

Tesis de Posgrado

Medición de radionucleicos cosmogénicos en el Meteorito de Campo del Cielo

Liberman, Rosa Gabriela

2000

Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Ciencias Físicas de la Universidad de Buenos Aires

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en digital.bl.fcen.uba.ar. Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in digital.bl.fcen.uba.ar. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:

Liberman, Rosa Gabriela. (2000). Medición de radionucleicos cosmogénicos en el Meteorito de Campo del Cielo. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_3310_Liberman.pdf

Cita tipo Chicago:

Liberman, Rosa Gabriela. "Medición de radionucleicos cosmogénicos en el Meteorito de Campo del Cielo". Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 2000. http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_3310_Liberman.pdf

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Física

Medición de radionucleidos cosmogénicos en el
Meteorito de Campo del Cielo

por Lic. Rosa Gabriela Liberman

Director de Tesis: Dr. Jorge O. Fernández Niello
Lugar de Trabajo: Comisión Nacional de Energía Atómica

Trabajo de tesis para optar por el título de Doctor en Ciencias Físicas
Noviembre 2000

33602

Agradecimientos

Mucha gente me ayudó, me apoyó o simplemente (y nada menos) estuvo ahí cuando tenían que estar. Quiero agradecerles a todos ellos pero, en particular, quiero mencionar:

A mi director, Dr. Jorge Fernández Niello, por mostrarme, hace cinco años, un pequeño pedazo de meteorito, contarme todo lo que era posible aprender a partir de él y guiarme, durante este tiempo, a descubrirlo.

A mi consejero de estudios, Dr. Hugo Sofía, por su siempre buena disposición a responder mis consultas y a firmar los inacabables papeles necesarios.

A la Comisión Nacional de Energía Atómica y las autoridades del laboratorio TANDAR quienes, en su momento, me otorgaron la beca que me permitió realizar este doctorado.

A mi amiga, Dra. Mariana di Tada (a quien alguien con merecida razón, alguna vez, bautizó Santa Mariana de Canberra) por ser la gestora del viaje a Australia y por todas las interminables horas que, a pesar de la bicicleta, pasó cargando gota por gota las benditas columnas de intercambio iónico. Por muchas cosas, pero fundamentalmente, por su amistad.

Al Dr. Hardy Achterberg por su apoyo constante y su siempre bien dispuesta ayuda en cualquier momento.

Al Dr. D. Abriola, Dr. O. A. Capurro, Dr. A. M. J. Ferrero, Dr. G. V. Martí, Dr. A. J. Pacheco, Dr. J. E. Testoni, Dra. D. E. Alvarez y a M. Ramírez por responder siempre a mis preguntas, guiarme en los inicios de mi aprendizaje de la técnica y formar un grupo con el cual siempre fue (y sigue siendo) bueno trabajar.

Al personal técnico del laboratorio TANDAR, quienes siempre han mostrado buena disposición para responder a las necesidades operativas de mi investigación.

Al Ing. Tulio Palacios por cederme algunas muestras para medir y enseñarme lo que sé de mineralogía y metalografía.

A la Dra. M. Benyacar y G. Leyva quienes, de manera desinteresada, realizaron el análisis químico de una de las muestras.

Al Dr. Keith Fifield y por su intermedio, a todo el personal científico y técnico del Department of Nuclear Physics de la Australian National University, por brindarme la posibilidad de trabajar y completar mis mediciones en dicha unidad académica.

Al Dr. R. C. Reedy y al Prof. W. Cassidy quienes, aún sin conocerme, se han interesado en mi trabajo y siempre han respondido mis preguntas y repreguntas con infinita paciencia y detalle. También a C. Schnabel, Dr. R. Servant y Dr. A. Ledesma quienes me ayudaron a conocer los procedimientos químicos necesarios para el tratamiento de "mi meteorito".

A mis compañeros del TANDAR: G. Carlo, M. F. D'Atri, R. de Luca, G. Levinton, G. Segura y F. Simonotti.

A quienes financiaron parte del viaje a Australia, la Fundación Sauberan, por medio de la Flia. Lafizondo y la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica.

A mi familia, padres y hermanos, quienes siempre me apoyaron y alentaron en todo lo que emprendí.

Y finalmente, quiero agradecer profundamente a mi marido y a mi hija. Los dos me dieron empuje y razones para llegar hasta acá.

A mi nena, Michelle.

Resumen

Los meteoritos contienen en su interior el registro de parte de la historia del Universo. En su viaje por el espacio son alcanzados por las partículas energéticas que componen la radiación cósmica, básicamente protones y partículas alfa. Estas partículas penetran en la materia extraterrestre e inducen reacciones nucleares cuyos productos son isótopos cosmogénicos, estables o radiactivos. La presencia de este tipo de radioisótopos o las concentraciones anómalas de los nucleidos estables pueden ser utilizadas para el estudio de la intensidad de los rayos cósmicos en el pasado, su espectro de energía, la dosis de radiación acumulada sufrida por los meteoroides y el tiempo durante el cual han estado sometidos a ella. Por otra parte, una vez que los cuerpos celestes han caído a la Tierra, la medición de las concentraciones de ese tipo de elementos es útil para la estimación del tiempo transcurrido desde la caída a nuestro planeta y de la posición preatmosférica de las muestras, lo cual permite inferir el tamaño de los meteoritos antes de penetrar en la atmósfera terrestre.

Las vidas medias de los radioisótopos cosmogénicos cubren un amplio rango de tiempos, los cuales pueden ser muy pequeños, fracciones de segundos o extremadamente largos, del orden de 10^{10} años. En general, los meteoritos que se estudian han sido recogidos varios cientos o miles de años luego de su caída. Por ello sólo es posible medir aquellos radioisótopos con vidas medias largas.

La técnica de espectrometría de masas con aceleradores de partículas (AMS) es particularmente útil para medir la concentración de isótopos cuyas vidas medias oscilan entre 10^3 y 10^8 años. Los productos de decaimiento de esta clase de nucleidos no pueden ser detectados en períodos ordinarios y por medio de técnicas usuales de detección. Por otra parte, su concentración es del orden de 10^{-12} o menor, por lo que no es posible detectarlos por medio de la espectrometría de masas convencional. AMS posee la sensibilidad adecuada para lograr mediciones confiables mediante el conteo individual de átomos del radionucleido en cuestión. Las muestras, que pueden ser tan pequeñas como 1 mg de material, deben pasar por un proceso químico previo el cual sirve para disminuir las contaminaciones y convertirlas a una forma apta para ser colocadas en la fuente de iones de los aceleradores de partículas.

El objetivo del presente trabajo es el estudio de parte de la historia del meteorito caído en Campo del Cielo, Argentina. Para ello, se aplica la técnica de AMS a la medición de la concentración de cinco radioisótopos cosmogénicos de vida media larga: ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca y ^{59}Ni , en muestras provenientes de dos fragmentos de dicho meteorito. Uno de ellos es, a su vez, parte de un fragmento expuesto en varios museos del mundo, El Taco, mientras que el otro fue levantado del suelo en las cercanías de los cráteres. Los resultados obtenidos y su comparación con los modelos teóricos existentes para las tasas de producción de radioisótopos cosmogénicos permitieron extraer conclusiones acerca de la edad terrestre del meteorito, de la posición de las muestras en el meteoroides madre y en consecuencia del tamaño del mismo antes de caer a la Tierra.

Palabras clave: Campo del Cielo, espectrometría de masas con aceleradores de partículas, radioisótopos cosmogénicos, meteorito, tasa de producción de ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca y ^{59}Ni , edad terrestre de un meteorito, tamaño preatmosférico del meteoroides.

Abstract

Meteorites record in their interior part of the history of the Universe. While they are travelling in space, the energetic particles from cosmic rays reach them, penetrate in the meteoritic matter and induce nuclear reactions whose products are both stable and radioactive cosmogenic nuclides. The presence of radioactive isotopes and abnormal abundances of stable isotopes tells us about the intensity of cosmic radiation in the past, its energy spectrum and the accumulated radiation dose to which the meteorite was exposed during its life as an independent object. Once the extraterrestrial bodies had fell onto the Earth, measurements of these concentrations are useful to estimate their terrestrial age and the sample preatmospheric position.

Cosmogenic radioisotope half-lives can be very small, fractions of seconds, or extremely long, about 10^{10} years. In general, meteorites which are studied in laboratories have been picked up several cents or thousands years after their fall. For this reason only long-lived radioisotopes can be measured.

The accelerator mass spectrometry technique (AMS) is particularly useful to measure the concentration of isotopes whose half-life is between 10^3 and 10^8 years. On the one side, their decay products can not be detected by conventional techniques over a reasonable counting period. On the other side, since their concentrations are usually lower than 10^{-12} , the use of conventional mass spectrometry is severely limited. AMS has the right sensitivity to obtain reliable measurements by means of the individual atom counting. Samples, which can be as small as 1 mg of material, must pass a previous chemical process to reduce the isobaric contamination and put them in a suitable form to be placed in the accelerator ion source.

The goal of the present thesis is the study of part of the history of the meteorite "Campo del Cielo". The AMS technique was used to measure the concentration of five long-lived cosmogenic radioisotopes: ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca y ^{59}Ni in five samples from two fragments of that meteorite. One of them came from the El Taco fragment and the other one was picked up from the ground in one crater field. The obtained results and their comparison with theoretical predictions of radioisotope production rates led to extract some conclusions about the terrestrial age of this meteorite, the preatmospheric position of the samples in the parent meteoroid and, in consequence, its size before the fall to the Earth.

Key words: Campo del Cielo, accelerator mass spectrometry, cosmogenic radioisotopes, meteorite, ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca and ^{59}Ni production rate, meteorite terrestrial age, parent meteoroid preatmospheric size.

Contenidos

TABLA DE CONTENIDOS	i
LISTA DE TABLAS	iv
LISTA DE FIGURAS	vi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. RADIACIÓN CÓSMICA, RADIOISÓTOPOS Y METEORITOS	5
2.1. Composición de la radiación cósmica	5
2.1.1. <i>Rayos cósmicos galácticos</i>	5
2.1.2. <i>Rayos cósmicos solares</i>	6
2.2. Interacción Radiación Cósmica – Materia	7
2.2.1. <i>Isótopos cosmogénicos</i>	7
2.2.2. <i>Tasa de producción de isótopos cosmogénicos. Modelos teóricos</i>	9
2.2.2.1. Modelo semiempírico: Modelo de Reedy y Arnold	10
2.2.2.2. Método de Monte Carlo: Modelo LCS	12
2.2.3. <i>Concentración y actividad</i>	12
2.3. Meteoritos	14
2.3.1. <i>Generalidades</i>	14
2.3.2. <i>Clasificación</i>	15
3. ESPECTROMETRÍA DE MASAS UTILIZANDO ACELERADORES DE PARTÍCULAS	19
3.1. Espectrometría de masas	20
3.2. Espectrometría de masas utilizando aceleradores de partículas	22
3.2.1. <i>Generalidades</i>	22
3.2.2. <i>Objetivo de la técnica y formas de medición</i>	22
3.2.3. <i>Limitaciones de la técnica</i>	23
3.3. Dispositivo experimental	25
3.3.1. <i>Fuente de iones</i>	25
3.3.2. <i>El sistema de inyección</i>	26
3.3.3. <i>El acelerador</i>	26

3.3.4. <i>Análisis de post-aceleración</i>	29
3.3.5. <i>Sistemas de detección</i>	31
4. EL METEORITO DE CAMPO DEL CIELO	33
4.1. Ubicación geográfica y antecedentes históricos	33
4.2. El campo de cráteres	34
4.3. Descripción y composición	35
4.3.1. <i>Generalidades</i>	35
4.3.2. <i>El Taco</i>	36
4.4. Historia del meteorito de Campo del Cielo a partir de trabajos previos	37
4.4.1. <i>Edad terrestre</i>	37
4.4.2. <i>Tamaño preatmosférico</i>	37
4.4.3. <i>Edad de exposición</i>	38
4.5. Muestras	38
4.5.1. <i>Muestra JFN1</i>	39
4.5.2. <i>Muestras TPB, TPC, ANU-I y ANU-B</i>	39
5. EXPERIMENTOS REALIZADOS	47
5.1. Generalidades	47
5.2. Tareas preliminares en el laboratorio TANDAR	49
5.3. Medición de muestras meteoríticas en la ANU	51
5.3.1. <i>Detectores utilizados</i>	51
5.3.2. <i>Medición de los diferentes isótopos</i>	52
5.3.2.1. Berilio 10 ($T_{1/2} = 1.6 \times 10^6$ años)	52
5.3.2.2. Aluminio 26 ($T_{1/2} = 7.2 \times 10^5$ años)	54
5.3.2.3. Cloro 36 ($T_{1/2} = 3 \times 10^5$ años)	54
5.3.2.4. Calcio 41 ($T_{1/2} = 1 \times 10^5$ años)	55
5.3.2.5. Níquel 59 ($T_{1/2} = 7.4 \times 10^4$ años)	57
6. RESULTADOS	68
6.1. Generalidades	68
6.2. Berilio 10	70
6.3. Aluminio 26	71
6.4. Cloro 36	72
6.5. Calcio 41	73
6.6. Níquel 59	74
7. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	81
7.1. Edad terrestre del meteorito de Campo del Cielo: Primeras estimaciones	81
7.2. Predicciones teóricas de la tasa de producción de ^{10}Be, ^{26}Al, ^{36}Cl, ^{41}Ca y ^{59}Ni	84
7.3. Estimación de la edad terrestre y el tamaño preatmosférico del meteorito de Campo del Cielo	88
8. CONCLUSIONES	96

9. APÉNDICES	100
9.1. Apéndice 1 – Procesamiento químico de las muestras	100
9.1.1. <i>Muestras de ¹⁰Be, ²⁶Al, ⁴¹Ca y ⁵⁹Ni</i>	<i>100</i>
9.1.2. <i>Muestras de ³⁶Cl</i>	<i>103</i>
9.2. Apéndice 2 – Cálculos utilizados para obtener concentraciones de radioisótopos en desintegraciones por minuto por kilogramo de meteorito	105
9.2.1. <i>Berilio 10</i>	<i>105</i>
9.2.2. <i>Aluminio 26 y Calcio 41</i>	<i>106</i>
9.2.3. <i>Cloro 36</i>	<i>108</i>
9.2.4. <i>Níquel 59</i>	<i>108</i>
REFERENCIAS	110

Lista de Tablas

Tabla 2-1: Características principales de la radiación cósmica.....	7
Tabla 2-2: Algunos nucleidos cosmogénicos producidos por los rayos cósmicos [4]. Se indican en <i>itálica</i> aquellos que fueron medidos en este trabajo.....	8
Tabla 2-3: Tipos más importantes de reacciones nucleares para la producción de algunos nucleidos cosmogénicos [4].....	9
Tabla 3-1: Aplicaciones de AMS.....	20
Tabla 3-2: Corrientes típicas extraídas de las fuentes de iones utilizadas en AMS [4].....	25
Tabla 4-1: Fragmentos principales, de masa mayor que 100 kg, encontrados en la región de los cráteres de Campo del Cielo.....	35
Tabla 4-2: Composición química del meteorito de Campo del Cielo ([34] y [48]).....	36
Tabla 4-3: Edades medidas por ^{14}C obtenidas a partir de muestras de restos carbonizados recogidas en el campo de cráteres de Campo del Cielo [9].....	37
Tabla 4-4: Composición química de la muestra JFN1, obtenida por el método EDAX de difracción de electrones.....	40
Tabla 5-1: Condiciones de irradiación para ^{10}Be	53
Tabla 5-2: Condiciones de irradiación para ^{26}Al	54
Tabla 5-3: Condiciones de irradiación para ^{36}Cl	55
Tabla 5-4: Condiciones de irradiación para ^{41}Ca	56
Tabla 5-5: Condiciones de irradiación para ^{59}Ni	58
Tabla 6-1: Masa inicial de las muestras de ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca y ^{59}Ni y cantidad de <i>carrier</i> agregado para las de ^{10}Be , ^{26}Al y ^{41}Ca . El error es puramente instrumental, de 10^{-4} mg.....	69
Tabla 6-2: Masa inicial y cantidad de <i>carrier</i> agregado para las muestras de ^{36}Cl . El error de todas las medidas es el instrumental: 10^{-4} mg.....	69
Tabla 6-3: Parámetros particulares registrados en la medición de cada radioisótopo.....	70
Tabla 6-4: Concentración de ^{10}Be medida en las muestras del meteorito de Campo del Cielo.....	71
Tabla 6-5: Concentración de ^{26}Al medida en las muestras del meteorito de Campo del Cielo.....	72
Tabla 6-6: Resultados de las concentraciones de ^{36}Cl medidos en las muestras del meteorito de Campo del Cielo.....	73
Tabla 6-7: Concentración de ^{41}Ca en las muestras del meteorito de Campo del Cielo.....	73
Tabla 6-8: Concentración de ^{59}Ni en las muestras del meteorito de Campo del Cielo.....	74
Tabla 7-1: Actividades promedio de saturación en meteoritos de hierro (a) [60] (b) [61].....	82

Tabla 7-2: Edad terrestre (en años) del meteorito de Campo del Cielo teniendo en cuenta cada radioisótopo de manera independiente sin considerar el blindaje de cada muestra, es decir la profundidad preatmosférica de la misma.....	82
Tabla 7-3: Secciones eficaces utilizadas para el cálculo de las tasas de producción de los diferentes radioisótopos con las referencias correspondientes. Los superíndices indican la referencia correspondiente: (a) [68], (b) [28], (c) [12], (d) [69], (e) [70].....	87
Tabla 7-4: Profundidades preatmosféricas (en cm) de las diferentes muestras calculadas a partir de la concentración medida de los diferentes radioisótopos y modelada según el modelo LCS....	89
Tabla 9-1: Resultados de las mediciones de ^{10}Be para los parámetros tomados en el momento de la medición y el número de eventos de ^{10}Be obtenidas del análisis de los espectros. RB1 corresponde a la muestra blank y NIST es la muestra patrón.....	104
Tabla 9-2: Resultados de las mediciones de ^{26}Al para los parámetros tomados en el momento de la medición y el número de eventos de ^{26}Al obtenidas del análisis de los espectros. El número de eventos de ^{27}Al es la digitalización de la intensidad de corrientes integrada en los intervalos de 10 segundos en los que se midió dicho isótopo. RB1 y STD corresponden a las muestras blank y patrón respectivamente.....	106
Tabla 9-3: Resultados de las mediciones de ^{41}Ca para los parámetros tomados en el momento de la medición y el número de eventos de ^{41}Ca obtenidas del análisis de los espectros. El número de eventos de ^{40}Ca es la digitalización de la intensidad de corrientes integrada en los intervalos de 10 segundos en los que se midió dicho isótopo. Los cocientes fueron determinados tomando 1 cuenta en el espectro, en aquellas muestras en las que no se midieron eventos en el espectro...	106
Tabla 9-4: Resultados de la medición de ^{36}Cl y los parámetros mencionados en la sección 5.2.3. El número de eventos de $^{35,37}\text{Cl}$ es lo obtenido en cada secuencia de 10s en los que se miden los isótopos estables. El cociente 35/37 es la relación en cada intervalo de 10s de dicha corriente integrada de los isótopos estables y el número de eventos de ^{36}Cl es el obtenido en los espectros bidimensionales.....	107
Tabla 9-5: Resultados de la medición de ^{59}Ni , con los valores para los isótopos estables y el número de eventos del radioisótopo obtenido luego de la normalización al valor obtenido para la muestra patrón, habiendo descontado el fondo debido al ^{59}Co	108

Lista de Figuras

Figura 2-1: Parámetro de dureza espectral y flujo integral de RCG. Éste está calculado para las partículas con $E > 1$ GeV/nucleón [12].	17
Figura 2-2: De la nebulosa al meteorito. En la figura se indica la evolución desde la nucleosíntesis estelar hasta que se tiene al meteorito en el laboratorio. Se indican también los períodos conocidos como edad de exposición, que corresponde al lapso que el meteorito está sometido a la radiación cósmica luego de separarse del asteroide madre y la edad terrestre, el tiempo transcurrido desde que el meteorito cae a la Tierra hasta que es recuperado y llevado al laboratorio.	18
Figura 3-1: Esquema del acelerador TANDAR. Se indican subrayados los parámetros relevantes para el desarrollo de la técnica de AMS.	32
Figura 4-1: Ubicación en el mapa del campo de cráteres de Campo del Cielo.	41
Figura 4-2: (Superior) Estructura de Widmanstätten en el meteorito de Campo del Cielo (200 X). (Inferior) Zona periférica del meteorito, bandas de Neumann (50X).	42
Figura 4-3: Corte transversal de El Taco. Se presume que los defectos que presenta en su interior son previos a la caída del meteorito a la Tierra.	43
Figura 4-4: Muestra JFN1, antes de ser procesada químicamente.	44
Figura 4-5: Foto del meteorito del que se tomaron las muestras ANU-I, ANU-B, TPC y TPB (0.75 X). La línea diagonal oscura cercana al centro de la figura es por donde se realizó el corte para obtener la tajada de la que se habla en el texto.	45
Figura 4-6: Tajada de meteorito de la cual se extrajeron las muestras ANU-I y ANU-B.	46
Figura 5-1: Cámara de ionización de ánodo segmentado del laboratorio TANDAR. El ánodo se muestra con su diseño original. Posteriormente se utilizaron sólo las dos primeras secciones subdivididas en triángulos.	60
Figura 5-2: Espectro bidimensional que muestra la capacidad de la cámara de ionización de ánodo segmentado para separar números de distinto número atómico y energía similar.	61
Figura 5-3: Distribución de estados de carga de ^{58}Ni a 113 MeV.	62
Figura 5-4: Espectro bidimensional de E_{tot} vs E_{res} tomado con la cámara de ionización de ánodo segmentado del TANDAR. Se muestran los eventos correspondientes a los isótopos estables del ^{59}Ni , ^{58}Ni y ^{60}Ni .	63
Figura 5-5: Detector utilizado para la medición de los radioisótopos ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca y ^{59}Ni .	64
Figura 5-6: Detector utilizado para la medición de ^{10}Be .	65
Figura 5-7: Pérdida de energía y energía en función de la distancia recorrida dentro del detector para ^{10}B y ^{10}Be de 38 MeV a una presión de 84 Torr de freón (CF_4). Puede verse que mientras el ^{10}B se ha frenado completamente en la región correspondiente, el ^{10}Be conserva aproximadamente el 40% de su energía inicial.	66

Figura 5-8: Espectros de energía residual vs. energía total tomados con y sin filtro de velocidades para la detección de ^{41}Ca . Debe considerarse que se trata de una muestra <i>blank</i> por lo que en ninguno de los dos casos se visualiza el radionucleido mencionado.....	67
Figura 6-1: Medición de ^{10}Be : Espectros bidimensionales de ΔE_1 vs. E_{tot} . (a) y (b) son los espectros correspondientes a la muestra JFN1 y al <i>blank</i> sin considerar las restricciones (<i>gates</i>) obtenidas para espectros similares de la muestra patrón. (c) y (d) son los mismos espectros analizados teniéndolas en cuenta. Es de remarcar que el fondo de medición se toma a partir del espectro (d).....	75
Figura 6-2: Medición de ^{26}Al : espectros unidimensionales del <i>blank</i> , la muestra patrón y la muestra JFN1, del número de cuentas en función de la energía total depositada por las partículas.....	76
Figura 6-3: Medición de ^{36}Cl : a) Espectro de ΔE_3 vs. E_{res} para la muestra patrón. En él se muestra una de las condiciones (<i>gates</i>). Con ella y las tomadas en los otros espectros para la misma muestra se analizan las muestras desconocidas. (b) Espectro bidimensional analizado sin tener en cuenta las condiciones obtenidas para la muestra TPC. (c) El mismo espectro sujeto a las condiciones.....	77
Figura 6-4: Medición de ^{41}Ca . (a) Espectro bidimensional de ΔE_3 vs E_{tot} , para la muestra patrón. Se ven algunas de las contaminaciones que no son desviadas por el filtro de velocidades pero claramente no complican en absoluto la separación del ^{41}Ca . (b) y (c) muestran el mismo espectro, sin condiciones, para las muestras JFN1 y para el <i>blank</i> respectivamente. Puede verse que son muy similares. Ambos, una vez analizados con condiciones presentan cero eventos de ^{41}Ca en la región indicada en el espectro (c).....	78
Figura 6-5: Medición de ^{59}Ni . Espectros tomados para la muestra patrón. (a) Espectro bidimensional de E_{res} vs E_{tot} , (b) TAC entre ΔE_1 y ΔE_4	79
Figura 6-6: Medición de ^{59}Ni . Espectros bidimensionales para la muestra patrón y para JFN1, ambos sujetos a las condiciones en el TAC.....	80
Figura 7-1: Tasas de producción teóricas de ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca y ^{59}Ni en función de la profundidad preatmosférica en el momento de la caída del meteorito, calculadas según el modelo LCS.....	91
Figura 7-2: Espacio de profundidad preatmosférica – edad terrestre – tasa de producción. Los números indican los diferentes planos posibles.....	92
Figura 7-3: Tasa de producción teórica de ^{36}Cl según los modelos de Reedy-Arnold y LCS. Corresponde al plano tasa de producción – profundidad preatmosférica de la figura 7-2. Se indica el punto de profundidad preatmosférica $d = 176.8$ cm, que será usado en las figuras siguientes como ejemplo.....	93
Figura 7-4: Decaimiento de ^{36}Cl , para la muestra TPB. Corresponde al plano tasa de producción – edad terrestre de la figura 7-2.....	94
Figura 7-5: Gráfico de edad terrestre vs. profundidad preatmosférica. Los resultados son calculados a partir de los valores medidos de concentración de ^{36}Cl	95

1 Introducción

La exploración del espacio ha sido uno de los desvelos de la humanidad desde sus comienzos. Ya desde tiempos de la antigua Grecia, el hombre ha levantado su vista y se ha preguntado sobre los orígenes del universo y su evolución. Si bien durante el siglo XX se ha invertido gran cantidad de tiempo y dinero en la investigación espacial enviando sondas y naves al espacio, es posible estudiar la historia del Universo mediante otros métodos.

En el interior del sistema solar, además de los planetas y sus lunas, existe también un número importante de objetos más pequeños y una variedad de radiaciones. Algunos de estos objetos alcanzan la superficie de la Tierra sin haberse destruido por completo, por ejemplo, los meteoritos⁽¹⁾ y el polvo cósmico. Respecto de las radiaciones, existe una diversidad importante: algunas son de baja energía o flujos bajos, como el viento solar o los rayos gamma. Otras, tienen la suficiente energía y son lo suficientemente intensas para inducir reacciones nucleares sobre los materiales sólidos del sistema solar (planetas, asteroides, lunas, polvo cósmico) las que a su vez producen concentraciones detectables de nucleidos, que reciben el nombre de nucleidos cosmogénicos. Estas radiaciones se clasifican según su origen: los rayos cósmicos galácticos (RCG) y los rayos cósmicos solares (RCS) [1].

Los meteoritos contienen los materiales más antiguos del sistema solar de los que disponemos para la investigación de su evolución. En ellos, como resultado de las reacciones nucleares inducidas por la radiación cósmica sobre los elementos componentes de la materia meteorítica, se producen los isótopos cosmogénicos, estables o radiactivos. La presencia de los nucleidos radiactivos o bien las concentraciones anómalas en las que aparecen los estables (si se compara con los valores de ellas en la Tierra) es ampliamente utilizado para reconstruir la historia de los cuerpos meteoríticos así como la intensidad de los rayos cósmicos en el pasado [2].

La tasa de producción de los nucleidos cosmogénicos depende de la energía y del flujo de partículas de la radiación cósmica a la profundidad a la cual se encuentre la muestra en cuestión, de la composición del meteorito⁽²⁾ y de las secciones eficaces de formación de los isótopos para cada una

¹ Meteorito: Objeto sólido de origen extraterrestre que sobrevive al pasaje por la atmósfera y alcanza la superficie terrestre.

² Meteoroides: Objeto sólido de origen extraterrestre que no ha sufrido la atracción gravitatoria de ningún planeta y que por lo tanto, se encuentra viajando por el espacio, sometido a la radiación cósmica.

de las reacciones consideradas [3]. Una vez que los meteoritos caen a la Tierra, la atmósfera apantalla la radiación cósmica de manera que la producción terrestre de los radioisótopos es despreciable y, si el isótopo no es estable, se tiene en cuenta únicamente el proceso de decaimiento radiactivo [4]. Si el nucleido cosmogénico fuera estable, su concentración (posterior a la caída del meteorito) permanece constante en el tiempo. De manera que el estudio de la presencia de ellos, se utiliza para la medición del tiempo transcurrido desde la caída del meteorito a la Tierra (edad terrestre). Por otra parte, dado que la producción de un determinado nucleido depende de la posición de la muestra en el meteorito madre, el estudio de la concentración de dicho nucleido también permite conocer la profundidad a la cual se encontraba la muestra y por lo tanto, inferir el tamaño preatmosférico del cuerpo extraterrestre.

A partir de la medición de la concentración de los nucleidos cosmogénicos se puede deducir que:

- La intensidad de los rayos cósmicos galácticos en el pasado se ha mantenido aproximadamente constante [1].
- Los meteoritos del tipo ferroso han estado expuestos a la acción de la radiación cósmica durante tiempos que oscilan entre 100 Ma (1Ma = 10^6 años) y 1 Ga, mientras que para los meteoritos rocosos varían entre 1 y 50 Ma [1].
- En algunos casos, la edad terrestre puede llegar a ser hasta varios millones de años, por ejemplo para los meteoritos antárticos.

Si bien los nucleidos cosmogénicos pueden ser estables o radiactivos, en este trabajo se realiza el estudio de parte de la historia de un meteorito particular a partir de la medición de la concentración de estos últimos. La vida media de estos radioisótopos puede ser corta (menor que 1 año), larga (en el rango de 10^3 a 10^8 años) o muy larga (mayor que 10^9 años). En el primer caso, los isótopos pueden ser medidos por técnicas convencionales de conteo de los productos de decaimiento [4]. Ésta no es una técnica que habitualmente se utilice en el caso de los meteoritos ya que, si bien estos caen constantemente a la Tierra, no es común estudiar un meteorito caído muy recientemente. Los radionucleidos con vidas medias mayores que 10^9 años son relativamente abundantes porque no han decaído completamente a lo largo de la vida media del sistema solar y pueden ser medidos con técnicas de espectrometría de masas convencional [4]. Sin embargo, aquellos cuyas vidas medias son largas, entre 10^3 y 10^8 años, son difíciles de medir utilizando cualquiera de las técnicas mencionadas anteriormente. No puede medirse su concentración detectando sus productos de decaimiento (aunque se trate de muestras grandes, del orden de gramos) porque el número de átomos que decae en un período normal de conteo es muy pequeño. Por otra parte, no puede emplearse la espectrometría de masas convencional debido a que sus concentraciones son extremadamente bajas, menores que 10^{-12} [5]. Dado que muchos de los eventos que ocurren en el sistema solar ocupan esta escala temporal es importante contar con una técnica que permita medir este tipo de radionucleidos.

Luego de la aparición de los aceleradores de partículas el estudio de los radioisótopos cosmogénicos tuvo un gran avance, ya que estas máquinas permiten alcanzar energías comparables a la

de los rayos cósmicos y simular los efectos de ellos sobre la materia. Otra de las aplicaciones de estos grandes aparatos es su integración a un sistema de espectrometría de masas, en la técnica denominada espectrometría de masas utilizando aceleradores de partículas (AMS), que es la solución a esa carencia en las tecnologías disponibles para la medición de las concentraciones isotópicas de radionucleidos [6].

AMS es una técnica ultrasensible que se basa en el conteo individual de los átomos radiactivos presentes en la muestra a través de las técnicas convencionales de detección utilizadas en la física nuclear [7]. Los aceleradores de partículas son los que proveen al radioisótopo la energía necesaria para alcanzar el sistema de detección. AMS permite detectar isótopos cuya presencia es tan baja como una parte en 10^{-15} o 10^{-16} [8]. Se aplica en general a la medición de dichas concentraciones en muestras de muy variado origen, en particular muestras extraterrestres: meteoritos, piedras lunares, polvo cósmico, etc.

En este trabajo se estudia el meteorito de Campo del Cielo. Es de tipo ferroso, una octahedrita gruesa con inclusiones de silicatos y se fragmentó antes de caer a la superficie terrestre. Cada uno de los trozos resultantes cayeron formando veinte cráteres dispuestos en forma elipsoidal, en la Provincia del Chaco, en la zona limítrofe con Santiago del Estero [9]. Las primeras noticias acerca de la caída de una gran masa de hierro aparecen en forma de leyendas indígenas. Por otra parte, los conquistadores españoles atraídos por esas leyendas, buscando de oro y plata realizaron las primeras expediciones y comenzaron a escribir la historia de este meteorito. Finalmente, entre 1967 y 1972, se llevaron a cabo las últimas investigaciones argentino-estadounidenses en la región, cuyos resultados fueron un exhaustivo relevamiento de la ubicación y disposición de los cráteres y una medición por métodos indirectos de la edad terrestre del meteorito.

Algunos cráteres contienen todavía las masas meteoríticas mientras que otros fragmentos han sido llevados a diferentes museos del país y del mundo. Tal es el caso de el meteorito El Taco, de 1998 kg., que ha sido dado en préstamo al United States National Museum de Washington. Además en la región del campo de cráteres hay numerosos fragmentos más pequeños (entre 0.5 y 5 kg.) desperdigados por el suelo [10].

Se realiza en este trabajo la determinación de la concentración de cinco radioisótopos cosmogénicos: ^{10}Be cuya vida media ($T_{1/2}$) es de 1.6×10^6 años, ^{26}Al ($T_{1/2} = 7.2 \times 10^5$ años), ^{36}Cl ($T_{1/2} = 3 \times 10^5$ años), ^{41}Ca ($T_{1/2} = 1 \times 10^5$ años) y ^{59}Ni ($T_{1/2} = 7.5 \times 10^4$ años) [11], por medio la técnica de espectrometría de masas con aceleradores de partículas. Las muestras estudiadas provienen de dos fuentes: una de ellas es a su vez un fragmento de El Taco, y las otras cuatro forman parte de uno de aquellos pequeños trozos sin nombre que siembran la región de los cráteres.

Para la obtención de predicciones teóricas se han utilizado modelos teóricos del flujo de partículas de la radiación cósmica. Ha sido necesario, para su aplicación realizar un cuidadoso estudio de cuáles son las reacciones nucleares relevantes para la formación de los nucleidos mencionados y la posterior búsqueda exhaustiva de las funciones de excitación correspondientes.

Los resultados experimentales han sido luego comparados con las predicciones teóricas de manera de obtener una medición de la edad terrestre del meteorito de Campo del Cielo y de la posición preatmosférica de las muestras. Esto último ha permitido inferir el tamaño del meteoroide original, antes de penetrar la atmósfera de nuestro planeta.

Debe remarcarse que las mediciones sobre meteoritos ferrosos son escasas debido a su complejidad: estos cuerpos suelen ser inhomogéneos y contienen muy bajas concentraciones de radioisótopos cosmogénicos (menores que las que se presentan en meteoritos rocosos). Por ello requieren por una parte, un tratamiento cuidadoso de cada una de sus fases o componentes y por otra, la disponibilidad de un equipamiento sofisticado como un acelerador de partículas para la aplicación de esta técnica, AMS, que tiene la sensibilidad suficiente para la detección de ese nivel en la presencia de los nucleidos a medir.

Si bien las muestras estudiadas en este trabajo han sido obtenidas al azar, es decir, sin un patrón sistemático para su extracción, los resultados obtenidos han permitido extraer conclusiones importantes acerca de la edad terrestre del meteorito de Campo del Cielo y del tamaño preatmosférico del meteoroide madre que le dio origen.

2 Radiación Cósmica, radioisótopos y meteoritos

2.1 Composición de la radiación cósmica

Los nucleidos cosmogénicos son resultado de la interacción de la radiación cósmica con la materia. La radiación se clasifica según su origen en rayos cósmicos galácticos (RCG) que provienen del exterior del sistema solar y rayos cósmicos solares (RCS) [12].

2.1.1 Rayos cósmicos galácticos

Los RCG están compuestos aproximadamente por un 87% de protones de alta energía y un 12% de partículas α [13]. También hay un bajo porcentaje (del orden del 1%) de núcleos pesados pero su importancia para inducir reacciones nucleares es despreciable. Su energía varía típicamente entre 0.1 y 10 GeV con un valor promedio de 2 GeV. En la tabla 2-1 se resumen las características de esta radiación.

Para el rango de energías entre varios gigaelectronvoltios por nucleón a 10^6 GeV/nucleón, el flujo de RCG no resulta afectado por la modulación debida al campo magnético solar y puede representarse por la siguiente ley

$$\frac{dJ(E)}{dE} = K E^{-\gamma} \quad (2.1)$$

donde $dJ(E)/dE$ es el flujo de partículas con energía entre E y $E + dE$ y tiene unidades de partículas por unidad de área por unidad de tiempo por estereoradián. Diferentes estimaciones han llevado a concluir que el mejor valor para $\gamma \approx 2.7$ [14].

El campo magnético solar produce un efecto significativo sobre el flujo de partículas de los RCG, de manera que el número de aquéllas con baja energía disminuye a medida que decrece la distancia al Sol. Esta modulación radial de los RCG es un factor importante a tener en cuenta al

comparar las tasas de producción a partir de diferentes reacciones nucleares a distintas distancias radiales al Sol. Este efecto ha sido visto en meteoroides cuyas órbitas se extienden varias unidades astronómicas más allá de la órbita terrestre (1 UA = distancia Tierra – Sol = 150×10^6 km) [15]. La magnitud de la variación radial de la modulación no es bien conocida a distancias mucho mayores que 1 UA, de manera que el flujo promedio ha sido estimado en 3.37 protones $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($E > 10$ MeV, 1 UA) [16]. Por otra parte, teniendo en cuenta el flujo integral de partículas de los RCG (protones y partículas secundarias) se ha estimado un valor promedio de 4.6 protones $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ [13].

El flujo de RCG presenta una variación temporal, coincidiendo con el período de 11 años de actividad solar: se produce un mínimo coincidiendo con el máximo de la actividad solar [17]. Este fenómeno ha sido interpretado como la modulación de los RCG debido a incrementos del campo magnético solar durante los tiempos del máximo de actividad del astro.

Debido a las altas energías de las partículas de los RCG, la mayoría de ellas sufren varias colisiones con los átomos que componen la materia extraterrestre antes de frenarse por completo, debido a la pérdida de energía de ionización [18]. Como producto de esas interacciones se generan partículas secundarias, las cuales a su vez, inducen nuevas reacciones, generándose un proceso en cadena por lo que sus efectos se propagan en profundidad en el materia a la cual llegan, del orden de varios metros. Las partículas con energías del orden de 1 GeV o mayor, generan como productos muchas partículas secundarias: neutrones, protones, piones y otros. El flujo total de RCG, primario y secundario, es el que debe tenerse en cuenta cuando se estudia la interacción de la radiación con la materia.

2.1.2 Rayos cósmicos solares

Los RCS se originan en el Sol y consisten básicamente en un 98% de protones y un 2% de partículas α . Su rango de energía abarca valores entre 0.1 y 100 MeV y su intensidad aumenta en varios órdenes de magnitud durante las llamaradas solares [12]. En la tabla 2-1 se resumen sus características.

El flujo de partículas emitidas por el Sol es de dos clases. La componente de baja energía de los RCS es el llamado viento solar, un flujo continuo de iones y electrones con energías del orden de 1 keV. A la distancia a la que se encuentra la Tierra el flujo promedio es del orden de 3×10^8 protones $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, pero la energía de este tipo de partículas es demasiado baja para sobrepasar la barrera coulombiana de interacción de protones sobre los diferentes blancos. Por lo tanto, el viento solar no induce reacciones nucleares [19].

El Sol emite ocasionalmente llamaradas solares, en las cuales las partículas pueden ser emitidas con energías mayores que 100 MeV/nucleón. El flujo decrece a medida que aumenta su energía y puede ser aproximado con una ley de potencia de la energía cinética: $dN/dE \approx E^{-\gamma}$ con γ entre 2 y 4 [20].

Las llamaradas solares pueden mostrar variaciones de corto término considerables en frecuencia y duración. Por lo tanto, el flujo de partículas asociado a ellas también presenta esa variación. Sin embargo, estas fluctuaciones se promedian y se desprecian en la escala de tiempos típica de la exposición a la radiación cósmica (mayor que 1 Ma). Dada la relativamente baja energía de los RCS, las partículas sólo inducen reacciones nucleares en las primeras capas del material extraterrestre (hasta aproximadamente 1 cm de profundidad, como máximo) las que se pierden cuando un este material penetra en la atmósfera terrestre.

Rayos cósmicos	Galácticos	Solares
Origen	Fuera del sistema solar, modulados dentro de él.	Llamaradas solares
Energía	> 1 GeV	≈ 10 – 100 MeV
Flujo	≈ 3 partículas/cm ² s	≈ 100 partículas/cm ² s
Composición	87% protones 12% partículas α 1% núcleos pesados	98% protones algunas partículas α pocos núcleos pesados
Características Básicas	Inducen reacciones nucleares, generan partículas secundarias. Los productos de las reacciones son los isótopos cosmogénicos.	Se frenan rápidamente. Producen reacciones en las primeras capas del material (hasta aproximadamente 1 cm de profundidad). Afectan básicamente al material Lunar.

Tabla 2-1: Características principales de la radiación cósmica

2.2 Interacción Radiación Cósmica – Materia

2.2.1 Isótopos cosmogénicos

La radiación cósmica interactúa con la materia extraterrestre, de manera que los efectos de los RCS son sólo notorios en la capa exterior del material. Como se dijo en la sección 2.1.2, en el caso de los meteoritos, este primer centímetro se pierde en el momento que aquellos atraviesan la atmósfera. A profundidades mayores que 1 cm, los nucleidos llamados cosmogénicos, estables o radiactivos son producto de reacciones nucleares inducidas por las únicas partículas con energía suficiente para ello: las partículas de los RCG. Más de la mitad de la producción de dichos nucleidos se debe a las reacciones inducidas por las partículas secundarias generadas a medida que la radiación cósmica primaria se frena y pierde energía. Las contribuciones relativas de las partículas primarias y secundarias a la producción de nucleidos depende de las funciones de excitación (secciones eficaces en función de la energía) para las reacciones nucleares relevantes [4]. En la tabla 2-2 se muestra algunos de los isótopos cosmogénicos producidos.

Nucleido	Vida media	Nucleido	Vida media	Nucleido	Vida media
³ H	12.3 a	³⁶ Cl	300 ka	⁷⁹ Se	1.1 Ma
³ He	estable	³⁹ Ar	34.8 d	⁸¹ Kr	210 ka
⁷ Be	53.3 d	⁴¹ Ca	100 ka	⁹⁰ Sr	28.5 a
¹⁰ Be	1.6 Ma	⁴⁴ Ti	54 a	¹⁰⁷ Pd	6.5 Ma
¹⁴ C	5.73 ka	⁵³ Mn	3.7 Ma	¹²⁶ Sn	207 ka
²² Na	2.6 a	⁵⁵ Fe	2.7 a	¹²⁹ I	15.7 Ma
²⁴ Na	15 ka	⁶⁰ Fe	1.5 Ma	²³⁶ U	23 Ma
²⁶ Al	720 ka	⁵⁹ Ni	7.5 ka	²³⁷ Np	2.1 Ma
³² Si	140 a	⁶³ Ni	100 a	²³⁹ Pu	24.1 ka

Tabla 2-2: Algunos nucleidos cosmogénicos producidos por los rayos cósmicos [4]. Se indican en *itálica* aquellos que fueron medidos en este trabajo.

Las reacciones nucleares que producen isótopos cosmogénicos pueden ser catalogadas en tres clases, dependiendo de la energía de la partícula incidente:

- Reacciones de *spallation*.
- Reacciones de dos cuerpos, de baja energía.
- Captura de neutrones térmicos.

El proceso de *spallation* sobre elementos pesados como el hierro o el níquel, es inducido por protones de alta energía dando lugar a elementos “hijos” más livianos. Cuando esas partículas inciden en la materia, producen también nucleones secundarios los que a su vez, pueden inducir nuevos procesos de *spallation*. La notación utilizada para este tipo de reacciones es (p,x), (n,x) o (η,x), donde x implica una variedad de productos de reacción producidos por los protones (p), neutrones (n) o en general, nucleones (η) [20].

Las reacciones de baja energía involucran partículas con energías menores que 10 MeV. Estas generan cascadas secundarias de nucleones, por ejemplo, neutrones térmicos cuyas energías siguen una distribución de Maxwell. En la tabla 2-3 se muestran los canales de formación de algunos de los radioisótopos cosmogénicos a partir de los diferentes elementos blanco.

La captura neutrónica ocurre cuando los neutrones secundarios, luego de ser termalizados, son atrapados por núcleos blanco (por ejemplo $^{35}\text{Cl} + n \rightarrow ^{36}\text{Cl}$).

Producto	Blanco Tipo de reacción nuclear		
	Reacciones de baja energía / Captura neutrónica	Reacciones de núcleo compuesto	Reacciones de spallation
¹⁴ C		O	O
⁵⁹ Ni	⁵⁸ Ni	⁵⁶ Fe(α,n)	
⁴¹ Ca	⁴⁰ Ca	Ti	Fe
⁸¹ Kr		Sr	Zr
³⁶ Cl	³⁵ Cl	Ca	Fe
²⁶ Al		Al, Si	Ca
¹⁰ Be			O, Si
⁵³ Mn		⁵⁶ Fe	Ni
¹²⁹ I	¹²⁸ Te	¹³⁰ Te	Ba
²¹ Ne		²⁴ Mg(n,α)	Si
³⁶ Ar	³⁵ Cl	Ca	Fe
⁸⁰ Kr	⁷⁹ Br	Sr	

Tabla 2-3: Tipos más importantes de reacciones nucleares para la producción de algunos nucleidos cosmogénicos [4].

La tasa de producción de los radionucleidos cosmogénicos es función de las secciones eficaces de formación a partir de las principales reacciones sobre los elementos blanco. También depende del flujo diferencial de la radiación cósmica a una determinada profundidad de la muestra en el meteoroido madre. Para el cálculo de estas tasas de producción han sido desarrollados modelos teóricos que serán explicados a continuación.

2.2.2 Tasa de producción de isótopos cosmogénicos. Modelos teóricos

Los factores que controlan la tasa de producción P_X , de un determinado nucleido cosmogénico X son el flujo de partículas de la radiación cósmica, tanto primarias como secundarias, la composición elemental del material, la forma y el tamaño del objeto blanco, la ubicación de la muestra en cuestión dentro del blanco y la función de excitación de cada proceso.

Si la muestra se encuentra a profundidad d en un meteorito de radio R , la tasa de producción del nucleido X puede calcularse de la siguiente manera

$$P(d, R) = \sum_j N_j \sum_k \int_0^{\infty} \phi(E, d, R) \sigma_{xjk}(E) dE \quad (2.2)$$

donde: N_j es número de átomos del elemento blanco j por kg de material en la muestra, $\sigma_{xjk}(E)$ es sección eficaz para la producción del nucleido X a partir del elemento blanco j con partículas de tipo k en función de la energía E de dichas partículas (funciones de excitación), $\phi(E, d, R)$ es flujo total de partículas (primarias y secundarias) de tipo k y energía E a profundidad d en el cuerpo irradiado [4].

Dependiendo de su tamaño, los meteoroides presentan dos clases distintas de blindaje a la radiación cósmica. Por una parte, los meteoritos pequeños, con un diámetro preatmosférico de menos de 1 m. experimentan una irradiación de 4π . Esto es, todos los puntos del interior del cuerpo reciben las partículas cósmicas desde todas direcciones. Y por otra parte, los meteoritos de diámetro mayor son lo suficientemente grandes como para apantallar los rayos cósmicos provenientes de, al menos, la mitad de los ángulos sólidos posibles. Por ello, se dice que las muestras cercanas a la superficie experimentan una irradiación de 2π .

El tratamiento de la tasa de producción de los nucleidos cosmogénicos presentado en la ecuación 2.2 depende de dos variables independientes entre sí: el flujo de rayos cósmicos y las secciones eficaces de formación de los nucleidos. Respecto del flujo de rayos cósmicos que llega a una dada profundidad en un determinado objeto, los modelos que describen la dinámica de la irradiación deben incluir tanto la pérdida de energía del flujo de partículas primarias como el desarrollo del flujo de partículas secundarias. El flujo diferencial de partículas es por lo tanto, dependiente de la profundidad en el objeto, así como también de la composición del objeto. Se han utilizado modelos semiempíricos para el flujo de rayos cósmicos, los cuales aplicados al cálculo de la tasa de producción de radioisótopos cosmogénicos han reproducido con éxito los resultados experimentales, en meteoritos pequeños y en la Luna [12]. Sin embargo, en meteoritos grandes, los métodos numéricos del tipo Monte Carlo son los que mejor aproximan a los datos [21].

A continuación se presentan dos modelos teóricos empleados en este trabajo para predecir las tasas de producción de ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca y ^{59}Ni y comparar luego con los resultados experimentales (ver Capítulo 6)

2.2.2.1 Modelo semiempírico: Modelo de Reedy y Arnold

En el año 1961, Arnold, Honda y Lal [22], estiman el flujo de rayos cósmicos primarios y secundarios a profundidades entre 10 g/cm^2 y 100 g/cm^2 en meteoritos de hierro. Aproximan el flujo total (suma de ambas contribuciones) diferencial de núcleos con energía mayor que 100 MeV como

$$\frac{dJ}{dE}(E, d) = k(\alpha + E)^{-2.5} \quad (2.3)$$

donde α es un parámetro de dureza espectral, que depende de la profundidad y cuyo valor ha sido determinado para diferentes profundidades a partir de los datos experimentales. La constante k se obtiene a partir de la normalización del flujo integral para partículas con energía mayor que 3 GeV.

Más tarde, Reedy y Arnold [12] perfeccionan el modelo, el cual es conocido desde ese momento como modelo de Reedy-Arnold (R-A), para estudiar la tasa de producción de nucleidos en la Luna. La comparación entre el satélite y los meteoroides es válida ya que ambos carecen de atmósfera, por lo que los rayos cósmicos inciden sobre ellos de la misma manera. El avance fundamental respecto a la versión original del modelo reside en considerar una variación continua con la profundidad del

parámetro de dureza espectral y del flujo diferencial de partículas. En la figura 2-1 se presentan esos parámetros, utilizados por Reedy y Arnold.

En este modelo se considera que el flujo de partículas resultante del bombardeo de RCG puede dividirse en dos regiones de energía. Por encima de 100 MeV, no discriminan la clase de partículas ya que, en ese rango de energía, todas ellas lo hacen de la misma manera. Por ello, las secciones eficaces de formación de nucleidos a partir de las reacciones nucleares de interés no depende fuertemente de la naturaleza de la partícula que induce la reacción. Si bien utiliza un parámetro de dureza espectral continuo en función de la profundidad, la forma del flujo diferencial es la misma que la planteada por Arnold, Honda y Lal [22]. Sin embargo, calcula la constante k a partir de la normalización del flujo integral para partículas con energías mayores que 1 GeV.

En el rango de energías menores que 100 MeV, el modelo considera que las partículas fuertemente interactuantes en cuerpos grandes son básicamente neutrones ya que la mayoría de las partículas cargadas con esa energía se frenan por pérdida de energía debido a ionizaciones sucesivas antes de interactuar con un núcleo. El modelo de R-A plantea que el flujo diferencial para partículas interactuantes con energías entre 2.5 y 100 MeV es:

$$\frac{dJ}{dE}(E, d) = k(\alpha + 100)^{-2.5} (M(E) - [\alpha - 50]\delta(E)) \quad (2.4)$$

donde k y α son los parámetros de la ecuación 2.3, E es la energía expresada en MeV y los factores $M(E)$ y $\delta(E)$ son:

$$M(E) = 94E^{-1} + 603E^{-2} - 300E^{-3} \quad (2.5)$$

$$\delta(E) = 0.3E^{-1.26} - 0.00091 \quad (2.6)$$

El factor $M(E)$ ha sido determinado a partir de la forma espectral de Hess y colaboradores [23] para la región de 10 a 100 MeV, datos experimentales de Tajima y colaboradores [24] y de Mendell y Korff [25]. Finalmente, para partículas entre 0.5 y 2.5 MeV el flujo diferencial se toma como

$$\frac{dJ}{dE}(E, d) = k(\alpha + 100)^{-2.5} [115 - (\alpha - 50)0.094] \cdot (1.3125 + 0.5E - 0.25E^2) \quad 2.7)$$

donde la forma ha sido derivada a partir de el flujo de fuga de neutrones en la superficie de la luna dada por Armstrong y Alsmiller [26].

El modelo de R-A reproduce correctamente los perfiles de producción de radionucleidos en la Luna hasta una profundidad de 400 g/cm². Posteriormente, fue modificado para modelar la tasa de producción de radioisótopos cosmogénicos en meteoritos [27].

2.2.2.2 Método de Monte Carlo: Modelo LCS

Los métodos de Monte Carlo son sumamente útiles cuando los problemas complejos no pueden resolverse de manera determinística. En lugar de resolver una ecuación explícita, estas técnicas obtienen resultados simulando eventos individuales y registrando aspectos relevantes de su comportamiento. En particular para este caso, los métodos de Monte Carlo repiten un proceso estadístico siguiendo el trayecto de cada una de un gran número de partículas desde su fuente hasta el evento final, sea éste la captura o la absorción [28]. Los cálculos de Monte Carlo simulan teóricamente los procesos físicos reales que resultan del bombardeo de rayos cósmicos, desde la interacción de una partícula primaria con un núcleo blanco, la generación de iones secundarios y la nueva reacción nuclear inducida por estos. En este caso, sólo los protones y neutrones contribuyen significativamente a la producción de radionucleidos cosmogénicos [28].

El "Los Alamos LAHET Code System" (LCS), desarrollado en el Oak Ridge Laboratory, Estados Unidos [29], es un programa que utiliza técnicas de Monte Carlo para modelar el transporte de partículas. Para ello considera que el rango de partículas primarias es entre 10 MeV y 20 GeV. En adelante los cálculos basados en este método serán denominados "según el modelo LCS".

2.2.3 Concentración y actividad

Se define concentración C_x de un isótopo cosmogénico X al cociente

$$\frac{\text{número de átomos del nucleido}}{\text{gramo de material}} \quad (2.8)$$

Es habitual en este tema utilizar prácticamente como sinónimos los términos "concentración", "actividad" y "tasa de producción". En particular, si un radionucleido X se produce a una tasa de producción P_x , mientras el meteoróide está en el espacio, y por otra parte tiene un período de semidesintegración $\lambda^{(1)}$, se produce un cambio en su concentración dado por

$$\frac{dC_x}{dt} = P_x(t) - \lambda C_x \quad (2.9)$$

cuya solución es

$$C_x(t) = \exp(-\lambda t) \left(\int P_x(t) \exp(\lambda t) dt + \text{cte.} \right) \quad (2.10)$$

de donde puede verse la necesidad de contar con una dependencia temporal para la tasa de producción P_x . Si se la considera constante con el tiempo, se toma como condición inicial que la concentración del isótopo en el momento del inicio de la irradiación es nula y que el meteoróide ha estado expuesto a esta

¹El período de semidesintegración λ está relacionado con la vida media $T_{1/2}$ de un radioisótopo por la relación $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$.

radiación durante un tiempo T_e (edad de exposición), dicha concentración en el momento de la caída del cuerpo a la Tierra es

$$C_x = \frac{P_x(1 - e^{-\lambda T_e})}{\lambda} \quad (2.11)$$

Si el tiempo de exposición es suficientemente largo, comparado con el período de semidesintegración del radioisótopo la concentración del mismo alcanza un valor constante aún antes de la caída del meteorito a la tierra. Es lo que se conoce como actividad o tasa de producción de saturación.

Por otra parte, la relación entre la concentración y la actividad está dada por un factor de conversión: el período de semidesintegración. Es decir, si expresamos la concentración en número de átomos del elemento por unidad de masa del material y la actividad en número de decaimientos por unidad de masa por unidad de tiempo puede verse que

$$A(t) \left[\frac{dpm}{kg \text{ de met.}} \right] = -\lambda [min^{-1}] C \left[\frac{\# \text{ de átomos}}{kg \text{ de met.}} \right] \quad (2.12)$$

De las ecuaciones 2.11 y 2.12 puede concluirse que la actividad del radionucleido en cuestión en el momento de la caída del meteorito a la Tierra es

$$A_x = P_x(1 - e^{-\lambda T_e}) \quad (2.13)$$

y la actividad del radioisótopo X medida en el laboratorio, A_x^L , luego que haya transcurrido un tiempo T_i (edad terrestre) desde ese instante, por lo tanto es

$$A_x^L = P_x(1 - e^{-\lambda T_e})e^{-\lambda T_i} \quad (2.14)$$

Puede verse, entonces, que a partir de la medición de la concentración de los nucleidos no estables presentes en una muestra meteorítica es posible extraer conclusiones acerca de la edad terrestre y de la edad de exposición del meteorito. Por otra parte, como se explicó en la sección anterior, la tasa de producción del nucleido X depende de la profundidad de la muestra por lo que también puede determinarse esta última. Es importante recalcar, que dado que la actividad medida depende de los tres parámetros, es necesario medir varios radioisótopos para obtener un sistema de ecuaciones determinado.

2.3 Meteoritos

2.3.1 Generalidades

Ya desde la prehistoria los meteoritos han sido reconocidos como objetos inusuales y en algunos casos, han sido venerados. Sin embargo, recién en el siglo XX, la comunidad científica ha reconocido que los meteoritos son muestras genuinas de cuerpos extraterrestres. Aquellos que han sido observados al caer son llamados “caídas” (*falls*), mientras que los que han sido encontrados en los sitios del impacto se denominan, justamente, “hallazgos” (*finds*) [30].

Los meteoritos penetran en la atmósfera terrestre a una velocidad inicial que puede variar entre 11 y 70 km/s. La velocidad media es del orden de 15 km/s y es suficiente para provocar que el material de la superficie se disuelva y sea removido por el calentamiento de fricción durante el pasaje por la atmósfera [30]. Dado que las tasas de generación de calor y de ablación son rápidas y muy similares en magnitud, los efectos detectables del calor rara vez penetran más que unos pocos milímetros por debajo de la superficie, por lo que el interior del meteorito se mantiene prácticamente intacto, en su estado preatmosférico. La ablación atmosférica y la fragmentación pueden causar una pérdida sustancial de masa (hasta del 90%) y desaceleración, a menudo hasta la velocidad terminal. Por otra parte, la corteza de fusión marrón oscuro a negra, consecuencia del calentamiento de la materia al atravesar la atmósfera, constituye el diagnóstico de un meteorito en la Tierra.

En general, los meteoritos derivan de los asteroides y, menos comúnmente, de cuerpos mayores como la Luna o el planeta Marte. De esos cuerpos puede provenir también algún tipo de partículas del polvo interplanetario. En la figura 2-2 puede verse la evolución de los meteoritos desde la nebulosa solar hasta su caída en la Tierra. Casi todos los elementos químicos se formaron por reacciones nucleares en el interior de las grandes estrellas. Luego de este proceso de nucleosíntesis estelar, estos nucleidos fueron eyectados mediante procesos energéticos dando lugar a la nebulosa solar. A partir de ella, gases y polvo cósmico se condensaron y amalgamaron formando grandes fragmentos llamados *planetesimales* [31]. Algunos de ellos dieron lugar a los planetas, sin embargo otros, de diferente composición quedaron en el espacio interplanetario: los cometas y los asteroides. Los primeros, compuestos principalmente por elementos livianos como hidrógeno, carbono y oxígeno tienen órbitas que en general, salen del sistema solar.

En los asteroides, cuyos componentes principales son metales y óxidos de silicio y de magnesio, como resultado del calentamiento, se produjeron cambios de estado sólido o, a mayores temperaturas aún, una diferenciación que incluye la separación entre sólidos, líquidos y gases. Los asteroides son blanco de las partículas de la radiación cósmica y de impactos mayores a consecuencia de los cuales grandes fragmentos son eyectados dando lugar a los meteoroides. Estos, aún sometidos a la acción de los rayos cósmicos, siguen trayectorias siguiendo órbitas heliocéntricas las cuales luego sufren perturbaciones gravitatorias. Finalmente, los meteoroides son atraídos por la gravedad terrestre y alcanzan la superficie luego de atravesar la atmósfera [32].

En la figura 2-2 se muestran también las definiciones de los distintos períodos importantes en el estudio de la historia de un meteorito, como lo es la edad de exposición (T_e), o el lapso durante el cual el meteorito, una vez que se ha separado del cuerpo madre, es irradiado por las partículas de los rayos cósmicos. La edad terrestre (T_t), o el tiempo transcurrido desde el aterrizaje del meteorito hasta el momento que es trasladado al laboratorio, es el otro período que se tiene en cuenta en esta clase de estudios.

La llegada de un meteorito a la Tierra puede ocurrir de dos maneras: un único cuerpo que se precipita hacia la superficie o quebrándose en varios fragmentos y cayendo en forma de lluvia. Las lluvias de meteoritos inciden en la superficie terrestre en forma de elipse cuyo eje mayor puede extenderse varios kilómetros y que es una proyección de la trayectoria original del meteorito [30].

Los grandes meteoritos, con radios de decenas de metros o más, no se desaceleran demasiado en su pasaje por la atmósfera, por ello es posible que incidan sobre la Tierra de manera explosiva, dejando un gran cráter característico y pudiendo causar un daño importante. Por ejemplo, el cráter de 1 km de diámetro en el desierto de Arizona, causado por el meteorito de Canyon Diablo, 50000 años atrás. Se estima que el meteorito en cuestión tenía entre 25 y 86 metros de diámetro [32]. Otro caso podría ser el Golfo de México, provocado, según las teorías por la caída de un meteorito de 10 km de diámetro hace 65 millones de años, que provocó la extinción de numerosas especies, los dinosaurios entre ellas. Sin embargo, algunos meteoritos, cuyas caídas han sido explosivas, no han dejado cráter alguno como rastro. Tal es la situación del meteorito caído en 1908 en Tunguska, Siberia [32]

2.3.2 Clasificación

Los meteoritos, como esencialmente toda la materia del sistema solar, derivan de los elementos más primitivos que luego se condensaron y solidificaron a partir del polvo y el gas formando los cuerpos estelares (fig. 2-2) Una primera clasificación de los meteoritos, basada en el contenido de hierro, los divide en meteoritos ferrosos, rocosos o ferro-rocosos. Por otra parte, pueden también ser clasificados según su origen en diferenciados o no diferenciados.

Los meteoritos no diferenciados, llamados condritas, son del tipo rocosos y deben su nombre a que contienen pequeñas inclusiones esféricas o cóndrulos (*chondrites*). A partir del estudio de esta clase de cuerpos se extraen conclusiones acerca de la composición elemental del sistema solar primitivo [32].

Dentro de los meteoritos diferenciados se encuentran los del tipo rocoso acondrita (ya que no contienen cóndrulos), ferro-rocoso y ferroso y contienen información acerca del proceso de diferenciación ocurrido en el cuerpo madre. En ellos ocurren separaciones físicas y químicas, en las cuales los componentes metálicos de alta densidad forman un "carozo" (*core*) y los elementos más livianos conforman un magma a su alrededor. Eventualmente estos líquidos se cristalizan dando lugar a regiones diferenciadas en aquellos cuerpos madre. Cuando se producen las colisiones energéticas que provocan su ruptura, del núcleo se generan los meteoritos ferrosos, de la corteza exterior, los rocosos

acodritas y de la región intermedia, conteniendo silicatos y metales, los del tipo ferro-rocosos ([30] y [32]).

Los meteoritos ferrosos, a su vez, se clasifican según su contenido de níquel: las hexaedritas contienen menos del 6%, las octahedritas, entre 6% y 14% y las ataxitas, más del 14%. En particular las octahedritas presentan bandas de kamacita, también llamada ferrita o hierro- α , un mineral mezcla de hierro y níquel [33]. El ancho de estas bandas determina las octahedritas gruesas, medias o finas. de manera que cuanto menor es el espesor, mayor es el contenido de níquel. Al pulir esta clase de meteoritos y atacarlos con ácidos presentan una estructura conocida como de Widmanstätten. Ésta forma a partir de la solidificación del material meteorítico cuando la temperatura es menor que 800°C [33], debido al agrupamiento y crecimiento de una segunda fase sólida a lo largo de ciertos planos cristalográficos en la fase original. Otra particularidad de las octahedritas son las bandas de Neumann que aparecen cuando el material meteorítico es sometido a tensiones de deformación que provocan el deslizamiento de la estructura cúbico cristalina [34].

Figura 2-1: Parámetro de dureza espectral y flujo integral de RCG. Éste está calculado para las partículas con $E > 1$ GeV/nucleón [12].

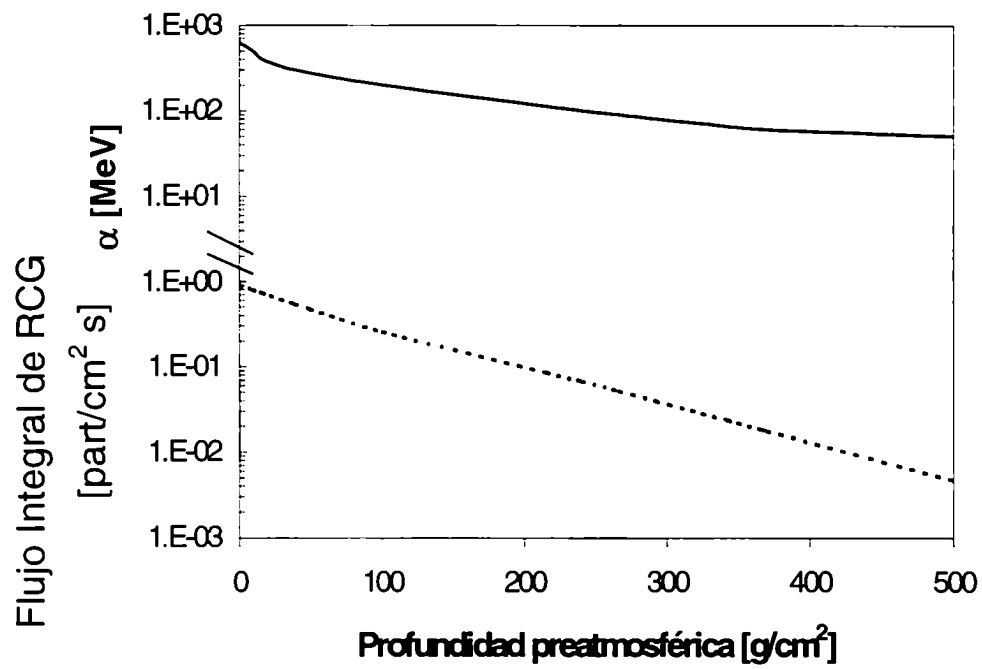
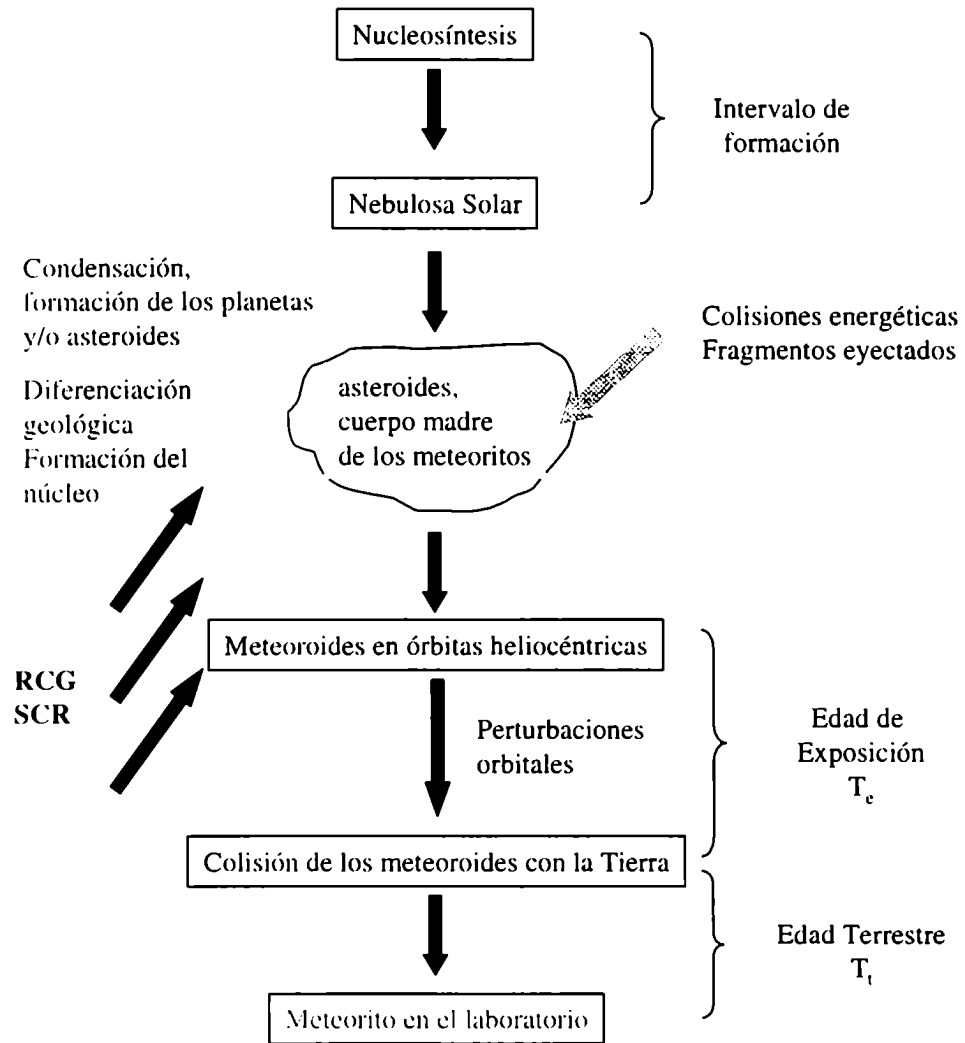


Figura 2-2: De la nebulosa al meteorito. En la figura se indica la evolución desde la nucleosíntesis estelar hasta que se tiene al meteorito en el laboratorio. Se indican también los períodos conocidos como edad de exposición, que corresponde al lapso que el meteoróide está sometido a la radiación cósmica luego de separarse del asteroide madre y la edad terrestre, el tiempo transcurrido desde que el meteorito cae a la Tierra hasta que es recuperado y llevado al laboratorio.



3 Espectrometría de masas utilizando aceleradores de partículas

La espectrometría de masas utilizando aceleradores de partículas (AMS) es una técnica ultrasensible utilizada para medir concentraciones del orden de 1 átomo en 10^{12} a 10^{15} de radionucleidos, como el ^{14}C , ^{59}Ni , ^{41}Ca , ^{36}Cl , ^{10}Be , ^{26}Al , o ^{129}I , cuyas vidas medias oscilan entre los 5730 años del ^{14}C hasta los 15 millones de años del ^{129}I .

AMS tiene numerosas aplicaciones en diferentes áreas de la ciencia. El isótopo más conocido para la aplicación de esta técnica es el ^{14}C . Sin embargo, en la tabla 3.1 se presentan varios ejemplos de la utilización de AMS mencionando los nucleidos correspondientes.

La diferencia fundamental entre AMS y la espectrometría de masas convencional (MS) es el rango de energías al que los iones son acelerados. En MS, se alcanzan energías de miles de electronvoltios mientras que en AMS es posible alcanzar valores del orden de los millones de electronvoltios. Estas energías se obtienen utilizando aceleradores de partículas, los que han sido diseñados originalmente para experimentos de física nuclear, y permiten identificar iones atómicos y moleculares sin ambigüedad, llegando a medir cocientes isotópicos de hasta 10^{-15} , que representa un factor 10^5 veces menor respecto de la MS [4]. Los mayores avances de AMS han sido tener la posibilidad de trabajar con muestra pequeñas, del orden de 1 mg o menos (contienen del orden de 10^6 átomos) y realizar las mediciones en tiempos del orden de una hora, aproximadamente.

	Radioisótopos utilizados	Utilización de AMS
Arqueología	^{14}C	Datación de muestras arqueológicas del orden de 50000 años de antigüedad: arte rupestre, momias. Autenticación: el Manto de Turín [35].
Geología	^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl	Avance y retroceso de glaciares. Caracterización de vulcanismo. Datación y estudio de la erosión en suelos y rocas. Estudio de minerales.
Cosmología	^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{59}Ni	Datación de la exposición de meteoritos a los rayos cósmicos, su permanencia en la tierra y el tamaño preatmosférico de los mismos. Estudio de la incidencia de los rayos cósmicos solares (partículas alfa) en rocas lunares.
Estudio del Clima	^{10}Be , ^{14}C , ^{36}Cl	Datación de la foraminífera planetónica para estudios paleoclimáticos. Estudio del cambio climático global.
Influencia del hombre en el ambiente	^{14}C , ^{36}Cl , ^{129}I , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{237}Np , ^{90}Sr .	Estudio de hielos antárticos para la evaluación de la influencia de pruebas nucleares. Polución: transporte y origen de biomasa debido a la quema de aerosoles, quemado de combustible y procesos industriales. Estudio de la influencia de los desechos de plantas nucleares.
Biomedicina	^{14}C , ^{26}Al , ^{32}Si , ^{41}Ca	Utilización de los radioisótopos como trazadores en muestras humanas para estudios de toxicidad o de daño celular.
Hidrología	^{36}Cl , ^{129}I , ^{14}C	Datación de aguas. Influencia de los residuos nucleares en aguas. Estudio de posibles sitios de repositorios nucleares.

Tabla 3-1: Aplicaciones de AMS.

3.1 Espectrometría de masas

En la espectrometría de masas, como ha sido originalmente desarrollada, los iones de carga q son extraídos del material de la muestra, acelerados a una energía E (del orden de entre 1 y 10 keV), y luego se separan de acuerdo a su masa atómica (M) utilizando un campo magnético B normal al plano del movimiento. El radio de curvatura (ρ) de la trayectoria de cada ion depende de M , E y q ; de manera que:

$$2 \frac{ME}{q^2} = k_1 (B\rho)^2 \quad (3.1)$$

Luego, la corriente de los iones con el valor correcto de ME/q^2 se determina con una copa de Faraday y provee una medida de la concentración en la muestra de los átomos de masa M [4].

Los espectrómetros de masa involucran iones de baja energía positiva que son generados por la remoción de un electrón de los átomos de la muestra. Para mejorar su funcionamiento en cuanto a la selección de iones se utilizan combinaciones de campos eléctricos, magnéticos o de radio-frecuencia. En un analizador electrostático, un campo electrostático ϵ , de magnitud constante a lo largo de un arco de radio ρ , desvía los iones en una trayectoria circular definida por

$$2 \frac{E}{q} = k_2 \epsilon \rho \quad (3.2)$$

También se utilizan filtros que seleccionan a los iones de interés según su velocidad. Estos dispositivos, ajustan el valor de campos eléctricos y magnéticos perpendiculares entre sí y normales a su vez a la trayectoria de la partícula, de manera que el ion elegido sea el único cuya trayectoria no es desviada.

$$v^2 = 2 \left(\frac{ME}{q^2} \right) = k_3 \epsilon^2 B_2 \quad (3.3)$$

Otras técnicas para la separación e identificación de las partículas incluyen la selección de masa por medio de cuadrupolos y análisis de tiempo de vuelo.

Aún cuando se utilicen varias de estas técnicas combinadas para la selección de las partículas, es posible que no se logre eliminar al máximo algunas contaminaciones que interfieren con la identificación y detección de los iones de interés. Dichas contaminaciones pueden provenir de:

- Insuficiente separación en masa, ya sea debido a isóbaros (nucleidos con la misma masa atómica pero diferente número atómico) o a moléculas con la misma masa que la del isótopo de interés.
- Iones que tienen el mismo M/q y E/q que el radionucleido en estudio.
- Iones que originalmente no tenían la masa, la energía o la carga correcta para ser seleccionados pero que, como resultado de colisiones de intercambio de carga o energía con los componentes del sistema o del gas residual, reproducen la trayectoria de los iones de interés y alcanzan el detector.

Dado que la MS utiliza iones positivos de baja energía es altamente probable que aparezcan este tipo de contaminaciones en niveles de concentración extremadamente bajos.

Con MS es posible alcanzar típicamente una sensibilidad del orden de 10^{-6} a 10^{-10} . Aún reduciendo al máximo las concentraciones de los iones contaminantes, el límite alcanzable es de 10^{-11} [36]. Sin embargo, dado que la concentración natural del ^{14}C es de 10^{-12} , para realizar, por ejemplo, la datación de materiales arqueológicos, es necesaria una sensibilidad del orden de 10^{-15} . La respuesta a esta necesidad surge a partir del desarrollo de AMS.

3.2 Espectrometría de masas utilizando aceleradores de partículas

3.2.1 Generalidades

Las limitaciones de la MS convencional se ven drásticamente mejoradas cuando se incorpora un acelerador de partículas y detectores típicos de la física nuclear en el sistema de espectrometría de masa. Con ese tipo de máquinas los iones son acelerados con diferencias de potencial de algunos millones de voltios, con lo que es posible descartar las interferencias moleculares realizando la remoción de muchos electrones, reducir la probabilidad de eventos espúreos (incluyendo choques e intercambios de carga) y reducir la interferencia isobárica. Finalmente en el sistema de detección se identifica la masa y la carga del ion de interés.

La mayoría de los sistemas de AMS se basa en aceleradores del tipo tandem. En ellos se extrae de la muestra iones con una carga negativa que son preacelerados con una diferencia de potencial de entre 30 y 300 kV. Luego, se realiza una primera selección en masa, mediante un campo magnético, según el momento ME/q^2 del ion que ingresa en la máquina y es acelerado hasta el terminal de alta tensión positiva (entre 1.5 y 15 MV). Allí se encuentra un removedor de electrones que puede ser sólido (una folia de carbono) o gaseoso (nitrógeno a baja presión) en el cual el ion pierde la carga negativa adicional y se le remueven uno o más electrones. El haz de iones, ahora positivo, es acelerado hasta el potencial de tierra en la segunda etapa del acelerador, al cabo de la cual se realiza un segunda selección magnética, ahora seleccionando las partículas con una combinación bien definida de estado de carga y energía (momento). Antes de llegar al sistema de detección, se utiliza algún tipo de filtro de energía y/o velocidad de los iones para disminuir o remover las posibles contaminaciones con el mismo momento que el radioisótopo de interés, o bien aquellos que en la segunda parte del acelerador realizan un intercambio de carga adecuado para lograr la rigidez magnética necesaria para ser aceptadas por el segundo imán. Finalmente, se detecta a los iones en forma individual, identificándolos y separándolos según su número másico y atómico (A y Z).

3.2.2 Objetivo de la técnica y formas de medición

AMS se utiliza para determinar la relación isotópica entre un radioisótopo cosmogénico y su/sus isótopos estables. Para ello, se cuenta átomo por átomo al radioisótopo en el detector mientras que el isótopo estable, que es del orden de 10^{12} veces más intenso se mide como corriente eléctrica en un copa de Faraday.

La determinación de las relaciones isotópicas puede realizarse en forma relativa o absoluta. En el primer caso, se mide la corriente del isótopo estable a la entrada del acelerador y luego se identifica y se mide al radioisótopo en el detector. Este procedimiento debe repetirse para la muestra desconocida, para una muestra patrón (o standard, de concentración isotópica conocida) y para una muestra *blank* (que contiene una cantidad despreciable del radioisótopo a medir y ha sido preparada siguiendo el mismo procedimiento químico que las muestras reales). El cociente entre el radioisótopo y el isótopo estable en la muestra desconocida se normaliza teniendo en cuenta la concentración nominal y el cociente experimental obtenido para la muestra patrón. Por otra parte, el *blank* permite obtener el límite de sensibilidad de la medición. El inconveniente de la determinación relativa de la concentración isotópica estriba en que no permite estimar directamente las posibles variaciones de la transmisión⁽¹⁾ del haz entre una y otra medición.

La determinación absoluta del cociente entre el isótopo radiactivo y el estable consiste en medir dicho cociente en cada una de las muestras de concentración desconocida, a partir del número de eventos registrados en el detector. Si bien no es necesario medir un standard sí debe medirse una muestra *blank* para sustraer el fondo de la medición. Con este método es posible detectar errores sistemáticos debido a las variaciones de los parámetros de los diferentes componentes del acelerador midiendo secuencial o simultáneamente con la medición del radionucleido al isótopo estable en la zona de alta energía del acelerador. Para ello, en general se requiere atenuar la intensidad del haz del isótopo estable ya que puede cargar electrostáticamente al acelerador produciendo descargas eléctricas y caídas de tensión en el terminal. Por otra parte si un haz intenso incidiera sobre el detector provocaría arruinarlo por completo. En el caso de la medición secuencial, el pasaje de un haz al otro debe hacerse en forma extremadamente rápida, del orden de segundos, para minimizar el tiempo total de medición lo que permite garantizar las condiciones de estabilidad del acelerador. Esto implica que el acelerador debe controlarse en forma completamente automática.

3.2.3 Limitaciones de la técnica

AMS, como toda técnica, tiene algunas limitaciones. En particular, el número de isótopos que pueden detectarse es relativamente pequeño, dado que las fuentes de iones disponibles no son capaces de extraer corrientes suficientemente altas para acceder a la detección de algunos isótopos inestables interesantes pero raros. Uno de los problemas más habituales es la separación isobárica. En particular la detección de iones como ^{36}Cl , ^{41}Ca o ^{59}Ni requieren que el haz sea lo bastante energético como para eliminar los iones no deseados.

En la aplicación de esta técnica se requiere equipamiento costoso y tecnología especializada, lo que ha incentivado el diseño de nuevos dispositivos más pequeños y accesibles para, por ejemplo, aplicaciones biomédicas. Por otra parte, dada la altísima sensibilidad de AMS, la preparación de las

¹ Se define como transmisión, básicamente al cociente entre el número de iones que salen del acelerador y el número de iones que entran. En el capítulo 5 se hará referencia más detalladamente a este parámetro.

muestras requiere la disponibilidad de laboratorios ultra limpios y técnicas de procesamiento químico que en general, son las etapas del método de medición que más tiempo requieren.

Las incertezas en una medición utilizando la técnica de AMS provienen de tres fuentes:

- *Preparación de las muestras.* En el proceso de preparación de las muestras, la incerteza proviene de las diferentes concentraciones del radioisótopo que pueden tener aquellas. Para evitar las contaminaciones, las muestras deben prepararse según un orden creciente de presencia del radioisótopo. Así, primero se realiza la preparación del *blank*, luego las muestras reales y finalmente, el standard (que suele ser el que más abundancia presenta del radioisótopo).
- *Evolución temporal.* Si la estabilidad de los parámetros del acelerador (los elementos de la fuente de iones, las condiciones de vacío, la tensión de terminal, etc.) es deficiente, su variación puede generar incertezas en la medición. Otro factor que evoluciona con el tiempo y que puede introducir errores en los resultados es la homogeneidad del removedor de electrones sólido. Al pasar los iones a través de él, se produce una distribución de carga y un fraccionamiento isotópico dependiente de la energía del ion [37] y que, por lo tanto, es diferente para el isótopo estable y el radiactivo. Con el paso del tiempo, las inhomogeneidades de la folia de carbono pueden provocar que su composición varíe y genere una dispersión en energía que afecta la precisión de la medición.
- *Sistema de detección.* Si la tasa de conteo es baja, disminuye la eficiencia de los detectores gaseosos del tipo de cámara de ionización. Por ello, cuando se utiliza esta clase de sistemas de detección, se intenta alargar el tiempo de adquisición para aumentar el número total de cuentas. Sin embargo, para realizar este procedimiento es necesario confiar en la estabilidad de los parámetros del acelerador.

Los errores sistemáticos pueden estimarse, por ejemplo, mediante la medición de la relación de dos isótopos estables la cual puede resultar un indicador de las fluctuaciones del fraccionamiento isotópico. Por otra parte, se puede controlar la reproducibilidad en la preparación de las muestras realizando más de un *blank* por cada muestra original. Finalmente, la estabilidad de los parámetros del acelerador se verifica midiendo una muestra patrón a intervalos regulares de tiempo a lo largo de una serie de muestras desconocidas.

La eficiencia total de una medición es la relación entre el número de átomos radiactivos detectados y los que realmente se encuentran en la muestra [38]. En ella se incluye, la eficiencia de la fuente de iones para la extracción de iones de la muestra, la eficiencia del proceso de remoción de electrones, la transmisión a través de todo el acelerador y la eficiencia del sistema de detección. Típicamente se alcanzan eficiencias totales entre 10^{-3} y $10^{-4}\%$.

3.3 Dispositivo Experimental

Los principios generales de AMS se aplican en sistemas que combinan diferentes dispositivos. La mayoría de ellos incluyen aceleradores del tipo tandem, como es el caso de este trabajo, los cuales se describen a continuación. En particular se hace referencia a los equipamientos utilizados para las mediciones que aquí se presentan: el laboratorio TANDAR, de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y el acelerador del *Department of Nuclear Physics* de la *Australian National University* (ANU).

3.3.1 Fuente de iones

Los aceleradores de tipo tandem requieren la inyección de haces negativos los cuales pueden ser producidos de diferentes maneras. En particular se describe brevemente el funcionamiento de una fuente de iones que extrae iones negativos de la muestra mediante el proceso de *sputtering*, en las cuales el bombardeo de partículas sobre una superficie sólida provoca el desprendimiento de átomos de ese material [39].

Una fuente de iones de *sputtering* típicamente utilizada en AMS consiste en un reservorio de Cs a alta temperatura, un ionizador para producir un haz de Cs^+ enfocado para extraer iones negativos de la muestra y un electrodo de extracción para acelerar y enfocar los iones negativos secundarios, provenientes de la muestra hasta el sistema de inyección. Si bien este tipo de fuentes producen haces de iones negativos intensos a partir de muchos elementos, en AMS es necesario, con frecuencia extraer iones moleculares para disminuir la contaminación isobárica del radioisótopo a medir. El rendimiento de este tipo de iones y la forma de extraerlos ha sido exhaustivamente estudiado por Middleton en 1990 [40]. En la tabla 3-2 pueden verse valores típicos de corrientes extraídas para algunos iones.

Isótopo de AMS	Material	Ion estable seleccionado	Corriente negativa de iones (μA)
^{10}Be	BeO	$^9Be^{16}O^-$	1-10
^{14}C	Grafito	$^{12}C^-$	15-60
^{26}Al	Al_2O_3	$^{27}Al^-$	0.1-1
^{36}Cl	AgCl	$^{35}Cl^-$	5-25
^{129}I	AgI	$^{127}I^-$	2-10

Tabla 3-2: Corrientes típicas extraídas de las fuentes de iones utilizadas en AMS [5].

En particular, la fuente de iones del acelerador TANDAR es del tipo *Sputtering Negative Ion Cesium Source II* (SNICS II), en la que puede colocarse una muestra por vez. En la ANU cuentan con una fuente de la misma clase pero con la posibilidad de montar hasta 32 muestras simultáneamente, lo que disminuye notoriamente el tiempo transcurrido entre la medición de muestras sucesivas.

3.3.2 El sistema de inyección

AMS depende de la capacidad del sistema para inyectar tanto el radioisótopo como el isótopo estable más abundante en el acelerador. La técnica consiste en la inyección secuencial de los diferentes isótopos, ya sea cambiando la energía de los iones previa al análisis en masa, o bien cambiando el campo magnético del imán inyector. Si bien el primer método es más rápido (y la rapidez en los cambios es relevante ya que favorece el aprovechamiento de la estabilidad de todos los parámetros del acelerador), en aquellos laboratorios en los que el acelerador es compartido por AMS y experimentos de física nuclear debe optarse por el segundo. Este es el caso del TANDAR y de la ANU.

La secuencia consiste en inyectar uno o varios isótopos estables para fijar todos los parámetros del acelerador y luego el radioisótopo de interés. El cambio puede hacerse en forma automática, controlada por computadora, como es el caso de la ANU o bien en forma manual, cambiando uno a uno los valores de los diferentes parámetros como es el caso del acelerador TANDAR.

3.3.3 El acelerador

El acelerador TANDAR es una máquina NEC 20 UD Pelletron [41] (el terminal de alta tensión alcanza un valor nominal de 20 MV) mientras que el acelerador de la ANU es NEC 14 UD Pelletron [42] (la tensión nominal máxima alcanzable es 14 MV). Ambos son aceleradores de tipo tandem Van de Graaff, en el que el transporte de carga desde tierra al terminal se realiza por medio de cadenas de piezas de lucite, los "pellets", de ahí su nombre Pelletron. La figura 3-1 muestra un esquema del TANDAR, en el cual el preacelerador está ubicado después del imán inyector. El acelerador de la ANU es más pequeño, por lo que no necesita de cuadrípolos ni lentes electrostáticas dentro del tanque. Debido a que los iones requieren mayor energía antes de ingresar en él, en este caso el preacelerador está emplazado antes del imán.

Los iones negativos entran en el acelerador con una energía $E_i = V_i e$, siendo V_i la tensión total de inyección y e la carga del electrón, y son acelerados hasta el terminal de alta tensión positiva, V_t . Allí son convertidos en iones positivos debido a la extracción de $(q + 1)$ electrones en el removedor de electrones, ya sea sólido o gaseoso. Los iones, ahora con q cargas positivas (el electrón adicional que se le extrae es el que había adquirido en la fuente de iones), son nuevamente acelerados desde el terminal a la tensión de tierra y salen de la máquina con $E = E_i + (q + 1) e V_t$.

Para realizar el correcto pasaje del haz a través del acelerador, debe maximizarse la corriente en las diferentes copas de Faraday. Para ello, estas máquinas cuentan con elementos de óptica iónica los cuales se utilizan para enfocar el haz en ellas (figura 3-1)

En la zona de baja energía (desde la fuente hasta el terminal de alta tensión), estos elementos son lentes Einzel (EL I1-1, en la figura 3-1), cuadrípolos (EQ 01-1 y EQ 01-2, antes de la entrada al tanque y EQ-D1 dentro de él) y deflectores electrostáticos (ES 01-1 y ES 01-2). Las lentes y los cuadrípolos son los elementos de enfoque y los deflectores se utilizan para dirigir el haz. En el terminal

propriadamente dicho hay dos cuadripolos (EQ T-1 y EQ T-2) y un deflector electrostático (ES T-1). Después de éste (zona de alta energía) la óptica iónica consiste en cuadripolos (MQ-02-1) y deflectores magnéticos (MS 02-1 y MS 02-2) que tienen en cuenta la relación ME/q^2 .

A lo largo de todo el acelerador, hay aberturas variables y placas simples y dobles (en una y dos direcciones, respectivamente) capaces de cubrir un rango continuo de aberturas. Estos colimadores, ubicados en general en los focos de los elementos ópticos, garantizan que el haz sea conducido en forma centrada.

Finalmente, y para controlar la homogeneidad del haz, la cual se mantiene siempre y cuando la sección del mismo sea circular, se utilizan monitores del perfil del haz ubicados en tres posiciones a lo largo de toda la máquina (BPM 01, BPM 02 y BPM 03), que permiten examinar dicho perfil en las dos direcciones perpendiculares a la de propagación del haz

Los aceleradores pueden funcionar en forma continua o pulsada. Ésta última disminuye la intensidad de la corriente efectiva de haces macroscópicos que son acelerados a través de la máquina para evitar que ésta se cargue y aparezcan chispas indeseadas. El instrumento que habilita y deshabilita el pasaje del haz durante tiempo regulares y estipulados previamente recibe el nombre de chopper y está ubicado antes de la entrada al tanque.

La transmisión de los iones a través de todo el acelerador debe ser alta y reproducible y, por otra parte, la tensión del terminal debe mantenerse constante. Para garantizar que la transmisión no refleje pequeños cambios en la inyección o en los parámetros del acelerador se utilizan tubos de aceleración de diámetro grande y se trata de limitar al mínimo el diámetro del haz. Sin embargo, los tubos de los removedores de electrones gaseosos, típicamente de 8 mm de diámetro, a menudo constituyen factores limitantes del sistema (el diámetro típico del haz es de hasta 5 mm). Por esto es que el correcto funcionamiento y la estabilidad de los elementos de óptica iónica son fundamentales para enfocar el haz a través del acelerador y disminuir al máximo la pérdida de transmisión.

La estabilidad de la tensión de terminal se controla de dos maneras posibles. La manera usual es conocida como "método slit", en el cual una corriente de iones (del orden de los nA) incide sobre las ranuras ubicadas luego del imán analizador y la tensión es controlada por medio de un lazo de realimentación. Este método no es aplicable en AMS dado que hay típicamente unos pocos iones por segundo de cada isótopo medible. La solución generalmente utilizada es tomar una señal proveniente de un generador de tensión (GVM). En este modo, las fluctuaciones del acelerador de la ANU son del orden de $\Delta V = 1 \text{ kV}$ en $V = 14 \text{ MV}$ (0.0071%) en el modo de estabilización GVM [5] y por otra parte, en los últimos años se ha logrado un gran avance en el laboratorio TANDAR llevando las fluctuaciones de $\Delta V = \pm 15 \text{ kV}$ en $V = 9 \text{ MV}$ (0.16%) a $\Delta V = \pm 2 \text{ kV}$ en $V = 10 \text{ MV}$ (0.02%) [38].

El método normal para el pasaje de un haz consiste en seleccionar la masa del ion que se desea acelerar en el imán inyector y determinar la tensión del terminal y el campo del imán analizador que corresponda a la masa y estado elegido para trabajar. Para ello, se debe maximizar la corriente en las

diferentes copas de Faraday utilizando los elementos de la óptica iónica que han sido descritos en los párrafos anteriores. Finalmente, al llegar al detector debe enfocarse el haz en una pastilla perforada de material fosforescente y enhebrar el haz a través de ella.

En el caso que la concentración del ion que se desea estudiar sea menor que 10^{-10} , no es posible utilizar el método convencional ya que la intensidad de corriente es insuficiente para ser detectada en las copas de Faraday. Por ello los parámetros del acelerador necesarios para acelerar este tipo de iones (haces que pueden ser llamados “invisibles”) se determinan prediciéndolos a partir de los obtenidos para los haces de los isótopos estables (haces macroscópicos) del radionucleido de interés.

Si se desea acelerar un determinado radioisótopo se comienza realizando el pasaje a lo largo de toda la máquina, de uno de sus isótopos estables. Esto define un juego de valores de los parámetros del acelerador. Para pasar al nucleido radiactivo debe cambiarse el valor del campo magnético del imán inyector. Para ello, de la ecuación 3.1 puede verse que $B_2 = B_1 \sqrt{M_2/M_1}$, donde los subíndices 1 y 2 indican el primero o el segundo haz, B y M son el campo magnético del imán y la masa del ion en cuestión. Este cambio mantiene constante la rigidez magnética de las partículas lo que permite dejar invariable todos los parámetros ópticos previos al imán.

De allí en adelante sería necesario hallar todo un nuevo conjunto de parámetros para el haz invisible. Esto puede evitarse si se logra mantener constante la rigidez magnética del imán analizador. Para esto, y dado que la masa de las partículas es diferente, debe variar su energía y por lo tanto la tensión del terminal. Como se intenta mantener el enfoque del haz, deben realizarse pequeños retoques en los cuadrupolos EQ-D1, que es el que enhebra al haz en el tubo del removedor de electrones gaseoso, a pesar que éste no se utilice, en el cuadrupolo EQ-T2 y en el deflector ES-T1. En el caso de las máquinas más pequeñas, como el de la ANU, que no cuentan con elementos ópticos dentro del tanque, sólo debe cambiarse la tensión del terminal.

El nucleido radiactivo puede contar con un único isótopo estable: ^{10}Be - ^9Be , ^{26}Al - ^{27}Al . En este caso la predicción de los parámetros correspondientes al radioisótopo (^{10}Be , ^{26}Al) se realiza únicamente a partir de los valores obtenidos para los estables (^9Be , ^{27}Al). Si el radionucleido cuenta con dos isótopos estables, la predicción se realiza interpolando linealmente los valores obtenidos para ellos. Es el caso del ^{36}Cl , cuyos isótopos estables son el ^{35}Cl y el ^{37}Cl , o el del ^{59}Ni , con el ^{58}Ni y ^{60}Ni . Finalmente, hay algunos núcleos que cuentan con varios isótopos estables: los del ^{41}Ca son ^{40}Ca , ^{42}Ca , ^{43}Ca , ^{44}Ca , ^{46}Ca y ^{48}Ca , cuyas abundancias en la naturaleza son 96.94%, 0.647%, 0.135%, 2.09%, 0.0035% y 0.187% [11], respectivamente. Al ser la concentración natural de los núcleos estables tan dispar, se prefiere trabajar como si el único isótopo estable fuera el más abundante, en este caso el ^{40}Ca .

3.3.4 Análisis de post-aceleración

Del acelerador sale un haz que contiene una distribución de los estados de carga del ion de interés. El imán analizador selecciona aquél que tiene la rigidez magnética elegida y lo desvía hacia el sistema de detección.

La mayoría de los sistemas cuentan con una etapa de análisis adicional posterior para remover contaminaciones espúreas. Esta contaminación proviene de iones atómicos o moleculares inyectados en la fuente de iones con el mismo momento p que el radioisótopo de interés y que luego del removedor de electrones, debido a un vacío deficiente en los tubos de aceleración, adquieren el momento necesario para seguir la misma trayectoria que el radioisótopo de AMS y son aceptados por el imán analizador. Por lo tanto, dicha selección adicional es fundamental para limitar la tasa de conteo del detector, que puede ser excesivamente alta debido a las contaminaciones y no al radioisótopo de interés.

Uno de los métodos más usuales para seleccionar iones es utilizar un filtro de velocidades o Wien Filter. Básicamente consiste en un campo eléctrico (ϵ) y otro magnético (B) perpendiculares entre sí y a su vez normales a la trayectoria de las partículas y transmite solamente aquéllas que tengan una velocidad específica v_0 dada por la ecuación 3.3. A la salida del filtro, los iones con diferentes velocidades ($v_0 + \Delta v$) son desplazados del eje del haz en una cantidad

$$D = \frac{q\epsilon L^2 \left(\frac{\Delta v}{v_0} \right)}{4E} \quad (3.4)$$

donde L es la longitud del filtro. Mientras las partículas se mantienen en la región con campo, dentro del filtro, siguen trayectorias parabólicas y al salir, siguen líneas rectas tangentes a esas parábolas. La distancia D' [mm] se relaciona con la longitud L' [cm] del filtro según la siguiente ecuación

$$D' = (L' + L/2) \frac{q\epsilon \left(\frac{\Delta v}{v_0} \right)}{2E} \quad (3.5)$$

Dado que el imán analizador deja pasar los iones cuyo producto Mv sea el mismo que el del radioisótopo de interés, aquellos que tengan masa M' y v' , tal que $M'v' = M_0v_0$ son desviados una distancia D'' tal que

$$D'' = 5 \times 10^{-3} L(L' + L/2) \frac{Vq \left(\frac{\Delta M}{M_0} \right)}{Ed} \quad (3.6)$$

donde ΔM es la diferencia de masas, V la diferencia de potencial y d [cm] la distancia entre las placas electrostáticas del filtro de velocidades [4]. Colocando un colimador delante del detector se previene el ingreso en él de los iones indeseados.

3.3.5 Sistemas de detección

En AMS se utiliza una amplia gama de detectores. Se describen aquí brevemente aquellos que son de uso generalizado en AMS y más adelante se explicará con más detalle los utilizados en este trabajo.

Los detectores de barrera de superficie se utilizan para medir la energía del ion. En la mayoría de los experimentos de AMS, esta única información no es suficiente para la correcta identificación del radioisótopo de interés. Por otra parte, son detectores muy susceptibles a sufrir daño por radiación.

Las cámaras de ionización proveen información de la energía total del ion incidente así como también la tasa de energía perdida a medida que se frena en su pasaje por el gas del detector. En general se utilizan cámaras de ionización cuyos ánodos se encuentran divididos en secciones, de manera que cada una de ellas entrega una señal independiente proporcional a la pérdida de energía, ΔE , de la partícula en su paso por ella. Finalmente, la última sección provee una señal proporcional a la energía residual, E_r , de la partícula. Dado que la pérdida de energía es proporcional al número atómico Z del ion incidente, esta información combinada con la de energía residual permite la separación e identificación de isóbaros.

Una combinación posible es utilizar un detector de tipo telescopio, en el que la pérdida de energía está dada por una cámara de ionización tradicional (o un detector de estado sólido de transmisión) y la señal de energía residual por un detector de estado sólido.

En los detectores gaseosos de curva de Bragg, el campo eléctrico es paralelo a la trayectoria del ion y la información de la pérdida de energía se obtiene a partir del desarrollo en el tiempo de la señal en el ánodo.

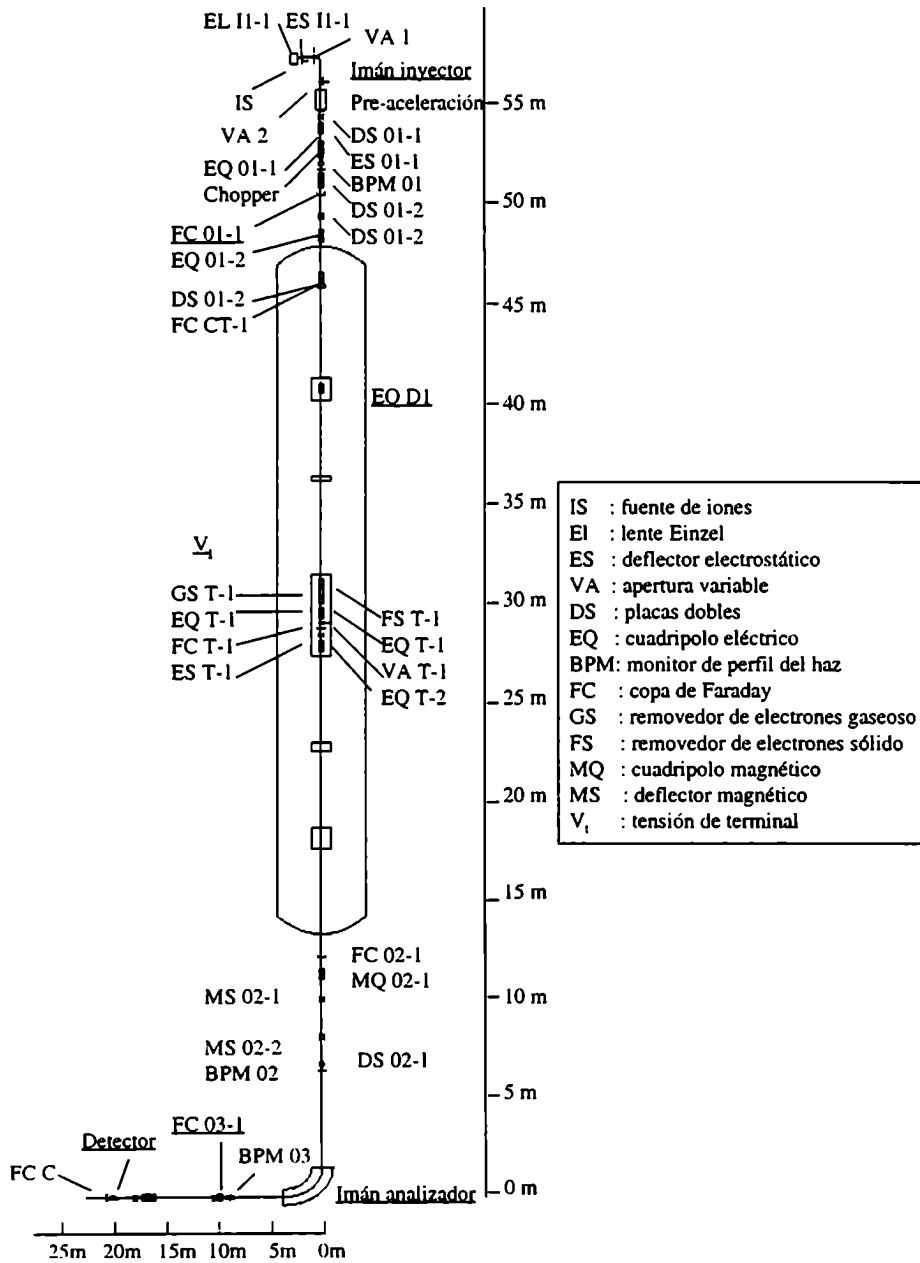
Los detectores detallados hasta el momento son particularmente útiles para la detección de iones relativamente livianos (^{10}Be , ^{12}C , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca). Sin embargo para iones más pesados (^{59}Ni , ^{129}I) no tienen suficiente resolución en energía para permitir la identificación de isóbaros. Por ello se combina la medición de la $\Delta E/E$, del ion con una determinación de su velocidad, midiendo su tiempo de vuelo (TOF) a través de una longitud conocida.

Un sistema de medición de TOF consiste en detectores que dan una señal de "inicio" y "parada" separados típicamente 2 m. Los detectores de "inicio" consisten en una lámina de carbono y un multiplicador de electrones llamado placa de microcanales (MCP), el que multiplica los electrones liberados por la folia de carbono en el momento del pasaje de la partícula. Los detectores de "parada" pueden ser similares a los de "inicio", en cuyo caso se les adosa un detector de silicio o una cámara de ionización que provea la señal de energía. También puede utilizarse un único detector de estado sólido que provea tanto la señal temporal como la de energía. Sin embargo estos sistemas de detección tienen algunas desventajas: el detector en entrega la señal de inicio provoca dispersión en la energía de las partículas y dispersión angular causando pérdidas de transmisión y finalmente no son útiles, por sí

solos, para hacer distinción entre isóbaros. Por ello, es común utilizar la técnica de tiempo de vuelo tomando la señal de inicio y parada entre dos detectores que ya formaran parte del sistema de detección, por ejemplo, entre dos secciones de un ánodo segmentado de una cámara de ionización como las mencionadas anteriormente. Más adelante se ilustrará esta técnica para la separación del ^{59}Ni de su isóbaro el ^{59}Co .

Finalmente, otro método de detección consiste en utilizar un espectrómetro lleno de gas (GFM) a baja presión. Si la región sometida al campo magnético está en vacío la trayectoria de las partículas está determinada por su cociente p/q , de manera que el radioisótopo y sus isóbaros, siguen el mismo camino y sólo se diferencian los diferentes estados de carga. En presencia de un gas a baja presión los diferentes isóbaros siguen trayectorias distintas, determinadas por el número atómico Z y que depende de un estado de carga promedio que alcanzan los iones luego de interactuar con las moléculas del gas. Paul [43] realiza una descripción detallada de los sistemas de espectrómetros llenos de gas aplicados a AMS.

Figura 3-1: Esquema del acelerador TANDAR. Se indican subrayados los parámetros relevantes para el desarrollo de la técnica de AMS.



4 El meteorito de Campo del Cielo

4.1 Ubicación geográfica y antecedentes históricos

Aproximadamente a 860 km, hacia el nor-noreste, de la Ciudad de Buenos Aires, en el límite entre las provincias de Chaco y Santiago del Estero se encuentra el campo de los cráteres de Campo del Cielo. La región está limitada por los paralelos de 27°30' y 27°40' de latitud sur y los meridianos de 61°30' y 61°50' de longitud oeste (figura 4-1) [9]. El pueblo más cercano es Gancedo, situado en la región conocida como Gran Chaco, en la llanura chaqueña. Es una región semiárida, topográficamente idéntica a la región pampeana, pero en la que no es posible el desarrollo de la agricultura debido a la sequedad del clima. La vegetación es del tipo sabana y bosques. Estos son densos, con mucha maleza, abundantes plantas espinosas y cactus lo que, en muchos lugares, hace imposible realizar observaciones detalladas del suelo en la búsqueda de cráteres meteoríticos. Por ello, a menudo es necesario abrirse paso entre la maleza con machetes y herramientas apropiadas. Los cráteres pueden haberse cubierto con sedimentos, tierra y vegetación y en la actualidad forman huecos poco profundos reconocibles únicamente por la leve ondulación que provocan en el terreno.

La historia escrita acerca del descubrimiento de Campo del Cielo data de los inicios de la conquista española. Los primeros exploradores españoles llegaron a la región atraídos por maravillosas historias indígenas que hablaban de un gran bloque de hierro que había caído desde el cielo [10]. Los nativos llamaban a la zona *Piguem Nonraltá* (Campo del Cielo). Los conquistadores, descreyendo que fuera realmente de hierro y con el sólo objetivo de encontrar oro y plata, hicieron que los indígenas los guiaran hasta el lugar. En 1576 una expedición a las órdenes del Capitán Hernán Mexía de Miraval, llegó a la región, retornando con algunos fragmentos de una enorme masa de hierro, del orden de 14 toneladas, conocida como Mesón de Fierro. Sospechando que esta zona fuera un depósito de plata, desde el Perú, Bartolomé Francisco de Maguna guió dos nuevas expediciones a la región en 1774 y 1776, volviendo con nuevas muestras que demostraron ser de un hierro de excelente calidad. En 1779, se envió una nueva expedición a las órdenes del Sargento Mayor Francisco de Ibarra y otra en 1783, bajo las del Teniente de la Armada Real Miguel Rubín de Celis. Este, además de tomar una muestra, reportó que no había evidencia de que el Mesón de Fierro se extendiera por debajo de la tierra. Para verificar que la masa de hierro no tenía raíces o que fuera parte de una veta metálica del suelo, como

supusieron los primeros visitantes, de Celis cavó trincheras alrededor del fragmento y lo encaramó en dos pilares delgados y corroídos [34]. Finalmente concluyó que el bloque debió originarse en alguna erupción volcánica y que carecía de valor económico. Desafortunadamente, la masa de hierro fue abandonada, volcada sobre el hueco y Rubín de Celis fue la última persona en verla. Aparentemente, la erosión del suelo ha cubierto todo rastro de ella y es el día de hoy, que el Mesón de Fierro continúa sin ser hallado.

Al mando de otra expedición en 1803, el Teniente Coronel Diego del Rueda localizó otra gran masa de hierro, conocida como Otumpa, de aproximadamente 900 kg. Ésta fue más tarde reconocida como una masa meteorítica y actualmente se encuentra en el British Museum, Londres.

Con el correr de los años fueron encontrándose nuevos fragmentos, de los cuales el mayor de ellos es el conocido como El Toba, de 4210 kg. En la tabla 4-1 se resumen los especímenes de más de 100 kg que han sido encontrados hasta el momento.

Aproximadamente a 15 km de Gancedo, Nágera en 1926 [44] descubrió cuatro depresiones que no reconoció como cráteres meteoríticos. Más tarde, en 1933, Spencer [45] corrigió a Nágera concluyendo que dichas depresiones habían sido provocadas por la caída de un meteorito, del cual ciertamente el perdido Mesón de Fierro había formado parte.

4.2 El campo de cráteres

En 1962 comenzaron una serie de expediciones realizadas en colaboración por científicos argentinos y estadounidenses ([9],[10] y [46]), que se continuaron hasta mediados de la década del '70. Como resultado de ellas se identificaron veinte cráteres en total (incluyendo los cuatro reconocidos por Nágera [44]), dispersos en forma aproximadamente elíptica. El campo de cráteres tiene al menos 18.5 km. de largo y posiblemente no más de 3 km. de ancho, en dirección N63°E. En el mapa de la figura 4-1 se indica su ubicación.

Se entiende que los cráteres han sido formados como consecuencia de la caída de una lluvia de trozos de una única y gran masa meteorítica que se fragmentó al penetrar en la atmósfera terrestre. La fractura fue causada por la presión del aire comprimido contra el frente del cuerpo incidente y fue facilitada por la presencia de las inclusiones de silicatos, de manera que los fragmentos mayores no se dispersaron demasiado y cayeron en las cercanías del eje de la elipse [9]. El suelo de la región es flojo, formado por sedimentos no consolidados, de manera que los cráteres se han ido cubriendo con ellos con el transcurso del tiempo [47]. En general son pequeños, a lo sumo 60 cm de diámetro. Se supone que en muchos de ellos quedan todavía fragmentos del meteorito, ya que si se realizan reconocimientos con detectores de metales en las cercanías aparecen algunas anomalías magnéticas ([9] y [10]).

Meteorito	Masa [kg]	Descubrimiento	Lugar de descubrimiento		Ubicación actual
			Lat. Sur	Long. Oeste	
Mesón de Fierro	≈ 14000	Antes de 1576	Desconocida		Probablemente in situ.
El Toba	4210	1923	27°39.5'	61°46.5'	Museo Bernardino Rivadavia, Buenos Aires.
El Taco	1998	1962	27°40'	61°47.5'	U.S. National Museum Washington (en préstamo).
El Mataco	990	1937	1962	27°40'	Parque Independencia, Rosario, Prov. Sta. Fé.
Otumpa	≈ 900	1803	Desconocida		British Museum, Londres (634 kg).
El Tonocoté	850	1931	Desconocida		Dirección Nacional de Geología y Minería, Buenos Aires.
El Mocoví	732	1925	27°35'	61°35'	Museo Bernardino Rivadavia.
El Abipón (Charata)	460	1936	Desconocida		Museo Bernardino Rivadavia.
El Patio	≈350	Antes de 1960	27°39'	61°43.5'	Estancia El Taco.
Sin nombre	132	Antes de 1960	27°39'	61°42'	Museo Municipal, Rafaela, Prov. Sta. Fé.
Sin nombre	≈100	Antes de 1960	27°37'	61°36'	Estancia Los Guanacos, Gancedo
Raúl Gómez I	≈33400	1969	27°36'39"	61°40'43"	In situ
Gancedo. Gran Chaco	05-5	Numerosos fragmentos pequeños, encontrados en diferentes ocasiones, y que se encuentran ahora en diferentes museos.			

Tabla 4-1: Fragmentos principales, de masa mayor que 100 kg, encontrados en la región de los cráteres de Campo del Cielo.

4.3 Descripción y composición

4.3.1 Generalidades

El meteorito de Campo del Cielo es un meteorito de hierro con importantes inclusiones de silicatos, grafitos y troilitas. Es una octahedrita gruesa, policristalina. En la tabla 4.2 se presenta su composición química promedio.

En el meteorito de Campo del Cielo, como en muchos meteoritos de hierro aparecen minerales como la kamacita (ferrita, hierro α) y taenita (austenita, hierro γ). Básicamente estos son dos combinaciones diferentes de hierro y níquel. La taenita aparece crecida siguiendo el parámetro de Widmanstätten (Sección 2.3.2). Hay también grafito y óxidos de hierro secundarios distribuidos al azar en el arreglo de silicatos [10].

Elemento	Concentración	Elemento	Concentración	Elemento	Concentración
Hierro	92.70 %	Silicio	0.02 %	Estaño	0.001 %
Níquel	6.15 %	Cromo	0.01 %	Vanadio	0.001 %
Cobalto	0.42 %	Cobre	0.01 %	Arsénico	0.001 %
Carbono	0.37 %	Titanio	0.007 %	Germanio	407 ppm
Fósforo	0.28 %	Azufre	0.002 %	Galio	87 ppm
Wolframio	0.023 %	Molibdeno	0.001 %	Iridio	3.6 ppm

Tabla 4-2: Composición química del meteorito de Campo del Cielo [34] y [48].

En algunas regiones, la kamacita se distribuye presentando líneas de Neumann (Sección 2.3.2). A su vez, éstas aparecen con cortes de deformación formados probablemente más tarde que las propias bandas y podrían indicar que el meteorito ha estado sometido a choques extraordinariamente fuertes, posiblemente, en su choque contra la tierra [49]. En la figura 4-2 pueden verse las estructuras mencionadas, a partir de un estudio realizado en la Comisión Nacional de Energía Atómica de un fragmento del meteorito de Campo del Cielo, hallado en la región de los cráteres y que dio lugar a algunas de las muestras medidas en el presente trabajo. Las fotos han sido obtenidas luego de pulir perfectamente la muestra [50]. A pesar que muchos de los especímenes encontrados están seriamente afectados por la corrosión, otros, como El Taco presentan un estado de preservación especialmente bueno [34] y una corteza debido a la fusión al ingresar en la atmósfera de varios centímetros. Esta capa aparece en varios de los fragmentos mayores, como si hubieran caído como masas individuales, con suficiente trayectoria a través de la atmósfera para desarrollar remagliptos⁽¹⁾ en gran escala.

4.3.2 El Taco

El Taco es una masa de 1998 kg que, antes de ser cortada, tenía una forma de escudo y medía aproximadamente 120 × 110 × 40 cm [34]. Fue descubierto en el año 1962 a 27°40' de latitud Sur y 61°47.5' de longitud Oeste [9]. En ese momento estaba bien conservado y presentaba remagliptos en la base de los cuales aparece una corteza de fusión levemente percutida por las condiciones climáticas. Su aspecto reflejaba haber realizado una larga trayectoria a través de la atmósfera suficiente para desarrollar una estructura similar a la que presentan los grandes meteoritos individuales de hierro. Sobre la superficie presentaba importantes inclusiones de silicatos de, por ejemplo, 10 × 9 y 3 × 2.5 cm, las cuales aparecieron con marcado contraste luego que la superficie fuera pulida con arena en 1966. En la figura 4-3 puede verse una foto de un corte pulido de El Taco como se hallaba en el Max-Planck-Institut für Chemie, Munich, donde el meteorito fue seccionado.

¹ Remagliptos: pequeños huecos con forma de dedo pulgar escurbados en la superficie de los meteoritos debido a corrientes de aire supersónicas y turbulentas durante el ingreso en la atmósfera terrestre.

4.4 Historia del meteorito de Campo del Cielo a partir de trabajos previos

No existen muchos estudios sobre meteoritos ferrosos en general y sobre el de Campo del Cielo en particular. Es complejo realizar estudios sobre esta clase de meteoritos ya que es necesario contar con equipamiento bastante sofisticado para realizar experimentos con nucleidos cosmogénicos, los cuales se presentan en concentraciones extremadamente bajas. A pesar de esto, existen algunos trabajos previos que aportan información sobre el meteorito de Campo del Cielo.

4.4.1 Edad terrestre

Como se explicó en la sección 2.2, la edad terrestre, T_e , de un meteorito es el tiempo transcurrido desde su caída a la Tierra. En el año 1965 [10], Cassidy y sus colaboradores reportan haber realizado estudios acerca de la edad de ocurrencia de Campo del Cielo, es decir, su edad terrestre, llegando a la conclusión que el meteorito había caído en la tierra hace 5800 ± 200 años. Esta edad había sido calculada a partir de mediciones indirectas, utilizando el método de datación del ^{14}C en muestras de carbonizadas del fondo del cráter. En 1972, Cassidy y Romaña [46] reportan una edad levemente menor. En 1996, Cassidy y Renard [9] presentan ambas mediciones juntas, agregando una tercera (Tabla 4-3). La primera, tomada del los sedimentos que rellenaron el cráter Nro. 1 y que se consideró

claramente más joven que el evento en cuestión (esta era la muestra que nunca antes había sido medida). La segunda muestra, tomada en el subsuelo antiguo (en 1965), por debajo del suelo del material del cráter Nro. 2, debía ser de una edad o mayor que el meteorito. Finalmente, la tercera muestra fue tomada del túnel que el meteorito provocó en su caída formando el cráter Nro. 10 (en 1972). De lo anterior se concluye que la edad aceptada para el meteorito de Campo del Cielo es de 3945 ± 85 años. Sin embargo en este trabajo se intenta realizar una estimación de la misma a partir de mediciones realizadas sobre el propio meteorito, para ratificar o rectificar los resultados anteriores.

Muestra	Laboratorio	Edad [a]	Interpretación
L-1043	Lamont Doherty Radiocarbon Laboratory	800 ± 150	Menor que la edad del impacto
L-746	Lamont Doherty Radiocarbon Laboratory	5800 ± 200	Límite superior o mayor que la edad del impacto
SI-1545	Smithsonian Institution Radiation Biology Laboratory	3945 ± 85	Edad del impacto

Tabla 4-3: Edades medidas por ^{14}C obtenidas a partir de muestras de restos carbonizados recogidas en el campo de cráteres de Campo del Cielo [9].

4.4.2 Tamaño preatmosférico

El meteorito que cayó en Campo del Cielo evidentemente se fracturó en al menos 20 fragmentos los que dieron lugar a los veinte cráteres. Es posible estimar por diferentes métodos el

tamaño preatmosférico del meteoroides madre. Por una parte, sólo sumando las masas de los fragmentos encontrados en los cráteres Nro. 9 y 10 ya se obtienen 51700 kg. Estimando que la masa en los 18 cráteres restantes es similar a la encontrada en el Nro. 9, de 5000 kg, se estaría hablando de una masa total de al menos 140000 kg, eso sin considerar al perdido Mesón de Fierro, que sumaría otros 14000 kg [47]. Estas estimaciones dan un límite inferior para el tamaño del meteoroides en el espacio y con los resultados obtenidos en este trabajo puede verse (Sección 7.3) que en realidad, debió ser aún mayor.

4.4.3 Edad de exposición

La edad de exposición de un meteorito T_e , es decir el tiempo durante el cual el meteoroides estuvo sujeto a la radiación cósmica, no es sencilla de determinar. En particular, algunos meteoritos pueden tener una historia de irradiación en varias etapas debidas a sucesivas fracturas del cuerpo madre, por lo que el flujo de rayos cósmicos que llega a una determinada muestra varía ya que depende de la profundidad de la misma. Sin embargo, éste no es el caso de Campo del Cielo, para el cual todos los estudios indican una única etapa de irradiación.

La literatura sobre este punto no parece ponerse de acuerdo en el tiempo de exposición de este meteorito. Frank Podosek, utilizando para datar meteoritos un método de activación neutrónica de potasio-argón [51] estima la edad de exposición entre 3.4×10^9 y 4.6×10^9 años. Con el mismo método, Kaiser y Zähringer [52] estimaron esa edad entre 2.55 y 2.7×10^9 años. A pesar de estas edades de exposición tan elevadas, Nyquist y sus colaboradores [53], utilizando el método de Signer y Nier para la medición de gases nobles atrapados [54], estiman una edad de exposición mucho menor: 14 ± 8 Ma.

La edad de exposición influye en la estimación de la edad terrestre del meteorito de una manera indirecta. En el cálculo de esta última, se considera que la producción de radioisótopos ha llegado a su valor de saturación cuando el meteorito cae a la Tierra. Esto es cierto cuando el tiempo durante el cual la radiación cósmica ha incidido sobre el meteoroides es mucho mayor que la vida media del nucleido radiactivo, de manera que su producción se compense con su decaimiento y su concentración se mantenga constante.

En particular, en Campo del Cielo, aún tomando la menor de las edades de exposición mencionadas, casi 10 veces mayor que la mayor de las vidas medias de los radioisótopos medidos en este trabajo (^{10}Be , $T_{1/2} = 1.6$ Ma), es suficiente para considerar que la producción de todos ellos se encontraba en su valor de saturación en el momento de la caída.

4.5 Muestras

Se han medido en este trabajo cinco muestras provenientes de dos fragmentos del meteorito de Campo del Cielo. Una de ellas proviene de un fragmento de El Taco y las otras cuatro provenientes de

otro fragmento sin identificación que alguien levantó del suelo en las cercanías de los cráteres de la región.

4.5.1 Muestra JFN1

La muestra JFN1 proviene de El Taco. En los comienzos de esta investigación, el fragmento del que se disponía fue cortado en tres secciones con una sierra de diamante en la Sede Central de la Comisión Nacional de Energía Atómica. El uso de este instrumento es fundamental ya que cualquier instrumento de acero inoxidable introduce contaminaciones de cobalto, debido al alto contenido de este elemento en el acero. La figura 4-4 muestra una foto del fragmento central de los tres obtenidos luego del corte.

Esta muestra mostraba estar seriamente afectada por las condiciones climáticas u oxidada y en realidad era un fragmento sumamente inhomogéneo. En el laboratorio TANDAR se ha realizado un estudio particular de su composición utilizando un método de difracción de electrones EDAX [55]. Este método es capaz de identificar la concentración cualitativa de elementos químicos, sin tener en cuenta la forma en la que se presentan en el material. Es decir, no tienen en cuenta si están combinados para formar minerales ni otros compuestos. Por otra parte el método sólo puede detectar elementos con número atómico mayor que 10, es decir, el primer elemento que puede detectar es el sodio.

Este estudio detectó zonas muy diferentes en la muestra y las identificó en seis fracciones que difieren en su composición química. En la tabla 4-4 se resumen los resultados obtenidos. Ellos son una clara muestra de las inhomogeneidades que presenta este fragmento. Para la medición de radioisótopos con AMS es preciso disolver la muestra por lo que se obtienen valores promedios de esas diferentes regiones.

4.5.2 Muestras TPB, TPC, ANU-I y ANU-B

Estas cuatro muestras formaron parte de un fragmento que algún habitante de la región levantó del suelo en la zona de los cráteres, el cual fue donado al Ing. Tulio Palacios, del Dpto. de Materiales de la Comisión Nacional de Energía Atómica, quien amablemente cedió parte del material para este trabajo. En definitiva, no pertenece a ninguno de los fragmento conocidos. El fragmento original puede verse en la figura 4-5. De él se extrajo una tajada de la región central (figura 4-6), de la cual se extrajeron las muestras ANU-I y ANU-B. La primera es del interior, mientras que la segunda es del borde. La distancia entre estas dos muestras no era mayor que 3 cm. Por otra parte de un pequeño trozo de la corteza del fragmento inicial se extrajeron las muestras TPB y TPC. La primera de ellas era la más cercana a la región por donde este trozo se había cortado, es decir la más cercana al cuerpo del meteorito, mientras que TPC era claramente de la corteza. Nuevamente estas muestras no distaban en más de 3 cm.

La ubicación respecto al fragmento con el que se contaba para esta investigación, no tiene íntima relación con la posición original de las muestras en el meteorode madre, salvo por la distancia relativa entre ellas. Pero es imposible conocer de antemano y sin ninguna otra información, la ubicación preatmosférica de las muestras.

Fracción Nro./ Particularidades	Elemento	Porcentaje en la muestra [%]
1 / Aumento = 3200x1.3	Fe	95
	Ni	5
2 / Aumento = 3200x1.3	Al	2
	Fe	96
3 / Aumento = 3200x1.3	Ni	2
	Al	30
	Si	56
4a / Aumento = 3200x1.3 Superficie lisa (tipo punta de flecha)	Fe	14
	Al	13
	Si	74
	K	5
4b / Aumento = 3200x1.3	Fe	7
	Al	7
	Si	47
	K	2
5a / Aumento = 3200x1.3 Superficie muy lisa	Fe	44
	Mg	12
	Al	13.5
	Si	41.5
	K	8
	Ti	3
5b / Aumento = 3200x1.3	Fe	19.5
	Cu	2
	Al	3
	Si	17
	Ag	30
	Fe	22
6 / Aumento = 3200x1.3	Cu	17
	Zn	11
	Al	7
6 / Aumento = 3200x1.3	Si	21
	Fe	72

Tabla 4-4: Composición química de la muestra JFN1, obtenida por el método EDAX de difracción de electrones.

Figura 4-1: Ubicación en el mapa del campo de cráteres de Campo del Cielo.

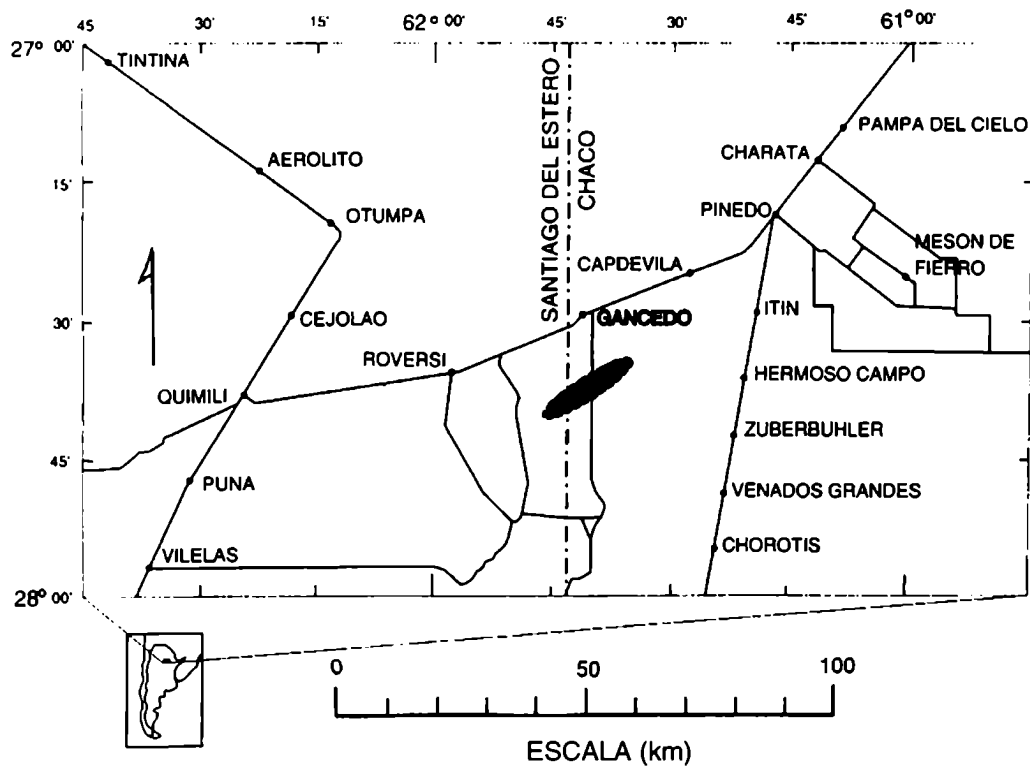


Figura 4-2: (Superior) Estructura de Widmanstätten en el meteorito de Campo del Cielo (200 X). (Inferior) Zona periférica del meteorito, bandas de Neumann (50X).

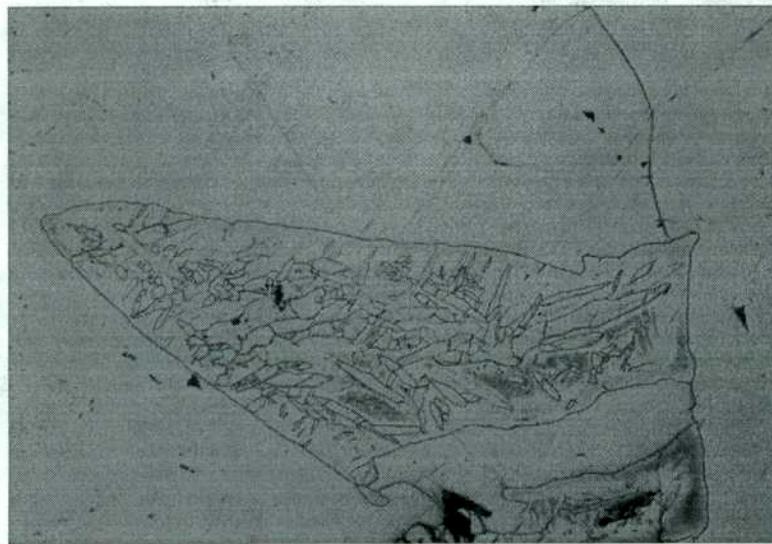
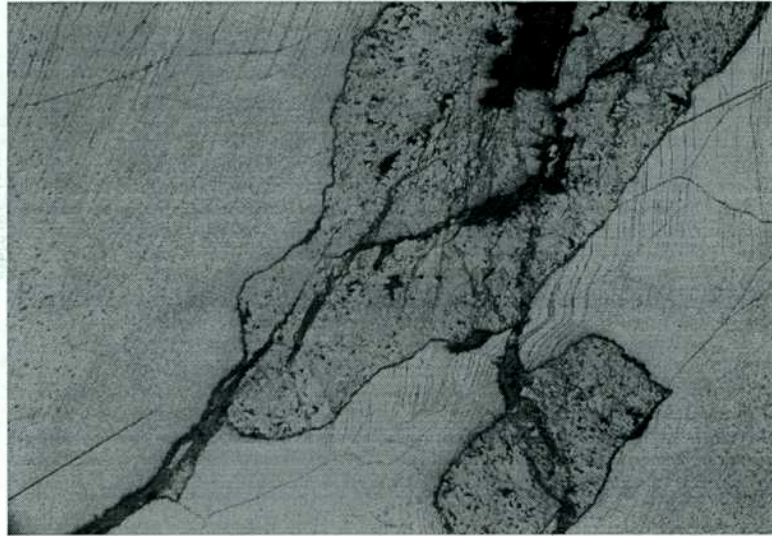


Figura 4-3: Corte transversal de El Taco. Se presume que los defectos que presenta en su interior son previos a la caída del meteorito a la Tierra.

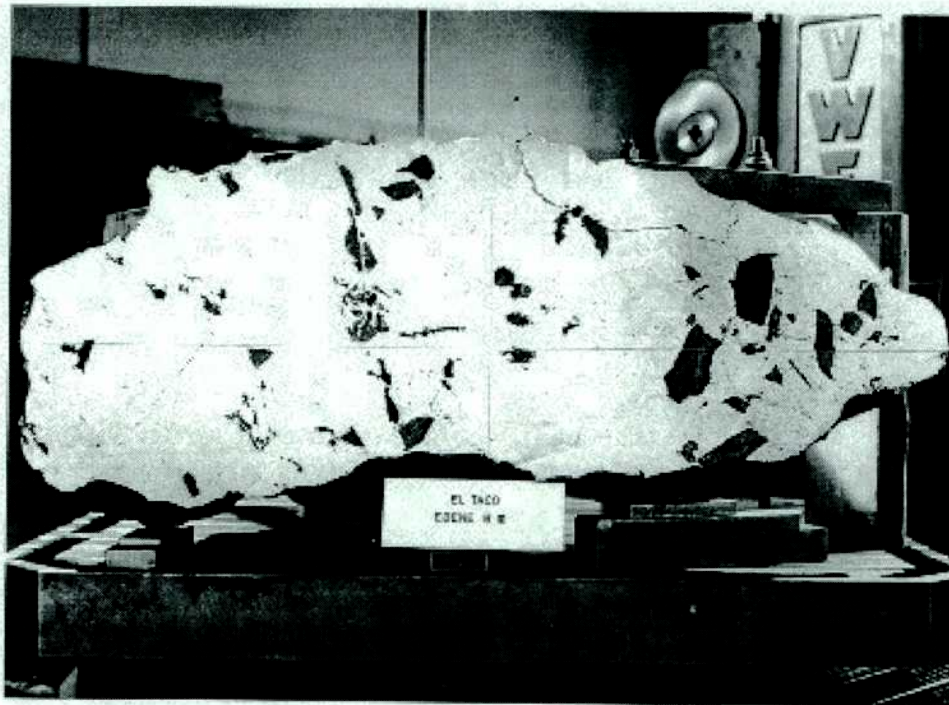


Figura 4-4: Muestra JFN1, antes de ser procesada químicamente.

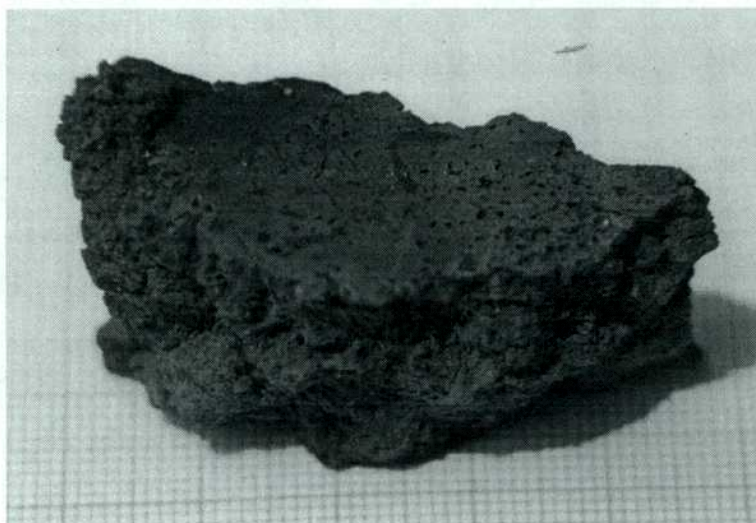


Figura 4-5: Foto del meteorito del que se tomaron las muestras ANU-I, ANU-B, TPC y TPB (0.75 X). La línea diagonal oscura cercana al centro de la figura es por donde se realizó el corte para obtener la tajada de la que se habla en el texto.

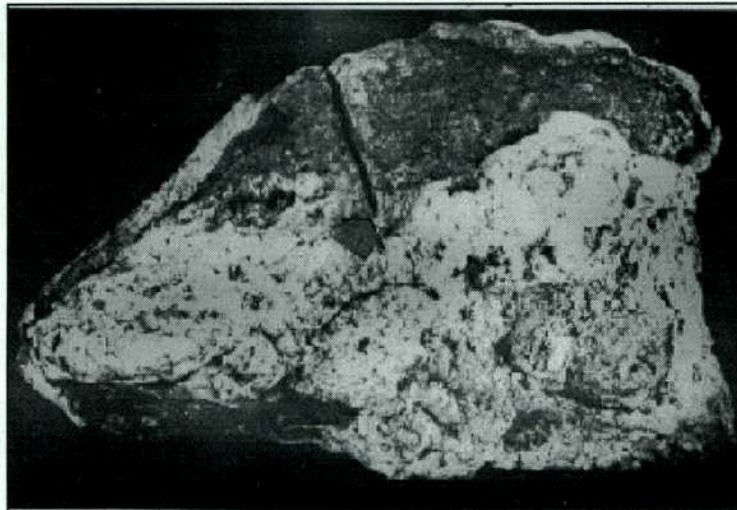


Figura 4-6: Tajada de meteorito de la cual se extrajeron las muestras ANU-I y ANU-B.



5 Experimentos realizados

En este capítulo se describen los experimentos realizados para la medición de la concentración de los radioisótopos ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca y ^{59}Ni . Estos han sido llevados a cabo en el acelerador de la ANU, pero se han realizado tareas preliminares en el laboratorio TANDAR. La sección 5.1 describe las generalidades de los experimentos, mientras que en las secciones 5.2 y 5.3 se describen las pruebas preliminares en el TANDAR y la medición de las muestras meteoríticas en la ANU, respectivamente.

5.1 Generalidades

La técnica de AMS para medir la concentración de un determinado radioisótopo, ya sea en forma absoluta o relativa (Sección 3.2.2) requiere el pasaje del/los isótopos estables (haces macroscópicos) a través del acelerador, para obtener los parámetros necesarios para acelerar al radioisótopo. El pasaje de éste se realiza "a ciegas", es decir, que no es posible medir su intensidad de corriente en ninguna copa de Faraday, sino directamente átomo por átomo en el detector de partículas, debido a su concentración extremadamente baja. Por ello, la tensión del terminal y los parámetros de la óptica iónica deben ser altamente estables.

Una vez determinado los valores óptimos para los diferentes componentes de la óptica iónica correspondientes al pasaje de un haz de iones estables, se inicia la secuencia de medición. La misma consiste en el pasaje del o los haces macroscópicos, durante un lapso corto de tiempo (del orden de 10 s), midiendo el valor integral de la intensidad de la corriente en ese lapso y luego el del radioisótopo de interés durante un tiempo que oscila entre los 10 y los 30 minutos, haciéndolo incidir en el detector. Esta secuencia se repite entre dos y tres veces por lo que el tiempo total de medición del radioisótopo es de entre 20 y 90 minutos. El intercambio de un haz al otro se realiza modificando el campo magnético del imán inyector (que es el que selecciona la masa de interés) y la tensión de terminal, como se explicó en la sección 3.3.3, manteniendo invariante el campo magnético del imán analizador.

Con el valor integral de la intensidad de corriente de los haces estables se calcula la relación isotópica $\frac{\text{radioisótopo}}{\text{isótopo estable}}$ a partir de la cual se obtiene la concentración y por lo tanto la actividad del radioisótopo por unidad de masa en la muestra.

Se define transmisión del acelerador, para un experimento al $\frac{\text{Número de iones salientes luego del imán analizador}}{\text{Número de iones entrantes al tanque}}$. Este parámetro se calcula, en particular en el TANDAR teniendo en cuenta el factor de rendimiento del estado de carga con el que se está trabajando, f . Este proviene de la distribución de carga aproximadamente gaussiana que se produce cuando un haz de iones (en este caso con una carga negativa) incide sobre una folia de carbono. Cada ion pierde una determinada cantidad de electrones generando la mencionada distribución del estado de carga saliente de la folia [37]. En general, en el TANDAR se selecciona el segundo más abundante con el objetivo de disminuir las contaminaciones que provienen de iones con estados de carga vecinos que realicen un intercambio de carga en la sección de alta energía del acelerador y adquieran la misma rigidez magnética que el ion de interés.

$$T = \frac{I(FC_{03})}{I(FC_{01}) \cdot q \cdot f} \quad (5-1)$$

donde $I(FC_{01})$ es la intensidad de corriente medida en la copa de Faraday a la entrada del tanque del acelerador, $I(FC_{03})$ es la medida en la que está ubicada luego del imán analizador (figura 3-1), q es el estado de carga seleccionado y f es la fracción del rendimiento de dicho estado de carga.

En la ANU, la transmisión no tiene en cuenta el factor de rendimiento del estado de carga y se calcula directamente como

$$T = \frac{I(FC_{bc})}{I(FC_{la}) \cdot q} \quad (5-2)$$

donde $I(FC_{bc})$ es la intensidad de corriente medida en la copa de Faraday de la línea experimental, justo delante del detector, $I(FC_{la})$ es la medida en la copa de Faraday de baja energía, justo a la salida de la fuente de iones y q es el estado de carga seleccionado.

El isótopo de interés y su isóbaro estable, por definición, tienen la misma masa, por lo que al seleccionarla en el imán, ambos nucleidos son inyectados en el acelerador, y adquieren igual energía y rigidez magnética de manera que pasan por la máquina y alcanzan el detector en forma idéntica. Aunque la presencia de los isóbaros en la naturaleza sea mínima, siempre es varios órdenes de magnitud mayor que la concentración del radioisótopo (por ejemplo, la abundancia natural del ^{36}S es de 0.017% [11], mientras que se espera una concentración de ^{36}Cl de 10^{-15}) por lo que en general producen una importante contaminación de fondo y es necesario separarlos e identificarlos en el detector de partículas.

5.2 Tareas preliminares en el laboratorio TANDAR

Por medio de las tareas preliminares realizadas en el laboratorio TANDAR se ha llegado al conocimiento y entendimiento de la técnica de AMS y al funcionamiento tanto de los aceleradores de partículas como al de los detectores utilizados. Por otra parte se ha logrado avanzar en la puesta en marcha y caracterización de nuevos instrumentos adquiridos por o diseñados en el laboratorio.

El TANDAR cuenta con varios sistemas de detección para realizar mediciones con AMS. Entre ellos el más comúnmente utilizado es un detector de tipo telescopio, que provee una señal de pérdida de energía dada por una cámara de ionización y una señal de energía residual dada por un detector de estado sólido. Por otra parte, se ha diseñado, especialmente para la aplicación de esta técnica una nueva cámara de ionización de ánodo segmentado [56] para ser montada dentro del espectrómetro magnético con que cuenta el laboratorio.

Las primeras experiencias realizadas en el TANDAR han sido orientadas al pasaje de haces de níquel (los cuales nunca antes habían sido acelerados aquí) y a la caracterización de la mencionada cámara

El espectrómetro magnético del laboratorio TANDAR está compuesto por un cuadripolo y dos dipolos (QDD magnetic spectrometer) y está emplazado de manera de recibir los productos de las reacciones nucleares producidas en una cámara de blancos emitidos dentro de un rango angular determinado por las ranuras de entrada al instrumento. La trayectoria de las partículas en la zona con campo magnético depende de su cociente p/q , con p el momento y q la carga de las mismas [57]. A continuación de esa región se coloca la cámara de ionización.

La cámara de ionización cuenta con un ánodo segmentado en cuatro regiones rectangulares, conectado a tierra. Las dos primeras secciones a su vez, están divididas en dos triángulos de los que se extraen señales independientes, con las que es posible obtener información acerca de la posición y ángulo de incidencia de las partículas incidentes. De las secciones rectangulares se extraen señales proporcionales a la pérdida de energía de los iones al pasar por debajo de ellas, y de la grilla de Frisch con que cuenta la cámara se extrae una señal proporcional a la energía total (figura 5-1).

Las pruebas realizadas con esta cámara han permitido evaluar su capacidad, no sólo de proporcionar información sobre la posición de incidencia de las partículas sino su utilidad en la separación de elementos de diferentes números atómicos Z .

En particular se han realizado experimentos con haces de ^{28}Si , ^{35}Cl y ^{32}S . Estos inciden sobre blancos de ^{197}Au y en la cámara de ionización se detectan los iones resultantes de la dispersión elástica de Rutherford [58]. Se muestra en la figura 5-2 un espectro bidimensional de la señal de la grilla, proporcional a la energía total de los iones vs. la energía residual de ellas al alcanzar la última sección rectangular de la cámara. El objetivo de este experimento ha sido probar la eficiencia de separación en número atómico de la cámara en partículas con energías similares, debido a que para ser correctamente

utilizada para AMS debe ser capaz de permitir la discriminación entre isóbaros, los cuales llegan con la misma energía al sistema de detección.

Para este trabajo se ha realizado, por primera vez, el pasaje de haces de níquel por el acelerador TANDAR. Para ello se prepararon cuatro muestras:

1. Ni metálico
2. Polvo de Ni (de origen comercial, 99.9% de pureza)
3. Polvo de Ni + Ag
4. Polvo de Ni + grafito.

Se seleccionó ^{58}Ni y ^{60}Ni en el imán inyector y se los aceleró por la máquina en forma secuencial, con el objeto de medir experimentalmente la relación isotópica real. El valor obtenido, a partir de la muestra de Ni + Ag ha sido de $(39.49 \pm 2.01)\%$ que se compara perfectamente con el valor teórico de 38.23%.

Una vez verificada la posibilidad de trabajar con haces de níquel en el laboratorio TANDAR, se han realizado dos mediciones más, tendientes a caracterizar el comportamiento de la cámara de ionización de ánodo segmentado con este nucleido.

1. Distribución de los estados de carga de ^{58}Ni , resultantes de la dispersión elástica sobre ^{197}Au
2. Contaminaciones isotópicas.

Para medir la distribución de los estados de carga producidos por la dispersión de ^{58}Ni sobre ^{197}Au , se utilizó la capacidad del espectrómetro magnético de desviar iones con diferente rigidez magnética (p/q). Dado que el momento de las partículas que llegan al espectrómetro es el mismo, la trayectoria depende del estado de carga, lo que se refleja en las diferentes posiciones de incidencia sobre el detector. La sensibilidad a la posición de incidencia de la cámara de ionización ha permitido identificar los estados de carga de los iones y generar la distribución que se muestra en la figura 5-3.

Finalmente, se ha realizado una medición de contaminaciones isotópicas a partir de una muestra de Ni irradiado con neutrones en el reactor RA-1 del Centro Atómico Constituyentes, para obtener artificialmente ^{59}Ni como producto de la reacción $^{58}\text{Ni}(n,\gamma)^{59}\text{Ni}$. La concentración nominal de ^{59}Ni , respecto del Ni, en esta muestra era de aproximadamente 5×10^{-10} . Lamentablemente no ha sido posible alcanzar la sensibilidad suficiente para detectar el ^{59}Ni ni su isóbaro el ^{59}Co . Sólo ha sido posible identificar los isótopos estables del Ni, ^{58}Ni y ^{60}Ni , como puede verse en la figura 5-4.

Los resultados obtenidos en estas pruebas preliminares en el laboratorio TANDAR llevaron a concluir que es necesario aún perfeccionar la técnica y mejorar la sensibilidad de los detectores utilizados para la detección e identificación de los radioisótopos de vida media larga que se pretende medir en este trabajo. Actualmente se están llevando a cabo esas mejoras, con la incorporación de un detector de Bragg, que está siendo probado con ^{36}Cl .

5.3 Medición de muestras meteoríticas en la ANU

Las concentraciones esperadas de los radioisótopos de vida media larga a medir en el meteorito de Campo del Cielo, menores que 10^{-13} han requerido la utilización de un sistema con mayor sensibilidad que la alcanzada en el TANDAR hasta el momento. Esta es la razón por la cual las muestras han sido medidas en el acelerador de la ANU. A continuación se detallan los detectores utilizados y luego las condiciones de los experimentos realizados para cada uno de los isótopos radiactivos.

5.3.1 Detectores utilizados

Para la detección de los radionucleidos se ha trabajado con dos cámaras de ionización de ánodo segmentado similares a la del laboratorio TANDAR. La diferencia reside en que éstas no son sensibles ni a la posición ni al ángulo con los que inciden las partículas. En la figura 5-5 se muestra un esquema del detector utilizado en la medición de ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca y ^{59}Ni .

En todos los casos, se ha utilizado propano a presiones diferentes según el radioisótopo a medir. La ventana que confina el gas dentro del detector es de mylar de $1.5\ \mu\text{m}$ de espesor. Los electrones producidos por el pasaje del ion energético derivan hacia el ánodo en forma transversal al campo eléctrico. El ánodo está dividido en secciones (ΔE_1 , ΔE_2 , ΔE_3 , ΔE_4), cada una de las cuales colecta esos electrones y entrega una señal proporcional a la pérdida de energía de la partícula en ese tramo del detector, mientras que la última sección entrega una señal proporcional a la energía residual de la partícula, E_{res} . Dado que la pérdida de energía de un ion luego de interactuar con las moléculas de un gas es función de su número atómico Z , combinando las señales asociadas a cada región es posible separar e identificar los isóbaros.

El detector cuenta con dos grillas: la grilla de Frisch ($V_G = +400\ \text{V}$) sirve para que la señal que llega al ánodo sea independiente de la posición en la que se formó el par iónico producido por la interacción de la partícula incidente con las moléculas del gas. Por otra parte, hay una segunda grilla conectada a tierra y acoplada al cátodo por medio de un capacitor, que da una señal proporcional a la energía total de la partícula incidente, E_m . Si este acoplamiento capacitivo no existiera dicha señal sería nuevamente dependiente de la posición de formación del par protón-electrón. La separación más efectiva entre los isóbaros se produce si el máximo de pérdida de energía (pico de Bragg) de cada especie (el radioisótopo y su isóbaro) se produce en ubicaciones bien diferenciadas en el detector.

El detector utilizado para la detección de ^{10}Be es una variación sobre el recientemente explicado. En la figura 5-6 puede verse el esquema correspondiente.

El isóbaro estable del ^{10}Be es el ^{10}B y como se explicó, ambos realizan exactamente la misma trayectoria hasta llegar al detector de partículas. Si bien la química de la preparación de las muestras contempla la limpieza del boro, las tasas de conteo de ^{10}B exceden aún, en general, la capacidad de separación de los detectores en general utilizados. La solución a este inconveniente surge del

aprovechamiento de la diferencia en el rango del ^{10}B y del ^{10}Be , de manera que el segundo todavía tiene aproximadamente un 40% de su energía inicial cuando el primero se ha frenado completamente [5]. Esto puede verse en la figura 5-7 donde también se muestra la diferencia entre la pérdida de energía en función de la distancia recorrida dentro del detector para ambas especies ($E = 38 \text{ MeV}$, 84 Torr de freón, CF_4). Por esto, los iones de ^{10}B son frenados en la primera región de gas o en la ventana del detector, mientras los de ^{10}Be continúan su trayectoria depositando la energía residual en el detector.

Si el flujo de ^{10}B es considerable puede dar lugar a otra contaminación posible: los iones de ^7Be que resultan de la reacción $^1\text{H}(^{10}\text{B}, ^7\text{Be})^4\text{He}$. Por lo tanto, es necesario evitar cualquier componente de hidrógeno en el gas y las ventanas del detector. El gas elegido ha sido freón y la ventana es de una aleación de Co/Cr/Fe/Ni/W, con el cobalto como componente principal, conocido como havar.

El detector cuenta con dos cátodos desacoplados: uno, a la entrada del detector, que es la región de frenado del ^{10}B , que es el isóbaro estable del ^{10}Be , mientras que el segundo es el sector donde el ^{10}Be deposita toda su energía residual. En la primera región, la grilla conectada a tierra (ver descripción del detector de Cl, Al, Ca y Ni) es reemplazada por una placa metálica para evitar que los electrones producidos en la ionización del freón por el ^{10}B alcancen el ánodo. El detector cuenta con una región encerrada entre dos placas, ubicadas cerca de la ventana de entrada que funciona como cámara de ionización, en sí misma, para la medición de la corriente de ^{10}B .

5.3.2 Medición de los diferentes isótopos

5.3.2.1 Berilio 10 ($T_{1/2} = 1.6 \times 10^6$ años)

El berilio no forma iones negativos estables por lo que las muestras son preparadas como óxido de berilio. Para asegurar la conductividad térmica y eléctrica de la muestra, en la misma preparación se mezcla nitrato de plata (AgNO_3 , Apéndice 9.1). El ion seleccionado en la fuente de iones es BeO^+ .

Seleccionar un ion molecular tiene dos consecuencias:

1. El estado de carga promedio es menor que el que se obtendría inyectando $^{10}\text{Be}^+$ ya que en este caso, éste sólo lleva el 10/26 del total de la energía de la molécula al llegar al removedor de electrones en el terminal.
2. Es necesario utilizar un removedor de electrones gaseoso. Si se usara solamente un removedor de electrones sólido, se producirían pérdidas debido a la "explosión coulombiana" de la molécula: la fuerte repulsión electrostática entre los átomos de Be y O inmediatamente después de haber pasado por la folia de carbono, agregaría componentes transversales y longitudinales a la dirección del haz. Las pérdidas serían consecuencia, entonces, de una creciente divergencia del haz y de una dispersión en la energía, que excedería la aceptación del sistema de análisis de post-aceleración. El

removedor de electrones gaseoso disocia la molécula más lentamente minimizando estos efectos. En este trabajo se ha utilizado N₂ a una presión de 46 mTorr.

Como se dijo, el isóbaro estable es el ¹⁰B y la relación isotópica ¹⁰Be/⁹Be se ha determinado inyectando ¹⁰BeO⁻ y ⁹BeO⁻ de manera secuencial, utilizando al ⁹Be como nucleido para sintonizar la máquina. Este isótopo es acelerado en dos condiciones diferentes, con los diafragmas y aberturas ubicadas a lo largo del acelerador mínimamente abiertas (es lo que comúnmente se llama “ranuras cerradas”), con lo que se consigue un haz de sección pequeña y luego abiertas al máximo, minimizando la pérdida de iones por choques en los bordes de las mencionadas aberturas. Cuando se está midiendo el radioisótopo de interés, las aberturas y diafragmas permanecen abiertos el máximo posible.

La masa seleccionada es 26, correspondiente tanto al ion molecular de interés ¹⁰Be¹⁶O⁻ como al de ⁹Be¹⁷O⁻, por lo que ambos iones son aceptados por el imán inyector. El removedor de electrones produce la ruptura de estos iones pero el ¹⁷O mantiene la rigidez magnética necesaria para ser aceptado también por el imán analizador. Luego es desviado por el filtro de velocidades, cuyos valores de campos eléctrico y magnético dejan intacta la trayectoria del ¹⁰Be pero desvían la del ¹⁷O y la de las demás las contaminaciones. Sin embargo, se utiliza una copa de Faraday ubicada fuera del eje de la línea experimental y delante del detector de partículas para medir la corriente de iones de ¹⁷O provenientes de la molécula ⁹Be¹⁷O, para utilizarla luego como valor de normalización.

Ion a medir:	¹⁰ Be ³⁺
Muestra:	BeO ₂ + AgNO ₃
Ion inyectado en la fuente de iones:	BeO ⁻
Ion utilizado para sintonizar el acelerador:	⁹ BeO ⁻
Secuencia (Tiempos)	⁹ Be (10 s) – ¹⁰ Be (30 min), repetida 3 veces.
Intensidad de corriente de ⁹ BeO ⁻ en FC _{bc} - FC _{la} :	250 nA – 160 nA (ranuras cerradas)
Transmisión (para ⁹ Be)	21.3%
Haz:	Continuo
Tensión del terminal:	8 MV
Removedor de electrones:	gaseoso (N ₂ a 46 mTorr)
Energía de los iones:	34 MeV
Gas del detector:	Freón a 84 Torr

Tabla 5-1: Condiciones de irradiación para ¹⁰Be.

La tensión en el terminal del acelerador ha sido de 8 MV, con lo que la energía final del ¹⁰Be³⁺ es de 32 MeV. La máxima tensión alcanzable en el acelerador de la ANU es de 15 MV, pero en este caso se han utilizado barras cortocircuitadoras (*shorting rods*), las cuales realizan cortocircuitos en algunas secciones del tubo de aceleración. Esto tiene dos consecuencias, la primera es que la tensión máxima alcanzable pasa a ser 10.5 MV y la segunda es que las secciones del tubo que no quedan en cortocircuito funcionan como lentes de enfoque adicionales. En la tabla 5-1 se resumen las condiciones de irradiación.

5.3.2.2 Aluminio 26 ($T_{1/2} = 7.2 \times 10^5$ a)

El isóbaro del ^{26}Al es el ^{26}Mg . Si bien los iones moleculares de AlO^- y de MgO^- se producen de manera igualmente prolífica y con mayor rendimiento que el ion atómico Al^- , se ha elegido inyectar este último para eliminar desde el comienzo la contaminación isobárica del ^{26}Mg . Éste no forma iones negativos y por lo tanto, no puede ser extraído de la fuente de iones. La principal limitación, en este caso, proviene de la muy baja afinidad electrónica del aluminio por lo que no forma iones negativos fácilmente. Para solucionarlo, la muestra, que se prepara como óxido de aluminio (Al_2O_3), se mezcla con una cantidad similar en masa de nitrato de plata (AgNO_3) lo cual asegura buena conducción térmica y eléctrica.

Se ha seleccionado un estado de carga impar para disminuir las contaminaciones de fondo altas de ^{13}C que aparecen en caso contrario. Por ejemplo, seleccionando $^{26}\text{Al}^{6+}$, se habría obtenido, como contaminación no deseada, una intensa tasa de conteo de $^{13}\text{C}^{3+}$, dado que estos iones son inyectados en forma de molécula en el imán inyector (C_2), mientras que en la parte de alta energía del acelerador adquieren el mismo momento y la misma rigidez magnética que el $^{26}\text{Al}^{6+}$ (tienen el mismo cociente p/q), por lo que son igualmente aceptados por todos los selectores eléctricos y magnéticos. Antes de incidir sobre el detector, el haz atraviesa el filtro de velocidades que desvía la trayectoria de las contaminaciones y deja intacta la del ^{26}Al . En la tabla 5-2 se presentan las condiciones de irradiación del ^{26}Al .

Ion a medir:	$^{26}\text{Al}^{7+}$
Muestra:	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{AgNO}_3$
Ion inyectado en la fuente de iones:	Al^-
Ion utilizado para sintonizar el acelerador:	$^{27}\text{Al}^-$
Secuencia (Tiempos):	^{27}Al (10 s) – ^{26}Al (20 min) (repetida 3 veces)
Intensidad de corriente de $^{27}\text{AlO}^-$ en $\text{FC}_{\text{be}} - \text{FC}_{\text{ia}}$:	40 nA – 32 nA (ranuras cerradas) 80 nA – 40 nA (ranuras abiertas)
Transmisión (para ^{27}Al)	11% (ranuras cerradas) 7% (ranuras abiertas)
Haz:	Continuo
Tensión del terminal:	11.396 MV
Removedor de electrones:	Sólido
Energía de los iones:	91.168 MeV
Gas del detector:	Propano a 144 Torr

Tabla 5-2: Condiciones de irradiación para ^{26}Al .

5.3.2.3 Cloro 36 ($T_{1/2} = 3 \times 10^5$ años)

Los isóbaros estables del ^{36}Cl son el ^{36}S y el ^{36}Ar . Este último no forma iones negativos por lo que no se forma en la fuente de iones y no constituye una fuente de contaminación. Sin embargo, el ^{36}S ,

cuya presencia en la naturaleza es de 0.017% [11], no sólo es extraído de la fuente de iones, sino que al tener la misma masa que el radioisótopo de interés, sigue su misma trayectoria a lo largo de todo el acelerador. Por ello puede convertirse en un importante contaminante. Si bien en la preparación química de las muestras de cloro (ver Apéndice 9.1) se realiza un proceso para eliminar al máximo la presencia de azufre natural, aún reduciéndola a algunas partes por millón, resulta mucho mayor que la concentración del ^{36}Cl , que se espera sea del orden de 10^{-15} . Por ello se utilizan detectores como el explicado en la sección 5.3.1, capaces de discriminar en número atómico y por lo tanto de separar los isóbaros.

La intensidad de corriente de ^{35}Cl en la copa de Faraday de baja energía es de entre 5 y 10 μA , que de ser llevada a lo largo de todo el acelerador lo cargaría electrostáticamente impidiendo la medición de ^{36}Cl . Para evitarlo, en este caso se trabaja con el haz pulsado, interrumpiéndolo durante 990 μs y dejando que continúe su trayectoria durante 10 s. Esto implica que la intensidad de corriente de ^{35}Cl que pasa a través de la máquina es el 1% de la corriente extraída de la fuente de iones. En la tabla 5-3 se resumen las condiciones de irradiación de ^{36}Cl .

La secuencia de medición, en este caso, incluye dos isótopos estables, ^{35}Cl y ^{37}Cl . El ^{35}Cl se utiliza en primera instancia para sintonizar el acelerador y luego, se realizan dos intervalos de 10 s cada uno en los que se miden los isótopos estables y luego un intervalo de 10 min. en los que se mide ^{36}Cl . Esta secuencia se repite tres veces.

Ion a medir:	$^{36}\text{Cl}^{10+}$
Muestra:	ClAg
Ion inyectado en la fuente de iones:	Cl^-
Ion utilizado para sintonizar el acelerador:	$^{35}\text{Cl}^-$
Secuencia:	^{35}Cl (10s) – ^{37}Cl (10s) – ^{36}Cl (10 min) (repetida tres veces).
Intensidad de corriente de $^{35}\text{Cl}^-$ en FC_{bc} - FC_{la} :	100 nA – 70 nA (ranuras cerradas)
Transmisión (para ^{35}Cl)	7.1%
Haz:	Pulsado (interrupción: 99 % del tiempo)
Tensión del terminal:	14 MV
Removedor de electrones:	Sólido
Energía de los iones:	154 MeV
Gas del detector:	Propano a 187 Torr

Tabla 5-3: Condiciones de irradiación de ^{36}Cl .

5.3.2.4 Calcio 41 ($T_{1/2} = 1 \times 10^5$ años)

AMS para ^{41}Ca requiere inyectar un ion molecular ya que si bien el ion Ca^- es estable, su energía de ligadura es muy baja, por lo que la probabilidad de formarlo en la fuente de iones muy pequeña. El material resultante de la preparación química (Apéndice 9.1) es fluoruro de calcio (CaF_2),

del cual, si bien es relativamente sencillo de preparar químicamente (Apéndice 9.1), es difícil extraer alta intensidad de corriente. Por ello, en el prensado de cada muestra agrega polvo de plata para garantizar la conductividad térmica y eléctrica. Del fluoruro de calcio se extrae el ion CaF_3^+ , el cual es inyectado en el acelerador. Esta elección elimina la contaminación isobárica del ^{41}K , ya que el ion KF_3^+ no es estable.

Debido a la inyección del ion molecular debe utilizarse el removedor de electrones gaseoso, al igual que en el caso del ^{10}Be , para evitar la explosión coulombiana en el momento de la rotura de la molécula. Por otra parte, también se usa la folia de carbono para aumentar el estado de carga resultante luego de la remoción de electrones y por lo tanto la energía del haz que incide en el detector. En la tabla 5-4 se resumen las condiciones de irradiación del ^{41}Ca .

Ion a medir:	$^{41}\text{Ca}^{7+}$
Muestra:	CaF_2 + polvo de plata (agregado en el momento del prensado de la muestra)
Ion inyectado en la fuente de iones:	CaF_3^+
Ion utilizado para sintonizar el acelerador:	$^{40}\text{Ca}^+$
Secuencia:	^{40}Ca (10s) – ^{41}Ca (10 min.) repetida tres veces
Intensidad de corriente de ^{40}Ca en FC_{be} - FC_{ia} :	40 nA – 9 nA (ranuras cerradas) 90 nA – 24 nA (ranuras abiertas)
Transmisión (para ^{40}Ca)	3.2% (ranuras cerradas) 3.8% (ranuras abiertas)
Haz:	Continuo
Tensión del terminal:	13.648 MV
Removedor de electrones:	gaseoso + sólido
Energía de los iones:	109 MeV
Gas del detector:	Propano a 80 Torr

Tabla 5-4: Condiciones de irradiación para ^{41}Ca .

En este caso se ha utilizado, también, el filtro de velocidades para disminuir las contaminaciones que llegan al detector, y que de otra manera, enmascararían las cuentas de ^{41}Ca . En particular, la figura 5-8 ilustra la importancia de este instrumento mostrando dos espectros tomados con y sin filtro de velocidades, para una muestra *blank*.

Dado que en la fuente de iones se inyecta masa 98 ($^{41}\text{Ca}^{19}\text{F}_3$), en principio en el acelerador entra una variedad de moléculas que pudieran extraerse de la muestra con esa masa. Cuando cada ion molecular atraviesa el removedor de electrones, se rompe y como consecuencia, diferentes iones son acelerados en la zona de alta energía de la máquina. Aquéllos que adquieren, por intercambios de carga, la misma rigidez magnética que el ion de interés, en este caso $^{41}\text{Ca}^{7+}$, son aceptados por el imán analizador. Es aquí cuando se aplica el filtro de velocidades que desvía la trayectoria de gran parte de

ellos. Sin embargo, dado que el filtro tiene un determinado rango de aceptación ($\Delta y = 6$ mm), algunas de las contaminaciones inciden de todas maneras en el detector.

En particular, en el espectro tomado con filtro de velocidades de la figura 5-8 pueden verse iones de $^{82}\text{Se}^{14+}$, los que provienen de la molécula $^{82}\text{Se}^{16}\text{O}$ y cuya tasa de conteo puede ser del orden de 1300 partículas/seg. También aparece una combinación de iones de $^{64}\text{Zn}^{11+}$ y $^{65}\text{Cu}^{11+}$. Aparecen también algunos iones de ^{41}K , los cuales pueden ser producto de la inyección de moléculas tales como $^{41}\text{K}^{19}\text{F}_2^{18}\text{OH}$, $^{41}\text{K}^{19}\text{F}_2^{16}\text{OH}_3$, $^{41}\text{K}^{19}\text{F}_2^{12}\text{C}^7\text{Li}$. Dado que el ^{41}K sigue exactamente la misma trayectoria que el ^{41}Ca dentro del acelerador, no se requiere ninguna colisión que provoque intercambio de carga para que el primero aparezca como contaminación. La tasa de conteo típica es de 0.5-3 partículas/seg, por lo que es claramente separable del ^{41}Ca . En la tabla 5-5 se detallan las energías calculadas y las desviaciones de la trayectoria provocadas por el filtro de velocidades para algunas especies [59].

Ion	Energía (MeV)	Desviación (mm)
$^{82}\text{Se}^{14+}$	202.1	0
$^{64}\text{Zn}/^{65}\text{Cu}^{11+}$	159.8/157.4	1.7/-2.3
$^{47}\text{Ti}^{8+}$	115.1	-0.8
$^{41}\text{K}^{7+}$	101.04	0
$^{35}\text{Cl}^{6+}$	87.3	1.1

Tabla 5-5: Contaminaciones en el espectro de E_{res} vs. E_{tot} , para una muestra *blank* durante la medición de ^{41}Ca .

5.3.2.5 Níquel 59 ($T_{1/2} = 7.5 \times 10^4$ años)

El isóbaro estable del ^{59}Ni , el ^{59}Co aparece en la naturaleza en una abundancia del 100%, por lo que siempre aparece como contaminante. Para llevar a cabo una buena separación e identificación entre el ^{59}Co y el ^{59}Ni es fundamental llegar químicamente a una concentración de ^{59}Co del orden o menor que 100 ppb, y en tal caso es posible la detección utilizando el mismo detector que el ^{36}Cl [5]. Sin embargo, es posible que el fondo de contaminación debido al ^{59}Co sea todavía importante respecto del radioisótopo, por lo que es necesaria una identificación adicional. Para ello se agrega una señal proporcional al tiempo de vuelo de los iones entre las secciones ΔE_1 y ΔE_4 del detector, provista por un convertidor de tiempo a amplitud (TAC) conectado entre ellos. En la sección 6.6 se explica en detalle su utilidad.

Como resultado de la química (Apéndice 9.1) se obtiene óxido de níquel (NiO), el cual se coloca en la fuente de iones. Este material tiene buena conductividad térmica y eléctrica por lo que no se le agrega polvo de plata. Se ha inyectado Ni por lo que se ha utilizado únicamente el removedor de electrones sólido. En la tabla 5-6 pueden verse las condiciones de irradiación para el ^{59}Ni .

Ion a medir:	$^{59}\text{Ni}^{14+}$
Muestra:	NiO
Ion inyectado en la fuente de iones:	Ni^+
Ion utilizado para sintonizar el acelerador:	$^{58}\text{Ni}^+$
Secuencia:	^{58}Ni (10s) - ^{60}Ni (10s) - ^{59}Ni (10 min.) repetida tres veces.
Intensidad de corriente de ^{59}Ni en FC_{be} - FC_{la} :	62 nA - 13 nA (ranuras cerradas) 175 nA - 28 nA (ranuras abiertas)
Transmisión (para ^{59}Ni)	1.5% (ranuras cerradas) 1.2% (ranuras abiertas)
Haz:	Continuo
Tensión del terminal:	14 MV
Removedor de electrones:	sólido
Energía de los iones:	210 MeV
Gas del detector:	Propano a 155 Torr

Tabla 5-6: Condiciones de irradiación para ^{59}Ni .

Figura 5-1: Cámara de ionización de ánodo segmentado del laboratorio TANDAR. El ánodo se muestra con su diseño original. Posteriormente se utilizaron sólo las dos primeras secciones subdivididas en triángulos.

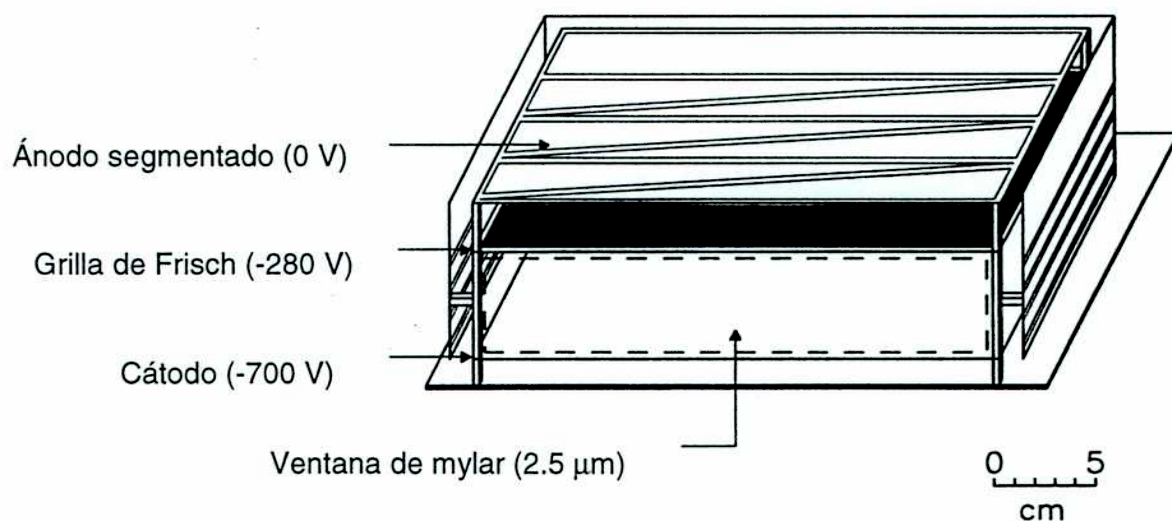


Figura 5-2: Espectro bidimensional que muestra la capacidad de la cámara de ionización de ánodo segmentado para separar números de distinto número atómico y energía similar.

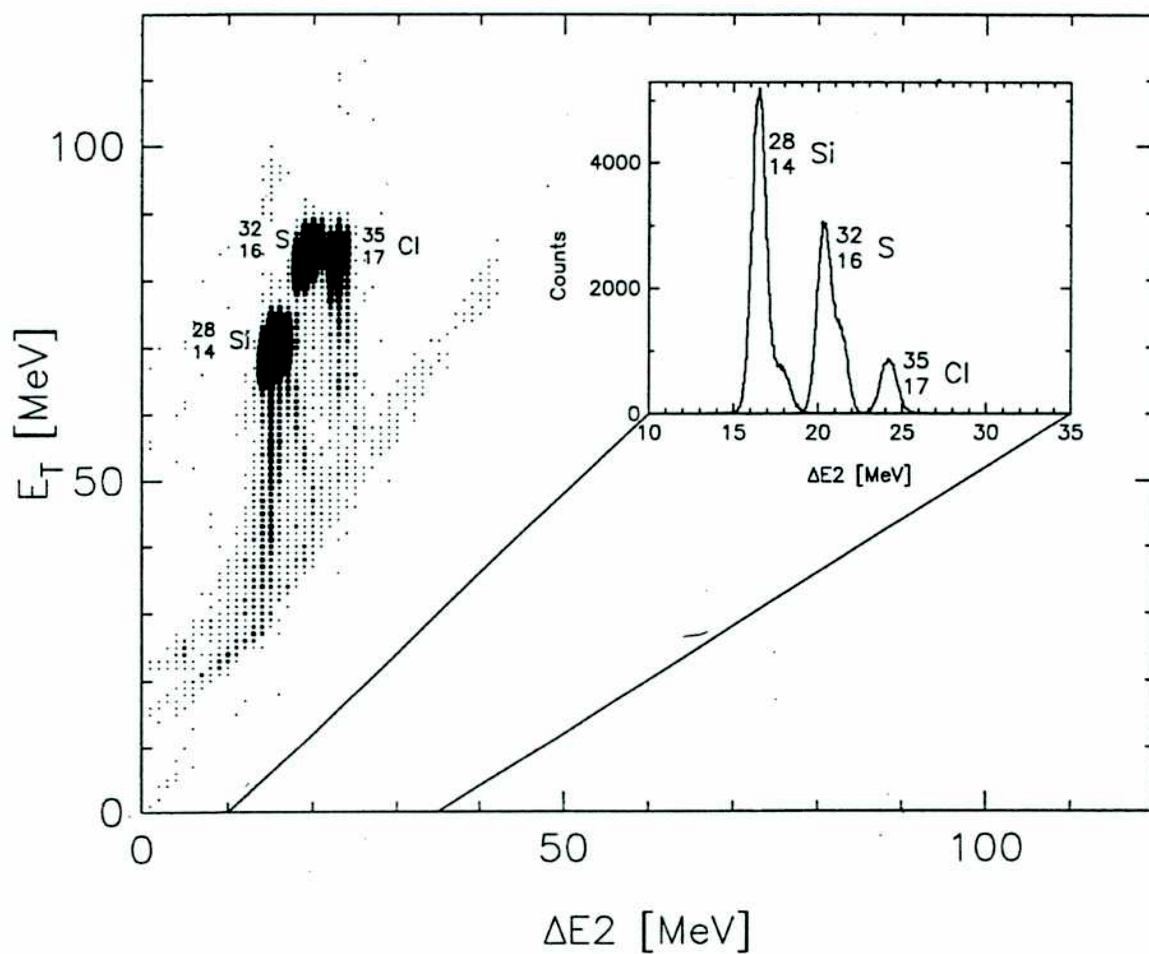


Figura 5-3: Distribución de estados de carga de ^{58}Ni a 113 MeV.

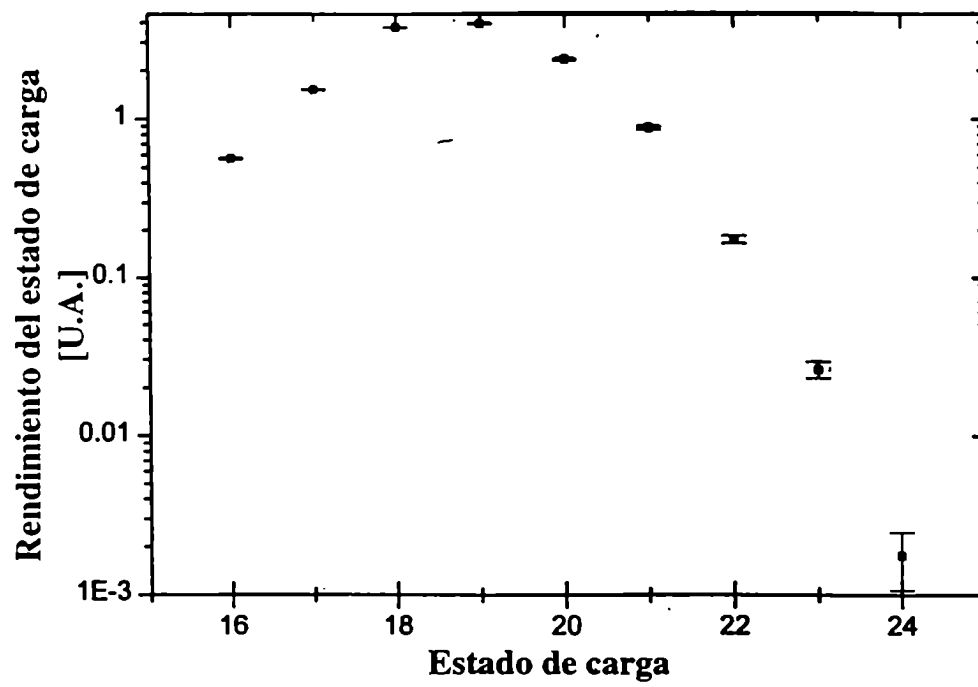


Figura 5-4: Espectro bidimensional de E_{tot} vs E_{res} tomado con la cámara de ionización de ánodo segmentado del TANDAR. Se muestran los eventos correspondientes a los isótopos estables del ^{59}Ni , ^{58}Ni y ^{60}Ni

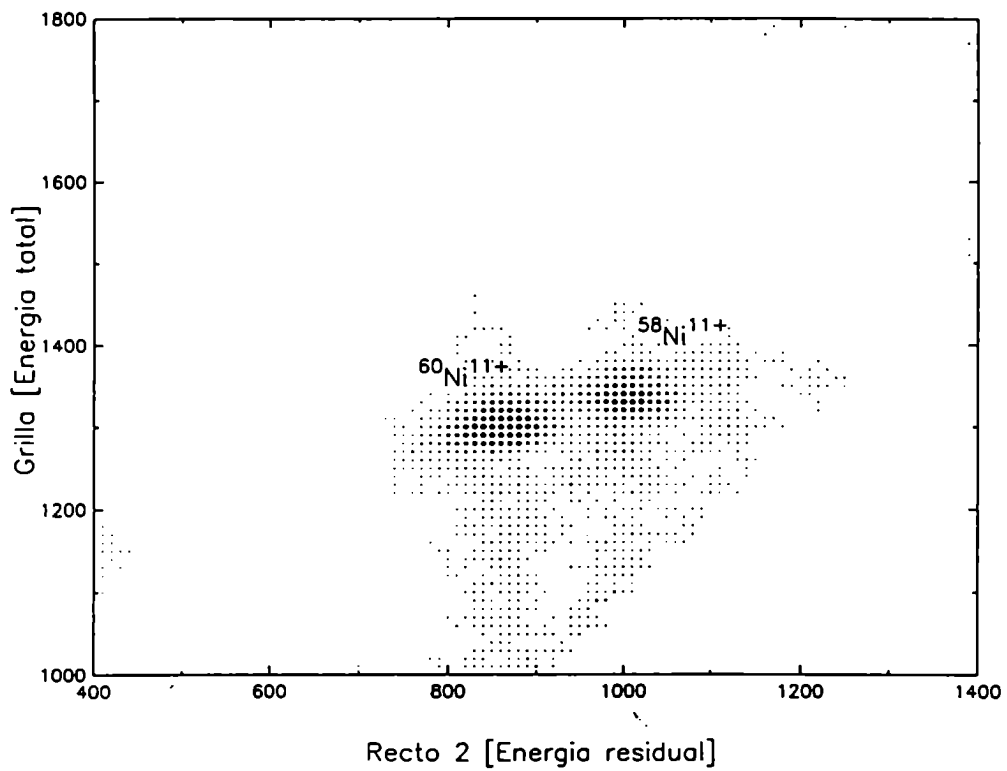


Figura 5-5: Detector utilizado para la medición de los radioisótopos ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca y ^{59}Ni .

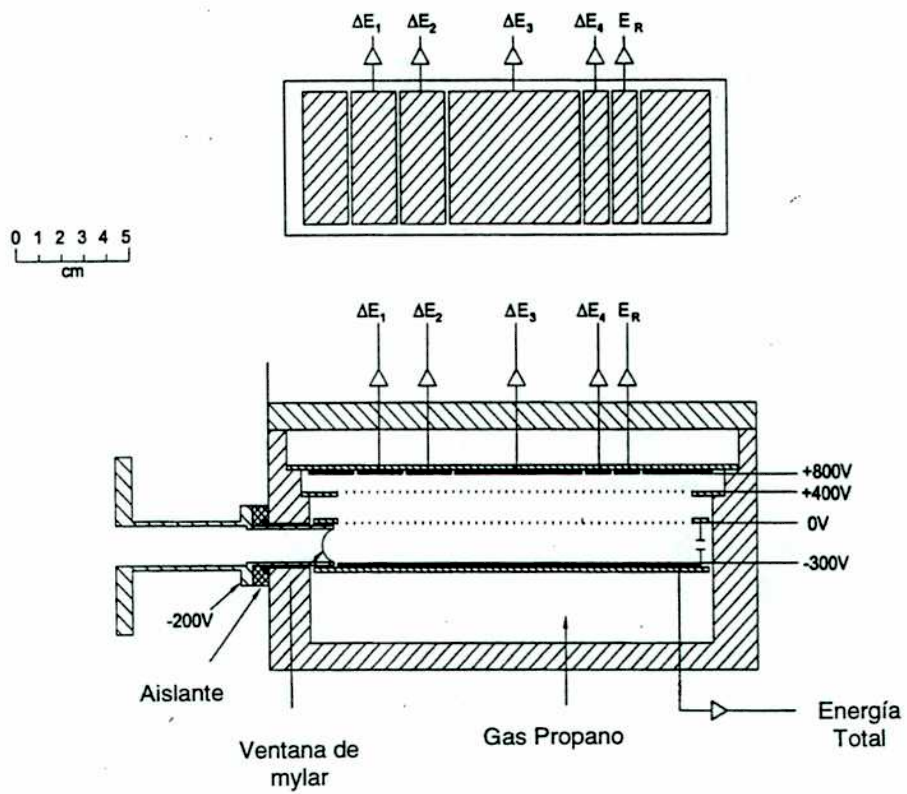


Figura 5-6: Detector utilizado para la medición de ^{10}Be .

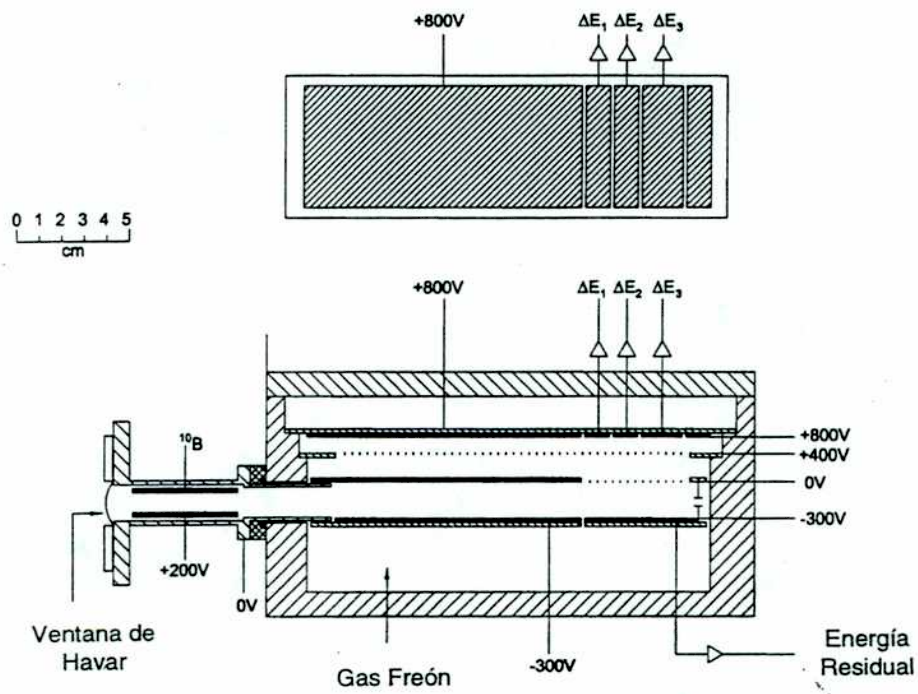


Figura 5-7: Pérdida de energía y energía en función de la distancia recorrida dentro del detector para ^{10}B y ^{10}Be de 38 MeV a una presión de 84 Torr de freón (CF_4). Puede verse que mientras el ^{10}B se ha frenado completamente en la región correspondiente, el ^{10}Be conserva aproximadamente el 40% de su energía inicial.

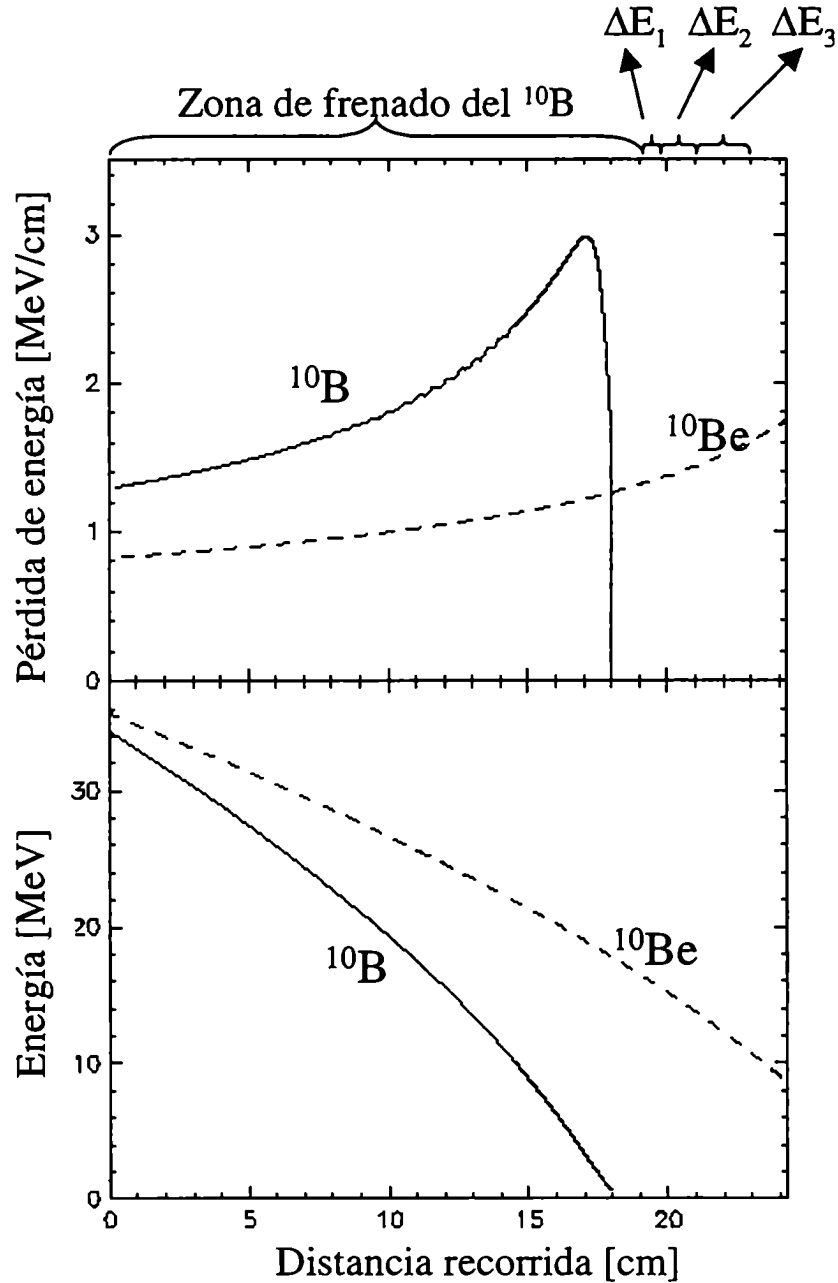
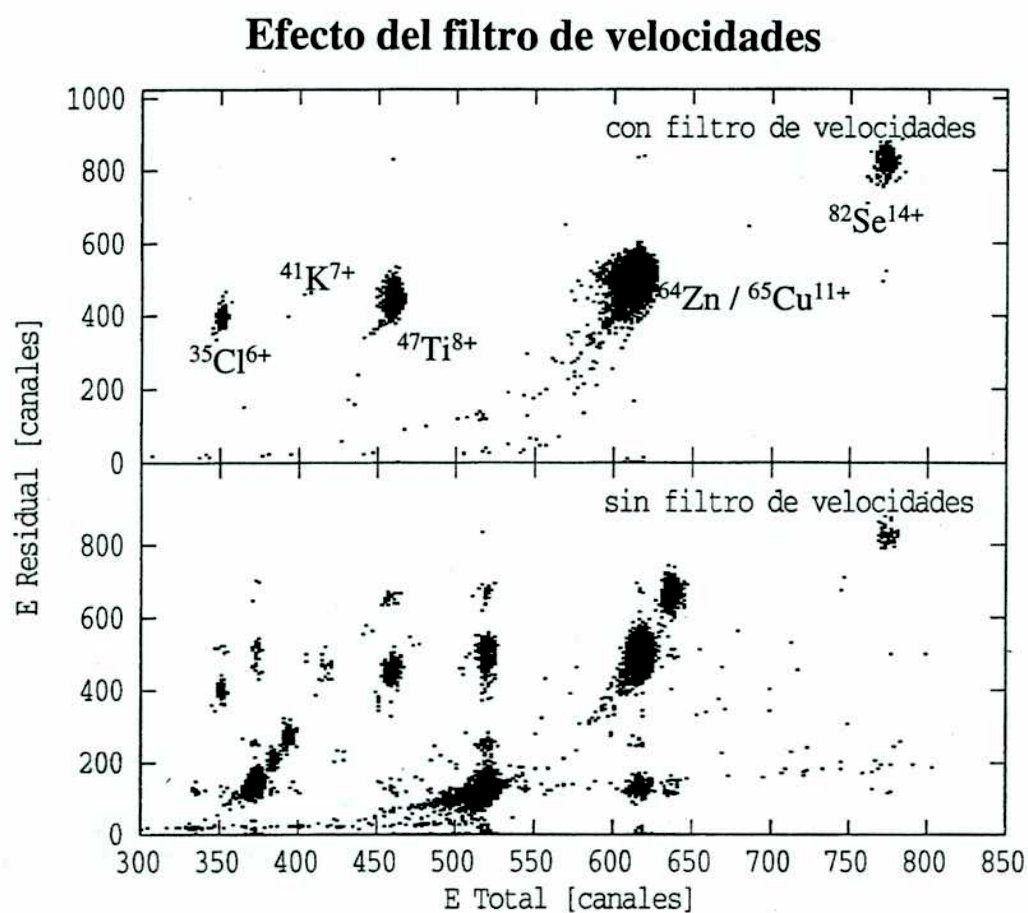


Figura 5-8: Espectros de energía residual vs. energía total tomados con y sin filtro de velocidades para la detección de ^{41}Ca . Debe considerarse que se trata de una muestra *blank* por lo que en ninguno de los dos casos se visualiza el radionucleido mencionado.



6 Resultados

Se describen aquí los resultados obtenidos en la medición de las muestras meteoríticas (sección 5.3). En primer lugar se describen las generalidades comunes a todos los experimentos y luego, separado en diferentes secciones, los valores de concentración obtenida para cada uno de los diferentes radioisótopos.

6.1 Generalidades

En este trabajo se han utilizado las dos maneras de medición ya mencionadas: la concentración de ^{36}Cl ha sido medida en forma absoluta y los otros cuatro radioisótopos en forma relativa. En todos los casos sin embargo, se midió una muestra *blank* y una patrón. El *blank* se ha procesado con la misma química y simultáneamente con las muestras reales y ha sido usado para determinar la sensibilidad de la medición. Por otra parte, muestra patrón, se ha utilizado para normalizar los resultados obtenidos para las muestras desconocidas (de ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca y ^{59}Ni) y para chequear las condiciones de estabilidad de la máquina en todos los casos.

Durante la preparación química de todas las muestras (Apéndice 9.1), excepto las de níquel, se agregó una determinada cantidad de *carrier* del elemento a medir: una solución que contiene a los isótopos estables del radioisótopo que se pretende medir y la menor cantidad posible de éste. Se agrega en los casos en los que se supone que la muestra contiene una concentración pequeña de los isótopos estables, por lo que se utiliza su presencia en el *carrier* para acelerarlos. En las muestras de níquel no ha sido necesario agregar esta solución, ya que el meteorito contiene más del 6% de este elemento. En las tablas 6-1 y 6-2 se presenta la masa inicial de material de la que se obtuvo cada muestra y la cantidad de *carrier* que se agregó en cada caso. En la muestra JFN1 no se midió ^{36}Cl ya que no alcanzó un nivel satisfactorio de disolución.

Muestra	Masa [g]	Carrier de Be [mg]	Carrier de Al [mg]	Carrier de Ca [mg]
TPB	1.7498	1.0072	1.0091	4.9359
TPC	1.5680	1.0210	0.9577	4.8932
ANU-I	2.8231	1.0070	0.9967	4.9581
ANU-B	2.8220	1.0068	0.9979	5.0118
JFN1	0.8738	1.0007	0.9560	4.7373

Tabla 6-1: Masa inicial de las muestras de ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca y ^{59}Ni y cantidad de *carrier* agregado para las de ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca . El error es el puramente instrumental, de 10^{-4}mg .

Muestra	Masa [g]	Carrier de Cl [mg]
TPB	2.4747	3.4086
TPC	1.4227	1.9570
ANU-I	2.8504	3.8673
ANU-B	2.8191	3.8867

Tabla 6-2: Masa inicial y cantidad de *carrier* agregado para las muestras de ^{36}Cl . El error de todas las medidas es el instrumental: 10^{-4}mg .

En cada experimento para los diferentes radioisótopos, se han tomado básicamente los mismos datos:

1. corrientes integradas de isótopos estables para el cálculo de las relaciones isotópicas.
2. duración nominal de la medición.
3. registro de un *pulser* para conocer el tiempo real de la medición y realizar la corrección por tiempo muerto correspondiente,
4. las señales, evento por evento, de la energía depositada por las partículas incidentes en el detector.

En el análisis estos datos se combinan adecuadamente para obtener el número de cuentas del radioisótopo en cuestión.

Al finalizar cada medición se obtiene el conjunto de estos parámetros más los mencionados para cada radioisótopo en la tabla 6-3 y un conjunto de espectros. Estos espectros guardan el registro, evento por evento, de las señales entregadas por cada una de las secciones del ánodo del detector. Con ellos ha sido posible, luego del correspondiente análisis, conocer el número de átomos de cada radioisótopo presente en cada muestra. A continuación se presenta los resultados obtenidos y el análisis de datos para cada isótopo en particular.

Isótopo	Datos registrados	Finalidad
¹⁰ Be	Corriente integrada de ¹⁷ O en cada secuencia.	Obtener el cociente ¹⁰ Be/Be, a partir de la relación ¹⁰ Be/ ¹⁷ O medida experimentalmente en la muestra y en una muestra patrón.
	Tasa de conteo de ¹⁰ B	Chequeo de buen funcionamiento del sistema.
²⁶ Al	Corriente integrada de ²⁷ Al en cada secuencia.	Obtener la concentración de ²⁶ Al respecto del Al total en la muestra.
³⁶ Cl	Corriente integrada de ³⁵ Cl y ³⁷ Cl en cada secuencia.	Obtener el cociente ³⁵ Cl/ ³⁷ Cl, compararlo con la relación isotópica natural y luego obtener la relación ³⁶ Cl/Cl en la muestra.
	Tasa de conteo de S y del total de C+O.	Simplemente como chequeo de buen funcionamiento del sistema.
⁴¹ Ca	Corriente integrada de ⁴⁰ Ca en cada secuencia.	Obtener la concentración de ⁴¹ Ca respecto del Ca total en la muestra.
⁵⁹ Ni	Corriente integrada de ⁵⁸ Ni y ⁶⁰ Ni en cada secuencia.	Obtener el cociente ⁵⁸ Ni/ ⁶⁰ Ni, compararlo con la relación isotópica natural y luego obtener la relación ⁵⁹ Ni/Ni en la muestra.
	Tasa de conteo de ⁵⁹ Co.	
	Señal temporal entre la primera y la cuarta señal del detector	Seleccionar e identificar la contaminación debida al ⁵⁹ Co.

Tabla 6-3: Parámetros particulares registrados en la medición de cada radioisótopo

6.2 Berilio 10

El ánodo del detector utilizado en este caso cuenta con tres secciones (figura 5-6) que entregan una señal proporcional a la pérdida de energía de los iones de ¹⁰Be en su pasaje por cada una de ellas y una última cuya señal es proporcional a su energía residual. Durante la medición se registra, evento por evento, la señal de cada una de estas secciones: ΔE_1 , ΔE_2 , ΔE_3 , E_{res} y también la señal de energía total E_{tot} . Esto permite, luego del experimento realizar el análisis de espectros bidimensionales, oponiendo en cada eje diferentes combinaciones de las señales obtenidas en cada sección.

La relación isotópica ¹⁰Be/⁹Be en las muestras desconocidas se calcula a partir del valor nominal del patrón (3×10^{-11} , NIST standard) y de la sensibilidad determinada por el *blank*. La forma de contabilizar el número de átomos en una muestra desconocida es la siguiente:

1. Se analizan cuatro espectros bidimensionales, ΔE_1 vs E_{tot} , ΔE_1 vs ΔE_2 , ΔE_3 vs ΔE_2 y ΔE_1 vs ΔE_3 , para la muestra patrón.

2. En cada espectro se identifica el grupo de los puntos correspondientes al ^{10}Be y se lo encierra con condiciones (gates), en cada uno de ellos. Cabe recordar que muchas contaminaciones han sido filtradas por el selector de velocidades antes de incidir en el detector. Sin embargo los espectros bidimensionales se utilizan para identificar al ^{10}Be y separarlo de las contaminaciones que ocasionan el fondo de la medición.
3. Se analizan nuevamente los cuatro espectros, pero ahora sujetos a las condiciones obtenidas en el punto 2. Cada uno de los espectros se analiza con las condiciones tomadas en los otros tres. Como resultado de los dos últimos pasos se obtiene: a) el número experimental de cuentas de ^{10}Be para la muestra patrón, que luego se normaliza con el valor nominal del mismo y b) las condiciones para analizar los espectros correspondientes a las muestras desconocidas y al *blank*.
4. Se analizan los espectros correspondientes a las muestras desconocidas y al *blank* con las condiciones obtenidas en el paso 2. En la figura 6-1 se muestran los espectros ΔE_1 vs E_{tot} , tomados con y sin dichas condiciones, para las muestras JFN1 y para el *blank*.

En la tabla 6-4 se presentan la concentración de ^{10}Be medida en cada muestra. Dado que la cantidad de átomos de ^{10}Be medidos en las muestras desconocidas es del orden de la obtenida para el *blank*, los resultados medidos son en realidad límites superiores del contenido real de ^{10}Be en cada muestra.

Muestra	dpm(^{10}Be)/kg de met.
TPB	0.00068 ± 0.00014
TPC	0.0017 ± 0.0006
ANU-I	0.00016 ± 0.00004
ANU-B	0.000034 ± 0.000028
JFN1	0.0125 ± 0.0009

Tabla 6-4: Concentración de ^{10}Be medidas en las muestras del meteorito de Campo del Cielo.

6.3 Aluminio 26

En el caso de las muestras de ^{26}Al , dado que por un lado, las contaminaciones han sido eliminadas con el selector de velocidades y por otro, el isóbaro estable del ^{26}Al , como se explicó en la sección 5.3.2.2, el ^{26}Mg no forma iones negativos y no puede ser acelerado por la máquina, el análisis de datos es más sencillo. El *blank* y una muestra patrón se ha medido para la sustracción del fondo y la normalización del número de cuentas de la muestra desconocida. Sin embargo, sólo se trabaja con espectros unidimensionales del número de cuentas respecto de la energía total depositada por las partículas en el detector. En la figura 6-2 se muestra este histograma para el *blank*, el patrón (cuyo valor nominal para la relación isotópica $^{26}\text{Al}/\text{Al}$ es de 2.78×10^{-10}) y la muestra JFN1.

En la tabla 6-5 se presentan las concentraciones de ^{26}Al medidas en las muestras del meteorito. Dado que el número de eventos de ^{26}Al en las muestras, nuevamente son del orden del *blank*, los resultados obtenidos son cotas superiores a la concentración real de ^{26}Al .

En el Apéndice 9.2 se presentan los cálculos realizados para llegar desde los datos crudos, obtenidos en las mediciones, hasta la concentración de ^{26}Al expresados en desintegraciones por minuto por kilogramo de meteorito.

Muestra	dpm(^{26}Al)/ kg de met
TPB	0.00029 ± 0.00029
TPC	0.00048 ± 0.00048
ANU-I	0.00044 ± 0.00031
ANU-B	0.00085 ± 0.00085
JFN1	0.0023 ± 0.0013

Tabla 6-5: Concentración de ^{26}Al medidas en las muestras del meteorito de Campo del Cielo.

6.4 Cloro 36

Este radioisótopo ha sido medido para todas las muestras excepto para JFN1, como se mencionó anteriormente. Siguiendo un procedimiento similar al explicado en la sección 6.2, para el berilio, se obtienen los espectros evento por evento para la muestra patrón, el *blank* y la muestra desconocida. A pesar de haber realizado las mediciones en forma absoluta, el patrón es útil para corroborar la condiciones de estabilidad del acelerador, identificar inequívocamente al ^{36}Cl y obtener las condiciones a las cuales se sujetan los demás (del *blank* y de las muestras) para el aislamiento de las cuentas de ^{36}Cl .

En la figura 6-3 se presenta el espectro ΔE_3 vs. E_{res} para la muestra patrón y para TPC, analizados con y sin las condiciones obtenidas a partir de la primera. En ellos puede verse la presencia de contaminaciones de ^{35}Cl y ^{37}Cl . Estas contaminaciones provienen de dos fuentes:

1. Al seleccionar la masa 36 en el imán inyector se acepta al ion molecular ^{35}ClH (masa 36), de donde surge la contaminación de ^{35}Cl .
2. El imán inyector puede tener una deficiente selección en masa por lo que deja pasar parte de los extremos de la distribución en masa en función del campo magnético, con lo que aparece la contaminación del ^{37}Cl .

La medición de la corriente integrada de ^{35}Cl y ^{37}Cl (no las contaminaciones sino la obtenida cuando el acelerador está sintonizado para ellos) junto con el número de cuentas de ^{36}Cl obtenido para las muestras desconocidas permite obtener la concentración de este último. (tabla 6-6).

Muestra	dpm(³⁶ Cl)/ kg de met
TPB	0.0018 ± 0.0002
TPC	0.0053 ± 0.0004
ANU-I	0.00061 ± 0.00013
ANU-B	0.00095 ± 0.00015

Tabla 6-6: Resultados de las concentraciones de ³⁶Cl medidas en el meteorito de Campo del Cielo.

6.5 Calcio 41

El procedimiento ha sido similar al seguido para la medición de ¹⁰Be. Sin embargo, el fondo de la medición (básicamente el contenido del radioisótopo del *carrier*) era muy bajo, del orden de una o dos cuentas en media hora de medición. Si bien una posibilidad hubiera sido realizar mediciones durante mayores lapsos de tiempo, dado que el contenido de ⁴¹Ca de las muestras era comparable al del *blank* esa opción no hubiera aumentado el número de cuentas de las muestras meteoríticas. Los valores mostrados en la tabla 6-7, por esa razón, son cotas superiores del valor real de la concentración de este isótopo radiactivo en las muestras. El valor nominal del patrón utilizado para la normalización era de 1.13×10^{-11} .

Muestra	dpm(⁴¹ Ca)/kg de met
TPB	0.020 ± 0.011
TPC	0.026 ± 0.014
ANU-I	0.010 ± 0.006
ANU-B	0.011 ± 0.006
JFN1	0.024 ± 0.014

Tabla 6-7: Concentración de ⁴¹Ca en las muestras del meteorito de Campo del Cielo.

En la figura 6-4 se presenta el aspecto de un espectro de ΔE_3 vs E_{tot} . En ella puede verse que el aspecto del *blank* y de la muestra JFN1 es muy similar. Si hubiera más cuentas de ⁴¹Ca en la muestra desconocida, serían útiles las condiciones que pueden extraerse en el espectro de la muestra patrón donde aparece la contaminación del isóbaro ⁴¹K. En la figura 6-4 (c) puede verse la región donde debiera aparecer los eventos asociados al ⁴¹Ca. Si bien aparecen algunos puntos en la figura, estos no figuran en el espectro analizado con condiciones que no se muestra aquí, ya que sería un espectro completamente en blanco. En los espectros, aparecen también las contaminaciones debidas a intercambios de carga y filtraciones en el imán inyector que no son desviados suficientemente por el filtro de velocidades: ⁴⁷Ti⁸⁺ y ³⁵Cl⁶⁺.

6.6 Níquel 59

El procedimiento para la medición de este isótopo ha sido similar al seguido en la medición de ³⁶Cl, dado que se han acelerado dos isótopos estables (⁵⁸Ni y ⁶⁰Ni) para luego medir el ⁵⁹Ni. Sin

embargo, como se mencionó en la sección 5.3.2.5 se ha utilizado una señal adicional para lograr la identificación y separación de la contaminación debida al isóbaro ^{59}Co .

Cuando los iones de ^{59}Co ingresan en el detector pierden una cantidad de energía diferente que los de ^{59}Ni . Las dos especies ingresan al detector igual energía y la separación se realiza en función de la comparación entre las pérdidas en cada sección del mismo. Por ello, si por algún choque adicional los iones de cobalto modifican su energía perdida pueden ser registrados como si fueran iones de níquel y contribuir con eventos espúreos en el conteo. Una manera de eliminar este fondo de ^{59}Co consiste en medir los tiempos relativos de la llegada de los electrones a los electrodos ΔE_1 y ΔE_4 [60]. Se registra, entonces, un espectro de tiempo a partir de un convertidor de tiempo a amplitud (TAC) conectado entre ellos (espectro que será nombrado de aquí en adelante como *TAC*). Por otra parte, con las señales de pérdida de energía, energía residual y energía total entregadas por el detector generan tres espectros bidimensionales: E_{tot} vs E_{res} , ΔE_1 vs ΔE_2 y ΔE_3 vs ΔE_4 . Los cuatro en su conjunto, fueron tomados para la muestra patrón, cuyo valor nominal de concentración de $^{59}\text{Ni}/\text{Ni}$ es 3×10^{-11} , para un *blank* y para las muestras del meteorito.

El procedimiento para el análisis de los espectros difiere en parte de los utilizados para otros isótopos (ver Apéndice 9.2), pero su base fundamental: obtener condiciones limitantes sobre los espectros de la muestra patrón y luego aplicarlas al análisis de los de las demás muestras se mantiene.

En la figura 6-5 se muestran los espectros de E_{tot} vs E_{res} y el *TAC*, para la muestra patrón, los cuales no están sujetos a ninguna restricción. Con las condiciones obtenidas sobre el *TAC* y los demás espectros de la muestra patrón, se analizan nuevamente y se observan los eventos puramente asociados al ^{59}Ni , como puede verse en la figura 6-6 para la muestra patrón y para JFN1.

Los resultados obtenidos para las muestras del meteorito (ver tabla 6-8) son comparables a los medidos en el *blank*, por lo que nuevamente son considerados como límites superiores del contenido real de ^{59}Ni en el meteorito.

Muestra	dpm(^{59}Ni)/kg de met
TPB	1.9 ± 1.9
TPC	0.4 ± 0.7
ANU-I	1.6 ± 1.2
ANU-B	1.5 ± 1.5
JFN1	2.4 ± 1.6

Tabla 6-8: Concentración de ^{59}Ni en las muestras del meteorito de Campo del Cielo.

Figura 6-1: Medición de ^{10}Be : Espectros bidimensionales de ΔE_I vs. E_{tot} . (a) y (b) son los espectros correspondientes a la muestra JFN1 y al *blank* sin considerar las restricciones (gates) obtenidas para espectros similares de la muestra patrón. (c) y (d) son los mismos espectros analizados teniéndolas en cuenta. Es de remarcar que el fondo de medición se toma a partir del espectro (d).

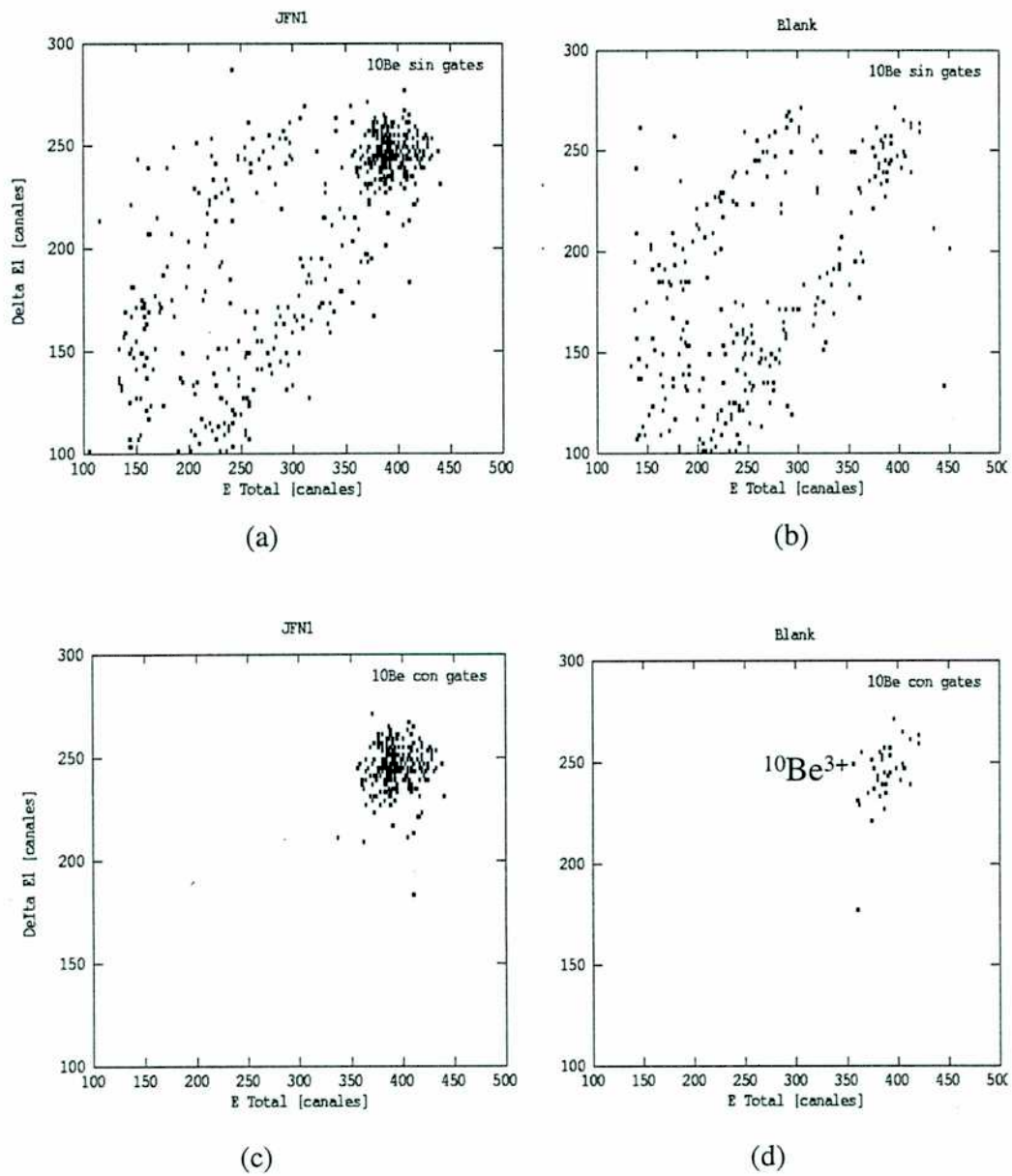


Figura 6-2: Medición de ^{26}Al : espectros unidimensionales del *blank*, la muestra patrón y la muestra JFN1, del número de cuentas en función de la energía total depositada por las partículas.

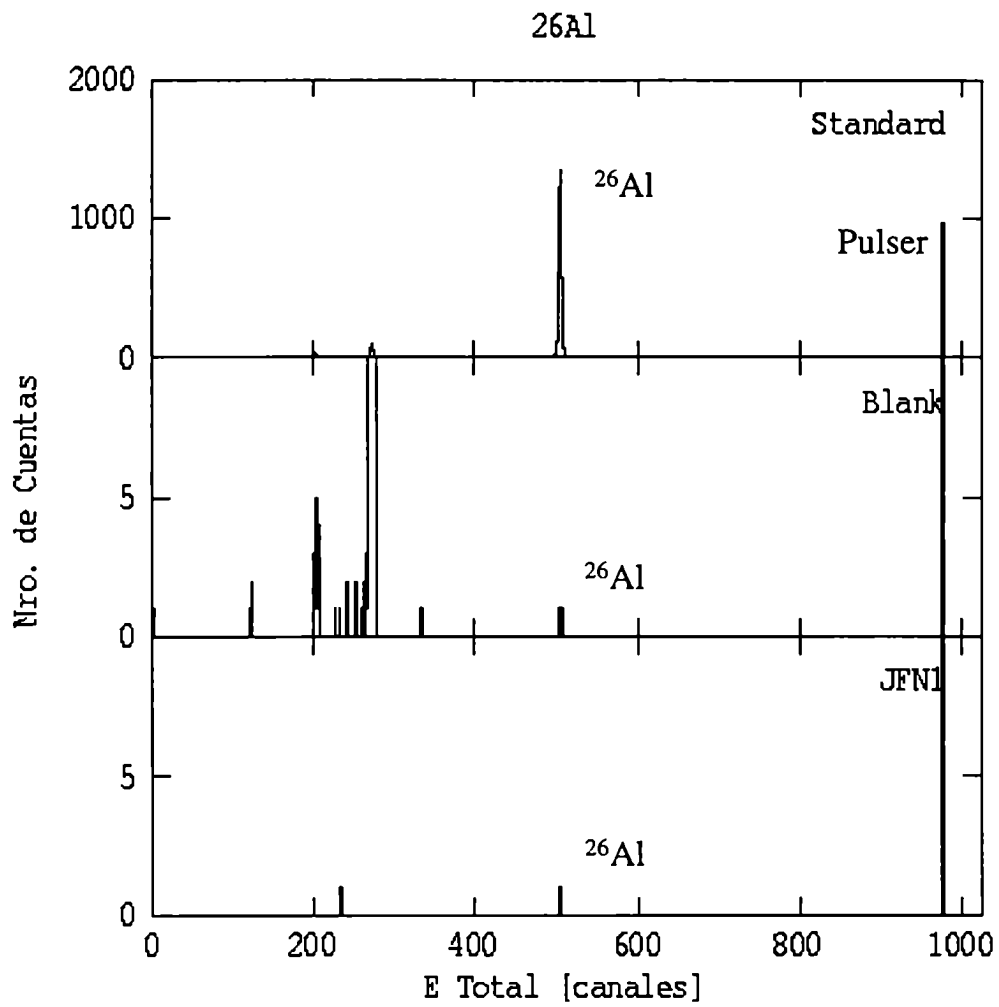


Figura 6-3: Medición de ^{36}Cl : a) Espectro de ΔE_3 vs. E_{res} para la muestra patrón. En él se muestra una de las condiciones (gates). Con ella y las tomadas en los otros espectros para la misma muestra se analizan las muestras desconocidas. (b) Espectro bidimensional analizado sin tener en cuenta las condiciones obtenidas para la muestra TPC. (c) El mismo espectro sujeto a las condiciones.

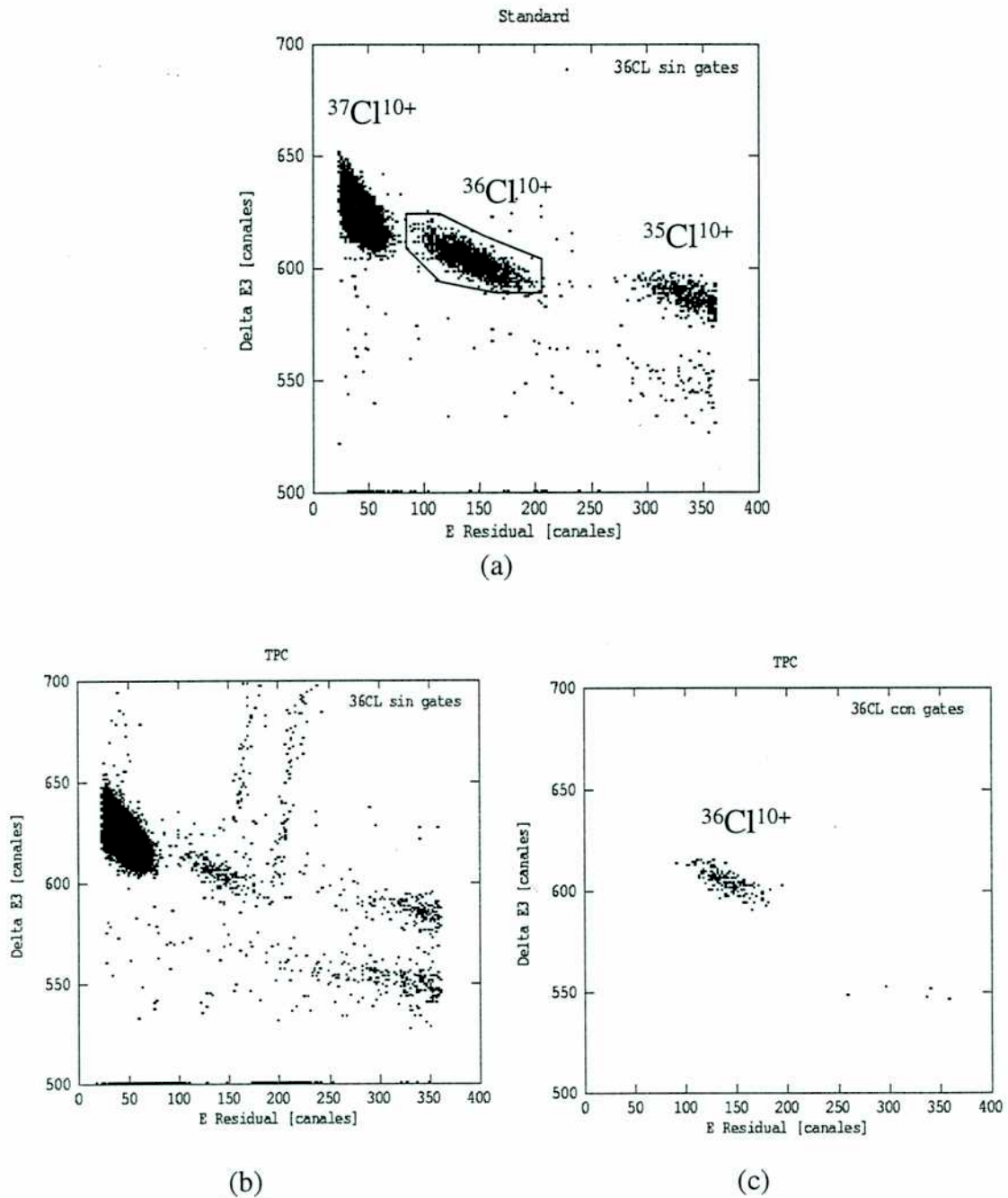


Figura 6-4: Medición de ^{41}Ca . (a) Espectro bidimensional de ΔE_3 vs E_{tot} , para la muestra patrón. Se ven algunas de las contaminaciones que no son desviadas por el filtro de velocidades pero claramente no complican en absoluto la separación del ^{41}Ca . (b) y (c) muestran el mismo espectro, sin condiciones, para las muestras JFN1 y para el *blank* respectivamente. Puede verse que son muy similares. Ambos, una vez analizados con condiciones presentan cero eventos de ^{41}Ca en la región indicada en el espectro (c)

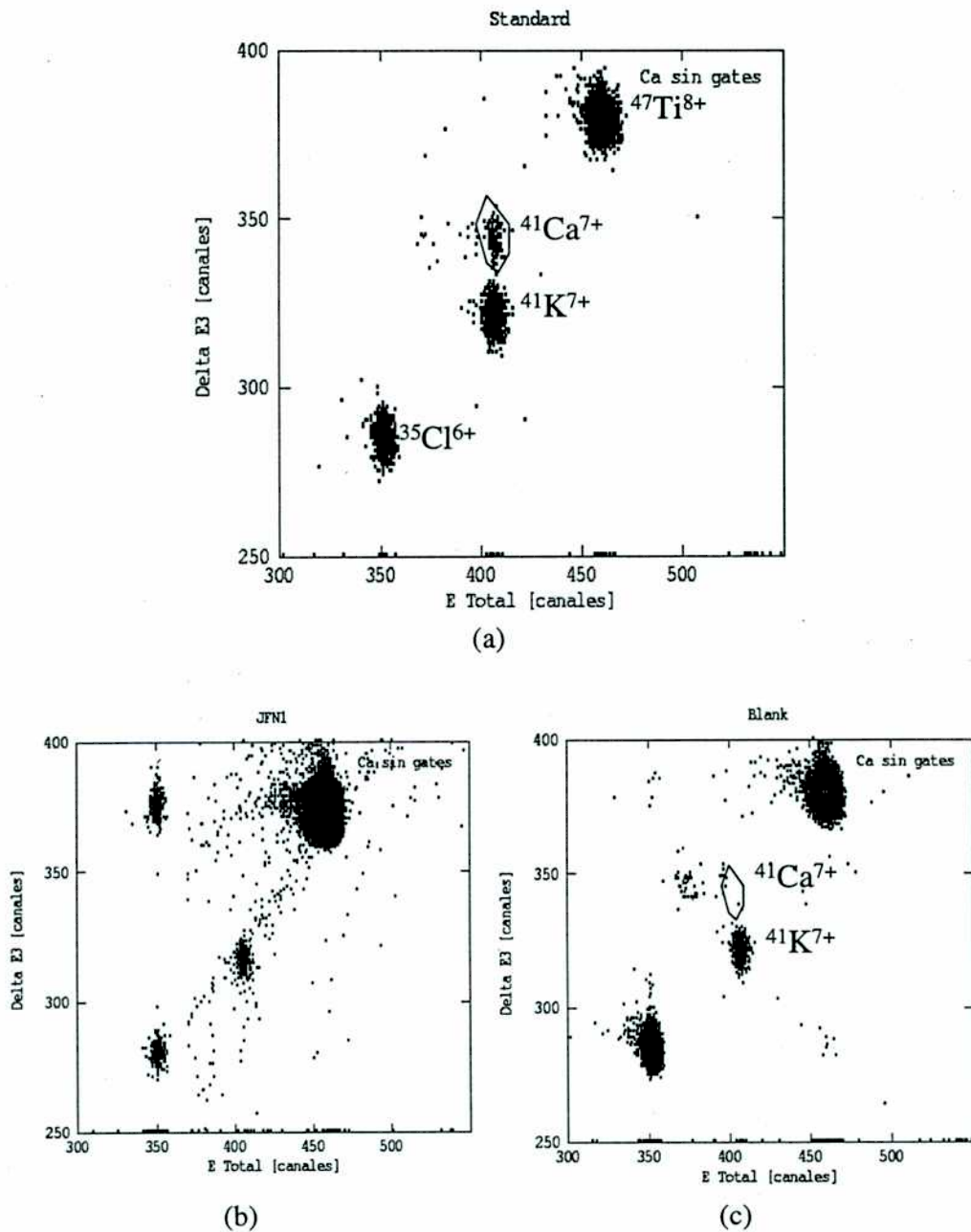
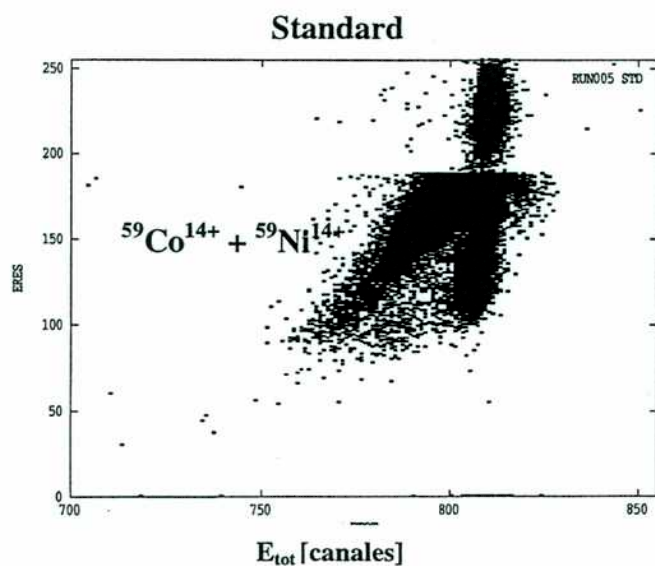
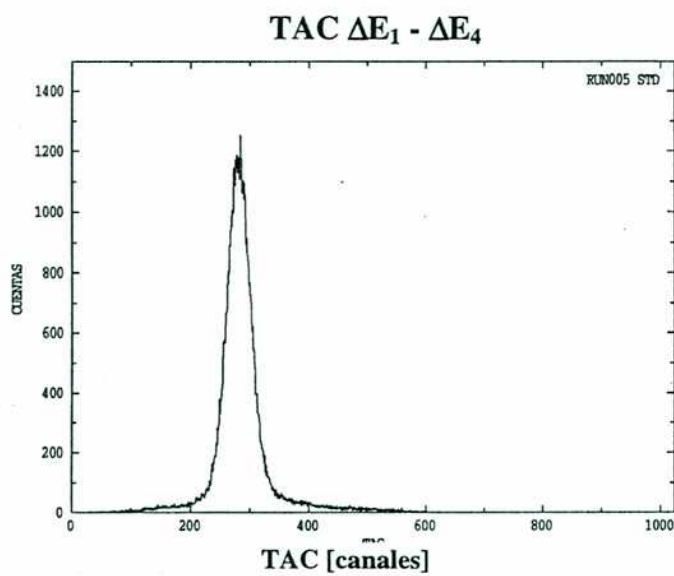


Figura 6-5: Medición de ^{59}Ni . Espectros tomados para la muestra patrón.
(a) Espectro bidimensional de E_{res} vs E_{tot} , (b) TAC entre ΔE_1 y ΔE_4 .

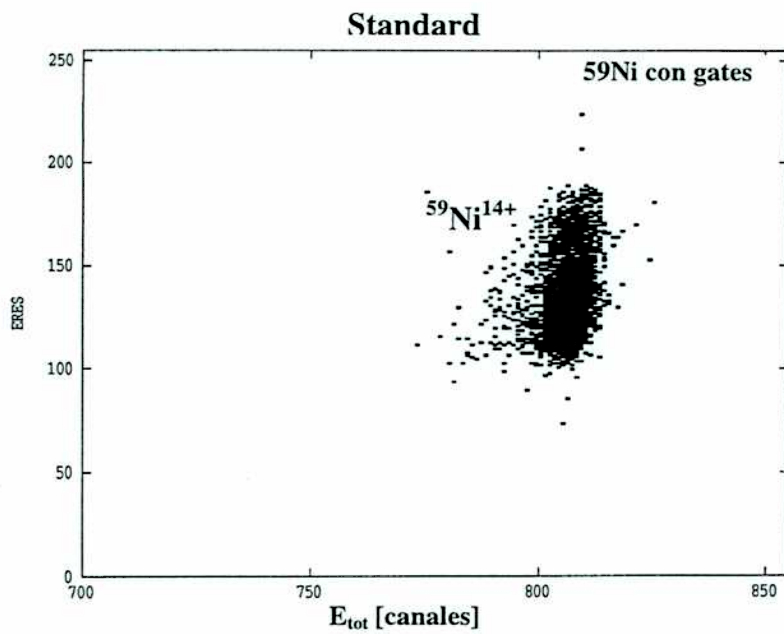


(a)

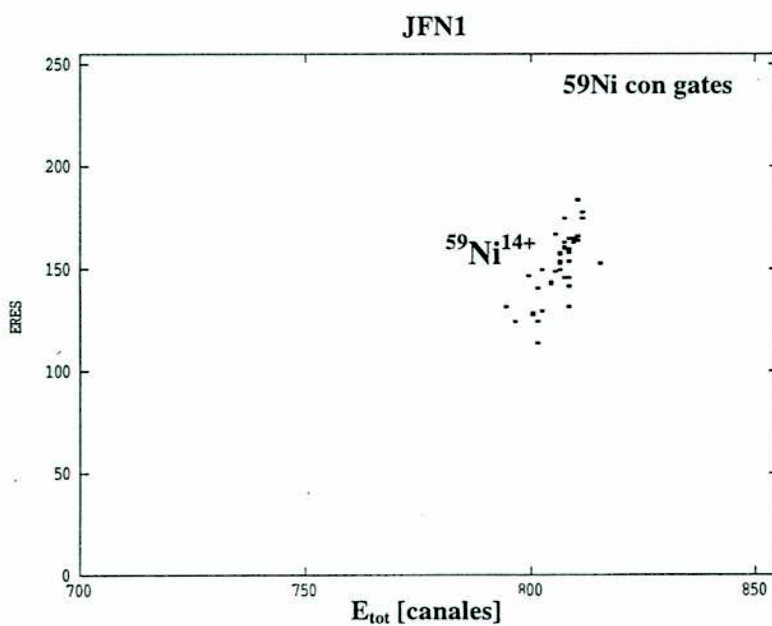


(b)

Figura 6-6: Medición de ^{59}Ni . Espectros bidimensionales para la muestra patrón y para JFN1, ambos sujetos a las condiciones en el TAC.



(a)



(b)

7 Interpretación de resultados

En este Capítulo se comparan los resultados experimentales con las predicciones teóricas obtenidas a partir de los modelos para la tasa de producción de radioisótopos presentados en la sección 2.2.2. El objetivo de esta interpretación es estimar la edad terrestre y el tamaño preatmosférico del meteorito de Campo del Cielo.

7.1 Edad terrestre del meteorito de Campo del Cielo: Primeras estimaciones

Para el cálculo de la edad terrestre del meteorito de Campo del Cielo se utilizó primeramente una aproximación sencilla válida en el caso de meteoritos pequeños. La misma consiste en considerar el decaimiento natural de los radioisótopos una vez que el cuerpo celeste cayó a la Tierra. Se verá a continuación que considerar un modelo tan elemental lleva a importantes errores por lo que deben aplicarse modelos más complejos.

El decaimiento natural de un nucleido radiactivo está regido, como se sabe, por la siguiente

$$N = N_0 \exp(-\lambda T_t) \quad (7.1)$$

donde N es la actividad del radioisótopo medida, λ , su período de semidesintegración, N_0 la actividad en el momento de la caída, es decir, la actividad de saturación y T_t la edad terrestre del meteorito (que en adelante también se llamará "edad del meteorito"). Las actividades de saturación (Sección 2.2.3) utilizadas para este cálculo pueden verse en la tabla 7-1.

De la ecuación 7-1 se deduce que la edad del meteorito debiera ser

$$T_t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{N}{N_0} \right) \quad (7.2)$$

A partir de ecuación 7.2, las actividades de saturación de la tabla 7-1 y las concentraciones medidas presentadas en las tablas 6-4 a 6-8, se obtuvieron las siguientes edades terrestres para el meteorito de Campo del Cielo para cada uno de los radioisótopos tenidos en cuenta independientemente uno de otro.

Radionucleido	Actividad de saturación [átomos por minuto por kilogramo]
^{10}Be ^(a)	4-6 (5)
^{26}Al ^(a)	3-5 (4)
^{36}Cl ^(a)	22.8 ± 3.1
^{41}Ca ^(a)	23.8 ± 0.6
^{59}Ni ^(b)	368

Tabla 7-1: Actividades promedio de saturación en meteoritos de hierro. (a) [60] (b)[61].

Muestra	T_t (^{10}Be) [a]	T_t (^{26}Al) [a]	T_t (^{36}Cl) [a]	T_t (^{41}Ca) [a]	T_t (^{59}Ni) [a]
TPB	2.06E+07	9.92E+06	4.09E+06	1.10E+06	5.65E+05
TPC	1.85E+07	9.38E+06	3.62E+06	1.07E+06	7.45E+05
ANU-I	2.39E+07	9.46E+06	4.56E+06	1.20E+06	5.86E+05
ANU-B	2.75E+07	8.79E+06	4.37E+06	1.19E+06	5.89E+05
JFN1	1.38E+07	7.76E+06	-	1.08E+06	5.37E+05

Tabla 7-2: Edad terrestre (en años) del meteorito del Campo del Cielo teniendo en cuenta cada radioisótopo de manera independiente sin considerar el blindaje de cada muestra, es decir la profundidad preatmosférica de la misma.

Las diferencias en varios órdenes de magnitud en la edad terrestre obtenida muestran claramente el error en el modelo elegido. El cálculo de la edad del meteorito según este método no tiene en cuenta la profundidad de las muestras: considera como actividad en el momento de la caída la correspondiente a meteoritos pequeños. Esto implica que no tiene en cuenta que cada muestra debió haber estado ubicada en una posición sumamente profunda, por lo que el efecto de la radiación cósmica se vio reducido debido al blindaje del material. Por otra parte, dado que todas las muestras provienen del mismo meteorito original, todos los cálculos deben conducir a edades terrestres dentro de los márgenes de error y no con dos órdenes de magnitud de diferencia como se ve en la tabla 7-2. Es aquí donde se ve la necesidad de aplicar los modelos teóricos para el cálculo de la tasa de producción de los radioisótopos explicados en la sección anterior.

Una determinación más precisa de la edad terrestre del meteorito se logra a partir del estudio de las relaciones entre las concentraciones de ^{10}Be , ^{26}Al y ^{36}Cl . Dada las vidas medias de los isótopos involucrados y a partir de la medición de ellos en numerosos meteoritos ferrosos y en las fases metálicas de meteoritos rocosos y ferro-rocosos, se ha establecido [62] que la relación $^{36}\text{Cl}/^{10}\text{Be}$ sigue la siguiente ley empírica:

$$\frac{{}^{36}\text{Cl}}{{}^{10}\text{Be}} = 5.98 - 0.2({}^{10}\text{Be}) - 0.023({}^{10}\text{Be})^2 \quad (7.3)$$

mientras que la relación ${}^{36}\text{Cl}/{}^{26}\text{Al}$ [63] puede expresarse como:

$$\frac{{}^{36}\text{Cl}}{{}^{26}\text{Al}} = 7.82 - 0.22({}^{26}\text{Al}) - 0.17({}^{26}\text{Al})^2 \quad (7.4)$$

Si las concentraciones de ${}^{10}\text{Be}$ y ${}^{26}\text{Al}$ son extremadamente bajas (como ocurre en este caso), los términos de orden superior son despreciables y las relaciones pueden aproximarse por los valores constante (5.98 y 7.82 respectivamente). En particular, las ecuaciones 7.3 y 7.4 implican que en el momento de la caída del meteorito a la Tierra, la actividad de ${}^{10}\text{Be}$ debiera haber sido aproximadamente 1/6 de la de ${}^{36}\text{Cl}$ y la de ${}^{26}\text{Al}$, 1/8.

Es posible aplicar estas estimaciones al meteorito de Campo del Cielo de la siguiente manera:

1. Se toma como dato la concentración medida de ${}^{36}\text{Cl}$ (N) y se propone un valor posible para la edad terrestre del meteorito.
2. Con ellos es posible calcular la actividad de ${}^{36}\text{Cl}$ en el momento de la caída del meteorito N_0 (${}^{36}\text{Cl}$).

$$N_0({}^{36}\text{Cl}) = N e^{\lambda_{36}\text{Cl} T_i} \quad (7.5)$$

3. Utilizando la relación 7.3, la actividad de ${}^{10}\text{Be}$ al momento de la caída, N_0 (${}^{10}\text{Be}$) debiera haber sido aproximadamente 1/6 de ese valor. Corrigiendo por el decaimiento del ${}^{10}\text{Be}$ se obtendría el valor que debiera haberse medido de este radioisótopo.

Ejemplo

Si $T_i = 3$ Ma, N_0 (${}^{36}\text{Cl}$) debiera ser 1000 veces mayor que la concentración obtenida experimentalmente. Si el límite obtenido es menor que esa predicción, la edad terrestre del meteorito debe ser menor que 3 Ma.

Considérese la muestra TPB. La concentración medida de ${}^{36}\text{Cl}$ ha sido $N = 0.0018$ dpm/kg. Aplicando la ecuación 7.5 y suponiendo $T_i = 3$ Ma, la actividad en el momento de la caída debió haber sido $N_0 = 1.8$. Si se asume que la relación ${}^{36}\text{Cl}/{}^{10}\text{Be} \approx 5.98$, debió ser N_0 (${}^{10}\text{Be}$) = .301. Corrigiendo por el decaimiento de este último nucleido durante la supuesta edad terrestre del meteorito, se obtiene la concentración esperada de ${}^{10}\text{Be}$ en el momento de la medición: N (${}^{10}\text{Be}$) = 0.082. Dado que el valor del límite obtenido para la actividad de ${}^{10}\text{Be}$ en la muestra TPB ha sido de 0.00067 ± 0.00014 , se concluye que la edad terrestre del meteorito debe ser menor que 3 Ma.

Utilizando entonces las relaciones 7.3 y 7.4, las cotas obtenidas en los valores de las concentraciones de ^{10}Be y ^{26}Al determinan, a su vez, límites superiores en la edad terrestre del meteorito. Según la posición original de las muestras en el meteorito, dicha edad terrestre puede ser de hasta 3×10^5 años, para las muestras más superficiales.

7.2 Predicciones teóricas de la tasa de producción de ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca y ^{59}Ni

La actividad de los radioisótopos de vida media larga medida en el laboratorio en un meteorito es función de dos factores: la actividad de los radionucleidos en el momento de la caída en la posición donde se encontraba cada muestra (tasa de producción para esa profundidad en ese instante) y el tiempo transcurrido desde la caída del meteorito a la tierra, es decir, su edad terrestre.

Recordando la ecuación 2.14, de la actividad de un radioisótopo X medida en el laboratorio.

$$A^L_X = P_X (1 - e^{-\lambda T_e}) e^{-\lambda T_t} \quad (2.14)$$

y si se considera que la edad de exposición de los meteoritos ferrosos es del orden de varios millones de años, es posible aproximarla de la siguiente manera

$$A^L_X = P_X(d) e^{-\lambda T_t} \quad (7.6)$$

$P_X(d)$ es la tasa de producción del radionucleido X en el momento de la caída a la profundidad d de la muestra en cuestión, λ es el período de semidesintegración y T_t es la edad terrestre del meteorito. De manera que, dado que los resultados obtenidos para un único radioisótopo dependen de más de una variable, es necesario medir más de un nucleido para obtener información sobre esos parámetros. Esa es la razón por la cual se decidió medir cinco especies diferentes, las cuales, en principio aportan exceso de información.

En este trabajo se ha obtenido, por una parte, el valor de la concentración de ^{36}Cl para las muestras TPB, TPC, ANU-I y ANU-B. Por otra parte, dado que el número de eventos de ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca y ^{59}Ni en todas las muestras ha sido comparable al de las muestras *blank* (Capítulo 6), sólo es posible afirmar haber obtenido cotas superiores para la actividad de esos cuatro radioisótopos. Si los resultados hubieran sido el valor de la actividad para todos los radionucleidos (y no sólo cotas) habría sido posible, no sólo obtener conclusiones acerca de la edad terrestre del meteorito y de su tamaño preatmosférico, sino también, considerando la ecuación 2.14, acerca de su edad de exposición. La interpretación de los resultados se realiza a partir del enfoque dado por la ecuación 7.6.

En el cálculo teórico de las tasas de producción esperadas de los radioisótopos medidos en el meteorito de Campo del Cielo se utilizan los modelos presentados en la sección 2.2.2 para el flujo de rayos cósmicos y funciones de excitación empíricas para las reacciones nucleares de interés.

Los valores de las concentraciones medidas, presentadas en el Capítulo 6 son varios órdenes de magnitud menor que los que aparecen en la literatura sobre medición de radioisótopos en meteoritos ferrosos ([64],[65], [66] y [21]). Por ello, cabe obtener dos conclusiones posibles: la caída del meteorito de Campo del Cielo se produjo hace varios millones de años o éste era extremadamente grande antes de caer. La primera hipótesis está acotada por los 300000 años de edad terrestre máxima calculada en la sección anterior. A continuación se presentan cálculos y predicciones de la edad terrestre y el tamaño preatmosférico del meteorito de Campo del Cielo, teniendo en cuenta, por supuesto, la limitación mencionada.

La ecuación 2.2, que rige la tasa de producción P_x de un radioisótopo X

$$P(d, R) = \sum_j N_j \sum_k \int_0^{\infty} \phi(E, d, R) \sigma_{xjk}(E) dE \quad (2.2)$$

puede ser reescrita de la siguiente manera:

$$P_x(d) = N \int_0^{\infty} \left(\frac{dJ}{dE} \right) (E, d) \sigma_i(E) dE \quad (7. 7)$$

donde N la densidad de núcleos blanco, $\frac{dJ}{dE}(E, d)$ el flujo diferencial de rayos cósmicos en función de la profundidad y la energía y $\sigma_i(E)$ la sección eficaz de la reacción i que genera el nucleido X en función de la energía E .

El cálculo teórico se realizó aproximando al meteorito de Campo del Cielo por una esfera y se consideraron capas de 35 g/cm^2 de espesor, es decir, si la densidad promedio del meteorito es de 7.775 g/cm^3 , cada una de ellas sería de aproximadamente 4.5 cm. Se consideró que la composición de esa esfera era la del meteorito de Campo del Cielo, presentada en la sección 4.3.1, tomando los componentes más importantes: hierro, níquel, cobalto, silicio y fósforo.

Para el cálculo de la tasa de producción de los diferentes radionucleidos, utilizando el modelo de Reedy – Arnold [12], se trabajó con el flujo de rayos cósmicos descrito en la sección 2.2.2.1 y las funciones de excitación de las reacciones que, sobre los elementos que componen el meteorito de Campo del Cielo, producen los isótopos en estudio. De ellas, las principales son aquellas de *spallation* de protones y neutrones sobre hierro. Por la similitud en masa de los núcleos blanco, se ha asumido que las secciones eficaces de ese tipo de reacciones sobre níquel y cobalto coinciden con las anteriores. En particular, en la tabla 7-3 se detallan los productos de cada reacción, los proyectiles, las reacciones nucleares consideradas y la referencia de la cual fueron obtenidas las correspondientes secciones eficaces en función de la energía.

Se calculó la tasa de producción teórica de los radioisótopos ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl y ^{41}Ca , en función de la profundidad utilizando:

1. Las ecuaciones del modelo de Reedy – Arnold [12] presentadas en el Capítulo 2 y que se reescriben aquí para el flujo de rayos cósmicos son, dependiendo de la energía de los mismos:

$$\text{Si } E > 100 \text{ MeV} \rightarrow \frac{dJ}{dE}(E, d) = k(\alpha + E)^{-2.5} \quad (7.8)$$

$$\text{Si } 2.5 \text{ MeV} < E < 100 \text{ MeV} \rightarrow \frac{dJ}{dE}(E, d) = k(\alpha + 100)^{-2.5} (M(E) - [\alpha - 50]\delta(E)) \quad (7.9)$$

$$M(E) = 94E^{-1} + 603E^{-2} - 300E^{-3} \quad (7.10)$$

y

$$\delta(E) = 0.3E^{-1.26} - 0.00091 \quad (7.11)$$

Y, finalmente si $0.5 \text{ MeV} < E < 2.5 \text{ MeV} \rightarrow$

$$\frac{dJ}{dE}(E, d) = k(\alpha + 100)^{-2.5} [115 - (\alpha - 50)0.094] \cdot (1.3125 + 0.5E - 0.25E^2) \quad (7.12)$$

2. Las funciones de excitación mencionadas en la tabla 7.3.

Para dicho cálculos se aplicó la ecuación 7.7 y la composición química del meteorito de Campo del Cielo dada en la sección 4.3.1. La tasa de producción total de cada radioisótopo incluye las contribuciones de todos los núcleos blanco posibles.

El modelo de R-A ha sido originalmente pensado para el cálculo de las tasas de producción de radionucleidos en la Luna y a profundidades no mayores que 400 g/cm^2 ([12] y [67]), es decir del orden de unos 50 cm. Si bien este método no es útil para modelar completamente los resultados obtenidos en este trabajo, sí es perfectamente válido como ejemplo de cómo deben calcularse las tasas de producción de radioisótopos y para una estimación inicial de la profundidad de las muestras del meteorito de Campo del Cielo. En particular, se ha aplicado el modelo de R-A para las tasas de producción teóricas de ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl y ^{41}Ca .

Un modelo más adecuado es el LCS, en base al cual se han calculado las tasas de producción teórica para el meteorito de Canyon Diablo ([28] y [21]), caído en Arizona, EE.UU. hace unos 50.000 años. Es un meteorito ferroso cuya composición es: Fe, 92.3%; Ni, 7.1%; Co, 0.4%; P, 0.2 % [34]; la cual es muy similar a la del de Campo del Cielo. Por ello, en particular se han asumido como predicciones teóricas, para ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl y ^{59}Ni las presentadas en las mencionadas referencias.

Radiosótomo producido	Blanco	Proyectil	Rango de Energía [MeV]	Canal de reacción
¹⁰ Be	Fe	p	0.5 – 2600	Fe(p,23pxn) ^(a)
		n	100 – 10000	Fe(n,x) ^(b)
	Ni	p	0.5 - 2600	Ni(p,25pxn) ^(a)
		n		
	Co	p		
		n		
	Si	p	0.5 - 2600	Si(p,11pxn) ^(a)
		n		
Al	Fe	p	0.5 – 2600	Fe(p,14pxn) ^(a)
		n	100 – 10000	Fe(n,x) ^(b)
	Ni	p	148 – 2600	Ni(p,16pxn) ^(a)
		n		
	Co	p		
		n		
	P	p	30 – 100	²⁷ Al(p,x) ²² Na ^(c)
		n		²⁷ Al(n,x) ²² Na ^(c)
	Si	p	> 0.5	Si(p,x) ^(d)
		n		
³⁶ Cl	Fe	p	100 - 24000	Fe(p,x) ^(b)
		n		Fe(n,x) ^(b)
	Ni	p	100 - 24000	Fe(p,x) ^(b)
		n		Fe(n,x) ^(b)
⁴¹ Ca	Fe	p	108 – 600	Fe(p,x) ^(e)
		n		
	Ni	p	98 - 600	Ni(p,x) ^(e)
		n		
Co	p			
	n			

Tabla 7-3: Secciones eficaces utilizadas para el cálculo de las tasas de producción de los diferentes radioisótopos con las referencias correspondientes. Los superíndices indican la referencia correspondiente: (a) [68], (b) [28], (c) [12], (d) [69], (e) [70].

El cálculo de la tasa de producción de ⁴¹Ca se ha basado en una relación isotópica presentada por Nishiizumi y Caffee [71], según la cual el cociente ⁴¹Ca/³⁶Cl aumenta con la profundidad. Sin embargo, para blindajes delgados, es decir, para poca profundidad (hasta 100 g/cm²) se mantiene constante: 1.01 ± 0.08. Por otra parte, a profundidades mayores su valor sería ⁴¹Ca/³⁶Cl = 2 [67]. A partir de esta relación y la tasa de producción LCS de ³⁶Cl, se obtuvo la tasa de producción de ⁴¹Ca. La

figura 7.1 muestra las tasas de producción obtenidas para cada uno de los isótopos medidos, en el momento de la caída en función de la profundidad preatmosférica y calculadas a partir del modelo LCS.

Ahora bien, volviendo al planteo de la ecuación 7.7, es posible pensar en un espacio de tres dimensiones: actividad o tasa de producción, edad terrestre y profundidad (figura 7-2). El gráfico presentado en la figura 7-3, nuevamente muestra la tasa de producción teórica de ^{36}Cl , exclusivamente. Se quiere realizar en dicho esquema la comparación entre los dos modelos utilizados y resaltar que la tasa de producción en función de la profundidad corresponde al plano *tasa de producción – profundidad preatmosférica*, es decir a edad terrestre constante y en particular $T_t = 0$

7.3 Estimación de la edad terrestre y el tamaño preatmosférico del meteorito de Campo del Cielo.

La estimación de la edad terrestre y el tamaño preatmosférico del meteorito de Campo del Cielo se realiza a partir de la comparación entre las actividades de los diferentes radioisótopos medidas y los valores teóricos predichos por el modelo LCS. Desde ya, es importante anticipar que las predicciones son muy sensibles a un cambio en la profundidad preatmosférica calculada de las muestras. Es decir, un pequeño cambio en este parámetro redonda en una importante variación en la edad terrestre.

Una vez que el meteorito se encuentra en la Tierra, la tasa de producción de los diferentes radioisótopos es despreciable debido al fuerte apantallamiento de los rayos cósmicos que produce la atmósfera. En el plano *tasa de producción – edad terrestre* de la figura 7-2 puede verse que la actividad de un determinado radioisótopo decae exponencialmente desde su actividad inicial, al momento de la caída. Sin embargo como esa concentración inicial depende de la profundidad, para cada valor de profundidad queda determinada una curva de decaimiento. En la figura 7-4 se muestra esta situación para el ^{36}Cl en la muestra TPB. Por razones de claridad en el gráfico no se muestran las curvas correspondientes a todas las profundidades. Se muestra también el valor experimental medido de la concentración de ese radioisótopo con su error.

A partir de los datos presentados en la figura 7-4 se realiza el siguiente análisis. Considerando cada una de las curvas de decaimiento a profundidad constante, se calcula qué edad terrestre debió tener el meteorito si la muestra se hubiera encontrado a cada profundidad determinada. En particular, en la figura se muestra un ejemplo: si la muestra hubiera estado a 176.8 cm de profundidad, la edad del meteorito debió ser entre 131115 y 246628 años. Reflejando este cálculo en el plano *edad terrestre – profundidad preatmosférica* (figura 7-2) se obtiene una forma poligonal que puede verse en la figura 7-5. En ella se muestran los polígonos correspondientes a las muestras TPB, TPC, ANU-I y ANU-B obtenidos a partir de los valores de la concentración medida de ^{36}Cl . También se muestran la ubicación de los puntos indicados en la figura 7-4.

Si, como se dijo en la sección 7.2, se hubieran obtenidos valores para las concentraciones de los demás radioisótopos, este análisis podría haberse repetido en cada caso y obtener una región poligonal análoga a la del ^{36}Cl para cada uno de ellos. La intersección de esas figuras en el plano *edad terrestre – profundidad preatmosférica* hubiera aportado mayor precisión en las conclusiones. Sin embargo, evidentemente las muestras que han sido medidas en este trabajo han estado muy profundamente ubicadas en el meteorito madre por lo que la producción de ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca y ^{59}Ni se ha visto muy disminuida por el importante blindaje a la radiación cósmica.

De la figura 7-5 pueden extraerse conclusiones acerca de la profundidad preatmosférica de las muestras y por consiguiente del tamaño del meteoroide antes que éste penetre en la atmósfera terrestre. En particular, dado que la muestra más profunda, ANU-I, estuvo ubicada a una profundidad de entre 190 y 210 cm, el meteoroide debió tener al menos 210 cm de radio. Esto, considerando una densidad promedio de 7.775 g/cm^3 , implica una masa de 310000 kg. Este valor es coherente con que el valor de 140000 kg (sección 4.4.2) sea un límite inferior.

Debe recalarse que en la figura 7-5, la edad terrestre está presentada en escala logarítmica, por lo que un muy pequeño cambio en la profundidad preatmosférica de las muestras se refleja en una importante variación en la edad del meteorito.

Otro hecho muy importante de resaltar es la coherencia que muestran las formas poligonales. Independientemente de la edad absoluta del meteorito, los resultados son autoconsistentes entre sí, ya que para un valor de edad terrestre determinado la distancia relativa entre las muestras se mantiene constante y similar a la que podría obtenerse para otro valor.

Finalmente, si bien la figura 7-5 da un amplio margen para la estimación de la edad terrestre del meteorito, desde aproximadamente 4000 hasta 300000 años, puede verse que no entra en contradicción con las mediciones indirectas realizadas por Cassidy y sus colaboradores ([9], [10] y [46]) presentadas en la sección 4.4.1, de 3945 años. En particular, si se considerara como válida esa edad puede verse en la tabla 7-5, cuáles debieran haber sido las profundidades preatmosféricas calculadas según la concentración de cada uno de los diferentes radioisótopos. Como se ve, según las cotas obtenidas para ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca y ^{59}Ni , las profundidades calculadas son límites inferiores por lo que son coherentes con los valores dados por la concentración de ^{36}Cl .

Muestra	$d(^{36}\text{Cl})$ [cm]	$d(^{26}\text{Al})$ [cm]	$d(^{10}\text{Be})$ [cm]	$d(^{41}\text{Ca})$ [cm]	$d(^{59}\text{Ni})$ [cm]
TPB	182 – 187	> 155	> 140	> 142	> 173
TPC	162 – 165	> 146	> 123	> 138	> 204
ANU-I	202 – 210	> 150	> 161	> 156	> 181
ANU-B	194 – 200	> 136	> 180	> 154	> 178
JFN1	-	> 123	> 96	> 139	> 172

Tabla 7-4: Profundidades preatmosféricas (en cm) de las diferentes muestras calculadas a partir de la concentración medida de los diferentes radioisótopos y modelada según el modelo LCS.

Es importante remarcar que si bien para la muestra JFNI no se ha obtenido la profundidad preatmosférica exacta (por que no ha podido medirse en ella ^{36}Cl), es posible concluir que este fragmento era más superficial que aquel del cual provenían las otras cuatro muestras.

El tamaño preatmosférico que puede estimarse a partir de los valores presentados en la tabla 7-4 son coherentes con el mencionado previamente, del orden de 310000 kg.

Figura 7-1: Tasas de producción teóricas de ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca y ^{59}Ni en función de la profundidad preatmosférica en el momento de la caída del meteorito, calculadas según el modelo LCS.

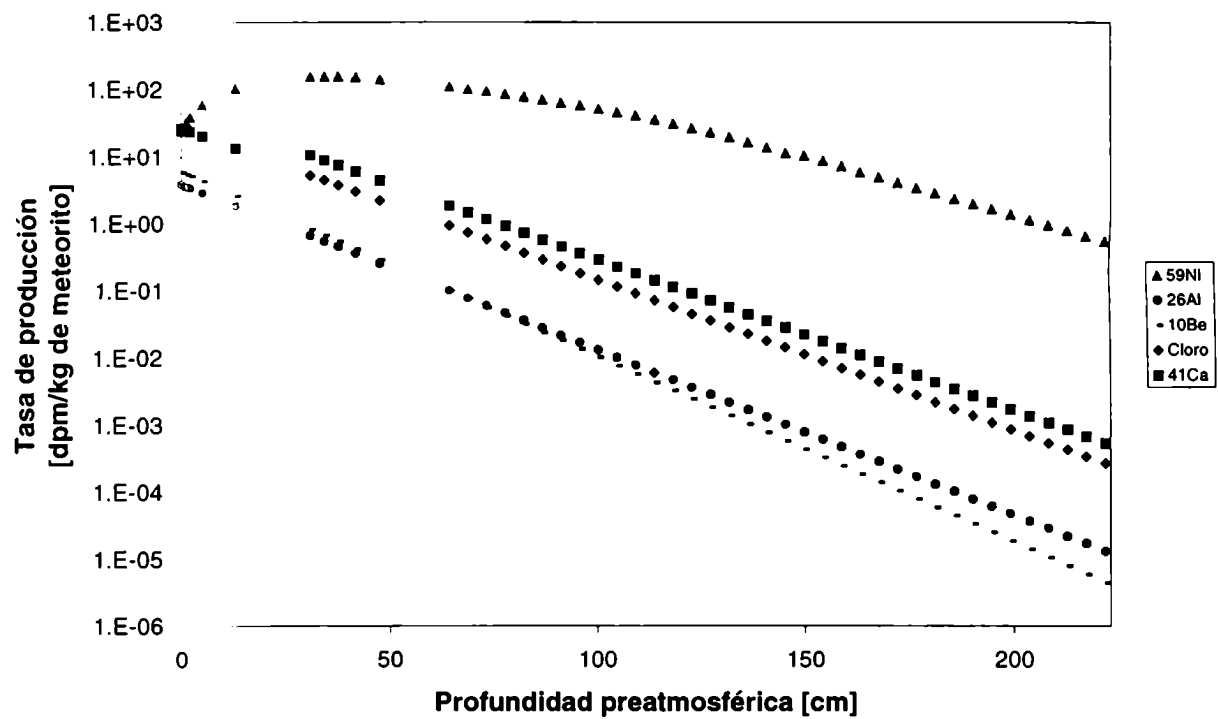


Figura 7-2: Espacio de *profundidad preatmosférica* – *edad terrestre* – *tasa de producción*. Los números indican los diferentes planos posibles.

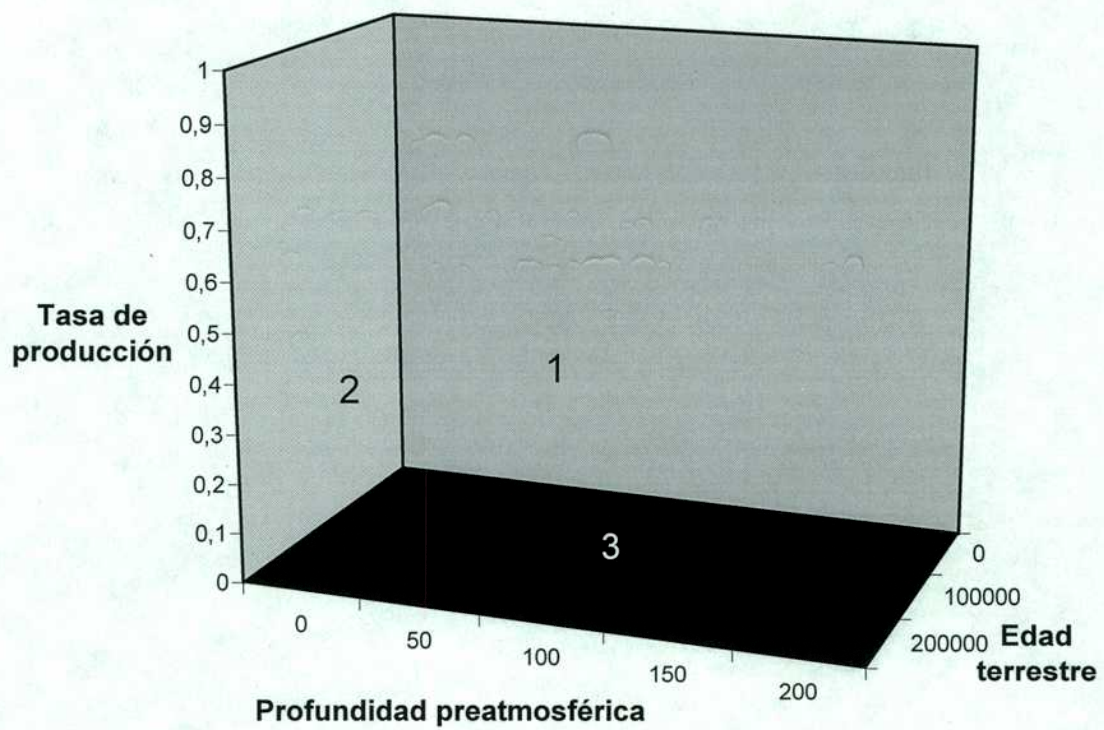


Figura 7-3: Tasa de producción teórica de ^{36}Cl según los modelos de Reedy-Arnold y LCS. Corresponde al plano *tasa de producción – profundidad preatmosférica* de la figura 7-2. Se indica el punto de profundidad preatmosférica $d = 176.8$ cm, que será usado en las figuras siguientes como ejemplo.

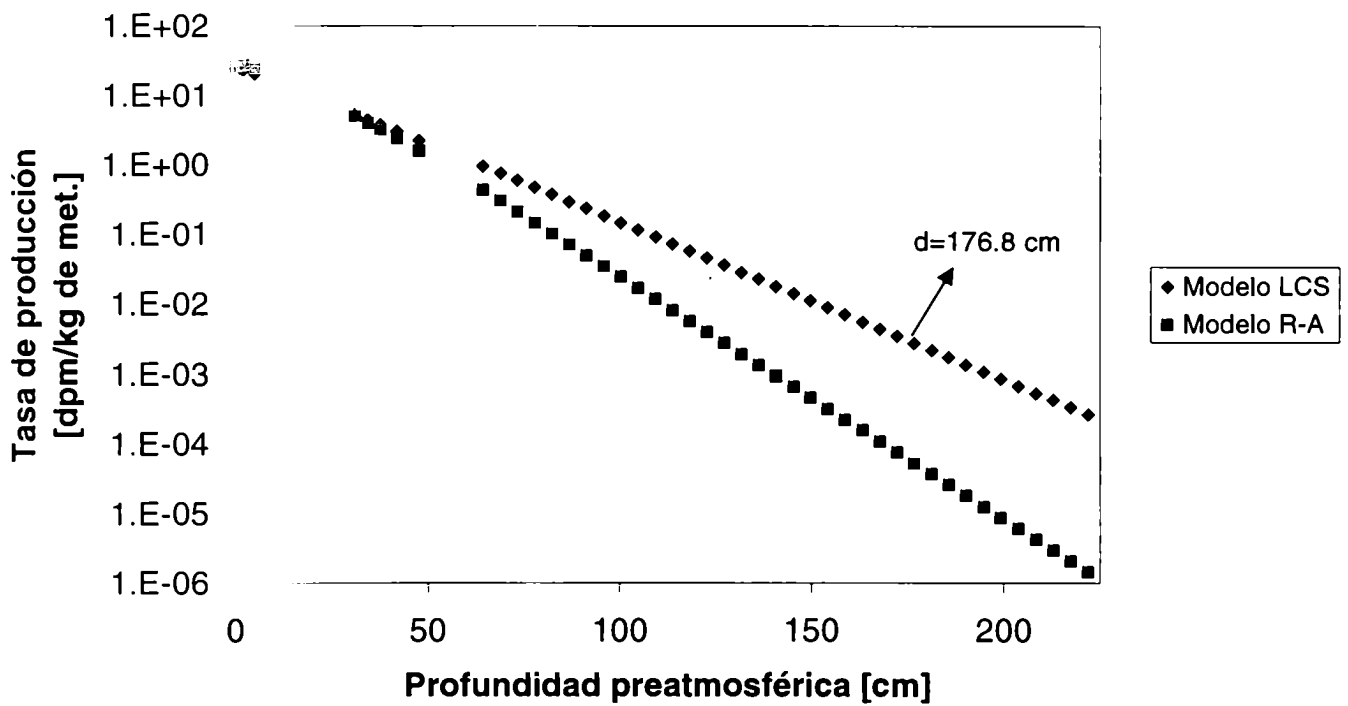


Figura 7-4: Decaimiento de ^{36}Cl , para la muestra TPB. Corresponde al plano *tasa de producción – edad terrestre* de la figura 7-2.

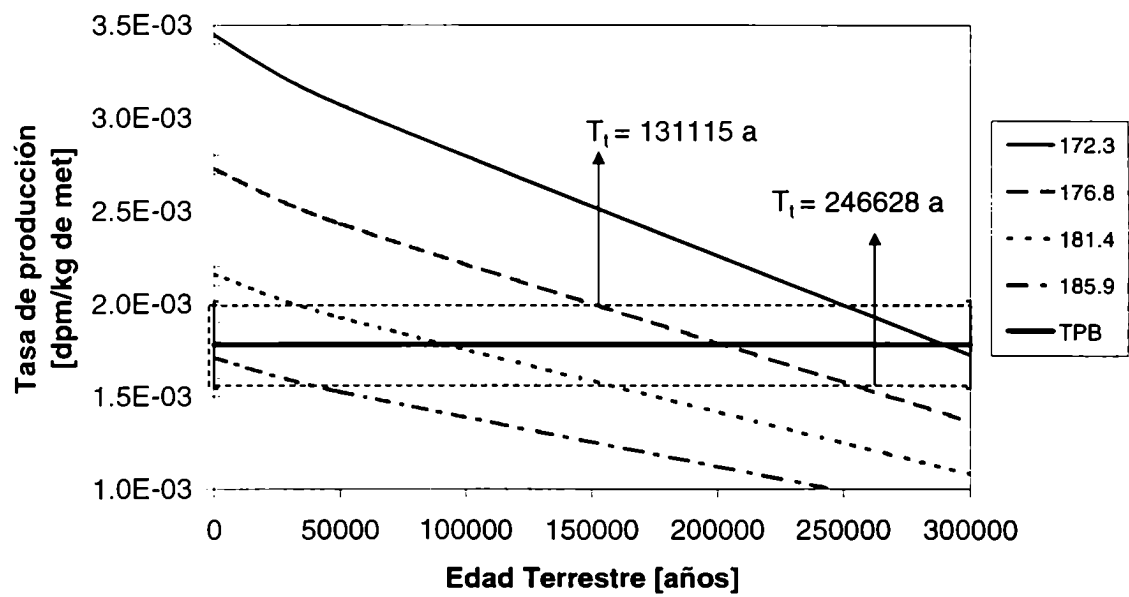
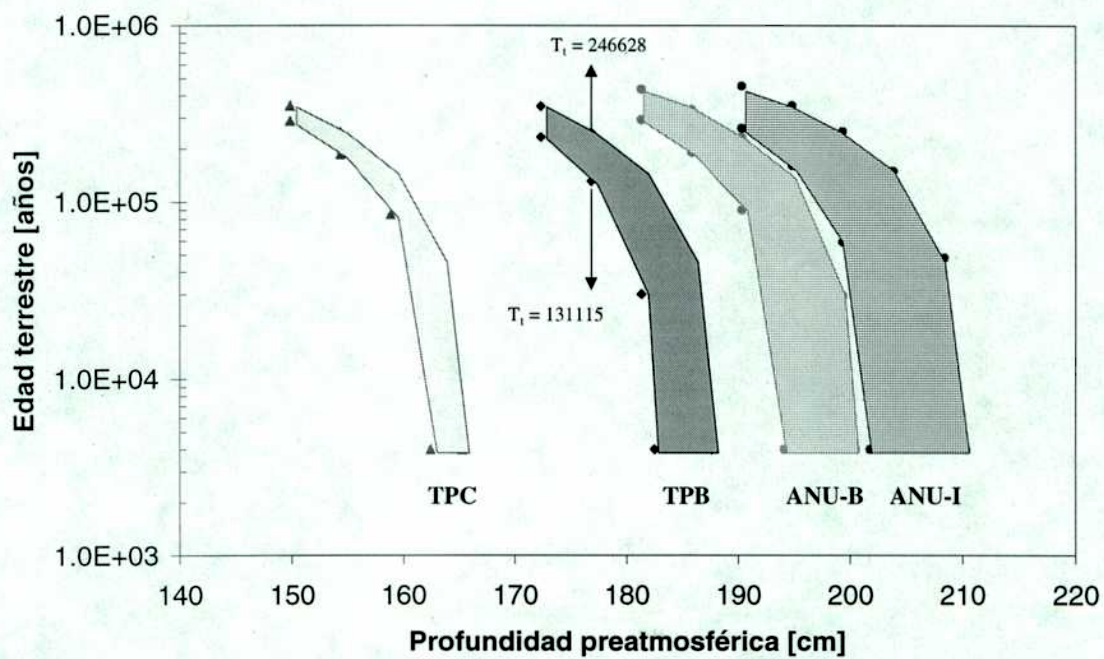


Figura 7-5: Gráfico de edad terrestre vs. profundidad preatmosférica. Los resultados son calculados a partir de los valores medidos de concentración de ^{36}Cl .



8 Conclusiones

En este trabajo se ha utilizado la medición de la concentración de radionucleidos cosmogénicos de vida media larga (^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca y ^{59}Ni) en dos fragmentos del meteorito de Campo del Cielo para estimar su edad terrestre y su tamaño preatmosférico.

Entre todos los materiales extraterrestres, los meteoritos son los que muestran mayores efectos de la radiación cósmica a la que se ven sometidos debido a que los productos de las reacciones nucleares provocadas por las partículas incidentes se acumulan durante lapsos de tiempo extraordinariamente largos, antes de su caída a la Tierra. Esos productos son los llamados nucleidos cosmogénicos y pueden ser o no, radiactivos. La presencia de esta clase de radioisótopos y la abundancia anormal de elementos estables es utilizada para la determinación de la intensidad de los rayos cósmicos, su espectro de energía y la dosis de radiación acumulada a la cual los meteoroides han estado sujetos [72].

Una vez que los meteoroides son atrapados por la gravedad terrestre, penetran en la atmósfera y caen a la superficie de nuestro planeta, el efecto de la radiación cósmica se ve disminuido en varios órdenes de magnitud, por lo que la producción terrestre de los nucleidos cosmogénicos es despreciable. Midiendo su concentración es posible, en general, estimar la edad terrestre de cada meteorito y su tamaño preatmosférico que es precisamente lo que se ha hecho en este trabajo.

En la sección 7.2 se ha explicado la importancia de medir más de un radionucleido. La actividad de un determinado isótopo inestable, medida en el laboratorio, depende del tiempo que el meteorito haya permanecido en la Tierra y de la actividad del propio nucleido en el momento de la caída. Ésta, a su vez, depende de la posición de la muestra en el meteorito madre. Por ello la medición de un único radioisótopo no brinda información suficiente para obtener valores inequívocos de estos parámetros. De allí surge la necesidad de medir varias especies radiactivas. En este caso en particular se han elegido los isótopos ya mencionados, ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca y ^{59}Ni . En las muestras TPB, TPC, ANU-I y ANU-B ha sido posible obtener el valor de la concentración de ^{36}Cl . Para los otros cuatro radioisótopos sólo ha sido posible obtener una cota superior del valor de su actividad en todas las muestras.

Las mediciones se han realizado utilizando la espectrometría de masas con aceleradores de partículas (AMS). Ésta es una técnica ultrasensible que se basa en el conteo individual de átomos, por lo que es particularmente útil para medir las concentraciones del orden de entre 10^{-12} y 10^{-15} en las que aparecen los radionucleidos de vida media larga. Para su aplicación a las muestras de material meteorítico ha sido necesario someter a éstas a un procesamiento químico previo con el objetivo de eliminar al máximo la presencia de los isóbaros estables de los radioisótopos a medir. Aún cuando la abundancia natural de estos elementos sea muy pequeña, siempre constituyen una fuente de contaminación de la medición, dada la extremadamente baja concentración del nucleido de interés. Por ello, además de eliminarlos químicamente, se han utilizado detectores de radiación capaces de discernir en número atómico y por lo tanto de separar al nucleido inestable de su isóbaro, aún cuando la concentración de éste fuera del orden de una parte en un millón.

Durante la preparación química de las muestras meteoríticas se ha preparado simultáneamente, siguiendo el mismo proceso, una muestra *blank*, para cada isótopo a medir. El *blank* no contiene al radioisótopo de interés y se ha utilizado para determinar la sensibilidad de la medición. Por otra parte ha permitido comprobar que ninguna de las técnicas empleadas han introducido contaminaciones no deseadas.

En las muestras de Campo del Cielo la relación $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ha resultado ser del orden de 10^{-11} a 10^{-15} según la muestra, lo que representa entre 10^7 a 10^{10} átomos de $^{10}\text{Be}/\text{kg}$ de meteorito. Estas concentraciones respecto de los isótopos estables se repiten aproximadamente para las demás especies medidas, de manera que se ha establecido que la presencia de ^{26}Al , ^{36}Cl y ^{41}Ca en este meteorito es del orden de entre 10^5 y 10^6 átomos de cada uno de esos elementos radiactivos por kilogramo de material y entre 10^{10} y 10^{11} átomos de ^{59}Ni por kilogramo de meteorito. Recordando que el número de Avogadro es 6.02×10^{23} , estos valores muestran la excelente sensibilidad de AMS, capaz de medir una cantidad tan pequeña de átomos en una muestra. A pesar de ello, se ha afirmado haber obtenido valores límites en las mediciones de ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca y ^{59}Ni en el meteorito debido a que su abundancia en las muestras del material extraterrestre ha sido comparable con la del *blank*. Es decir, la limitación es propia del material estudiado y no de la técnica.

Los resultados han sido interpretados a la luz de la teoría predicha por el modelo LCS para la tasa de producción de radioisótopos cosmogénicos. Este método utiliza técnicas de Monte Carlo para la simulación de los eventos inducidos por las partículas de los rayos cósmicos [28].

La actividad de ^{36}Cl medida en las diferentes muestras ha sido estudiada en el marco de un enfoque que contempla un espacio de tres dimensiones: *profundidad preatmosférica – edad terrestre – tasa de producción*. Realizando cortes en los diferentes planos de ese espacio pueden extraerse conclusiones acerca de la edad terrestre y el tamaño preatmosférico del meteorito de Campo del Cielo.

En el plano *tasa de producción – profundidad preatmosférica*, a edad terrestre $T_t = 0$, es donde se han presentado las predicciones teóricas. Para realizar la comparación con los resultados experimentales, como estos han sido obtenidos un determinado tiempo, T_t , posterior a la caída del

meteorito a la Tierra ha sido necesario extrapolar las tasas de producción en el momento de la caída, teniendo en cuenta el decaimiento radiactivo natural de cada radioisótopo. En el plano *tasa de producción – edad terrestre*, por lo tanto, para cada muestra y con los límites dados por el error experimental en la medición de ^{36}Cl , se ha determinado la edad terrestre posible asumiendo cada una de las profundidades preatmosféricas posibles como constantes.

Finalmente, en el tercer plano, *edad terrestre – profundidad preatmosférica*, pueden volcarse aquellas edades terrestres calculadas para cada muestra, desde aproximadamente 4000 hasta 300000 años, generando una figuras poligonal para cada una, como puede verse en la sección 7.3. Es de remarcar la coherencia de dichas figuras: independientemente de la edad terrestre, mantienen correctamente la distancia relativa entre las muestras.

Dado que de los demás radioisótopos sólo se han obtenido valores límites de su concentración no ha sido posible repetir este proceso y generar una figura en el plano *edad terrestre – profundidad preatmosférica* para cada uno de ellos. El hecho de obtener una figura para cada muestra y para cada isótopo hubiera permitido obtener un valor más preciso de la edad terrestre del meteorito. A pesar de ello, es posible afirmar que la estimación presentada en este trabajo está de acuerdo con las mediciones indirectas, que han sido recopiladas de la bibliografía [9].

La concentración de ^{36}Cl medida en las diferentes muestras de este meteorito ha permitido estimar la profundidad de cada una de las muestras medidas. Y, aunque si bien no ha podido medirse este isótopo en la muestra JFNI, según los límites calculados en base a los resultados obtenidos para los demás radioisótopos se ha podido estimar que debió haber estado levemente más cercana a la superficie del meteoroides madre que las otras cuatro muestras.

Es importante recordar que las muestras TPB, TPC, ANU-I y ANU-B han formado parte del mismo fragmento. Los resultados obtenidos permiten ordenarlas según profundidad preatmosférica creciente siendo TPC la más superficial, seguida por TPB, ANU-B y finalmente ANU-I. De aquí se deduce que el fragmento del cual esta muestras provienen debió haber estado situado en forma aproximadamente radial dentro del meteoroides madre.

Dado que la máxima profundidad preatmosférica obtenida es de entre 190 y 210 cm se afirma, antes de penetrar en la atmósfera terrestre, el meteoroides madre debió tener no menos de esa longitud de radio y una masa de entre 220000 y 310000 kg. Los valores límites obtenidos para las concentraciones de los demás radioisótopos se reflejan en una cota inferior para el tamaño preatmosférico perfectamente coherente con las predicciones realizadas a partir del ^{36}Cl . Estas dimensiones para el meteoroides madre, permiten afirmar que el meteorito de Campo del Cielo es uno de los más grandes del tipo ferroso que haya caído en la Tierra.

Las muestras aquí medidas han sido obtenidas al azar y aún así ha sido posible extraer las conclusiones presentadas. Por ello, este trabajo sienta un importante precedente y es un incentivo para realizar un estudio extremadamente sistemático de numerosas muestras. Dicho estudio debería

contemplar el levantamiento de un patrón de profundidades según la concentración de los radioisótopos cosmogénicos y por otra parte, asegurar la obtención de muestras más superficiales las cuales deberían tener mayor abundancia de ellos. Con una mayor presencia de los nucleidos radiactivos sería posible, no sólo obtener la edad terrestre con mayor precisión, sino que podría ser posible la obtención, por este método de la edad de exposición a la radiación cósmica del meteorito.

Si bien en la literatura es posible hallar gran cantidad de trabajos sobre meteoritos rocosos, es de remarcar que los estudios sobre meteoritos ferrosos son escasos, y por cierto, menos numerosas aún son las investigaciones sobre el meteorito de Campo del Cielo en particular. En este sentido, la presente tesis es pionera en cuanto al meteorito estudiado y al número y simultaneidad de radioisótopos de vida media larga medidos.

9 Apéndices

9.1 Apéndice 1

Procesamiento químico de las muestras

El objetivo del procesamiento químico del material meteorítico es la eliminación al máximo nivel posible de los isóbaros estables de los radioisótopos a medir así como la conversión de cada muestra a una forma apta para ser colocada en la fuente de iones del acelerador.

Es posible separar las muestras del meteorito de Campo del Cielo en dos: 1) la muestra JFN1, proveniente de un fragmento percutido por las condiciones climáticas y 2) las otras cuatro muestras: TPB, TPC, ANU-I y ANU-B, las cuales pertenecían a un fragmento pulido en su mayor parte, con un aspecto claramente metálico y con una delgada capa de corteza.

Por otra parte, el proceso necesario para obtener muestra de ^{36}Cl es completamente diferente al que debe realizarse para medir ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca y ^{59}Ni . Es más, las muestras correspondientes a estos cuatro isótopos se obtienen como resultados simultáneos de la misma preparación.

Los dos grupos de muestras fueron sometidos a procesos diferentes de limpieza inicial y luego todas siguieron el mismo proceso, desde la disolución hasta la obtención de la muestra lista para ser colocada en la fuente de iones, teniendo en cuenta los dos grupos de isótopos.

9.1.1 Muestras de ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca y ^{59}Ni

El proceso seguido para la preparación de las muestras ha sido extraído de numerosas fuentes ([73], [74], [75], [76] y [77]).

- a) Preparación previa: La muestra JFN1, como se mencionó anteriormente estaba fuertemente afectada por las condiciones climáticas del entorno en el que se conservó desde la caída del meteorito. El fragmento inicial (aproximadamente 26 g) fue machacado en un mortero de mármol de boca pequeña. Luego se realizó una separación de la fracción magnética con un

imán. A esta fracción magnética se le realizó un lavado ultrasónico con 10% HF (ácido fluorhídrico) seguido de un enjuague con agua [64] luego del cual el material resultante se dividió en dos partes aproximadamente iguales (aproximadamente 2.6 g cada una). Una de ellas se utilizó para la preparación de la muestra de ^{36}Cl y la otra para la de los demás isótopos. El material que dio lugar a las muestras TPB, TPC, ANU-I y ANU-B no se veía afectado por las condiciones climáticas. Por ello, no fue necesaria ninguna preparación previa a la limpieza inicial.

- b) Limpieza inicial: Las cinco muestras fueron tratadas de la misma manera. Se realizó tres veces un lavado ultrasónico de 10 minutos de duración con 1M HCl (ácido clorhídrico) seguido de un enjuague profundo con agua.
- c) Agregado de carriers: A las cinco muestras, TPB, TPC, ANU-I, ANU-B y JFN1 se les agregó carrier de Be, Al y Ca
- d) Disolución: 10 ml de 4M HCl más 18 ml de 45% HNO_3 (ácido nítrico) por gramo de muestra. Luego, para acelerar la disolución se agregaron 9 ml de 9M HCl por gramo de muestra.
- e) Separación del Hierro: Dado el alto contenido de hierro en el meteorito (aproximadamente el 92%) fue necesario una primera separación del hierro utilizando diisopropiléter, obteniendo como resultado una solución prácticamente transparente casi libre de hierro.
- f) Intercambio aniónico: La solución resultante del paso anterior fue sometida al pasaje por una columna de intercambio aniónico. En particular, en el caso de la muestra JFN1, antes de hacer este pasaje se evaporó dos veces la solución con HClO_4 (ácido perclórico) con el objeto de eliminar por completo los residuos de flúor. El pasaje por la columna de intercambio aniónico sirvió para realizar una segunda limpieza del hierro en la muestra eliminar el Co presente en la misma (el ^{59}Co , único isótopo estable del cobalto, es el isóbaro del ^{59}Ni), los cuales quedan atrapados en la columna. El pasaje por la columna de intercambio aniónico redujo a 1×10^{-3} la presencia de este elemento. El resultado de este paso ha sido una solución de aproximadamente 20 ml de 9M HCl, conteniendo Be, Al, Ca y Ni.
- g) Separación Be + Al v Ca + Ni: Luego de evaporar la solución hasta aproximadamente 3 ml, se agregó NH_4Cl (cloruro de amonio) sólido. A ella, a su vez, se le agregó NH_4OH ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$, solución acuosa de amoníaco, amonía) en gotas hasta ver un precipitado. Luego del centrifugado correspondiente, se obtuvo la fase sólida conteniendo Be + Al, y una fase líquida, conteniendo Ca + Ni. Ambas fracciones fueron luego evaporadas con 40% HNO_3 para eliminar la amonía y luego disueltas en 1M HCl, dejándolas ya listas para ser pasadas por sendas columnas de intercambio catiónico.

- h) Intercambio catiónico: Se prepararon dos columnas de intercambio catiónico por muestra. Luego del acondicionamiento de cada una de ellas, se cargó la solución conteniendo Be + Al en una y la Ca + Ni en la otra.

Fracción de Be + Al: Se realizó la extracción del Be con 80 ml de 1M de HCl y luego la del Al con otros 80 ml de 4.5M HCl. Resultado: una solución 1M HCl conteniendo Be y una solución 4.5M de HCl conteniendo Al.

- b. Fracción de Ca + Ni: En un proceso análogo se extrajo el Ni y el Ca con 120 ml de 1M de HCl y 80 ml de 4.5M HCl, respectivamente. Resultado: una solución 1M HCl conteniendo Ni y una solución 4.5M de HCl conteniendo Ca.

- i) Muestras de Be y de Al:

Después de evaporar ambas soluciones, se les agregó NH_4OH en gotas para obtener el precipitado de los correspondientes hidróxidos.

- b. Luego de extraer el precipitado mediante centrifugación, se disolvió y en HNO_3 , evaporando y repitiendo el proceso tres veces. La última de ellas agregando dos o tres gotas HClO_4 para eliminar los restos de B (boro, el ^{10}B es el isóbaro del Be, que pudiera haber aparecido por realizar la preparación en vasos de precipitado de vidrio).

Agregado de AgNO_3 (nitrato de plata), manteniendo la relación 4 Ag: 1 Be (o Al).

- d. Agregado de NH_4OH (solución 1:1 con H_2O) para la formación del precipitado de $\text{Be}(\text{OH})_2$ (hidróxido de berilio) y $\text{Al}(\text{OH})_3$ (hidróxido de aluminio).

Extracción de los precipitados por centrifugado.

- f. Secado a 70°C y posterior calcinado para la conversión de los hidróxidos en óxidos en dos etapas: a 340°C durante media hora y a 850°C durante dos horas.
Resultado: Muestra de BeO y de Al_2O_3 listas para ser prensadas en los portamuestras y montadas en la fuente de iones.

- j) Muestras de Ni:

la solución de 120 ml 1M HCl, conteniendo al Ni debió dejarse evaporar hasta consistencia siruposa [75].

- b. Se disolvió en H_2O y se le agregó $\text{Na}(\text{OH})$ (hidróxido de sodio) en gotas para obtener $\text{Ni}(\text{OH})$ (hidróxido de níquel) en forma de precipitado.

Se extrajo el precipitado por centrifugado y se dejó secar a 110°C. Finalmente se calcinó para obtener el NiO (óxido de níquel) durante dos horas a 600°C. Resultado: muestra de NiO lista para ser prensada en un portamuestra y montada en la fuente de iones.

k) Muestras de Ca:

- a. La solución de 80 ml de 4.5M HCl debió dejarse evaporar sin que se seicara por completo. Luego se le agregó solución de $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ (oxalato de amonio).
- b. Se agregó NH_4OH en gotas para obtener CaC_2O_4 (oxalato de calcio) en forma de precipitado.
- c. Se extrajo el precipitado por centrifugado y se lo disolvió en 1M HCl.
- d. Se agregó 10% HF en gotas para obtener el precipitado de CaF_2 .
- e. Luego de extraer el precipitado por centrifugado se lo secó a 110°C y luego se lo calcinó por dos horas a 250°C. Resultado: Muestra de CaF_2 lista para ser mezclada con polvo de Ag y montada en la fuente de iones.

9.1.2 Muestras de ^{36}Cl

La preparación de las muestras de cloro requirió la utilización de un ambiente limpio, libre al máximo de posibles contaminaciones con cloro. El objetivo de esta preparación es la eliminación del isóbaro ^{36}S y la conversión del material meteorítico a AgCl en polvo para ser prensadas y colocadas en la fuente de iones.

- a) Preparación previa: La muestra JFN1 fue tomada de la preparación explicada en la sección 8.1.1. Las demás muestras no requirieron preparación previa alguna.
- b) Limpieza inicial: Dado que debía evitarse la utilización de HCl, para no introducir contaminación en la cantidad de Cl a medir, el baño ultrasónico se realizó con 10% HF, tres veces de 10 minutos cada vez, con profundos lavados con H_2O entre cada uno de ellos.
- c) Agregado de carrier: se agregó el carrier de Cl, una solución de 9.71679 mg de Cl⁻ por cada gramo de solución.
- d) Disolución: se disolvió la muestra con aproximadamente 20 ml de 45% HNO_3 por cada gramo de muestra.
- e) Primera precipitación de AgCl (cloruro de plata):

Luego de calentar hasta ver movimientos convectivos, se agregó 1 ml de 10% AgNO_3 (nitrato de plata) por cada miligramo de cloro agregado en el carrier. La solución resultante se dejó reposar un par de días en la oscuridad.

- b. Al cabo de ese tiempo transcurrido un fino polvo se había depositado en el fondo del vaso de precipitado y luego de extraerlo centrifugando, se disolvió el material recogido en una solución de amoníaco (1:1 con H_2O (nota: el agua utilizada en todos los procesos fue agua desmineralizada)) y se completó la disolución agregando H_2O .
- f) Limpieza de S: Este paso debió realizarse en tubos de centrifugado de vidrio para reducir al máximo las posibles contaminaciones de S. Se le agregó a la solución obtenida en el paso anterior 1 ml de $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ (nitrato de bario) saturado (es decir, con cristales depositados en el fondo). Los tubos se cubrieron con parafilm, un film transparente, que permite evitar que se deposite polvo sobre la solución pero es permeable al CO_2 de la atmósfera, de manera que este ayude a la precipitación del BaSO_4 (sulfato de bario).
- g) Precipitación final de AgCl :

- a. Se preparó una solución de 2M HNO_3 + H_2O a la que se le agregó solución de AgNO_3 .
- b. Se centrifugó el precipitado de SO_4 y se extrajo mediante pipetas el líquido sobrenadante, teniendo cuidado de no levantar la más mínima contaminación del fondo (este método puede parecer primitivo, pero realmente funciona).

El líquido extraído en el paso b se agregó a las soluciones ya preparadas en el paso a. Luego, la solución resultante se dejó nuevamente reposar en la oscuridad.

- d. Luego de uno o dos días de reposo el AgCl , ya libre de S, precipitó nuevamente en el fondo y fue separado por centrifugado y extracción del líquido sobrenadante.

El precipitado se dejó secar durante la noche a 60°C , luego de la cual las muestras estaban listas para ser prensadas y medidas.

- h) Prensado de las muestras: A diferencia de las muestras de los demás radioisótopos, que se prensan en portamuestras de Cu y se montan en la rueda de la fuente de iones también de Cu, con las muestras de ^{36}Cl se siguió un proceso particular. Para evitar la contaminación con S, de cualquier elemento que pudiera utilizarse en la fuente de iones, en cada posición de la rueda de la fuente de iones se coloca un lecho de BaNO_3 , sólido, dejando un hueco, en el centro donde es donde se colocó la muestra a medir.

9.2 Apéndice 2

Cálculos utilizados para obtener concentraciones de radioisótopos en desintegraciones por minuto por kilogramo de meteorito.

En esta sección se detallan los cálculos realizados para obtener las concentraciones medidas en desintegraciones por minuto, a partir del número de eventos del radioisótopo en cuestión y de los kilogramo de meteorito, demás datos obtenidos durante la medición. Se dividirá el tratamiento según los diferentes isótopos.

9.2.1 Berilio 10

A partir de los espectros bidimensionales mencionados en la sección 5.3.2.1, se obtuvo el número de átomos de ^{10}Be presentes en cada muestra, en la muestra patrón y en el *blank*. Estos pueden verse en la segunda columna de la tabla 9-1. La tercera columna de la misma tabla presenta el número de eventos de ^{17}O , tomadas en el momento de la medición. A partir de ellos se sustrajo el fondo de la medición a partir del número de eventos de ^{10}Be y el número de eventos de ^{17}O para el *blank*. Luego se realizó el cociente C_{Be} entre el número normalizado de eventos de ^{10}Be y las de ^{17}O , siguiendo la ecuación 9.1.

Muestra	^{10}Be Nro. de eventos.	^{17}O Nro. de eventos.	^{10}Be Nro. de eventos norm.	$^{10}\text{Be}/^{17}\text{O}$	Átomos de ^{10}Be / kg de met. [$\times 10^5$]
TPB	48 ± 6	2389 ± 49	24	0.010 ± 0.002	8.2 ± 1.7
TPC	10 ± 3	309 ± 17	7	0.022 ± 0.008	20.5 ± 7.8
ANU-I	55 ± 7	3963 ± 63	15	0.004 ± 0.001	1.9 ± 0.5
ANU-B	19 ± 4	1759 ± 42	1	0.0008 ± 0.0007	0.4 ± 0.3
JFNI	277 ± 16	2651 ± 52	251	0.094 ± 0.006	151 ± 11
RB1	38 ± 6	3805 ± 62	0	0.0000	
NIST	7551 ± 87	525 ± 23	7546	14.37 ± 0.16	

Tabla 9-1: Resultados de las mediciones de ^{10}Be para los parámetros tomados en el momento de la medición y el número de eventos de ^{10}Be obtenidas del análisis de los espectros. RB1 corresponde a la muestra *blank* y NIST es la muestra patrón.

$$C_{\text{Be}} = \frac{\text{eventos de } ^{10}\text{Be}}{\text{eventos de } ^{17}\text{O}} \quad (9.1)$$

Con la ecuación 9.2 se obtuvo el cociente $^{10}\text{Be}/\text{Be}$ (muestra)

$$\frac{{}^{10}\text{Be}}{\text{Be}} \Big|_{\text{muestra}} = \frac{\frac{{}^{10}\text{Be}}{{}^{17}\text{O}} \Big|_{\text{exp muestra}}}{\frac{{}^{10}\text{Be}}{{}^{17}\text{O}} \Big|_{\text{exp standard}}} \cdot \frac{{}^{10}\text{Be}}{\text{Be}} \Big|_{\text{nominal standard}} \quad (9.2)$$

Para los valores experimentales para la muestra patrón (o standard) se utilizó el promedio de los valores presentados en la tabla 9-1. El número de átomos de ${}^{10}\text{Be}$ por gramo de meteorito de obtiene de:

$$\begin{aligned} \frac{\text{Nro. de átomos de } {}^{10}\text{Be}}{\text{g de meteorito}} &= \\ &= \frac{{}^{10}\text{Be}/\text{Be} \Big|_{\text{muestra}}}{\text{át. de Be}} \cdot \frac{\text{át. de Be}}{\text{g de muestra}} = \\ &= \frac{{}^{10}\text{Be}/\text{Be} \Big|_{\text{muestra}} \cdot \frac{\text{g de carrier} \cdot NA}{PM(\text{Be})} \cdot \text{át. de Be}}{\text{át. de Be} \cdot \text{g de muestra}} \end{aligned} \quad (9.3)$$

donde NA es el número de Avogadro. Finalmente, los resultados de la tabla 6-1 surgen de:

$$\frac{\text{dpm}({}^{10}\text{Be})}{\text{kg de muestra}} = \frac{\text{Nro. de átomos de } {}^{10}\text{Be}}{\text{g de meteorito} \times 10^{-3}} \cdot \frac{1 \text{ dps} \cdot 60}{\tau [s]} \quad (9.4)$$

donde

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}, T_{1/2}({}^{10}\text{Be}) = 1.6 \times 10^6. \quad (9.5)$$

9.2.2 Aluminio 26 y Calcio 41

El análisis de los datos de ${}^{26}\text{Al}$ y ${}^{41}\text{Ca}$ se basa en los cocientes ${}^{26}\text{Al}/\text{Al}$ y ${}^{41}\text{Ca}/\text{Ca}$ obtenidos, a partir del número de eventos registrados en los espectros y el número de eventos de los isótopos estables en el momento de la medición, por programas de cálculos generados especialmente a tal efecto [79]. A partir de ellos se han obtenido los resultados mostrados en las tablas 9-2 y 9-3 para ${}^{26}\text{Al}$ y ${}^{41}\text{Ca}$, respectivamente.

Muestra	²⁶ Al Nro. de eventos.	²⁷ Al Nro. de eventos	²⁶ Al/Al [× 10 ⁻¹⁴]
TPB	1	3900 / 2992 / 2411 / 2053	1.2 ± 1.2
TPC	1	3211 / 1875 / 1310 / 983	1.9 ± 1.9
ANU-I	2	3812 / 2726 / 1436 / 1105	3.1 ± 2.2
ANU-B	0 (1)	731 / 637 / 519 / 421	5.9 ± 5.9
JFNI	3	2892 / 2492 / 1474 / 1109	5.1 ± 2.9
RBI	3	2417 / 2066 / 1790 / 1520	5.2 ± 3.0
STD	4709	1965 / 1838 / 1674	26200 ± 382

Tabla 9-2: Resultados de las mediciones de ²⁶Al para los parámetros tomados en el momento de la medición y el número de eventos de ²⁶Al obtenidas del análisis de los espectros. El número de eventos de ²⁷Al es la digitalización de la intensidad de corrientes integrada en los intervalos de 10 segundos en los que se midió dicho isótopo. RBI y STD corresponden a las muestras *blank* y patrón respectivamente.

Muestra	⁴¹ Ca Nro. de eventos	⁴⁰ Ca Nro. de eventos	⁴¹ Ca/Ca [× 10 ⁻¹⁴]
TPB	0 (1)	3030 / 4725 / 3828 / 3303	2.7 ± 2.7
TPC	0 (1)	3061 / 3443 / 3642 / 3120	3.1 ± 3.1
ANU-I	0 (1)	4956 / 5068 / 5084 / 4436	2.2 ± 2.2
ANU-B	0 (1)	4864 / 5094 / 4171 / 3832	2.3 ± 2.3
JFNI	1	5067 / 4298 / 4378 / 4414 / 5122 / 5076	1.7 ± 1.7
RBI	0 (1)	2967 / 3304 / 3324	5.5 ± 5.5

Tabla 9-3: Resultados de las mediciones de ⁴¹Ca para los parámetros tomados en el momento de la medición y el número de eventos de ⁴¹Ca obtenidas del análisis de los espectros. El número de eventos de ⁴⁰Ca es la digitalización de la intensidad de corrientes integrada en los intervalos de 10 segundos en los que se midió dicho isótopo. Los cocientes fueron determinados tomando 1 cuenta en el espectro, en aquellas muestras en las que no se midieron eventos en el espectro.

Para llevar los cocientes ²⁶Al/Al y ⁴¹Ca/Ca a una unidad referida al standard se utilizó la ecuación 9.6, que se presenta para el calcio, pero fue la misma utilizada para aluminio, haciendo las sustituciones ²⁶Al ⇔ ⁴¹Ca y ²⁷Al ⇔ ⁴⁰Ca.

$$\left. \frac{{}^{41}\text{Ca}}{\text{Ca}} \right|_{\text{muestra}} = \frac{\left. \frac{{}^{41}\text{Ca}}{{}^{40}\text{Ca}} \right|_{\text{exp muestra}}}{\left. \frac{{}^{41}\text{Ca}}{{}^{40}\text{Ca}} \right|_{\text{exp standard}}} \cdot \left. \frac{{}^{41}\text{Ca}}{\text{Ca}} \right|_{\text{no min al standard}} \quad (9.6)$$

Finalmente la conversión a desintegraciones por minuto por kilogramo de muestra se hizo utilizando la ecuación 9-4, donde se debió cambiar ¹⁰Be por ²⁶Al o ⁴¹Ca según correspondiera y considerar que la vida media del ²⁶Al es de 7.5 × 10⁵ a y la del ⁴¹Ca de 1 × 10⁵ a.

9.2.3 Cloro 36

La medición de ^{36}Cl fue la única que se hizo de manera absoluta, es decir no normalizada al valor medido para la muestra patrón. De ahí que se utilizara un programa análogo al utilizado para calcio y aluminio, para obtener la concentración de ^{36}Cl respecto del Cl total en la muestra teniendo en cuenta los valores de las corrientes integradas [79] de ^{35}Cl y ^{37}Cl y luego, directamente la conversión a desintegraciones por minuto por kilogramo de meteorito, utilizando la ecuación 9.4.

Muestra	^{35}Cl Nro. de eventos	^{37}Cl Nro. de eventos	Cociente 35/37	^{36}Cl Nro. de eventos	$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ Ctas [$\times 10^{-15}$]
STD	4750 / 4524 / 4102	1288 / 1200 / 1059	3.6879 / 3.7700 / 3.8735	1654	409.8 \pm 10.1
RBI	4131 / 4213 / 4192	1064 / 1071 / 1074	3.8825 / 3.9337 / 3.9032	0	0.3
TPB	3689 / 3717 / 3617	961 / 963 / 942	3.8387 / 3.8598 / 3.8397	57	17.3 \pm 2.3
TPC	3784 / 3342 / 3624	1040 / 1038 / 1036	3.6385 / 3.2197 / 3.4981	177	51.8 \pm 3.8
ANU-I	4019 / 4053 / 4058	1073 / 1094 / 1103	3.7456 / 3.7048 / 3.6791	22	6.0 \pm 1.3
ANU-B	4101 / 4246 / 4393	1167 / 1175 / 1209	3.5141 / 3.6136 / 3.6336	36	9.2 \pm 1.5

Tabla 9-4: Resultados de la medición de ^{36}Cl y los parámetros mencionados en la sección 5.2.3. El número de eventos de $^{35,37}\text{Cl}$ es lo obtenido en cada secuencia de 10s en los que se miden los isótopos estables. El cociente 35/37 es la relación en cada intervalo de 10s de dicha corriente integrada de los isótopos estables y el número de eventos de ^{36}Cl es el obtenido en los espectros bidimensionales.

9.2.4 Níquel 59

Por último, el ^{59}Ni ha sido el radioisótopo para el cual debió hacerse la mayor cantidad de conversiones, ya que se toma en cuenta, básicamente la medición realizada para la muestra patrón y sobre ella se establecen condiciones que ayudan a eliminar el fondo del isóbaro ^{59}Co , gracias a la utilización, como se explicó en el texto, de una señal de TAC entre los sectores ΔE_1 y ΔE_4 del detector. La secuencia del análisis de datos se detalla a continuación. Por otra parte, dado que no se agregó carrier de níquel, la conversión del número de átomos de ^{59}Ni por gramo de muestra a desintegraciones de ^{59}Ni por kilogramo de meteorito, se hizo teniendo en cuenta la concentración de níquel en el mismo, del orden del 6%.

- Se analizaron los espectros bidimensionales E_{tot} vs E_{res} , ΔE_1 vs ΔE_2 y ΔE_3 vs ΔE_4 y el TAC para la muestra patrón. En la figura 6-5 puede verse el espectro de E_{tot} vs E_{res} y el TAC.
- Se colocó una condición generosa, es decir incluyendo eventos que podrían considerarse del fondo, sobre el espectro unidimensional y con ella se analizaron nuevamente los espectros bidimensionales, colocándose condiciones sobre los espectros E_{tot} vs E_{res} y ΔE_3 vs ΔE_4 .

- c) Las condiciones obtenidas en el punto b son las utilizadas para una nueva analización de todos los espectros y la determinación de una condición, ahora más limitante en el TAC. Debe tenerse en cuenta que cada espectro se ha analizado sujeto a las condiciones obtenidas en los demás.
- d) Se realizó una nuevo análisis de todos los espectros, con la nueva condición y se colocó otra en el espectro ΔE_1 vs ΔE_2 . Con todas estas condiciones se analizó el TAC obteniendo un número N_1 ajustado de eventos de ^{59}Ni .
- e) Finalmente, se analizaron todos los espectros, aceptando algunos eventos en los espectros E_{tot} vs E_{res} y ΔE_1 vs ΔE_2 , que antes habían sido descartados. Con esto se obtuvo un número N_2 generoso de eventos de ^{59}Ni . Este proceso ha sido realizado para la muestra patrón la que ha proporcionado un cociente N_2/N_1 que sirvió de normalización para las muestras desconocidas.

Con esta secuencia se genera la tabla 9-5 en la que cada columna expresa los pasos de la misma.

Muestra	^{59}Ni Nro. de eventos	^{59}Ni eventos/seg	^{58}Ni eventos/seg	^{60}Ni eventos/seg	$^{59}\text{Ni}/\text{Ni}$ [$\times 10^{-13}$]
Penn.Std.	4686	8.528	2.5E+11	7.3E+10	267
JFNI	22	0.013	4.7E+10	1.3E+10	2.3 ± 0.4
ANU-I	12	0.007	3.9E+10	1.1E+10	1.5 ± 1.1
ANU-B	9	0.005	2.9E+10	8.2E+09	1.4 ± 1.4
TPB	15	0.009	3.9E+10	1.1E+10	1.8 ± 1.8
TPC	12	0.008	1.8E+11	5.1E+10	0.4 ± 0.7

Tabla 9-5: Resultados de la medición de ^{59}Ni , con los valores para los isótopos estables y el número de eventos del radioisótopo obtenido luego de la normalización al valor obtenido para la muestra patrón, habiendo descontado el fondo debido al ^{59}Co .

Referencias

- [1] Reedy R. C. *Nucl. Instr. and Meth Phys. Res.* B29 (1987) 251-261.
- [2] Graf T., Vogt S., Bonani G., Herpers U., Signer P., Suter M., Wieler R., Wölfi W. *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res.* B29 (1987) 262-265.
- [3] Masarik J., Reedy R.C. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 58 (1994) 5307.
- [4] Tuniz C., Bird J.R., Fink D., Herzog G.F. CRC Press LLC. (1998) "Accelerator Mass Spectrometry: Ultrasensitive Analysis for Global Science".
- [5] Fifield L.K. *Report on Progress in Physics.* Vol. 62, Nro. 8 (1999) 1223-1274.
- [6] Litherland A. E. *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res.* B5 (1980) 100.
- [7] Brown L. *Ann. Rev. Earth. Planet. Sci.* 12 (1984) 39.
- [8] Elmore D., Philips F. M. *Science* 236 (1987) 543.
- [9] Cassidy W., Renard M. *Meteoritics & Planetary Science* 31 (1996) 433-448.
- [10] Cassidy W.A. , Villar L. M., Bunch T.E., Kohman T.P., Milton D.J. *Science* 149 (1965) 1055-1064.
- [11] *Chart of Nuclides.* (1992). Japanese Nuclear Data Comitee and Nuclear Data Center. Japan Atomic Energy Research Institute.
- [12] Reedy R., J. Arnold. *Journal of Geophysical Research* Vol. 77. No. 4 (1972) 537.
- [13] Simpson J. A. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 33 (1983) 323.
- [14] Badhwar G. D., O'Neill P.M. *Nucl. Tracks. Radiat. Meas.* 20 (1992) 403.
- [15] Forman M. A., Stoenner W., Davis R. Jr. *Journal of Geophysical Research* 76 (1971) 4127.
- [16] Michel R., Dragovitsch P., Cloth P., Dagge G., Filges D. *Meteoritics* 26 (1991) 221.
- [17] Webber. W. *Handb. Phys.* 46-2 (1967) 181.
- [18] Reedy R.C., Arnold J.R., Lal D. *Science* 219 (1983) 127

- [19] Phillips J. L., Bame S. J., Feldman W. C., Goldstein B. E., Gosling J. T., Hammond C. M., McCommas D.J., Neugebauer M., Scime E. E. Suess S. T. *Science* 269 (1995) 1030.
- [20] Honda M. Arnold J. *Science* 143 (1964) 203.
- [21] Michlovich E. S., Vogt S., Masarik J., Reedy R. C., Elmore D., Lipschutz M. E. *Journal of Geophysical Research* 99. Nro. E11 (1994) Pages 23,187-23,194.
- [22] Arnold J.R., Honda M., Lal D. *Journal of Geophysical Research* Vol. 66. No 10 (1961) 3519.
- [23] Hess W.N., Patterson W., Wallace R. and Chupp E. *Physical Review* 116 (1959) 445.
- [24] Tajima E., Adachi M., Doke T., Kubota S and Tsukuda M. *J. Phys. Soc. Jap* 22 (1967) 355.
- [25] Mendell R.B., Korff S. A. *Journal of Geophysical Research* 68 (1963) 5487.
- [26] Armstrong T.W and Alsmiller R.G. *Proceedings of the Second Lunar Science Conference*. 2D (1971) 1729-1745.
- [27] Reedy R.C. *Journal of Geophysical Research* 90 (1985) Supplement C722.
- [28] Michlovich E.S. *Tesis Doctoral*. (1984)
- [29] Prael R.E., Lichtenstein H. *Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-89-3014* (1989).
- [30] Mc Graw-Hill. *Encyclopedia of Science and Technology*.
- [31] Fernández Niello J. O., Liberman R. G. *Ciencia Hoy*. Vol. 10 Nro.59 (2000) 18.
- [32] Lipschutz M. y L.Schultz. *Encyclopedia of the Solar System*. (1999) 629-671.
- [33] Budka P. Z., Viertel J. R. M., Thamboo S. V. *Advanced Mat. & Proc.* 7 (1996) 27.
- [34] Buchwald V.F. *Handbook of Iron Meteorites*. Univ. Conf. Press, (1975) 373-379.
- [35] Damon P. E. et al. *Nature* 337 (1989) 611.
- [36] Schnitzer R., Aberth W. A., Brown H. L., Anbar M. *Proc. 22nd Conf. on Mass Spectroscopy and Allied Topics, Philadelphia, PA*, 64 (1974) 361.
- [37] Hofmann H, G. Bonani, Morenzoni E., Nessi M., M.Suter and W. Wölfli. *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res.* B5 (1984) 254-258.
- [38] Alvarez, D.E. *Tesis Doctoral*. (1998).
- [39] Fernández Niello J. O., *Reporte Interno*. (1994).
- [40] Middleton R., "A negative ion cookbook". Dept. of Physics, University of Pennsylvania. Pittsburg. (1990). No publicado.
- [41] Pérez Ferreira E., Mariscotti M.A.J., Ventura E., Ceballos A., Fazzini N., Filevich A., González H., Requejo R., Ribarich R., Rossi J., Achterberg E., Camin D., Nicolai J. y Tau S. *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res.* 184 (1981) 161-172.

- [42] Fifield L.K., Ophel T.R., Bird J.R., Calf G.E., Allison G.B. and Chivas A.R. *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res.* B29 (1987) 114-119.
- [43] Paul M. *Nucl. Instr. and Meth Phys. Res.* B52 (1990) 315
- [44] Nágera J.J. *Dirección General de Minas, Geología y Hidrología* (1933) 19.
- [45] Spencer L.J. *Geographical Journal* 81 (1933) 227-248.
- [46] Romaña A., W. A. Cassidy. *Monografías, Universidad Nacional del Nordeste* (1972).
- [47] Cassidy W. A (2000). *Comunicación privada*.
- [48] Talleres Metalúrgicos San Martín, 1989, Chaco Análisis Químico Nro. 00.108 de una muestra del meteorito de Campo del Cielo.
- [49] Palacios T. (2000) *Comunicación privada*.
- [50] Cabanillas E. (2000) *Comunicación privada*.
- [51] Podosek Frank A. 1971. *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 35 (1971) 157-173.
- [52] Kaiser W. and Zähringer J. *Meteorite Research*, (1969) 429-443.
- [53] Nyquist L.E., Huneke J.C. and Signer P. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2 (1967) 241-248.
- [54] Signer P., Nier A. O. *Journal of Geophysical Research* Vol. 65 No. 9 (1960) 2947.
- [55] Leyva G., Benyacar M. (2000). *Comunicación privada*.
- [56] Arazi A., *Tesis de Licenciatura* (1997).
- [57] Achterberg E., Pacheco A. J., di Tada M., Fernández Niello J., Liberman R., Martí G. V., Ramírez M., Testoni J. E. y Koide K.. *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res.* A 361 (1995) 222.
- [58] Fernández Niello J. O., Testoni J. Elementos de Reacciones Nucleares. *Apuntes del Curso de la Carrera de Doctorado. Universidad Nacional de General San Martín.* (1997)
- [59] Fifield L. K. ⁴¹Ca Measurements. Internal Report, Department of Nuclear Physics, The Australian National University, (1999).
- [60] Paul M., Fifield L.K., Fink D., Albrecht A., Herzog G., Tuniz C. 1993. *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res.* B83 (1993) 275.
- [61] Vogt S., Herzog G. F., Reedy R. C. *Rev. Geophys.* 28 (1990) 253.
- [62] Nishiizumi, K.; Caffee, M. W.; Jeannot, J. P.; Lavielle, B.; Honda, M. *Met. Planet. Sci.* 32 (1997) A100.
- [63] Welten K. C., Nishiizumi K., Caffee M. W., *Lunar and Planetary Science XXXI.* (2000) 2077.pdf
- [64] Nagai H., Honda M., Imamura M., Kobayashi K. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 57 (1993) 3705.

- [65] Chang C. and Wacnke H. in: *Meteorite Research* (ed. P. M. Millman).. Reidel Publishing Company. (1969) 397-406
- [66] Schnabel C., Pierazzo E., Xue S., Herzog G.F., Masarik J., Creswell R.G., di Tada M.L., Liu K., Fifield L.K. *Science* 285 (1999) 85-88.
- [67] Reedy R. C. (2000). *Comunicación privada*
- [68] Dittrich B., U. Herpers, H.J. Hofmann, W. Wölfi, R. Bodeman, M.Lupke,R. Michel. P. Dragovitsch and D. Filges. *Nucl. Instr. and Meth Phys. Res. B52* (1990) 588-594.
- [69] Furukawa M., Shizuri K., Komura K., Sakamoto K. y Tanaka S. *Nucl. Phys. A174* (1971) 539-544.
- [70] Kutschera W. and M. Paul. *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* Vol. 40 (1990) 411-438.
- [71] Nishiizumi, K.; Caffee, M. W. *Met. Planet. Sci.*, 32 (1998) A117.
- [72] Lal D., Peters B., "Cosmic Ray Produced Radioactivity on the Earth". *Handbuch der Physik* v. 46/2, Springer, Berlin. (1967) 551
- [73] Merchel S. (2000). *Comunicación privada*.
- [74] Schnabel C. (1999). *Comunicación privada*.
- [75] Servant R., Ledesma A. (1997). *Comunicación privada*.
- [76] Vogt S. and U. Herpers. *Fresenius Z Anal Chem* Vol. 331 (1988) pág. 186-188
- [77] Stone J.O., di Tada M ANU - *AMS Program Research Report ¹⁰Be determination in soil by fusion*. Internal Report. Department of Nuclear Physics of The Australian National University (1997).
- [78] Voshage H. *Earth Planet. Sci. Lett.* 71 (1984) 181-194.
- [79] Fifield L.K. Programa de análisis para ²⁶Al, ⁴¹Ca, ³⁶Cl y ⁵⁹Ni. (1993).

Sres. Miembros de la
Subcomisión de Doctorado
Facultad de Ciencias exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires

Buenos Aires 23 de Febrero de 2001

Informe del trabajo de tesis presentado para optar por el título de Doctor en Física por la Lic. R. Liberman cuyo título es " Medición de radionucleidos cosmogénicos en el Meteorito de Campo del Cielo".

El trabajo presentado describe las tareas desarrolladas con el objeto de aplicar la técnica denominada Espectrometría de masa con Aceleradores o también denominada con su acrónimo inglés AMS (Accelerator Mass Spectrometry) utilizando el acelerador TANDAR. La misma permite medir con una resolución de una parte en 10^{15} el número de átomos de una muestra constituyendo una de las técnicas con mayor sensibilidad existente en la actualidad.

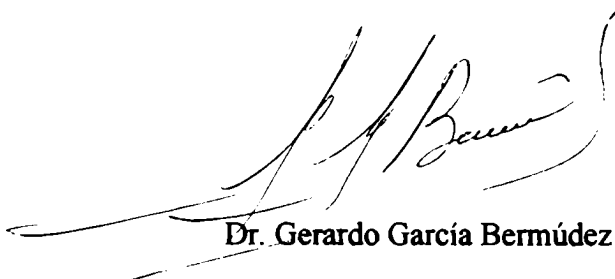
La idea central de esta tesis es realizar la determinación de la concentración de diferentes radionucleidos cosmogénicos en restos del meteorito hallado en el Chaco.

Los primeros capítulos describen cuidadosamente la producción y formación de isótopos cosmogénicos en los meteoritos previos a su caída en la Tierra en general y las particularidades del método AMS.

La preparación de los blancos y su análisis previos se realizaron en el laboratorio Tandar mientras que la medición de AMS fundamentalmente en Australia.

Los resultados son comparados con teorías existentes y se obtienen estimaciones del tiempo en que el meteorito cayó a la Tierra y su tamaño anterior al impacto.

En general es un trabajo muy bien logrado y en cierta manera pionero debido al estudio realizado. Finalmente por todo lo expuesto considero el trabajo de tesis como muy bueno esperando que la exposición oral sea del mismo nivel para poder definir la tesis como excelente.



Dr. Gerardo García Bermúdez



Universidad de Buenos Aires
Departamento de Física "Juan José Giambiagi"
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Buenos Aires, 25 de febrero de 2001

Informe sobre la Tesis doctoral de la Lic. Rosa G. Liberman

Tema de la Tesis: Medición de radionucleidos cosmogénicos en el meteorito de Campo del Cielo


Director de Tesis: Dr. Jorge O. Fernández Niello

Esta tesis esta centrada en el estudio de radioisótopos cosmogénicos formados en el meteorito de Campo del Cielo. Estos radionucleos son formados a partir de la interacción de la radiación cósmica galáctica con el material del meteorito. La Lic. Liberman estudio núcleos de vida media larga (^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca y ^{59}Ni) porque ellos pueden sobrevivir en el meteorito por largos periodos de tiempo dando además información acerca de la zona del meteorito donde se encontraban.

Ella participó en la implementación del método AMS en el acelerador TANDAR y consiguió obtener información sobre el tamaño preatmosférico del meteorito así como una cota acerca de la fecha de su caída.

El estudio de las concentraciones de los radionúcleos (^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca y ^{59}Ni) en los distintos fragmentos del meteorito fue realmente notable (estas mediciones, en el rango de 10^{-13} a 10^{-14} [átomos del radioisótopo por átomos de su isótopo estable] lo cual permitió establecer límites para el tamaño del meteorito y una cota a la edad terrestre del mismo. Hay que notar que dada la complejidad del proceso de medición son escasas las mediciones de este tipo sobre meteoritos ferrosos.

Considerando el trabajo realizado y los resultados obtenidos creo que la tesis presentada por la Licenciada Rosa Gabriela Liberman es apropiada y se le debe otorgar el título de Doctor en Física.


Guillermo G. Dussel



DEPARTAMENTO DE FÍSICA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
PABELLÓN I, CIUDAD UNIVERSITARIA
1428 - BUENOS AIRES, ARGENTINA

Dr. R. Piegai

E-mail: aia@df.uba.ar
Teléfono: (54)11-4576-3353
Fax: (54)11-4576-3357

Buenos Aires, 27 de febrero de 2001

Señores miembros de la
Comisión de Doctorado,

El próposito de la presente es manifestar que la tesis presentada por la Lic, Rosa Liberman alcanza sin duda el nivel de una Tesis de Doctorado del Departamento de Física pues su trabajo ha involucrado una gran cantidad de mediciones de alta precisión, y un cuidadoso y laborioso análisis de los datos.

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'R. Piegai', written over a horizontal line.

Dr. R. Piegai