UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA
"Prof. Jorge A. Sabato"

Implementación de un microhaz de iones pesados para el acelerador Tandar [(*)]

por Ing. Pablo A. Stoliar

Director y Codirector
Dr. Andrés J. Kreiner
Dr. Mario E. Debray

[(*)] Tesis para optar al título de Doctor en Ciencia y Tecnología mención Física

República Argentina

2004

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido 3
Abstract. 5
Resumen. 7
Notas al lector 9
Introducción. 11
Principio del microhaz y técnicas analíticas relacionadas. 13
  Sistema de coordenadas. 13
  Óptica iónica 13
    Descripción del transporte del haz mediante matrices de transferencia. 13
    Matriz de transferencia de una región libre de campos. 14
    Matriz de transferencia de una lente delgada. 14
    Matriz de transferencia de un cuadrupolo magnético. 15
    Sistema básico para formar una imagen. 18
    Emitancia, brillancia, aceptancia, y transmisión. 23
  Teorema de Liouville 24
  Transporte del haz dentro de la línea 26
  Técnicas analíticas 28
    STIM. 28
    PIXE 30
Simulaciones 35
  Variación del tamaño de foco con la energía 35
  Haz disperso por los colimadores. 39
    Componente espacial de la aceptancia de la lente magnética. 41
    Distribución del haz luego de atravesar W. 45
    Cantidad de haz que atraviesa cada espesor. 51
    Intensidad y distribución del haz disperso sobre la muestra 56
    Resultado de la simulación 57
Diseño instalación y puesta en marcha del microhaz 59
  Layout (croquis), criterio de diseño. 59
    Estabilidad mecánica y vibraciones. 59
    Interferencias electromagnéticas (EM). 61
  Montaje del microhaz y alineación. 62
    Alineación óptica 62
    Alineación de las lentes magnéticas y la bobina de barrido. 62
  Sistema de vacío 67
    Descripción y criterios de diseño. 67
    Sistema de control. 70
  Instrumentación. 78
    Cámara de irradiación. 78
    Detectores de rayos X. 80
    Copa de Faraday. 82
    Sistema de adquisición[4] 86
  Nota sobre las dimensiones físicas del microhaz. 88
  Nota sobre el funcionamiento de los colimadores. 88
  Operación del microhaz 89
    Colimadores – operación por encima de 2 micrones – alta corriente 89
    Colimadores – operación por debajo de 2 micrones – alta resolución 90

Medición del tamaño del foco. 92
Instrumentación para el guiado del haz. 131
Uso del microscopio para posicionar la muestra. 132
Aplicaciones. 133
Introducción. 133
Preparación de las muestras. 133
Instrumentación y planificación del experimento. 134
Análisis PIXE de muestras. 135
Medición de la sección eficaz de producción del Cu para las energías involucradas en el análisis. 135
Determinación de una curva de correlación característica entre la sección eficaz de producción del Cu y el fondo del espectro 145
Estudio de la corrección por variación de la sección eficaz. 148
Generación de mapas de distribución de cobre 160
Determinación de la concentración de cobre en espectros integrales. 163
Concentración de cobre en la serie 255/6/7 164
Concentración de cobre en la serie 225/6 197
Concentración de cobre en la serie 214 199
Resumen 209
Mapas cuantitativos de distribución de cobre. 210
Conclusiones. 225
Transmisión. 225
Dispersión en energía del haz del acelerador. 225
Haz disperso. 226
Vibraciones e interferencias electromagnéticas. 226
Alineación y enfoque. 226
Sistema de vacío. 227
Sistema de control. 227
Instrumentación 227
Mediciones 228
Determinación de cobre - mapas cuantitativos. 228
Apéndices. 231
Descripción de los programas específicos que interactúan con los controladores. 233
Programas 239
Programa “cu.c” 239
Programa “pixe.c” 244
Header “lmf.h” 248
UCVS 250
Descripción funcional 250
Circuito 251
Plaqueta 251
Software 252
Bibliografía. 256

Abstract.

This work describes the design, installation and startup of the heavy ion microbeam of the Tandar accelerator and, as an example of a relevant application, the first series of experiments where this experimental line was used.
Basically, this microbeam is an ion optics system where a high precision magnetic lens focuses the ion beam on a sample within an area larger than one square micron. Furthermore the microbeam consists of a control and data acquisition system to safely operate and to obtain information from the interaction between the beam and the sample.
The first section introduces the basic concepts on ion optics required to understand this system, and the basic criteria for guiding the particle beam through the experimental line. It also outlines the basic concepts of two analytical techniques used in this work, namely STIM and PIXE. In STIM (Scanning Transmission Ion Microscopy) the energy loss of the ion as it travels through the sample is used to obtain information about its thickness and/or density. In PIXE (Particle Induced X-ray Emission) the elemental composition of the sample is determined by using the X-ray emission induced by the particle beam as it traverses and excites the sample.
As a next step, numerical simulations are presented for the study of two aspects of the microbeam which are critical when a beam of the smallest dimensions is required, namely the energy spread of the ions, and the disperse-beam generation in the jaws of the slits.
The subsequent section describes the design, installation and startup of the microbeam. The design emphasizes the mechanical stability, the isolation of vibrations, and the elimination of electromagnetic interferences, which can degrade the performance of the microbeam. At the same time this section describes the design criteria concerning the vacuum system, the instrumentation used for guiding the beam, and the data acquisition system and procedures.
Concerning the installation and startup, it also presents the procedure for the first alignment of the components during assembly, the fine alignment, the tuning of the microbeam, and the basic procedures for the setup operation.
This section is completed by the measurement of the beam spot size, where three procedures combining PIXE and STIM were used.
Finally, the new facility is utilized to study the microdistribution of a drug of potential interest for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) on cancerous and normal hamster tissue samples.
Cupper distribution maps at tissue level using PIXE were produced using the microbeam because this drug carries cupper in its structure. To obtain quantitative information a specific method for dead time corrections was developed. Also, a correction of the X-ray spectra was implemented to account for the considerable amount of energy loss of the beam in the sample and the associated X-ray production cross section variation. Since it is very cumbersome in practice to obtain STIM information for each sample, a method was designed which enables us to perform the finite-thickness corrections using the bremsstrahlung background.
At the end of this section results on microdistributions in different tissue types are presented. Particularly the cancer tissue samples show a large non-homogeneity in the distribution of this drug.

Resumen.

En este trabajo se describe el diseño, la instalación y puesta en marcha del microhaz de iones pesados del acelerador Tandar, y a modo de ejemplo de aplicación relevante se detalla la primera serie de experimentos para los que se utilizó esta línea.

Básicamente este microhaz es un sistema de óptica iónica en el que una lente magnética de alta precisión enfoca el haz de iones sobre la muestra dentro de un área del orden del micrón cuadrado. Completan al microhaz un sistema de control y adquisición para controlar y obtener información de la interacción del haz con la muestra.

En la primer parte del presente trabajo se introducen los conceptos de óptica iónica necesarios para la comprensión del sistema, y los criterios básicos para el guiado del haz dentro de la línea. Además, en esta sección se describen las nociones elementales de dos técnicas analíticas utilizadas, STIM y PIXE. En STIM (Scanning Transmission Ion Microscopy) se utiliza la pérdida de energía de los iones al atravesar la muestra para obtener información de su espesor y/o densidad. En PIXE (Particle Induced X-ray Emission) se determina la composición elemental de una muestra estudiando la emisión de rayos X al ser excitada por un haz de partículas cargadas.

Luego se presentan dos simulaciones numéricas con las que se estudian dos puntos críticos a la hora de obtener un haz de dimensiones reducidas en este tipo de instalación, la influencia de la variación de energía del haz de iones, y la generación de haz disperso en los bordes de los colimadores.

A continuación se encuentra una sección en la que se describe el diseño, la instalación y la puesta en marcha del microhaz.

En el diseño se prestó especial atención a la estabilidad mecánica, la aislación de vibraciones, y la eliminación de interferencias electromagnéticas, factores que pueden degradar considerablemente el funcionamiento del microhaz. Al mismo tiempo, se describen los criterios de diseño del sistema de vacío y la instrumentación utilizada para el guiado del haz dentro de la línea, y la adquisición de datos.

En lo que respecta a la instalación y puesta en marcha, se especifican los procedimientos utilizados para la alineación de los componentes durante el montaje, y para la alineación fina, la puesta a punto, y los procedimientos básicos para la operación de la línea, es decir, el guiado del haz a través de ella, y la obtención de un haz de dimensiones micrométricas.

Completan esta sección la medición del tamaño del foco del haz, para lo que se utilizaron tres procedimientos que combinan las técnicas STIM y PIXE.

Por último, se muestra el procedimiento utilizado para estudiar la microdistribución de una drogas de potencial interés para la terapia por captura neutrónica en boro (BNCT) en cortes de tejidos de hámsteres. Esta droga contiene cobre, por lo que se utilizó el microhaz para obtener mapas de distribución de cobre en las muestras a nivel tisular, utilizando PIXE.

Para obtener información cuantitativa fue necesario desarrollar un método especifico de corrección de tiempo muerto. Además, como el haz de iones pierde una considerable cantidad de energía al atravesar algunas de estas muestra, fue necesario corregir en función de la variación de la sección eficaz de producción de rayos X. Debido a la imposibilidad de obtener información de STIM (útil para realizar esta corrección) para todas las mediciones, se desarrolló un método mediante el cual es posible realizar esta corrección basado en la correlación entre el fondo de bremsstrahlung en los espectros de PIXE y la pérdida de energía del ión al atravesar la muestra.

Al final de esta sección se presentan los resultados obtenidos, donde se observa una gran inhomogeneidad en la distribución de la droga en el tejido.

Notas al lector

En distintas secciones de este trabajo se presentan los resultados de cálculos y ajustes con una gran cantidad de decimales. Esto se debe a que estos valores fueron directamente pegados desde el software de cálculo. Todos estos valores están acompañados por sus intervalos de indeterminación, y queda por cuenta del lector tomar en cuenta una cantidad de decimales coherente con el error asociado.

Introducción.

Tradicionalmente todos los métodos de análisis y modificación de materiales utilizando haces de iones acelerados que se realizan en las líneas experimentales del acelerador Tandar (y en todo el mundo) tienen una limitación debido al mínimo tamaño dentro del cual se puede enfocar el haz que interactúa con la muestra a irradiar. En las mejores condiciones, cualquier análisis realizado de esta forma no puede concentrarse en propiedades que ocupen un área menor a los 10 mm^2.

Una solución para este inconveniente es colimar el haz. La desventaja de este método es que colimar implica reducir la corriente sobre la muestra, lo que va en contra del requerimiento de alta corriente de muchas técnicas experimentales. Por ejemplo, reducir el área de un haz de 10 mm^2 a un cuadrado de 0.01 x 0.01 mm^2 colimando, implica una reducción de 5 ordenes de magnitud en corriente.

El microhaz es la solución para este inconveniente, ya que utiliza una lente magnética de alta precisión para enfocar el haz dentro de áreas del orden de 0.01 x 0.01 mm^2 con una pérdida no muy importante de corriente (de un factor 50), y si se acepta un factor de reducción en corriente de 5000, se puede reducir el área a 1 μm^2.

Además, el microhaz puede ser deflectado magnéticamente antes de interactuar con la muestra, lo que permite posicionarlo en un punto especifico (dentro del campo de barrido, que en este caso es del orden de 2 x 2 mm^2)

Esto abre las puertas a un mundo nuevo de posibilidades, ya que poder barrer una muestra con un haz de iones de dimensiones micrométricas permite realizar mapas de diferentes observables mediante métodos analíticos, y en el caso de modificación de materiales, seleccionar una zona arbitraria a tratar.

Este trabajo, se divide en tres secciones intentando presentar los aspectos básicos concernientes a microhaces y un par de técnicas analíticas relacionadas, el diseño, construcción y puesta en marcha del microhaz del acelerador Tandar, y por último presenta a modo de ejemplo un estudio realizado valiéndose de este instrumento.

Principio del microhaz y técnicas analíticas relacionadas.

Sistema de coordenadas

El sistema de coordenadas cartesiano utilizado en el microhaz define como Z el eje principal de propagación del haz, y sobre el plano perpendicular a este, X en la dirección horizontal, e Y en la vertical.
En general, para el cálculo de transporte de haz en el microhaz se asume que el movimiento de los iones sigue un régimen paraxial, es decir, la velocidad en el eje Z es constante, y queda determinada por la energía que entrega el acelerador. Además, debido a las energías involucradas, no son necesarias correcciones relativistas.
En función de esto, cada ión queda representado en cada posición Z mediante el vector de 4 dimensiones *(x, x', y, y')*. *x'* e *y'* son los ángulos de la trayectoria respecto al eje Z, que son equivalentes a las velocidades transversales ya que la velocidad en el eje Z es conocida y constante.

Óptica iónica

Descripción del transporte del haz mediante matrices de transferencia.

Las matrices de transferencia son un método para organizar la información acerca del movimiento de las partículas que componen el haz a lo largo del eje principal[1].
En principio, todos los elementos ópticos utilizados en el microhaz pueden ser representados mediante una matriz de 4 x 4 dimensiones con los términos que provocan un acoplamiento entre los ejes X e Y en cero. Esta matriz queda determinada por la relación entre los vectores que representan las trayectorias de las partículas a la entrada y a la salida del elemento:

$$\begin{pmatrix} x_f \\ x'_f \\ y_f \\ y'_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x & b_x & 0 & 0 \\ c_x & d_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_y & b_y \\ 0 & 0 & c_y & d_y \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_i \\ x'_i \\ y_i \\ y'_i \end{pmatrix}$$

Ecuación 1

donde los elementos con subíndice *i* representan las variables de ingreso y *f* las de egreso. También es posible separar estas matrices en sistemas de 2 dimensiones:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} x_f \\ x'_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x & b_x \\ c_x & d_x \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_i \\ x'_i \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} y_f \\ y'_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_y & b_y \\ c_y & d_y \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} y_i \\ y'_i \end{pmatrix} \end{cases}$$

Ecuación 2

Matriz de transferencia de una región libre de campos.

La trayectoria de un ión en una región libre de campos sigue una recta definida, en lo que respecta a su componente en x, viene dada por:

$$x_f = x_i + x'_i \cdot l$$
$$x'_f = x'_i$$

Ecuación 3

donde l es la longitud de la región considerada. Expresándolo en forma matricial:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} x_f \\ x'_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_i \\ x'_i \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} y_f \\ y'_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} y_i \\ y'_i \end{pmatrix} \end{cases}$$

Ecuación 4

En el caso de considerar 2 espacios libres de campos contiguos, de longitudes l_1 y l_2:

$$\begin{pmatrix} x_f \\ x'_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_i \\ x'_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_2 + l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_i \\ x'_i \end{pmatrix}$$

Ecuación 5

y lo correspondiente para la componente *y*.

Matriz de transferencia de una lente delgada.

Al atravesar una lente delgada, un ión sólo altera su dirección, como se observa en la Ilustración 1.

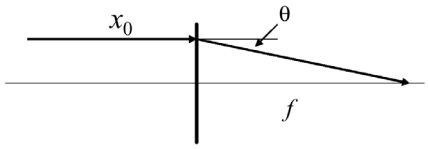


Ilustración 1: Trayectoria de un ión al atravesar una lente delgada.

Las ecuaciones que describen esta trayectoria son:

$$x_f = x_i$$
$$x'_f = x'_i - 1/f$$

Ecuación 6

donde *f* es la distancia focal de la lente. Expresándolas en forma matricial:

$$\begin{pmatrix} x_f \\ x'_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_i \\ x'_i \end{pmatrix}$$

Ecuación 7

Cabe aclarar que una lente delgada es una aproximación de primer orden de lo que es una lente real. En lo que al microhaz respecta, en general es una simplificación extremadamente imprecisa.

Matriz de transferencia de un cuadrupolo magnético.

Un cuadrupolo magnético es un elemento óptico en el que se busca que prevalezca sólo el término cuadrupolar del desarrollo multipolar del potencial. El motivo de esto, que es intentar emular a una lente delgada, se explica a continuación[3].

Expandiendo el potencial en serie de Taylor y Fourier en coordenadas cilíndricas *(r, ϕ, z)*:

$$V = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} M_{k,l}(z) \cdot \cos(l\phi + \theta_{k,l}) \cdot r^k$$

Ecuación 8

Donde θ representa una fase inicial, y el eje *z* coincide con el eje de simetría del microhaz. Planteando que el Laplaciano iguale a cero:

$$\Delta V = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(\frac{r \cdot \partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$$

Ecuación 9

Se llega a la conclusión de que todos los términos donde $k \neq l$ se hacen cero[1]. Sólo prevalecen aquellos términos $M_{l,l}(z)$, llamados intensidad multipolar. A *l* se lo conoce como orden multipolar, y $\theta_{l,l}$ fase multipolar. La siguiente tabla muestra los primeros términos que prevalecen de un desarrollo multipolar:

[1] Ver deducción en [3]

L	*término*	*nombre*
0	$M_{00}(z)\cdot\cos(\theta_{00})$	
1	$M_{11}(z)\cdot\cos(\phi+\theta_{11})\cdot r$	dipolar
2	$M_{22}(z)\cdot\cos(2\phi+\theta_{22})\cdot r^2$	cuadrupolar
3	$M_{33}(z)\cdot\cos(3\phi+\theta_{33})\cdot r^3$	sextupolar
4	$M_{44}(z)\cdot\cos(4\phi+\theta_{44})\cdot r^4$	octupolar

Tabla 1

desarrollando el término cuadrupolar para $\theta_{22}=\pi/2$:

$$V = M_{22}\cdot\cos\left(2\phi+\pi/2\right)\cdot r^2$$
$$V = -M_{22}\cdot\mathrm{sen}(2\phi)\cdot r^2$$
$$V = -M_{22}\cdot 2\cdot\mathrm{sen}\,\phi\cdot\cos\phi\cdot r^2$$

Ecuación 10

$$V = -M_{22}\cdot 2\cdot x\cdot y$$

Ecuación 11

Esta configuración de potencial implica los siguientes campos:

$$\begin{cases} B_x = 2\cdot M_{22}\cdot y \\ \\ B_y = 2\cdot M_{22}\cdot x \end{cases}$$

Ecuación 12

Para construir un dispositivo (lente cuadrupolar, o simplemente "cuadrupolo") se utiliza una configuración de polos magnéticos como se ve en la Ilustración 2:

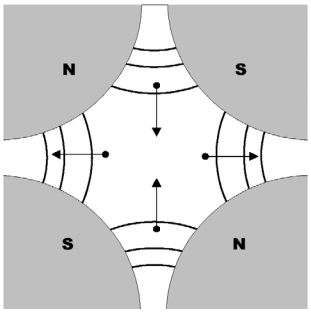


Ilustración 2: Distribución de las piezas polares en un cuadrupolo magnético. También se observan las líneas de campo y las resultantes de la fuerza que experimenta un ión en las distintas posiciones.

En la Ilustración 2 también están indicadas los sentidos de las componentes de la fuerza de Lorentz experimentada por una partícula que viaja en dirección z. Se observa que para esa configuración el haz de partículas resultará enfocado en el eje vertical, y desenfocado en el horizontal, por lo que esta configuración se comporta como una lente cilíndrica[2].

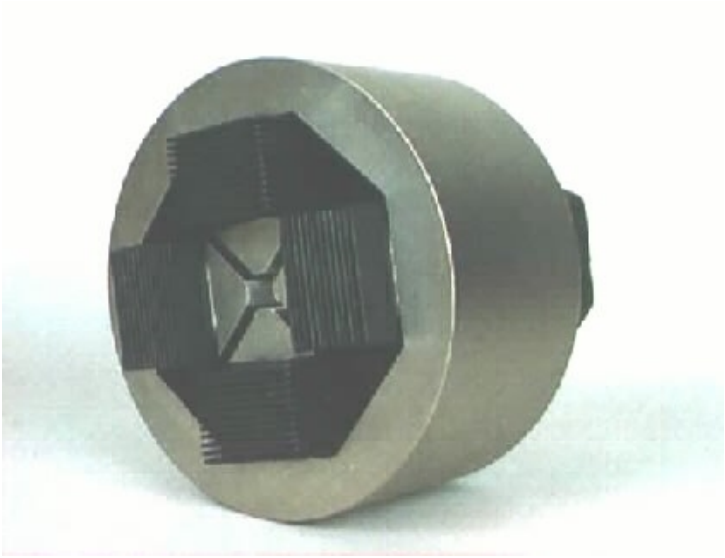


Ilustración 3: Uno de los 3 cuadrupolos de precisión utilizados en el microhaz.

Resolviendo la ecuación que describe la órbita de un ión dentro de una lente cuadrupolar quedan 2 matrices, una convergente y otra divergente[3]:

$$A_C = \begin{pmatrix} \cos(k \cdot l_{ef}) & \frac{1}{k} \cdot sen(k \cdot l_{ef}) \\ -k \cdot sen(k \cdot l_{ef}) & \cos(k \cdot l_{ef}) \end{pmatrix}$$

Ecuación 13

$$A_D = \begin{pmatrix} \cosh(k \cdot l_{ef}) & \frac{1}{k} \cdot senh(k \cdot l_{ef}) \\ k \cdot senh(k \cdot l_{ef}) & \cosh(k \cdot l_{ef}) \end{pmatrix}$$

Ecuación 14

donde l_{ef} representa la longitud efectiva de la lente (a definir más abajo), y k queda definido por la cantidad de espiras del bobinado de cada polo n, la corriente que circula por ellos i, el radio de la circunferencia inscripta dentro de los polos r, y de la energía E, la carga q y la masa m del ión:

[2] Al decir lente cilíndrica se hace referencia a una lente con distinta distancia focal en cada eje.
[3] La deducción de estas ecuaciones puede encontrarse en [8].

$$k^2 = \mu_0 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{n \cdot i \cdot q}{r^2 \cdot \sqrt{E \cdot m}}$$

Ecuación 15

En los extremos de los polos de un cuadrupolo se presentan efectos de borde, y de hecho, el campo magnético se extiende más allá de la coordenada *z* en que este termina físicamente como se observa en la Ilustración 4.

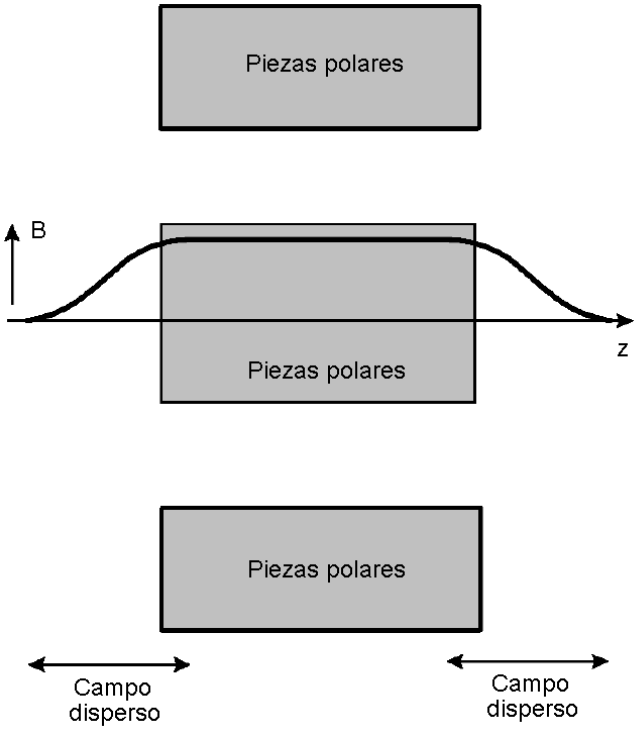


Ilustración 4: Campo disperso presente en los extremos de los cuadrupolos.

La longitud efectiva [37] es una aproximación de primer orden para considerar esto, y se define como:

$$B_{cte} \cdot l_{ef} = \int B(z) \cdot dz$$

Ecuación 16

donde B_{cte} representa el valor de campo teórico (expresado en la Ecuación 12) de un cuadrupolo de longitud infinita de igual geometría.

Sistema básico para formar una imagen.

Básicamente, la etapa final del microhaz está compuesta por una lente que enfoca la imagen de la apertura objeto sobre la muestra, como se muestra en la siguiente Ilustración:

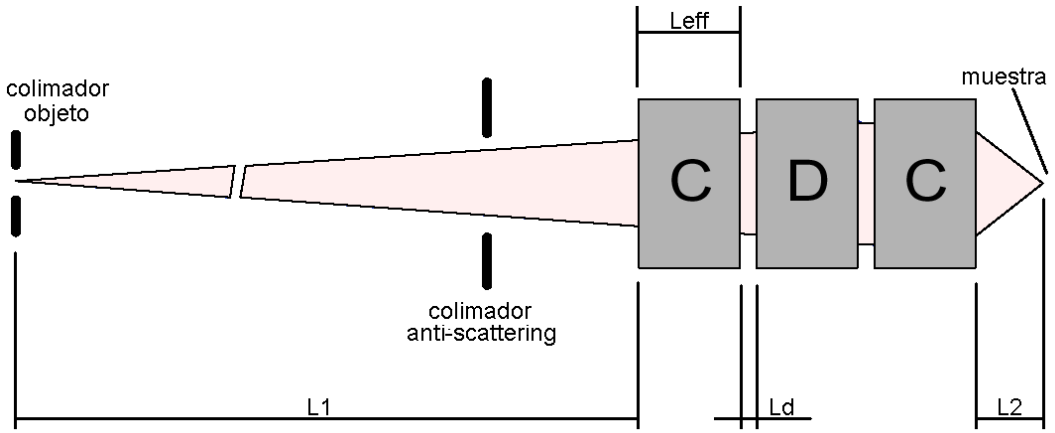


Ilustración 5: Corte vertical del sistema para formar imagen utilizado en el microhaz. La lente magnética está formada por un conjunto de tres cuadrupolos magnéticos en configuración CDC en este plano.

Una de las formas de obtener una lente con un astigmatismo[4] aceptable es combinar tres cuadrupolos, colocando primero uno que sea convergente en el plano horizontal (eje vertical) y que enfoque las componentes en y, luego uno que sea divergente en el plano horizontal (eje vertical) para desenfocar las componentes en Y, y finalmente uno convergente en el plano horizontal para intentar corregir el astigmatismo.
Expresando esto con las matrices de transferencia:

$$\begin{pmatrix} x_m \\ x'_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \mathrm{M}_D \times \begin{pmatrix} 1 & l_d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \mathrm{M}_C \times \begin{pmatrix} 1 & l_d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \mathrm{M}_D \times \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_i \\ x'_i \end{pmatrix} =$$
$$= \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \mathrm{M}_{DCD} \times \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_i \\ x'_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x & b_x \\ c_x & d_x \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_i \\ x'_i \end{pmatrix}$$

Ecuación 17

$$\begin{pmatrix} y_m \\ y'_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \mathrm{M}_C \times \begin{pmatrix} 1 & l_d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \mathrm{M}_D \times \begin{pmatrix} 1 & l_d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \mathrm{M}_C \times \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} y_i \\ y'_i \end{pmatrix} =$$
$$= \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \mathrm{M}_{CDC} \times \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} y_i \\ y'_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_y & b_y \\ c_y & d_y \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} y_i \\ y'_i \end{pmatrix}$$

Ecuación 18

donde l_1 es la distancia de la apertura objeto a la lente, l_2, la distancia de la lente a la muestra y l_d la distancia entre cuadrupolos.
Las matrices M_C y M_D son las que representan la trayectoria de los iones dentro de los cuadrupolos en el plano convergente y divergente respectivamente.

[4] Astigmatismo: Defecto de un sistema óptico que le hace reproducir un punto como un segmento lineal[38].

Las matrices M_{CDC} y M_{DCD} son una forma conveniente de expresar la transferencia de un triplete de cuadrupolos; CDC significa convergente-divergente-convergente, y DCD, divergente-convergente-divergente.

En el punto focal, la posición no varía con el ángulo, por lo que los términos b_x y b_y de la matriz de transferencia de todo el sistema son cero:

$$\begin{pmatrix} x_m \\ x'_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x & 0 \\ c_x & d_x \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_i \\ x'_i \end{pmatrix}$$

Ecuación 19

En ese caso, a_x y a_y son la magnificación del sistema, y d_x y d_y, sus inversas, son la demagnificación:

$$d_x = 1 \Big/ a_x$$

Ecuación 20

La Ecuación 19 puede ser utilizada para dos tareas relevantes, estimar las corrientes de enfoque y estudiar la influencia de las distancias l_1 y l_2 en la demagnificación de este sistema.

Estimación de las corrientes de enfoque.

Reemplazando en la matriz que representa la transferencia total del sistema presentada en la Ecuación 17 la matriz M_C por la matriz de transferencia de un cuadrupolo en el plano convergente, como está expresada en la Ecuación 13, y la matriz M_D por la ecuación en el plano divergente (Ecuación 14) se obtienen las ecuaciones de cada término en función de los factores k_1 k_2 y k_3:

$$\begin{pmatrix} a_x & b_x \\ c_x & d_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cosh(k_3 \cdot l_{ef}) & \frac{1}{k_3} \cdot senh(k_3 \cdot l_{ef}) \\ k_3 \cdot senh(k_3 \cdot l_{ef}) & \cosh(k_3 \cdot l_{ef}) \end{pmatrix} \times$$
$$\times \begin{pmatrix} 1 & l_d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(k_2 \cdot l_{ef}) & \frac{1}{k_2} \cdot sen(k_2 \cdot l_{ef}) \\ -k_2 \cdot sen(k_2 \cdot l_{ef}) & \cos(k_2 \cdot l_{ef}) \end{pmatrix} \times$$
$$\times \begin{pmatrix} 1 & l_d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cosh(k_1 \cdot l_{ef}) & \frac{1}{k_1} \cdot senh(k_1 \cdot l_{ef}) \\ k_1 \cdot senh(k_1 \cdot l_{ef}) & \cosh(k_1 \cdot l_{ef}) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ecuación 21

estos factores están relacionados por medio de la Ecuación 15 con parámetros geométricos, parámetros dependientes del haz de iones, y con las corrientes que circulan por los cuadrupolos. En la configuración utilizada en el microhaz, circula la misma corriente por los primeros dos cuadrupolos, y una corriente distinta por el tercero, por lo que la Ecuación 21 puede ser expresada como:

$$\begin{pmatrix} a_x(i_1,i_2) & b_x(i_1,i_2) \\ c_x(i_1,i_2) & d_x(i_1,i_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cosh(k(i_2)\cdot l_{ef}) & \frac{1}{k(i_2)}\cdot senh(k(i_2)\cdot l_{ef}) \\ k(i_2)\cdot senh(k(i_2)\cdot l_{ef}) & \cosh(k(i_2)\cdot l_{ef}) \end{pmatrix} \times$$
$$\times \begin{pmatrix} 1 & l_d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(k(i_1)\cdot l_{ef}) & \frac{1}{k(i_1)}\cdot sen(k(i_1)\cdot l_{ef}) \\ -k(i_1)\cdot sen(k(i_1)\cdot l_{ef}) & \cos(k(i_1)\cdot l_{ef}) \end{pmatrix} \times$$
$$\times \begin{pmatrix} 1 & l_d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cosh(k(i_1)\cdot l_{ef}) & \frac{1}{k(i_1)}\cdot senh(k(i_1)\cdot l_{ef}) \\ k(i_1)\cdot senh(k(i_1)\cdot l_{ef}) & \cosh(k(i_1)\cdot l_{ef}) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ecuación 22

De forma similar, la ecuación de transferencia en Y puede ser expresada como:

$$\begin{pmatrix} a_y(i_1,i_2) & b_y(i_1,i_2) \\ c_y(i_1,i_2) & d_y(i_1,i_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(k(i_2)\cdot l_{ef}) & \frac{1}{k(i_2)}\cdot sen(k(i_2)\cdot l_{ef}) \\ -k(i_2)\cdot sen(k(i_2)\cdot l_{ef}) & \cos(k(i_2)\cdot l_{ef}) \end{pmatrix} \times$$
$$\times \begin{pmatrix} 1 & l_d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cosh(k(i_1)\cdot l_{ef}) & \frac{1}{k(i_1)}\cdot senh(k(i_1)\cdot l_{ef}) \\ k(i_1)\cdot senh(k(i_1)\cdot l_{ef}) & \cosh(k(i_1)\cdot l_{ef}) \end{pmatrix} \times$$
$$\times \begin{pmatrix} 1 & l_d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(k(i_1)\cdot l_{ef}) & \frac{1}{k(i_1)}\cdot sen(k(i_1)\cdot l_{ef}) \\ -k(i_1)\cdot sen(k(i_1)\cdot l_{ef}) & \cos(k(i_1)\cdot l_{ef}) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ecuación 23

Exigiendo la condición de enfoque en ambos planos, es decir que b_x y b_y sean cero, se obtiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas, de la que se puede despejar i_1 e i_2 para esta condición:

$$\begin{cases} b_x(i_1,i_2) = 0 \\ b_y(i_1,i_2) = 0 \end{cases}$$

Ecuación 24

Por ejemplo, utilizando los siguientes parámetros (en unidades del SI):

leff = 0.105	Longitud efectiva de los cuadrupolos
q = 5 x 1.602 x 10^{-19}	Carga del ión (+5)
m = 16 x 1.67 x 10^{-27}	Masa del ión (16)
r0 = 0.00375	Radio de los polos
n = 15	Número de espiras
l1 = 6.6	Distancia del colimador objeto a la lente
l2 = 0.18	Distancia de la lente a la muestra.
ld = 0.06	Distancia entre los cuadrupolos
E = 50 x 10^{6} x 1.602 x 10^{-19}	Energía del ión (50 MeV)

Tabla 2

Se obtienen las siguientes corrientes de enfoque:

i1 = 30.16262254	Corriente de los primeros dos cuadrupolos
i2 = 33.17154759	Corriente del último cuadrupolo

Tabla 3

Influencia de las distancias l_1 y l_2 en la demagnificación.

Para evaluar la influencia de las distancias l_1 y l_2 en la demagnificación de este sistema, el triplete de cuadrupolos, representado por las matrices M_{DCD} y M_{CDC}, para el siguiente análisis, puede ser reemplazado por la matriz de una lente delgada:

$$\begin{pmatrix} x_m \\ x'_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_i \\ x'_i \end{pmatrix}$$

Ecuación 25

Considerando que se enfoca sobre la muestra, se puede aplicar lo expresado en la Ecuación 19 y en la Ecuación 20 obteniendo que la demagnificación es:

$$d = 1 - \frac{l_1}{f} = \frac{l_1}{l_2}$$

Ecuación 26

De esta ecuación se muestra cualitativamente que el hecho de elegir la mínima distancia entre la lente y la muestra (l_2 = 18 cm) y una gran distancia entre la apertura objeto y la lente (l_1 = 6.6 m) apunta a tener una gran demagnificación. Sin embargo esta ecuación no es lo suficientemente precisa para obtener los valores actuales de demagnificación, y se deben obtener evaluando los términos d_x y d_y de la Ecuación 22 y de la Ecuación 23, que para condiciones normales de funcionamiento son del orden de 25 y 80 respectivamente.

Emitancia, brillancia, aceptancia, y transmisión.

La ***emitancia*** puede considerarse como una medida del paralelismo de un haz [2]. Permite cuantificar y comparar distintos tipos de haces, y calificarlos en función del uso.

Los haces con componentes de velocidades transversales v_x y v_y aleatorios poseen una cierta distribución en el ángulo relativo al eje principal de propagación v_z. La emitancia de este tipo de haces es el volumen fásico definido por la envolvente al conjunto de vectores *(x, x', y, y')* que describen a los iones que lo componen.

En general este volumen puede desacoplarse en dos áreas *(x, x')* y *(y, y')* dando lugar a una emitancia en *x* y otra en *y*. En la Ilustración 4 se muestran diagramas de espacios de fase típicos.

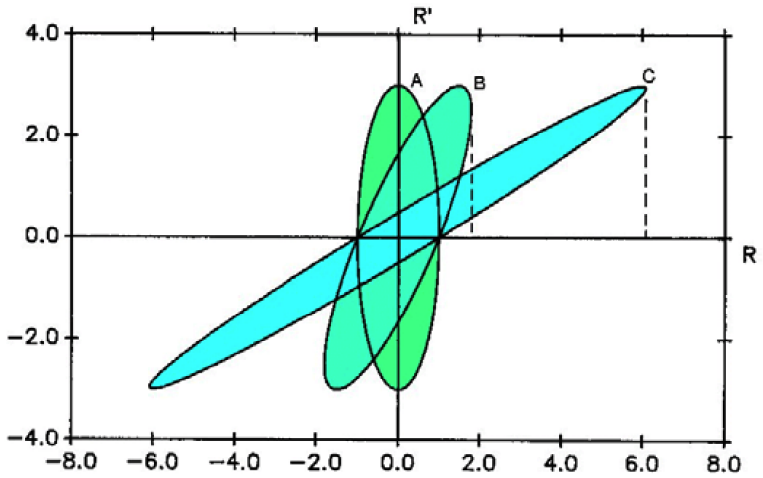


Ilustración 6: Evolución del diagrama de fases de un haz que viaja en una región libre de campos. La secuencia sigue A, B, C. R designa *x ó y*, R´ , *x' ó y'*

La ***emitancia normalizada***, en contraste con la emitancia a secas (sin normalizar), expresa las velocidades transversales en términos de un ángulo pequeño relativo a la dirección del haz. Como la velocidad v_z es proporcional a la raíz cuadrada de la energía, la emitancia puede ser escrita como[45]:

$$\varepsilon_x = \pi/4 \cdot \theta_f \cdot x_f \cdot \sqrt{E}$$
$$\varepsilon_y = \pi/4 \cdot \varphi_f \cdot y_f \cdot \sqrt{E}$$

Ecuación 27

donde θ_f y φ_f expresan la máxima divergencia del haz, y x_f e y_f, el máximo diámetro del haz en cada eje.

Cabe hacer notar que en lo que a este trabajo respecta, entre la emitancia normalizada y la emitancia sin normalizar existe una relación constante, ya que la energía de los iones no cambia dentro de la línea, por lo que se hace referencia a la emitancia sin normalizar simplemente como emitancia, en unidades de mm por mrad.

El ***brillo*** o ***brillancia*** de un haz mide la densidad de puntos en el espacio de fases. Para haces de iones se define como la relación entre la corriente del haz y la emitancia:

$$B = i/\varepsilon$$

Ecuación 28

La ***aceptancia*** es una propiedad geométrica de un componente o sistema de óptica iónica. Es el mayor valor de emitancia que puede ser transmitido a través de él. En la Ilustración 7 se muestra el procedimiento para calcular la aceptancia de un sistema compuesto por dos colimadores.

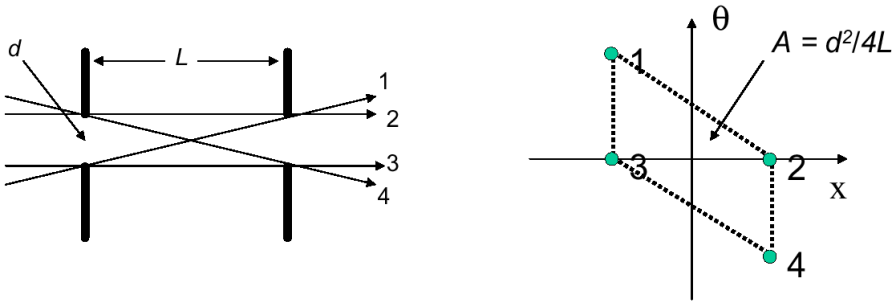


Ilustración 7: Cálculo de la aceptancia de un sistema compuesto por dos colimadores. Con números están indicadas las trayectorias extremas.

Conociendo la brillancia de un haz, y la aceptancia de un sistema, es posible calcular la ***transmisión*** a través del mismo, evaluando la intersección entre ambos volúmenes. En la Ilustración 8 se muestra el procedimiento teniendo sólo en cuenta la aceptancia y la emitancia en un eje.

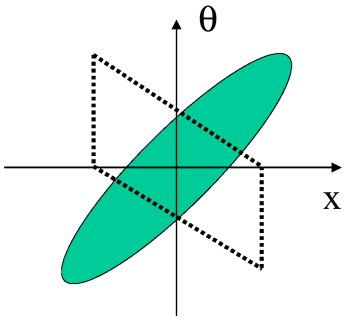


Ilustración 8: La transmisión del sistema queda determinada por la intersección entre la aceptancia de este, y la emitancia del haz. Con líneas de puntos está indicada la aceptancia del sistema, y la emitancia del haz con la elipse llena.

Teorema de Liouville

En la Ilustración 9 se observa la evolución del diagrama de fase a lo largo de varios elementos.

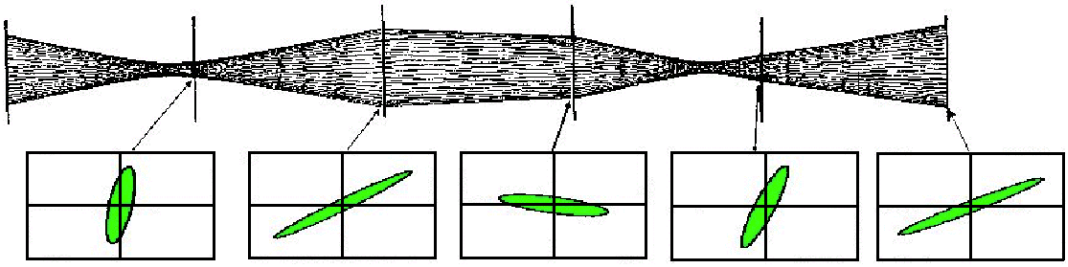


Ilustración 9: Evolución del diagrama de fases de un haz que viaja en un sistema compuesto por lentes delgadas y regiones libres de campos. Observar que el área del diagrama de fases se mantiene constante.

Una situación en que el volumen del espacio de fases no permanece constante es cuando se produce scattering (dispersión múltiple) en una folia ya que actúan fuerzas no conservativas, y la emitancia se incrementa.

El teorema de Liouville enuncia que para un conjunto de partículas moviéndose bajo la acción de fuerzas conservativas, el volumen del espacio fásico normalizado[5] permanece constante.

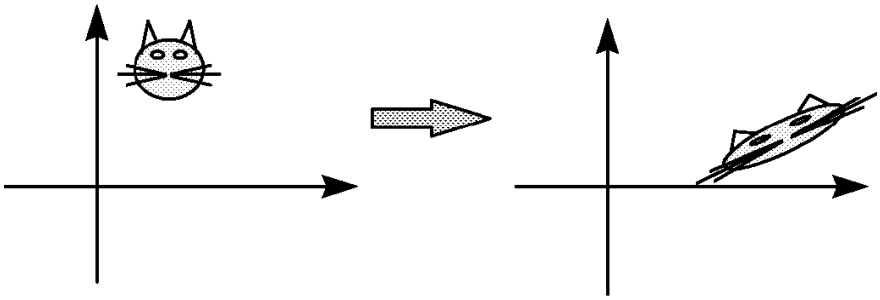


Ilustración 10: El volumen (área) fásico de las partículas que componen el haz permanece constante.

Esto tiene una enorme implicancia en lo que al microhaz respecta, ya que la única forma en la que se puede reducir la emitancia es colimando el haz, lo que implica pérdida de corriente.
Entonces esto está diciendo que para reducir las dimensiones espaciales de un haz inevitablemente se le deben aumentar las componentes angulares o de lo contrario se le deben eliminar los iones que tienen gran componente angular o espacial.
Desde el punto de vista del conjunto acelerador/microhaz tiene una implicancia más determinante: la emitancia y la brillancia de la fuente de iones fijan el desempeño del microhaz.
En este sistema no es posible reducir la emitancia normalizada[6], salvo removiéndole partículas, por lo que la emitancia y la brillancia de la fuente determina la máxima corriente que puede tener el microhaz.

[5] Entendiéndose por espacio fásico normalizado como el espacio de fases normalizado a la velocidad de los iones.
[6] La emitancia normalizada está normalizada a la energía del haz, por lo tanto aunque el acelerador disminuye la emitancia sin normalizar, no modifica a la normalizada.

En particular, en este tipo de aceleradores esto es peor, ya que el stripper[7] aumenta considerablemente la emitancia.
También debe considerarse que cualquier error en la alineación de los componentes involucrados en la transmisión del haz dentro del acelerador limita la aceptancia del acelerador, y por lo tanto, disminuyen la emitancia, por supuesto, reduciendo la corriente.

Transporte del haz dentro de la línea

En general, la emitancia de los aceleradores Van de Graaff es de algunos mm.mrad, en particular, es del orden de 10 mm.mrad en el acelerador Tandar (a la salida). Para lograr un haz de iones pesados de dimensiones reducidas es necesario enfocarlo utilizando un sistema de cuadrupolos con bajas aberraciones y con un elevado gradiente de campo para poder enfocar iones de alta rigidez, lo que representa unos de los mayores inconvenientes. En la práctica, este tipo de lentes tiene diámetros relativamente pequeños, siendo de 3.75 mm de radio en el microhaz.
En función de esto aparece una importante limitación: la máxima emitancia que puede tener el haz sobre la muestra. Las componentes angulares del haz sobre la muestra no pueden caer fuera del cono definido por el diámetro de la lente y la distancia de la lente a la muestra, y las componentes espaciales, no pueden superar al tamaño de haz deseado. Esto puede ser considerado como la aceptancia final, parámetro que sería bueno maximizar para maximizar la corriente sobre el blanco.
Sin intentar hacer cálculos precisos, si se busca un foco de 1x1 μm^2, se puede ver que acercando la muestra a 20 cm de la lente de 3.5 mm de radio, el mayor ángulo admitido es de 17.5 mrad, por lo que la emitancia de un haz de 1x1 μm^2 es a lo sumo de:

$$\varepsilon \leq 1\ \mu m \times 0.0175\ rad = 0.0175\ mm.mrad$$

La única forma de obtener este valor de emitancia a partir del haz incidente es colimarlo y aceptar sólo una pequeña fracción de las partículas, lo que en principio implica una transmisión máxima de:

$$T \leq \left(\frac{0.0175 mm.mrad}{10 mm.mrad} \right)^2 = 32700^{-1}$$

Ecuación 29

En el siguiente esquema se observa el guiado del haz dentro de la línea, en el que tanto los iones con componente radial grande como los de componente angular grande son desechados para obtener un haz de muy poca emitancia.
Al principio, el haz del acelerador es proyectado sobre un diminuto colimador, llamado colimador objeto, que sólo deja pasar a los iones con menor componente radial. Luego se le reduce la emitancia al haz eliminándole los iones con mayor componente angular proyectándolo sobre un conjunto de colimadores colocados a una gran distancia (colimadores anti-scattering), y entonces, enfocado sobre el blanco con una lente magnética con la menor distancia focal posible.

[7] El stripper es una folia de carbono situada en el medio de la etapa de aceleración que tiene por función removerles electrones a los iones que son acelerados.

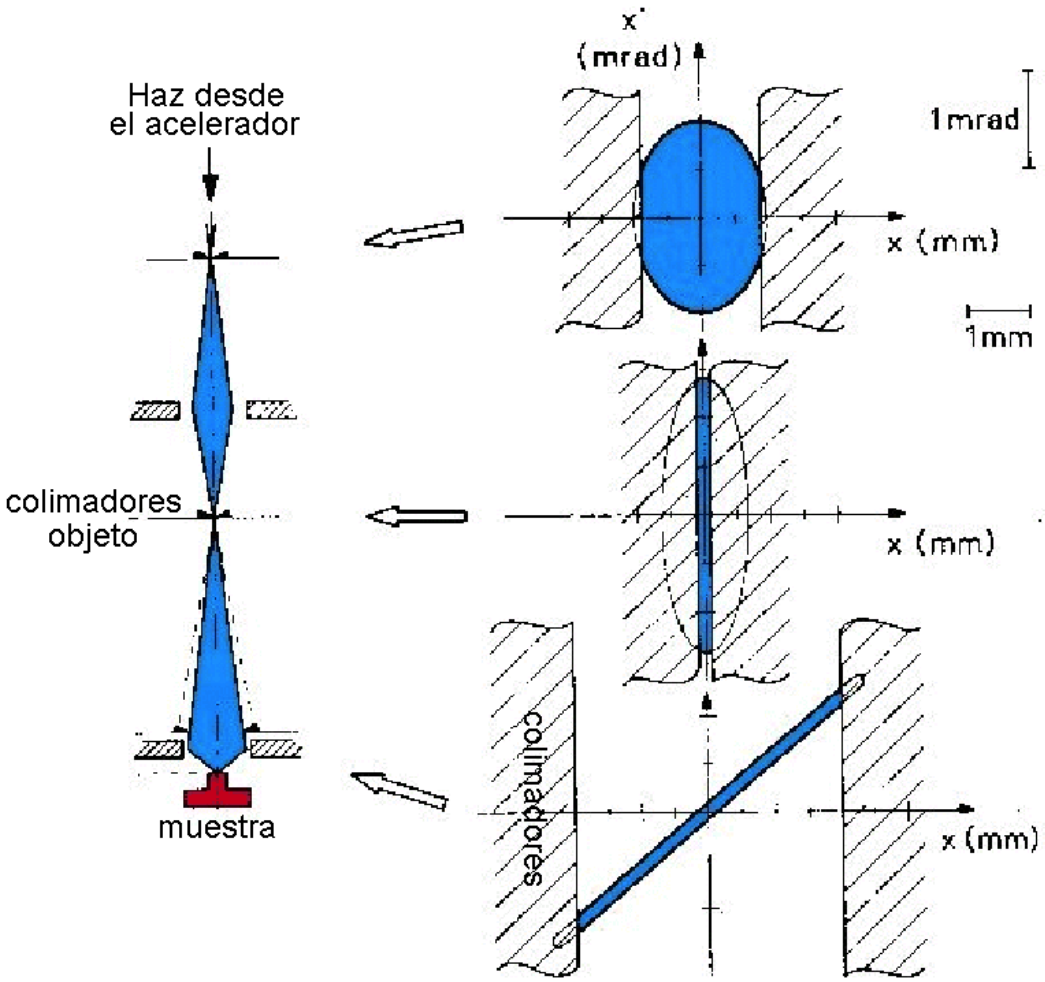


Ilustración 11: Diagramas de aceptancia para la selección de la emitancia apropiada del haz en el microhaz.

Técnicas analíticas

STIM.

STIM (del inglés Scanning Transmission Ión Microscopy, [40][41][44]) es una técnica analítica que permite analizar la densidad de una muestra. En STIM se hacen incidir sobre la muestra a analizar iones acelerados con energía suficiente como para atravesarla, y se realiza un análisis espectroscópico sobre los iones transmitidos.
Cuando los iones atraviesan el blanco colisionan con los electrones de la muestra con lo que van perdiendo energía. Esta pérdida específica de energía *dE/dZ [eV/Å]* depende de la energía y la carga de los iones incidentes, y de la densidad atómica, de la carga nuclear efectiva, y del potencial de ionización del blanco[42].
Teniendo en cuenta la densidad de un material, se puede definir el poder frenador ("stopping power") másico como:

$$S(E) = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dZ}$$

Ecuación 30

el que se encuentra tabulado para todos los elementos (ρ es la densidad del material).
El stopping power de un material compuesto puede ser calculado a partir de los stopping powers S_i (expresados en unidades de keV.cm^2/g) de los elementos que lo componen teniendo en cuenta las concentraciones c_i de los mismos, utilizando la regla de Bragg[43]:

$$S(E) = \sum_i c_i \cdot S_i(E)$$

Ecuación 31

En general, la matriz que compone al blanco se conoce, o puede ser determinada utilizando otra técnica, y es uniforme a lo largo de la trayectoria de los iones[8]. Por lo tanto integrando la inversa del stopping power entre la energía con la que el ión egresa de la muestra E_f y la energía inicial E_i, se obtiene la densidad superficial másica del blanco en el punto que el ión lo atravesó:

$$\mu = \int_{E_f}^{E_i} 1 \Big/ S(E) \cdot dE$$

Ecuación 32

La energía con la que el ión egresa de la muestra se obtiene de la información espectroscópica de los iones transmitidos.
La Ilustración 12 intenta esquematizar el principio de la técnica STIM. Se observa la degradación en la distribución energética de los iones a medida que aumenta la densidad superficial de la zona de la muestra atravesada.

[8] O, por lo menos, en lo que respecta a este trabajo, que apunta a analizar muestras de tejidos de pocos micrones de espesor.

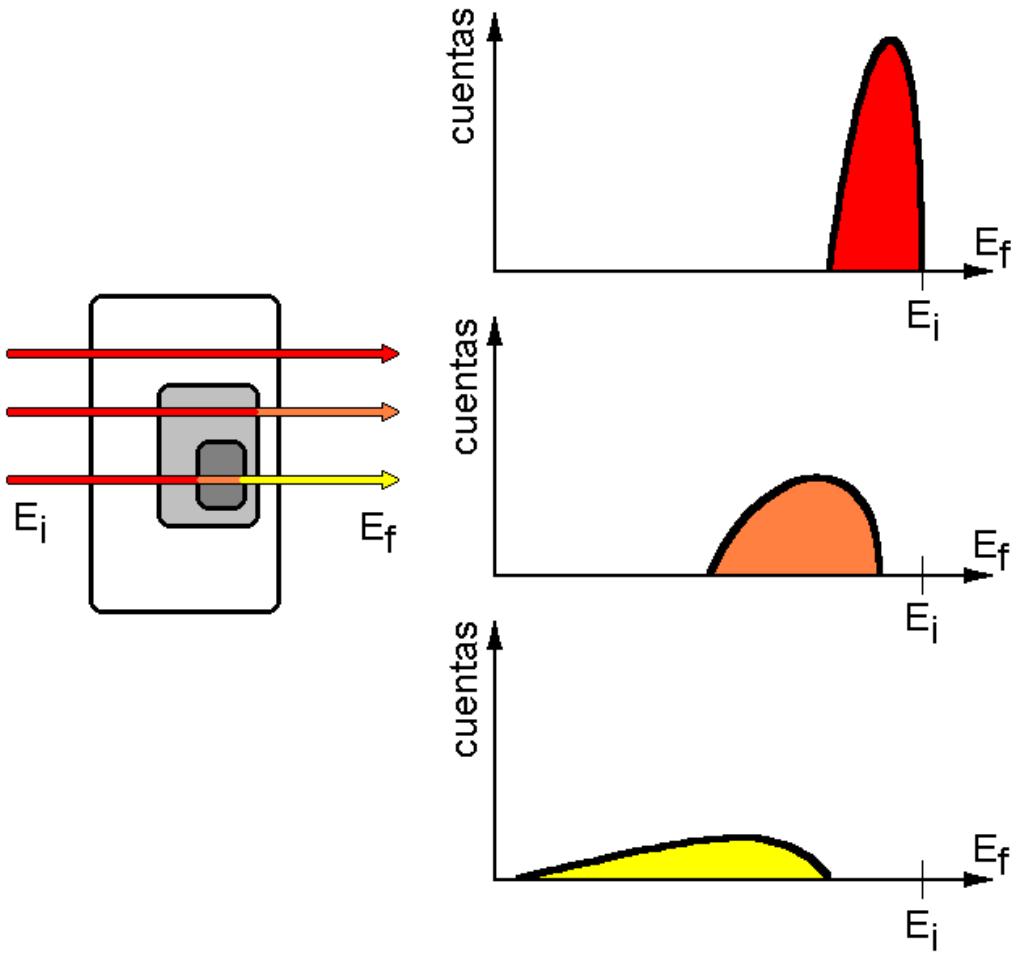


Ilustración 12: Principio de la técnica STIM, evaluando la degradación energética de los iones que atraviesan la muestra es posible inferir la densidad de la misma.

En general, para STIM se utilizan corrientes de partículas muy bajas, del orden de unos cientos de iones por segundo, porque cada ión transmitido contiene en sí mismo la información buscada. Además, la resolución de los detectores de barrera de superficie utilizados aquí se degrada rápidamente al recibir altas dosis de partículas. Típicamente un detector de este tipo no sirve más luego de recibir dosis de más de 10^9 partículas por cm^2.

PIXE

PIXE (del inglés Particle–Induced X–ray Emission) es una técnica analítica para análisis multi–elemental[39]. En ella se hacen incidir sobre la muestra a analizar iones acelerados con energía suficiente como para producir la ionización de las capas electrónicas más internas de los átomos que la componen, los que al desexcitarse emiten un espectro de rayos X característicos.

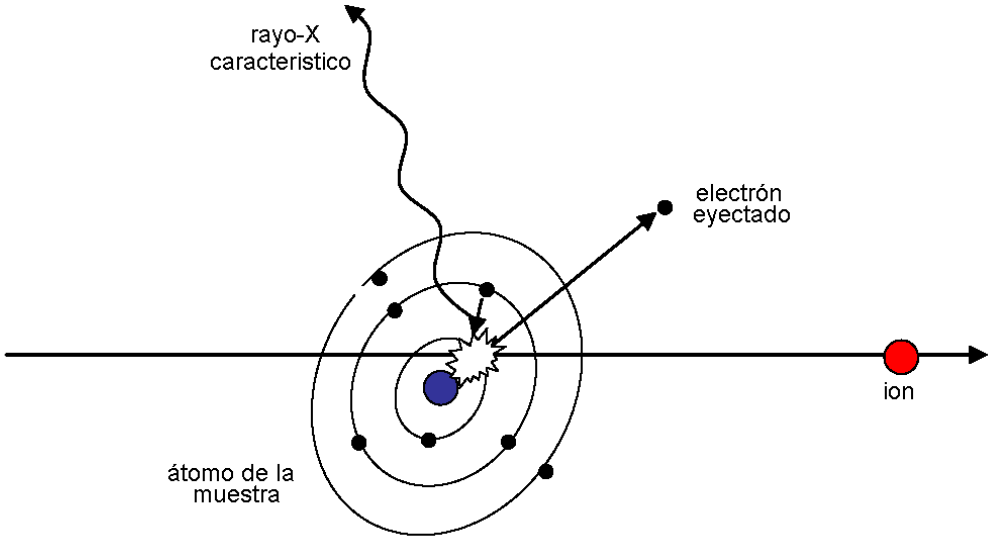


Ilustración 13: Principio de la técnica PIXE; el ión produce vacancias en las capas electrónicas más profundas. Luego, un electrón menos ligado llena la vacancia, emitiéndose un rayo X característico que puede ser analizado para determinar de que elemento provino.

Analizando este espectro es posible determinar los elementos presentes en la muestra, y calcular la concentración de cada uno de estos. En el caso de ser trazas, se alcanzan límites de detección que en general son del orden de partes por millón (ppm).

Si se ubica un detector de rayos X apuntando a la muestra, y se supone que el haz de iones no pierde energía al atravesar la muestra, y que los rayos X producidos en la muestra no sufren ninguna atenuación al atravesar (salir de) la misma[9], la cantidad de rayos X de un determinado elemento que adquiere el detector es [48]:

$$A(Z) = k'(Z) \cdot q \cdot \rho_Z \cdot \Delta X$$

Ecuación 33

Donde q es la carga que atravesó la muestra (proporcional al número de iones que la atravesó), la densidad del elemento Z multiplicada por el espesor es la densidad superficial del elemento $(\rho_Z.\Delta X)$, y $k'(Z)$ depende de la sección eficaz de producción de

[9] En este trabajo se analiza la concentración de Cu, cuyos rayos X son de suficiente energía como para no ser auto absorbidos

los rayos X buscados, la eficiencia intrínseca del detector, el ángulo sólido del detector, la energía inicial del ión, y otras constantes dimensionales, por lo que es una constante para cada elemento, para una geometría fija del setup (arreglo experimental), y para una energía determinada de los iones. Esta constante puede determinarse experimentalmente haciendo PIXE de un patrón de referencia del cual se conoce la densidad superficial, en las mismas condiciones experimentales que la muestra.
La cantidad de iones que atraviesan la muestra se obtiene utilizando una copa de Faraday, la cual, al ser conectada a un integrador de carga, en realidad mide la carga que atravesó la muestra. Pero para una determinada condición de irradiación, el estado de carga de los iones es constante.
Expresando la Ecuación 33 en función de la carga, y reemplazando la *k'(Z)* en función de los datos del experimento realizado sobre un patrón de referencia:

$$(\rho_Z \cdot \Delta X)_m = (\rho_Z \cdot \Delta X)_p \cdot \frac{q_p}{q_m} \cdot \frac{A_m(Z)}{A_p(Z)}$$

Ecuación 34

Donde $(\rho_Z.\Delta X)_m$ es la densidad superficial del elemento Z en la muestra, $(\rho_Z.\Delta X)_p$ es la densidad superficial del elemento Z en el patrón de referencia, q_p y q_m son las cargas que atravesaron el patrón y la muestra, y $A_m(Z)$ y $A_p(Z)$ son las áreas del pico correspondiente al rayo X en cuestión en la muestra y en el patrón.

Todo este análisis se basó en la hipótesis de que la energía de los iones se mantiene constante al atravesar la muestra, lo que se conoce como "análisis PIXE de muestras finas". Sin embargo, en este trabajo se observó que el espesor de las muestras era suficiente como para producir una pequeña variación en la energía de los iones al atravesarla, por lo que fue necesario realizar un "análisis PIXE de muestras gruesas".

En este caso, *k'(Z)* no puede considerarse una constante, ya que la sección eficaz de producción es función de la energía del ión. Por lo tanto, se debe replantear la Ecuación 33 de la siguiente forma:

$$A(Z) = k(Z) \cdot q \cdot C(Z) \cdot \int_{E_i}^{E_f} S(Z,E) \cdot dE$$

Ecuación 35

Donde E_i y E_f son las energías del ión al ingresar y al egresar de la muestra. El término $S(Z,E)$ incluye todos los factores que son dependientes de la energía del ión:

$$S(Z,E) = \frac{\sigma_Z(E) \cdot T_Z(E)}{S_M(E)}$$

Ecuación 36

donde σ es la sección eficaz de producción, T la transmisión de los rayos X desde el punto en que se generan hasta el detector, y S_M, el poder frenador de la matriz.
El poder frenador de la matriz se define como:

$$S_M(E) = \rho^{-1} \cdot \frac{dE}{dx}$$

Ecuación 37

donde ρ es la densidad de la matriz, y *dE/dx* es la energía que entrega el ión al atravesar la matriz por unidad de distancia recorrida.
En este trabajo se van a medir básicamente rayos X de energía suficientemente grandes como para considerar que la transmisión es 1, por lo que se llega a la ecuación:

$$A(Z) = k(Z) \cdot q \cdot C(Z) \cdot \int_{E_i}^{E_f} \frac{\sigma_Z(E)}{S_M(E)} \cdot dE$$

Ecuación 38

Combinando la sección eficaz de producción con la constante k, se obtiene la constante k' utilizada en la ecuación para muestras finas:

$$A(Z) = q \cdot C(Z) \cdot \int_{E_i}^{E_f} \frac{k'(E,Z)}{S_M(E)} \cdot dE$$

Ecuación 39

Si se quiere llegar desde esta ecuación a la Ecuación 33 se puede extraer de la integral k' y S_M, ya que son constantes, y al reemplazar según la Ecuación 37

$$A(Z) = q \cdot C(Z) \cdot \frac{k'(E,Z)}{S'_M} \int_{E_i}^{E_f} dE$$

Ecuación 40

Donde este S'_M queda definido como la pérdida de energía a lo largo de la muestra:

$$S'_M = \rho^{-1} \cdot \frac{\Delta E}{\Delta x}$$

Ecuación 41

Reemplazando:

$$A(Z) = q \cdot C(Z) \cdot \frac{k'(E,Z)}{\rho^{-1} \cdot \frac{\Delta E}{\Delta x}} \int_{E_i}^{E_f} dE$$

Ecuación 42

En esta ecuación la concentración está expresada en términos de la relación entre la densidad de la matriz y la densidad del elemento Z como:

$$C(Z) = \frac{\rho_Z}{\rho}$$

Ecuación 43

Resolviendo la integral y simplificando:

$$A(Z) = q \cdot k'(E,Z) \cdot \frac{\rho_Z}{\rho} \cdot \frac{1}{\rho^{-1}} \cdot \left(\frac{\Delta E}{\Delta x} \right)^{-1} \cdot \Delta E$$

Ecuación 44

Simplificando:

$$A(Z) = q \cdot k'(E,Z) \cdot \rho_Z \cdot \Delta x$$

Ecuación 45

Simulaciones

Variación del tamaño de foco con la energía

Las matrices de transferencia del microhaz son:

$$M_X = \begin{pmatrix} -.04472406199 & 0 \\ -3.496802628 \cdot {}^{1}\!/_{\mathrm{m}} & -22.35932403 \end{pmatrix}$$

Ecuación 46

$$M_Y = \begin{pmatrix} .01353196982 & 0 \\ 11.58181915 \cdot {}^{1}\!/_{\mathrm{m}} & 73.89903668 \end{pmatrix}$$

Ecuación 47

tomando en cuenta:

leff = 0.105	longitud efectiva de los cuadrupolos
q = 5 x 1.602 x 10^{-19}	carga del ión (+5)
m = 16 x 1.67 x 10^{-27}	masa del ión (16)
R0 = 0.00375	radio de los polos
n = 15	número de espiras
E = 50 x 10^{6} x 1.602 x 10^{-19}	energía del ión (50 MeV)
i1 = 30.16262254	corriente de los primeros dos cuadrupolos
i2 = 33.17154759	corriente del último cuadrupolo

Tabla 4

sus derivadas en función de la energía:

$$\frac{dM_X}{dE} = \begin{pmatrix} .1243615758 \cdot {}^{1}\!/_{\mathrm{MeV}} & .8338907958 \cdot {}^{\mathrm{m}}\!/_{\mathrm{MeV}} \\ .4516949490 \cdot {}^{1}\!/_{\mathrm{m} \cdot \mathrm{MeV}} & 3.025456977 \cdot {}^{1}\!/_{\mathrm{MeV}} \end{pmatrix}$$

Ecuación 48

$$\frac{dM_Y}{dE} = \begin{pmatrix} -.052924933\ 31 \cdot {}^{1}\!/_{\mathrm{MeV}} & -.341213723\ 0 \cdot {}^{\mathrm{m}}\!/_{\mathrm{MeV}} \\ -.461979495\ 2 \cdot {}^{1}\!/_{\mathrm{m} \cdot \mathrm{MeV}} & -3.01316200\ 3 \cdot {}^{1}\!/_{\mathrm{MeV}} \end{pmatrix}$$

Ecuación 49

Las derivadas segundas confirman que es buena aproximación tomar como constante a las derivadas primeras dentro de un intervalo de 1 MeV:

$$\frac{d^2 M_X}{dE^2} = \begin{pmatrix} -.007363806696 \cdot {}^{1}\!/_{\mathrm{MeV}^2} & -.04924669840 \cdot {}^{\mathrm{m}}\!/_{\mathrm{MeV}^2} \\ -.02803565316 \cdot {}^{1}\!/_{\mathrm{m} \cdot \mathrm{MeV}^2} & -.1874509813 \cdot {}^{1}\!/_{\mathrm{MeV}^2} \end{pmatrix}$$

Ecuación 50

$$\frac{d^2 M_Y}{dE^2} = \begin{pmatrix} .003280298055 \cdot {}^{1}\!/_{\mathrm{MeV}^2} & .02141942545 \cdot {}^{\mathrm{m}}\!/_{\mathrm{MeV}^2} \\ .02242115703 \cdot {}^{1}\!/_{\mathrm{m} \cdot \mathrm{MeV}^2} & .1470395645 \cdot {}^{1}\!/_{\mathrm{MeV}^2} \end{pmatrix}$$

Ecuación 51

Las coordenadas sobre el blanco (nomencladas con el subíndice "o") de un ión de 50 MeV con vectores iniciales (x_i, x'_i) y (y_i, y'_i) se calculan basándose en las matrices de transferencia como:

$$\begin{pmatrix} x_o \\ x'_o \end{pmatrix} = M_X \times \begin{pmatrix} x_i \\ x'_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -.04472406199 & 0 \\ -3.496802628 \cdot {}^{1}\!/_{\mathrm{m}} & -22.35932403 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_i \\ x'_i \end{pmatrix}$$

Ecuación 52

$$\begin{pmatrix} y_o \\ y'_o \end{pmatrix} = M_Y \times \begin{pmatrix} y_i \\ y'_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} .01353196982 & 0 \\ 11.58181915 \cdot {}^{1}\!/_{\mathrm{m}} & 73.89903668 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} y_i \\ y'_i \end{pmatrix}$$

Ecuación 53

resultando:

$$x_o = -.04472406199 \cdot x_i$$

Ecuación 54

$$y_o = .01353196982 \cdot y_i$$

Ecuación 55

donde se observa que las componentes iniciales angulares del haz no tienen importancia. Sin embargo, si el ión ingresa con una energía distinta, las matrices de transferencia se transforman como:

$$M'_X = M_X + \Delta E \cdot \frac{dM_X}{dE}$$

Ecuación 56

$$M'_Y = M_Y + \Delta E \cdot \frac{dM_Y}{dE}$$

Ecuación 57

y la posición sobre el blanco resulta:

$$x_o = \left(-.04472406199 + .1243615758 \cdot {}^{1}\!/\!_{\mathrm{MeV}} \cdot \Delta E\right) \cdot x_i + \left(.8338907958 \cdot {}^{\mathrm{m}}\!/\!_{\mathrm{MeV}} \cdot \Delta E\right) \cdot x'_i$$

Ecuación 58

$$y_o = \left(.01353196982 - .05292493331 \cdot {}^{1}\!/\!_{\mathrm{MeV}} \cdot \Delta E\right) \cdot y_i + \left(-.3412137230 \cdot {}^{\mathrm{m}}\!/\!_{\mathrm{MeV}} \cdot \Delta E\right) \cdot y'_i$$

Ecuación 59

de estas últimas ecuaciones se observa que los factores que multiplican a las componentes angulares pueden tomar valores extremadamente altos.
Normalizando estos factores a unidades convenientes, y despreciando las componentes espaciales:

$$x_o \cong 834 \cdot \frac{\mu m}{mrad \cdot \mathrm{MeV}} \cdot \Delta E \cdot x'_i$$

Ecuación 60

$$|y_o| \cong 341 \cdot \frac{\mu m}{mrad \cdot \mathrm{MeV}} \cdot \Delta E \cdot y'_i$$

Ecuación 61

Típicamente, cuando se trabaja con microhaces por encima de 2 x 2 μm^2, los colimadores antiscattering se fijan a aperturas de 1.5 x 1.5 mm^2, con lo que se admiten componentes angulares de hasta aproximadamente 0.1 mrad. En esta condición, el incremento del tamaño del haz es del orden de 83 μm en X por cada MeV que se corra el haz, y 34 μm/MeV en Y, teniendo en cuenta que la validez de estas ecuaciones está garantizada para corrimientos inferiores al MeV.

Mediciones realizadas verificando el funcionamiento del acelerador Tandar[52] indican una estabilidad en tensión de ± 5 kV lo que se traduce en una variación de ± 30 keV en el haz de ^{16}O con carga +5. Sin embargo, la geometría del imán analizador ubicado a la salida del acelerador puede reducir este ancho energético si los colimadores que se encuentran a la salida del mismo son cerrados apropiadamente.

Las matrices de transferencia del sistema compuesto por el tramo entre el colimador de entrada a la línea y la lente magnética que se encuentra a la entrada de la línea, dicha lente, y la distancia hasta el colimador objeto (remitirse a la Ilustración 11: Diagramas de aceptancia para la selección de la emitancia apropiada del haz en el microhaz.) son:

$$M_X \cong M_Y \cong \begin{pmatrix} -1.2 & 0 \\ -0.27 \cdot 1/\mathrm{m} & -0.83 \end{pmatrix}$$

Ecuación 62

Lo que indica que prácticamente la imagen a la salida de este sistema tiene la misma amplitud que el objeto a la entrada[10] y por ende que las componentes espaciales de la aceptancia del microhaz vistas desde el colimador objeto son prácticamente iguales que las componentes espaciales vistas desde el colimador de salida del imán analizador.
De esto puede concluirse que abrir los colimadores del imán analizador a una apertura mucho mayor que la apertura del colimador objeto no tiene sentido[11]. Es más, cuando el acelerador controla la estabilidad del terminal realimentando la información provista por estos colimadores (lo que se conoce como control por slits) las fluctuaciones de energía del haz que ingresa a la línea experimental disminuyen cuanto más se cierran estos colimadores.
Para estudiar esto en detalle se realizó una simulación con un programa de marcha de rayos inyectando en el modelo del imán analizador un haz de ^{16}O con una emitancia de $(10\ \mathrm{mm\ mrad})^2$ con una dispersión de energía de ± 30 keV. Esta simulación dio cuenta de un gradiente de energía en la distribución de partículas en el sentido vertical. Si de esta distribución se selecciona sólo una región de 120 μm (que es la aceptancia espacial del microhaz en este punto cuando se trabaja con los colimadores objeto abiertos a 140 μm en el sentido vertical) el rango de energías que llega a la muestra es de ± 15 keV.
Para esta variación de energía, el incremento del tamaño del haz es del orden de 83 μm/MeV y 34 μm/MeV multiplicado por ±0.015 MeV, lo que indica un incremento de 2.5 μm en X y 1 μm en Y debido a la dispersión en energía.
Cuando se utilizan las condiciones para obtener microhaces de dimensiones inferiores a los 2 x 2 μm^2 (ver sección “Colimadores – operación por debajo de 2 micrones – alta resolución”) se cierran los colimadores objeto y anti-scattering, por lo que la influencia de la dispersión en energía disminuye considerablemente.

[10] Una magnificación de 1.2 se puede considerar como 1 en estos términos.
[11] Si es que el sistema está correctamente alineado.

Haz disperso por los colimadores.

Uno de los principales factores que degradan la calidad del microhaz es el haz que se dispersa en la apertura objeto [45]. Hablando de un ejemplo concreto, cuando se realiza un experimento típico de PIXE sin intentar la máxima resolución del microhaz, se colocan los colimadores objeto definiendo una apertura de 100 x 320 μm^2, para que luego la lente magnética reduzca el haz a un tamaño de 4 x 4 μm^2. Para este ejemplo se utiliza un haz de ^{16}O acelerado a 50 MeV. Estos iones pueden atravesar hasta 11.4 μm de tungsteno, material del cual están compuestas las hojas de los colimadores, por lo que existe la posibilidad de que algunos iones atraviesen una zona del borde del colimador describiendo un camino de menos de 11.4 μm para luego salir del colimador y continuar su viaje con una energía degradada y una trayectoria distinta a la original.

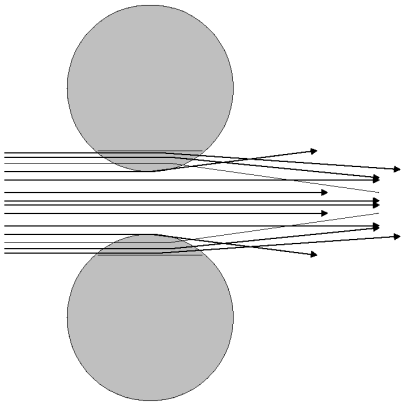


Ilustración 14: Las regiones más delgadas del colimador permiten el paso de iones con energía degradada y dirección distinta a la original.

La Ilustración 14 esquematiza este inconveniente. Se puede demostrar que un colimador de forma circular es lo más conveniente para minimizar este efecto. A priori se podría pensar que una forma plana es mucho mejor, sin embargo cualquier irregularidad por más mínima que sea, inclusive debido a la dispersión natural de componentes angulares del haz por no tener emitancia cero, generaría una cantidad de haz disperso muy superior a los que genera una forma circular.

Para estudiar este problema se define una "zona de transparencia", que es la zona del colimador por la cual el haz puede recorrer un camino ξ dentro de la hoja del colimador de menos de 11.4 μm para luego egresar. El enfoque que tradicionalmente se hace de este problema es estudiar geométricamente el colimador. Para un colimador circular con un radio R, el espesor de la zona de transparencia para partículas con un rango ξ, considerando una trayectoria lineal es:

$$e_{ZT} = R - \sqrt{R^2 - \frac{\xi^2}{4}}$$

Ecuación 63

Evidentemente, cualquier rugosidad en la superficie de la hoja incrementaría la cantidad de partículas dispersadas y por consecuencia a este resultado. El punto que en el caso de iones pesados invalida este cálculo es que el resultado de la Ecuación 63 para un R de 2.5 mm es 6.5 nm, valor que queda totalmente opacado por la rugosidad del colimador, típicamente, acotada en 0.1 μm según indica el fabricante.
En función de esto, se puede decir que al definir una apertura de 100 x 320 μm^2 quedará una zona de 0.1 μm de espesor circundando a este área en la que no queda claro que ocurre debido a la rugosidad de las hojas del colimador.
Esta zona representa un área

$$A = 0.1\mu m \cdot 2 \cdot (320\mu m + 100\mu m) = 84\mu m^2$$

Ecuación 64

, un factor de

$$f = \frac{84\mu m^2}{320\mu m \cdot 100\mu m} = 381^{-1}$$

Ecuación 65

con respecto al área de 100 x 320 μm^2. Esto quiere decir que por cada 381 iones que pasen por la apertura objeto con la energía y trayectoria apropiada, una puede pasar por una zona en donde no se puede determinar cuál va a ser su destino, y eventualmente ser dispersada.
En un experimento de PIXE, el haz disperso (definido como el conjunto de iones dispersados en el colimador), contribuye como un halo que se extiende más allá del foco del haz del microhaz, por lo que puede inducir la generación de rayos X en una zona indeseada de la muestra, o en los componentes del arreglo experimental.

El cálculo presentado a continuación apunta a estimar la magnitud de este problema. Intenta acotar el valor de la probabilidad de que un ión de ^{16}O acelerado a 50 MeV ingrese a la cámara de irradiación luego de atravesar un espesor ξ de W del colimador objeto, para luego interactuar con algo que se encuentre dentro del ángulo de visión del detector de rayos X.
Para esto se procede de la siguiente forma:

- Antes que nada, se define como criterio que todo este área de 84 μm^2 es área de transparencia, por lo que generará haz disperso. Esto es sin duda una cota superior, evidentemente está muy alejado de la realidad decir que debido a que la rugosidad está por debajo de 0.1 μm, el perfil de la hoja del colimador está formada por una banda de 0.1 μm de ancho que le presenta al haz un espesor de entre 0 y 11.4 μm. Sin embargo, en este cálculo se intenta determinar sí, para la situación propuesta, la relación entre el haz disperso que impacta dentro del ángulo de visión del detector y el haz directo está por debajo de la ppm, ya que este es el límite de detección típico de micro PIXE[12].

[12] En realidad, requerir que esta relación esté por debajo de la ppm es extremadamente restrictiva. En situaciones normales se mide la concentración de una traza dentro de una matriz compuesta por otros elementos. Por otro lado el efecto del haz disperso dependerá de cuanto material impacte dentro del campo de visión del detector (e.g., una pared de cobre).

- Luego, utilizando un programa de marcha de rayos, se simula el sistema compuesto por una fuente puntual colocada en la posición del colimador objeto y el sistema de 3 quadrupolos con los parámetros de funcionamiento normal enfocando en la posición de la muestra. Barriendo en la simulación el ángulo de emisión de la fuente simulada en 4π se obtiene la trayectoria de los iones, y se determina si esta trayectoria excede las dimensiones físicas del caño por el cual viaja el haz dentro de los cuadrupolos. De esta forma se determina lo que puede considerarse como un esquema de aceptancia espacial, es decir, el área obtenida al marcar sobre un gráfico bidimensional un punto en cada posición xy por la que ingreso el ión simulado a la lente para luego ingresar en la cámara de irradiación.
- A continuación se modela la distribución espacial y en energía del haz de iones a la entrada de la lente magnética, después de atravesar un cierto espesor de W y viajar 6.6 m.
- Luego se evalúa la cantidad de haz que atraviesa cada espesor.
- Después, utilizando el resultado de la marcha de rayos, se evalúa que proporción del haz transmitido a través del colimador objeto entra a la cámara teniendo en cuenta la distribución espacial y energética a la entrada del triplete de cuadrupolos.
- Finalmente, sabiendo que cantidad de haz disperso ingresa en al cámara, se estima cuanto de este puede interactuar con componentes abarcados en el ángulo de visión del detector.

Componente espacial de la aceptancia de la lente magnética.

La Ilustración 15 muestra una simulación de la trayectoria que siguen los iones dentro de la lente magnética, para finalmente ser enfocados sobre el blanco.

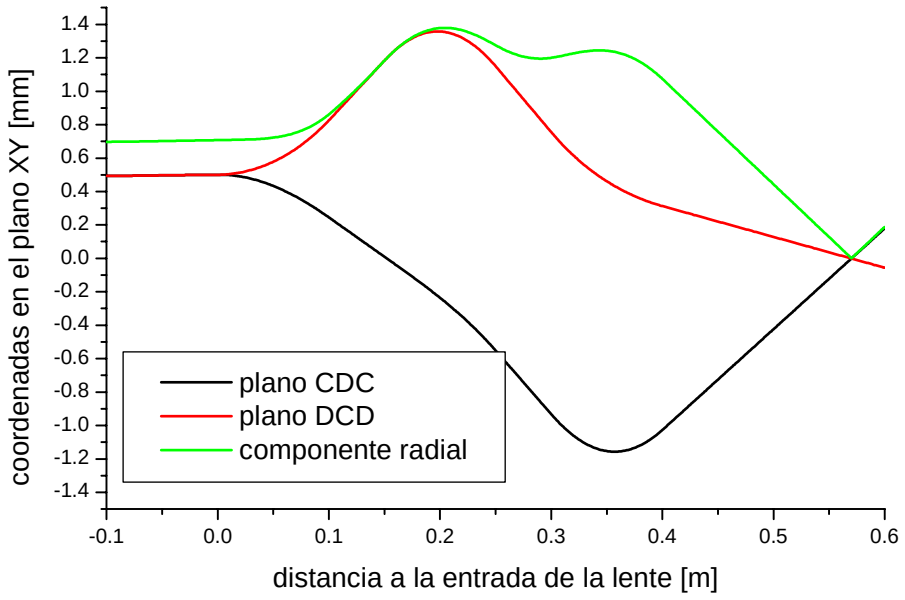


Ilustración 15: Trayectoria de los iones dentro de la lente. En el plano horizontal la lente se comporta como DCD, mientras que en el vertical como CDC. La componente radial se calcula como $r=(x^2+y^2)^{1/2}$.

Se observa que la componente radial (distancia del ión al eje de simetría) puede ascender a un valor considerablemente elevado. El inconveniente que esto presenta es que el haz, mientras viaja por las lentes, lo hace dentro de un tubo de acero de 6 mm de diámetro interno.
Lo primero que surge de esto es la necesidad de evaluar si la aceptancia del microhaz está realmente definida por los dos juegos de colimadores (el colimador objeto y el colimador anti-scattering), o por una combinación formada por el colimador objeto y la lente magnética. Para esto se hizo un programa de marcha de rayos que calcula la máxima componente radial que alcanza un ión dentro de la lente.
El sistema simulado en este programa se compone de una fuente de iones puntual localizada en la posición de la apertura objeto y los tres campos cuadrupolares puros con los gradientes de campo apropiados para formar un foco en la posición de la muestra, colocados en las posiciones de los tres cuadrupolos.
Los iones se emiten barriendo una grilla sobre la entrada de la lente, es decir, cada trayectoria inicial de las partículas queda determinada por la recta definida entre la fuente y un punto definido sobre un plano perpendicular al eje de simetría, con origen en este, y que lo corta en la posición de entrada al primer cuadrupolo.

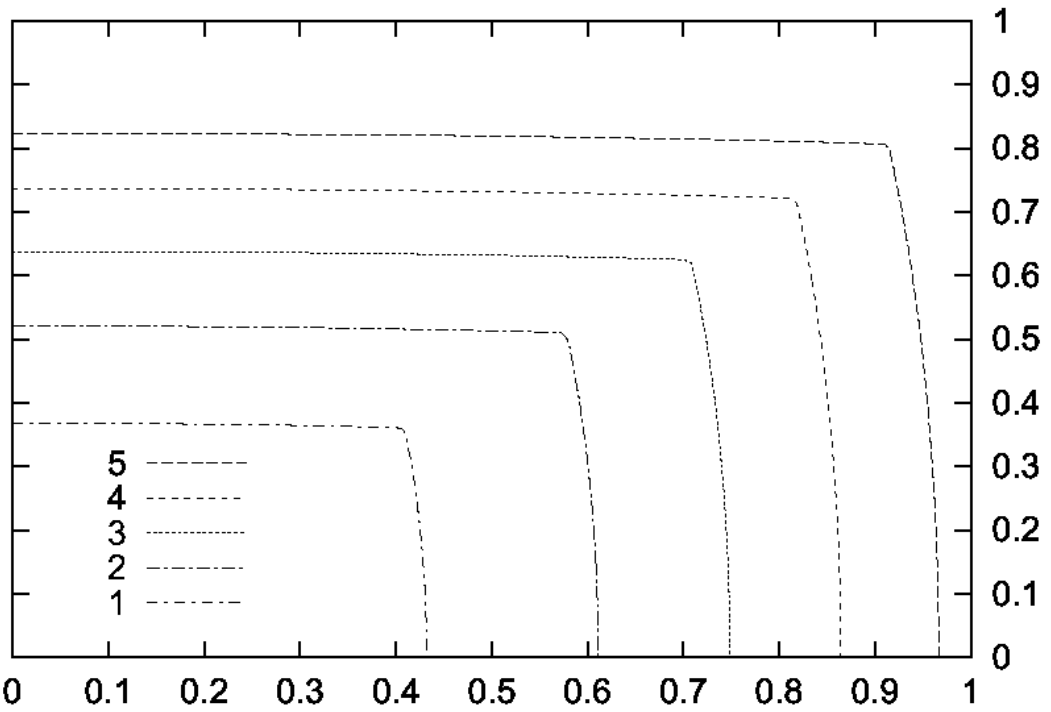


Ilustración 16: Curva de niveles de la máxima componente radial de un ión de ^{16}O a 50 MeV que ingresa por la posición (x,y) sobre el plano de entrada de la lente, proveniente del centro de la apertura objeto. Las unidades de los 3 ejes son mm, por lo tanto, todas las partículas que ingresen dentro de la curva rotulada como 3, no se apartaran más de 3 mm del eje.

La salida de este programa es una superficie en R3 (presentada en la Ilustración 16) que representa el máximo apartamiento para cada punto de ingreso a la lente.
En el caso del haz disperso esta curva no es válida, ya que este tipo de iones tiene menos energía, por lo que es necesario calcular esta curva utilizando como parámetro la energía de los iones en lugar del máximo apartamiento. Esto se presenta en la

Ilustración 17 donde se muestra la posición de entrada de los iones de energías que van desde 5 a 50 MeV que alcanzan una componente radial de 3 mm.

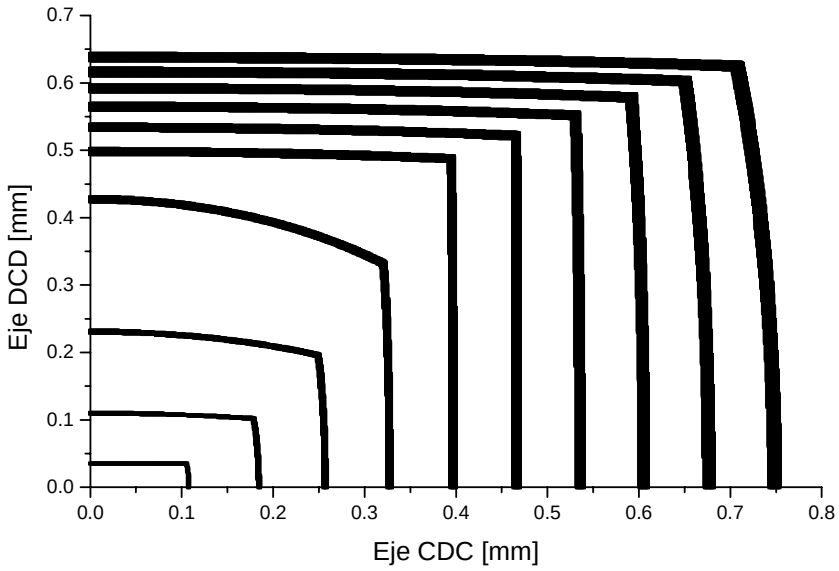


Ilustración 17: Curvas correspondientes a las posiciones (x,y) sobre el plano de entrada de la lente que alcanzan una componente radial de 3 mm. Las distintas curvas representan las diferentes energías de entrada de los iones, que van de 5 MeV, para la curva más cercana al origen de coordenadas, hasta 50 MeV, para la que más abarca.

Para poder manejar esta información se optó por aproximar estas curvas de nivel por rectángulos ortogonales a los ejes que coinciden con las curvas en los puntos de intersección con los ejes. A los fines de lo que se pretende calcular (una cota máxima en la probabilidad de transmisión de iones dispersados) esta aproximación es válida, ya que es una cota superior para la componente espacial de la aceptancia de la lente.
La Ilustración 18 presenta el gráfico de los puntos de intersección con el eje X (x_m) de estas curvas en función de la energía del ión y el ajuste que se hizo sobre estos valores para poder manejarlos algebraicamente.
Lo mismo se hizo con la componente Y (y_m), presentada en la Ilustración 19, y el área de los rectángulos que acotan a cada una de las curvas, en la Ilustración 20. En estos últimos dos ajustes se utilizó una función separada en dos tramos. El punto de quiebre se halla en 20 MeV.

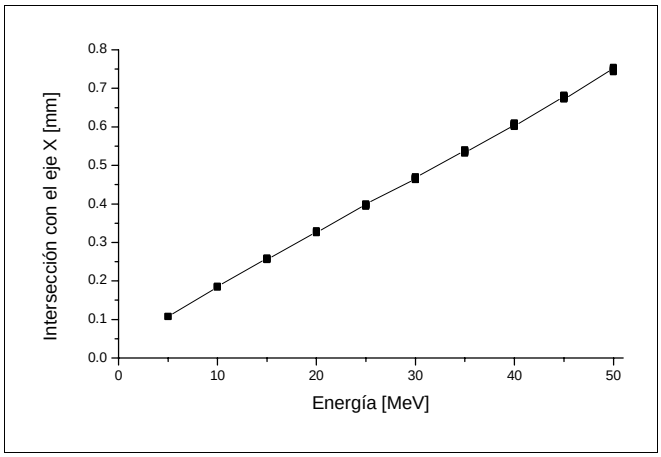


Ilustración 18: Puntos de intersección con el eje x de las curvas de la Ilustración 17.

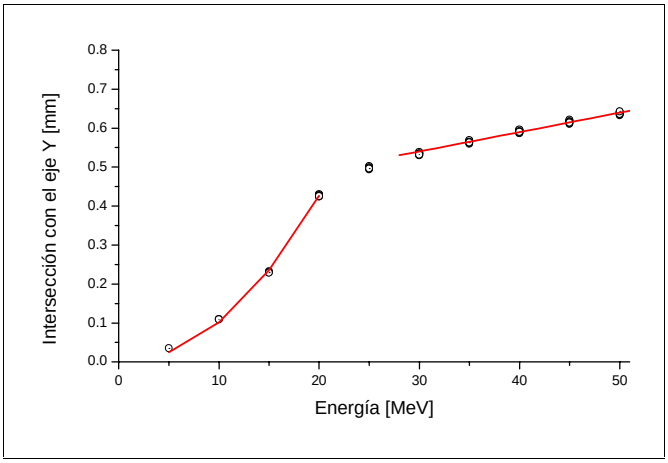


Ilustración 19: Puntos de intersección con el eje y de las curvas de la Ilustración 17.

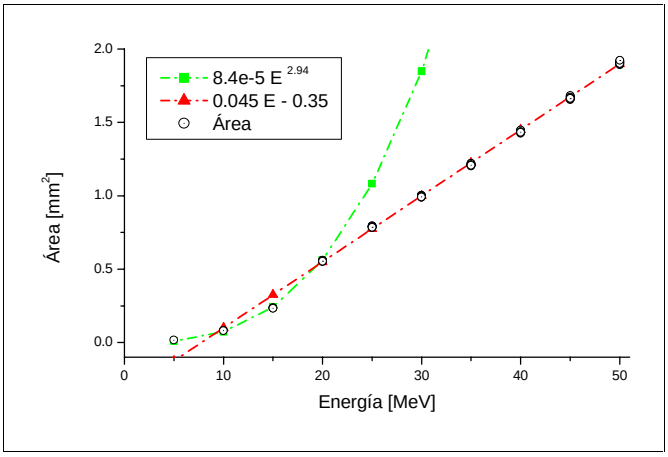


Ilustración 20: Área del rectángulo que abarca a las curvas de los iones con la máxima componente espacial transmitidos.

Los resultados de los ajustes de y_m y x_m son:

$$y_m = \begin{cases} 0.89 \cdot 10^{-3} \cdot mm \cdot \left(E / MeV \right)^{2.059} & E \le 20 MeV \\ \left(4.97 \cdot 10^{-3} \cdot E / MeV + 0.391 \right) \cdot mm & E > 20 MeV \end{cases}$$

Ecuación 66

$$x_m = \left(14.1 \cdot 10^{-3} \cdot E / MeV + 0.044 \right) \cdot mm$$

Ecuación 67

sin embargo se decidió utilizar las siguientes curvas que son cota superior de los ajustes en todo punto del domino:

$$y_q = \begin{cases} \left(1.4 \cdot 10^{-3} \cdot \left(E / MeV \right)^2 - 6 \cdot 10^{-3} \cdot \left(E / MeV \right) + 37 \cdot 10^{-3} \right) \cdot mm & E \le 20 MeV \\ \left(5.3 \cdot 10^{-3} \cdot E / MeV + 0.378 \right) \cdot mm & E > 20 MeV \end{cases}$$

Ecuación 68

$$x_q = \left(15 \cdot 10^{-3} \cdot E / MeV + 44 \cdot 10^{-3} \right) \cdot mm$$

Ecuación 69

Distribución del haz luego de atravesar W.

Esta parte del cálculo fue principalmente realizada utilizando el TRIM [55], en donde se definieron 2 capas, uno de W de espesor variable entre 0 y 11.4 μm (espesor al que los iones pierden toda su energía, como se observa en la Ilustración 21) con la densidad estándar, y un segundo capa de espesor 6.6 m de H gaseoso a una presión 3 ordenes de magnitud debajo de la estándar[13]. Para cada espesor de W evaluado se arrojaron 10^5 iones ^{16}O a 50 MeV con ángulo de incidencia 0, y se generó el archivo de registro de los iones transmitidos.

[13] Inicialmente se intentó hacer la simulación con sólo el layer de W, y utilizando la información angular que entrega el TRIM sobre los iones transmitidos, hacer la proyección de la trayectoria sobre el plano de la lente, pero esta información tiene una precisión muy inferior a la requerida para tener una resolución de milímetros sobre la lente. Por lo tanto se optó por incluir este layer, y tomar las coordenadas de egreso de la partícula. La elección de H a esa presión, se debe a que el H es el átomo con menos electrones, y la presión es la mínima que aparentemente acepta el TRIM.

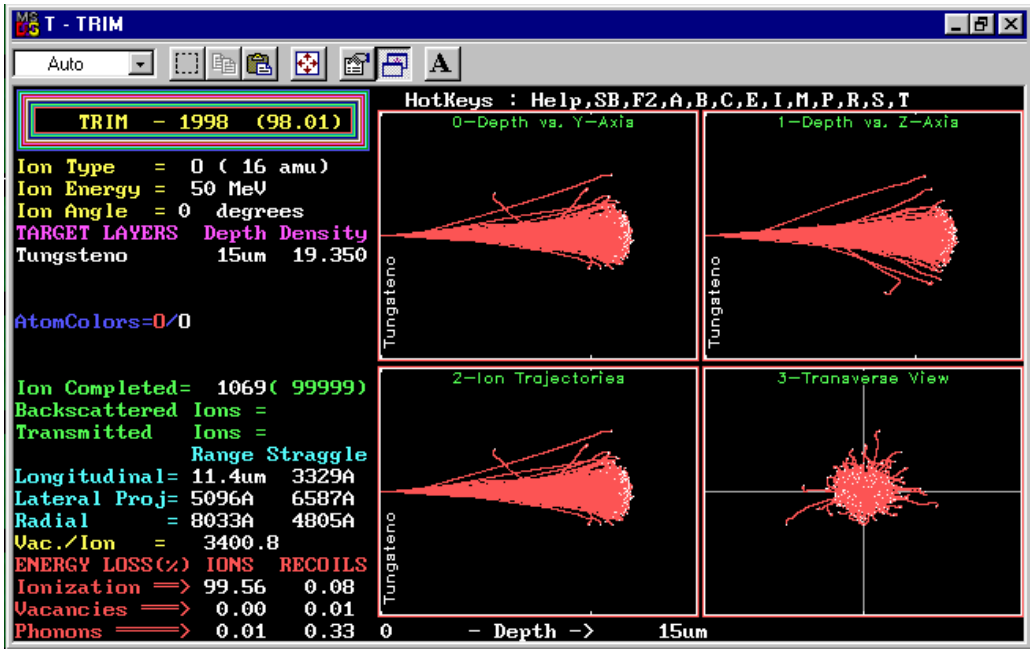


Ilustración 21: Simulación de la trayectoria de iones de ^{16}O a 50 MeV en tungsteno.

Utilizando el lenguaje AWK[14] se organizó la información de los iones transmitidos en histogramas de número de iones en función de la distancia al eje de simetría, con bins de un milímetro.

Antes de comenzar a extraer datos, se verificó arrojando 10^6 de estos iones sobre esta configuración con el espesor de tungsteno cero, prácticamente ningún ión sufrió desviación dentro de lo apreciable, ni pérdida de energía considerable. O sea, la capa de H no perturba a la simulación.

Distribución espacial.

Estos histogramas, se normalizaron según el número de iones simulados (10^5) y el área que representa utilizando la siguiente función:

$$N'_i = N_i \cdot \frac{1}{(2 \cdot i + 1) \cdot \pi} \cdot \frac{1}{10^5}$$

Ecuación 70

donde *N'* representa el número de cuentas normalizadas en el canal *i*, y *N* el número sin normalizar. En la Ilustración 22 se presentan estos histogramas para espesores de W que van desde 1 a 10.5 μm.

[14] Lenguaje que viene incorporado en las distribuciones de Linux, que sirve para manejar y formatear información de texto [10].

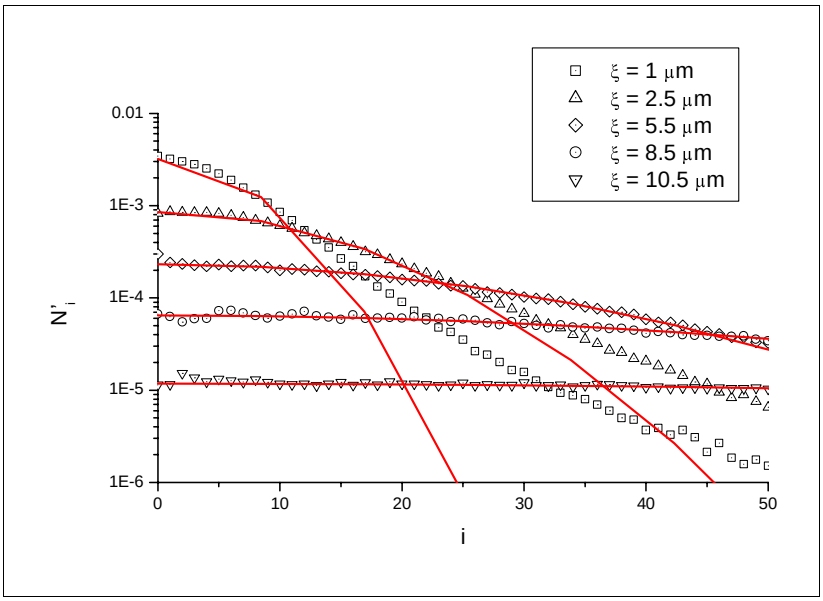


Ilustración 22: Distribución de la densidad de corriente del haz proyectada sobre el plano de entrada a la lente magnética, luego de atravesar espesores ξ que van desde 1 a 10. 5 μm.

Además se incluyen las curvas ajustadas a cada uno de estos histogramas. El modelo utilizado para este ajuste fue:

$$y = A \cdot e^{\frac{-x^2}{2 \cdot \omega^2}}$$

Ecuación 71

En el gráfico se observa un cierto déficit a medida que el haz se aleja del eje de simetría, que será evaluado más adelante. A pesar de esto, se considera aceptable el ajuste ya que en principio sólo se pretende averiguar el número de cuentas normalizado en el canal 0, ya que la boca de entrada de la lente tiene menos de 3 mm de radio.
En la Ilustración 23 se muestra el valor de A obtenido del ajuste para los distintos espesores de W, y en la Ilustración 24 los de ω.

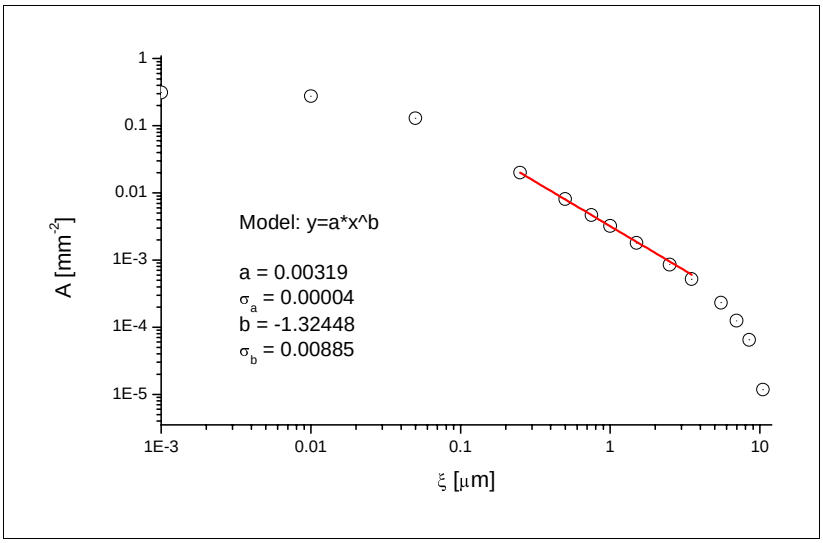


Ilustración 23: Variación del parámetro de altura de las curvas ajustadas a las distribuciones de densidad de corriente, en función del espesor atravesado.

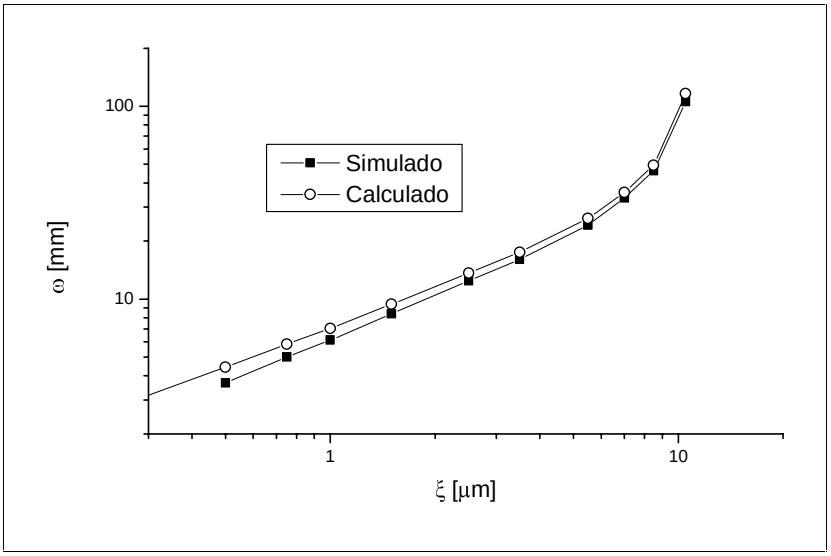


Ilustración 24: Variación del parámetro de ancho de las curvas ajustadas a las distribuciones de densidad de corriente, en función del espesor atravesado, en la curva simulada. La curva calculada muestra el valor necesario para que la integral de la curva ajustada coincida con la corriente total del haz.

Además, la Ilustración 23 presenta el resultado del ajuste realizado sobre este parámetro, modelado como:

$$A(\xi) = 3.21 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{mm^2} \cdot \left(\frac{\xi}{\mu m} \right)^{-1.3386}$$

Ecuación 72

Como verificación, se calculó el valor de ω que debe tener el modelo de la Ecuación 71 para que el área total de los histogramas sin normalizar sea igual al valor de iones simulados. Estos valores se presentan en la Tabla 5 junto con los valores arrojados por la simulación y el error entre ellos, y se grafican en la Ilustración 24.

ξ [μm]	*A [mm^{-2}]*	*ω ajustado [mm]*	*ω calculado [mm]*	*error*
1E-3	0.31246			
0.01	0.2746			
0.05	0.12935			
0.25	0.02			
0.5	0.00809	3.682	4.4365	0.20492
0.75	0.00467	5.01	5.838	0.16527
1	0.00321	6.1314	7.045	0.149
1.5	0.0018	8.3966	9.4037	0.11994
2.5	8.55932E-4	12.45	13.64	0.09558
3.5	5.19607E-4	16.056	17.502	0.09006
5.5	2.31855E-4	24.237	26.2	0.08099
7	1.24631E-4	33.486	35.735	0.06716
8.5	6.48836E-5	46.271	49.526	0.07035
10.5	1.1772E-5	105.614	116.275	0.10094

Tabla 5

El error presentado en esta tabla parece corresponderse con el déficit del ajuste en los canales altos de los histogramas presentados en la Ilustración 22. Esto seguramente indica que el modelo normal seleccionado para el ajuste no es del todo preciso, pero por el tipo de análisis que se está llevando a cabo, parece ser apropiado y suficiente.

Además, en la Ilustración 23 se observa una especie de saturación hacia bajos espesores, que además, se refleja en la Tabla 5 como un incremento en el error a medida que los espesores se acercan a ½ μm, ya que el modelo de la Ecuación 72 no acompaña a los valores simulados. Esta saturación se debe a un problema numérico por el tamaño de bin seleccionado para realizar los histogramas. Cuando el haz atraviesa un ξ inferior a 1 μm, sufre muy poca desviación, y la distribución que proyecta sobre la lente ocupa pocos o menos de un milímetro, siendo inapropiado un valor de bin del mismo orden para modelarlo. Como un ejemplo extremo, el haz al atravesar un espesor 0 de tungsteno debería quedar representado por una delta de amplitud infinita (ya que el eje Y en este modelo indica una densidad de partículas) y ancho cero, pero según este análisis, todas las cuentas se concentrarían en el canal cero, y según la normalización de la Ecuación 70 indicaría un valor de A igual a 1/π, valor al que tiende el gráfico de la Ilustración 23. El modelo de la Ecuación 72, en este sentido, es coherente con este valor extremo, al igual que la tendencia del gráfico de la Ilustración 24 en la región utilizada para el ajuste.

Distribución en energía.

Acomodando en histogramas en función de la energía a los iones transmitidos archivados en la salida del TRIM, se evaluó la distribución en energía de los mismos. Estos histogramas quedan perfectamente modelados por distribuciones normales, de las cuales se graficó el centroide E_m en la Ilustración 26 y el ancho Δ_E en la Ilustración 25.

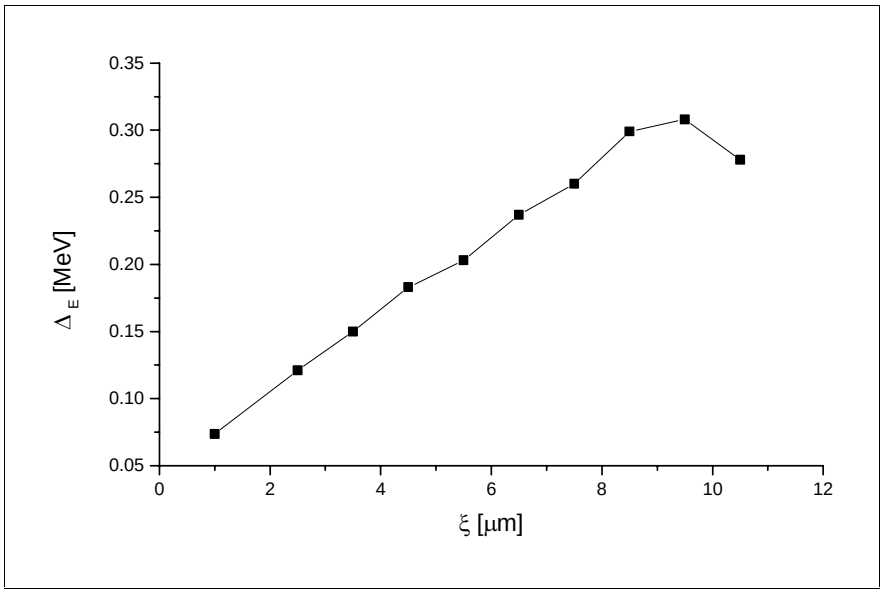


Ilustración 25: Ancho la distribución en energía de los iones que atraviesan un espesor ξ.

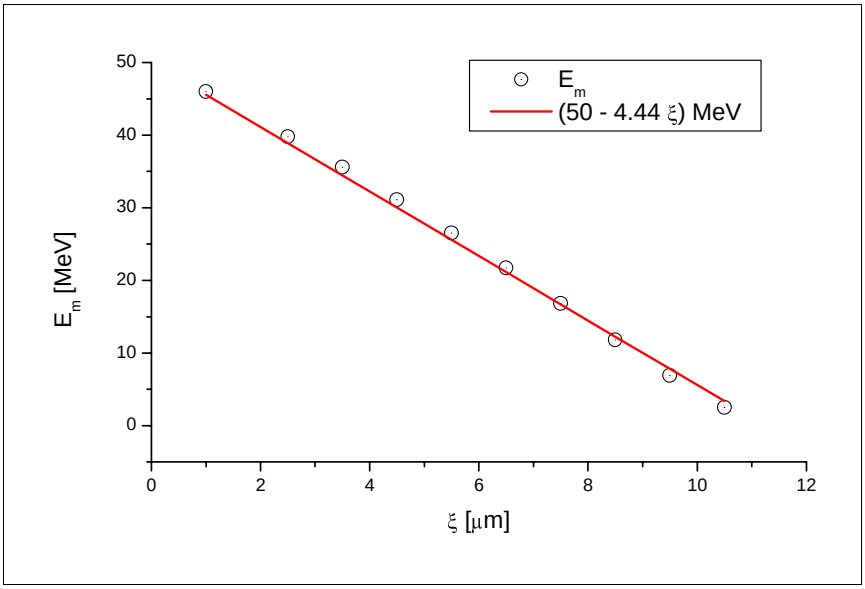


Ilustración 26: Centroide de la distribución en energía de los iones que atraviesan un espesor ξ.

La Ilustración 26 presenta también el modelo lineal utilizado para describir la curva, cuya ecuación es:

$$E_m = \left(50 - 4.44 \cdot \xi / \mu m\right) \cdot MeV$$

Ecuación 73

Probablemente, este modelo pierda su validez a medida que el espesor atravesado aumenta, ya que se está llegando al final de la curva de Bragg, donde presenta fuertes alinealidades, sin embargo como se va a ver más adelante, esta región no tiene mayor importancia en este análisis.

Cantidad de haz que atraviesa cada espesor.

Considerando que el área del colimador que presenta un determinado espesor es constante para todos los espesores efectivos inferiores a 11.4 μm, el número de iones por mm^2 en función del espesor atravesado es constante:

$$\frac{\#}{a}(\xi) = \frac{J}{I}(\xi) = cte$$

Ecuación 74

donde ξ representa el espesor de W atravesado, # el número de partículas, *a* el área atravesada, y *J* e *I* la densidad de corriente y la corriente.

La fórmula que aproxima la componente espacial de la aceptancia de la lente magnética como un rectángulo queda representada por dos ecuaciones para la componente Y, una válida para iones de hasta 20 MeV y otra para energías superiores. Por esta razón es necesario dividir el análisis en dos etapas.

El modelo de la distribución energética del haz luego de atravesar W queda representado por una distribución normal de centroide E_c y ancho Δ_E. La aproximación de primer orden del E_c en función de ξ

$$E_c(\xi) = \left(50 - 4.44 \cdot {\xi}/{\mu m}\right) \cdot MeV$$

Ecuación 75

indica que el ión debe atravesar un espesor de 6.8 μm para que su energía descienda a 20 MeV. Para este cálculo se desprecia el ancho energético del haz, representado por

$$\Delta E = \left(-0.2 \cdot \left({\xi}/{\mu m}\right)^4 + 3.3 \cdot \left({\xi}/{\mu m}\right)^3 - 23.1 \cdot \left({\xi}/{\mu m}\right)^2 + 90.3 \cdot {\xi}/{\mu m}\right) \cdot keV$$

Ecuación 76

En general, a los fines de evaluar la aceptancia de la lente en función de la energía del haz se puede considerar que el ΔE es cero. Para valores ξ de hasta 6.8 μm no supera los 250 keV, lo que en función del modelo del área aceptada por la lente, a_q

$$a_q = \left(45 \cdot 10^{-3} \cdot {E}/{MeV} - 0.35\right) \cdot mm^2 \quad ; E > 20 MeV$$

Ecuación 77

$$\frac{da_q}{dE} = 45 \cdot 10^{-3} \cdot mm^2 / MeV \quad ; E > 20MeV$$

Ecuación 78

es una variación 0.011 mm^2, comparado con valores de a_q superiores a 0.5 mm^2 para este rango.

Reemplazando en la Ecuación 77 el valor de E_c de la Ecuación 75

$$a_q = \left(1.9 - 0.2 \cdot \xi / \mu m\right) \cdot mm^2 \quad ; E > 20MeV \rightarrow \xi < 6.8\mu m$$

Ecuación 79

siendo la componentes individuales y_q e x_q en función de ξ para este rango de energías

$$y_q = \left(23.5 \cdot 10^{-3} \cdot \xi / \mu m + 0.643\right) \cdot mm \quad ; E > 20MeV \rightarrow \xi < 6.8\mu m$$

Ecuación 80

$$x_q = \left(66.7 \cdot 10^{-3} \cdot \xi / \mu m + 0.79\right) \cdot mm \quad ; E > 20MeV \rightarrow \xi < 6.8\mu m$$

Ecuación 81

La distribución espacial de la densidad de iones transmitidos sobre el plano de la lente queda modelada por la normal

$$\frac{J}{I}(\xi, x, y) = A(\xi) \cdot e^{-\left(x^2 + y^2\right) / 2 \cdot (\omega(\xi))^2}$$

Ecuación 82

donde r es la distancia del eje de simetría, y el w se calcula para normalizar la integral

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{J}{I}(\xi, x, y) \cdot dx \cdot dy = 1$$

Ecuación 83

resultando:

$$\omega(\xi) = \frac{1}{\sqrt{A(\xi)}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \approx \frac{0.4}{\sqrt{A(\xi)}}$$

Ecuación 84

Como, según el modelo expresado en la Ecuación 72

$$A(\xi) = 3.21 \cdot 10^{-3} \cdot {}^{1}\!/_{mm^2} \cdot \left({}^{\xi}\!/_{\mu m} \right)^{-1.3386}$$

Ecuación 85

entonces

$$\omega(\xi) = 7.06 \cdot mm \cdot \left({}^{\xi}\!/_{\mu m} \right)^{0.6693}$$

Ecuación 86

Para calcular la corriente transmitida por la lente en función del espesor de W atravesado se integra la distribución de iones sobre el plano de la lente dentro de la región aceptada por la lente:

$$\frac{I_T}{I}(\xi) = 4 \cdot A(\xi) \cdot \int_0^{y_q(\xi)} \int_0^{x_q(\xi)} e^{-{}^{\left(x^2+y^2\right)}\!/_{2\cdot(\omega(\xi))^2}} \cdot dx \cdot dy$$

Ecuación 87

Sin embargo, esta fórmula puede ser simplificada en función del ancho de la distribución, ω. Si esta se extiende por un área muy grande, dentro del área aceptada por la lente, permanece constante. A este fin, se considera constante cuando el valor del termino exponencial cae un 10% para un apartamiento del eje de 2 mm (muy por afuera del área de aceptación de la lente):

$$0.9 > e^{-{}^{\left(x^2+y^2\right)}\!/_{2\cdot\omega^2}} \quad ;\sqrt{x^2+y^2} = 2mm \rightarrow \omega > 4.357$$

Ecuación 88

lo que implica, en función de la Ecuación 86, la validez de esta condición para

$$\xi > \mu m \cdot \left(\frac{\omega}{7.06 \cdot mm} \right)^{{}^{1}\!/_{0.6693}} = 0.486 \mu m$$

Ecuación 89

resultando la corriente transmitida:

$$\frac{J}{I}(\xi) = A(\xi) \quad ;0.486 \mu m < \xi < 6.8 \mu m$$

Ecuación 90

reemplazando:

$$\frac{I_T}{I}(\xi)=\frac{J}{I}(\xi)\cdot a_q(\xi)=(1.9-0.2\cdot\xi)\cdot(0.00321\cdot\xi^{-1.3386}) \quad ;0.486\mu m<\xi<6.8\mu m$$

Ecuación 91

integrando:

$$\left\langle\frac{I_T}{I}\right\rangle_{III}=1/\Delta_{III}\cdot\int_{\Delta_{III}}\frac{I_T}{I}(\xi)\cdot\partial\xi=0.01074/\Delta_{III} \quad ;\Delta_{III}:0.486\mu m<\xi<6.8\mu m$$

Ecuación 92

Se puede realizar una simplificación similar para la región en la que ω es pequeña comparada con el área. Esta condición, donde prácticamente todo el haz es transmitido, se presenta cuando el valor del término exponencial cae a un 10% para un apartamiento del eje de 0.7 mm:

$$0.1>e^{-(x^2+y^2)/2\cdot\omega^2} \quad ;\sqrt{x^2+y^2}=0.7mm\rightarrow\omega>0.336$$

Ecuación 93

lo que implica, en función de la Ecuación 86, la validez de esta condición para

$$\xi>\mu m\cdot\left(\frac{\omega}{7.06\cdot mm}\right)^{1/0.6693}=0.01\mu m$$

Ecuación 94

resultando la corriente transmitida, expresada en conjunto con el intervalo que ocupa:

$$\left\langle\frac{I_T}{I}\right\rangle_{I}=1=0.01/\Delta_{I} \quad ;\Delta_{I}:\xi<0.01\mu m$$

Ecuación 95

Para la región comprendida entre estas dos no queda otra que resolver la integral de la Ecuación 87:

$$\left\langle\frac{I_T}{I}\right\rangle_{II}=1/\Delta_{II}\cdot 4\cdot\int_{\Delta_{II}}A(\xi)\cdot\int_0^{y_q(\xi)}\int_0^{x_q(\xi)}e^{-(x^2+y^2)/2\cdot(\omega(\xi))^2}\cdot dx\cdot dy\cdot d\xi \quad ;\Delta_{II}:0.01\mu m<\xi<0.486\mu m$$

Ecuación 96

Sin embargo, se puede simplificar teniendo en cuenta que para valores de ξ que van desde 0 hasta 0.486 μm, la energía del ión transmitido está comprendida entre 47.8 y 50 MeV, lo que no produce ninguna variación considerable en el área de aceptancia de la lente.
Por lo tanto se consideran x_q e y_q independientes de ξ:

$$x_q = 0.75mm \quad ; x_q = 0.65mm \quad ; \xi \in \Delta_{II}$$

Ecuación 97

Entonces, la corriente transmitida resulta:

$$\left\langle \frac{I_T}{I} \right\rangle_{II} = 0.047 \Big/ \Delta_{II} \quad ; \Delta_{II} : 0.01\mu m < \xi < 0.486\mu m$$

Ecuación 98

Finalmente, en función del siguiente resultado, se desprecia la contribución del haz transmitido a través de ξ mayores de 6.8 μm.
En esta región, la aproximación lineal para la energía transmitida en función de ξ deja de tener validez por que se está llegando al final de la curva de Bragg. Como a medida que ξ aumenta, la E decrece, puede tomarse el valor de 20 MeV (correspondiente a ξ = 6.8 μm, según indica la Ecuación 75) como cota superior. Esta, a su vez, a través de la modelización del área aceptada en función del espesor atravesado, implica una cota superior de 0.56 mm^2.
Por otro lado, el análisis de la distribución de la densidad de corriente sobre el plano de la lente hecho a partir de la simulación numérica del TRIM, indica un pronunciado déficit del valor de A en función de ξ con respecto al valor entregado por el modelo de la Ecuación 85 para valores de ξ tendiendo a 11.4 μm. También se opta por acotar el valor de A en 1.246E-4, el valor que entrego el ajuste de la distribución para un ξ de 7 μm.
La cota superior transmisión, considerablemente sobredimensionada, queda:

$$\left\langle \frac{I_T}{I} \right\rangle_{IV} << A(\xi = 7\mu m) \cdot aq(E = 20MeV) = 0.32 \cdot 10^{-3} \Big/ \Delta_{IV} \quad ; \Delta_{IV} : \xi > 6.8\mu m$$

Ecuación 99

valor que representa un 3% del valor entregado por la Ecuación 92 para la región III, 0.01074.

Resumiendo los resultados para las 4 regiones, normalizados por 11.4 μm:

región	*transmisión [mA/A]*	*ancho de la región [μm]*
I	0.88	0.01 – 0
II	4.12	0.483 – 0.01
III	0.94	6.8 – 0.483
IV	<< 0.028	11.4 – 6.8
Total	**6 mA/A**[15]	11.4 – 0

Tabla 6

Intensidad y distribución del haz disperso sobre la muestra

A este punto, se llegó a un valor de relación entre haz disperso y haz directo ingresando a la cámara de irradiación de

$$f' = 381^{-1} \cdot 6 \cdot {}^{mA}\!/_{A} = 63500^{-1}$$

Ecuación 100

en función del resultado de la Ecuación 65 y la Tabla 6.
Se plantearon las ecuaciones de la trayectoria de los iones de iones que saliendo del centro del colimador objeto, siguen la trayectoria de mayor apartamiento del eje, pasando por un colimador antiscattering abierto a 1 x 1 mm2. La Ilustración 27 muestra el tamaño que proyecta el haz sobre la muestra para distintas energías.

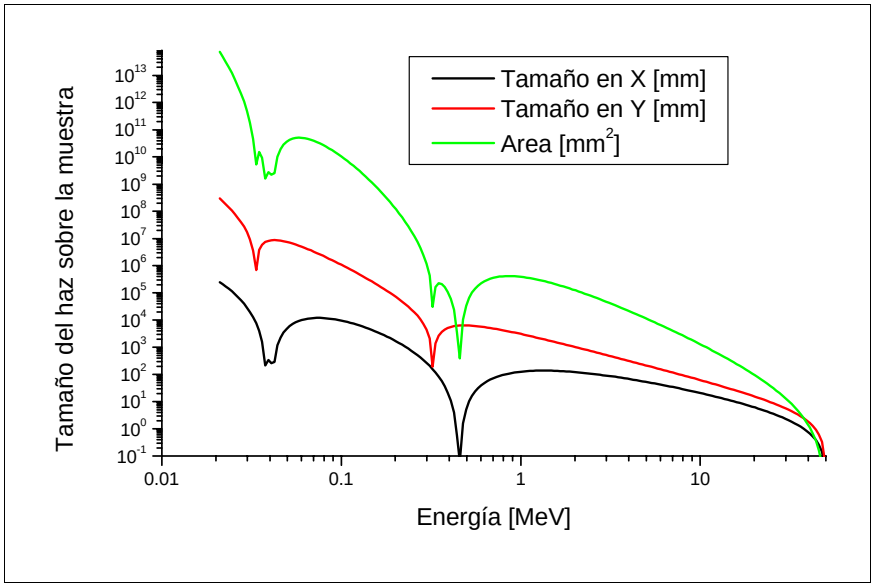


Ilustración 27: Tamaño en X y en Y de la imagen proyectada sobre el plano de la muestra por la lente, para haces de energía inferior a la de enfoque. También se presenta el área que ocupa.

[15] Valor aproximado, se desprecia la contribución de la región IV

Se observa que los iones de 50 MeV son enfocados en un spot mínimo, y a medida que la energía disminuye, el radio de giro de las partículas dentro de los campos cuadrupolares se hace más chico, y la proyección sobre el plano de la muestra diverge.
La Ilustración 28 presenta la misma información, pero en función del espesor de tungsteno atravesado.

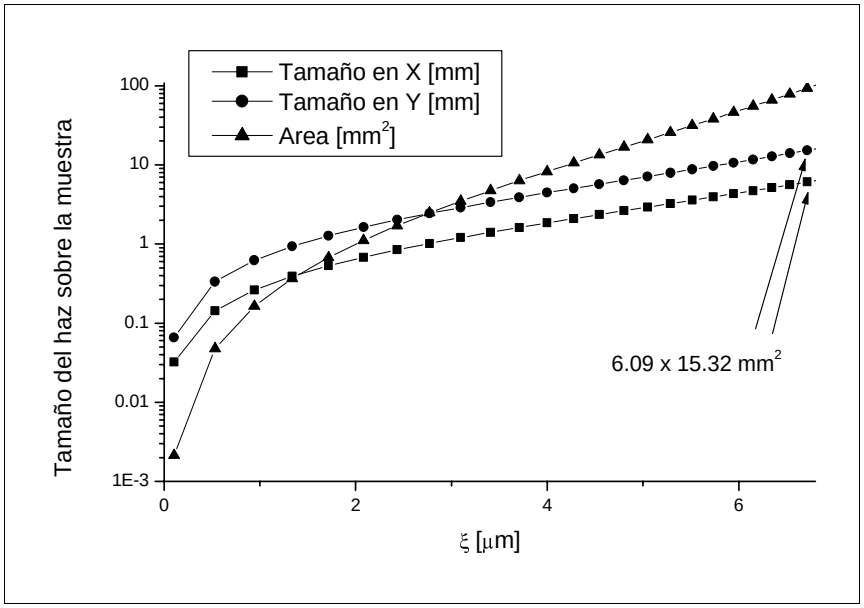


Ilustración 28: Tamaño en X y en Y de la imagen proyectada sobre el plano de la muestra por le lente, en función del espesor atravesado. También se presenta el área que ocupa.

Como se propuso en la Tabla 6, los iones que atraviesan más de 6.8 μm no contribuyen con el haz disperso, por lo que no son considerados en el gráfico.

Resultado de la simulación

El cálculo realizado, que apunta a una cota superior, indica que el haz disperso es como máximo 16 ppm del haz directo, y se distribuye dentro de un rectángulo de 6 x 15 mm^2 sobre el plano de la muestra.
Esto quiere decir que, por ejemplo, si la muestra está montada sobre un substrato a su vez soportado por un marquito de acero con un agujero de 10 mm de diámetro, siempre va a haber una parte del haz disperso que interactúe con el marquito. Esto contribuirá con un fondo de Fe en el espectro.
Hubiera sido conveniente que este cálculo indicase que el haz disperso es menor que 1 ppm, entonces teniendo en cuenta que el límite de detección de micropixe es de 1 ppm, la contribución del haz disperso estaría por debajo del límite detectable.
Sin embargo, hay que tener en cuenta varias suposiciones que se hicieron a lo largo de este cálculo. Lo primero que surgiría es decir que gran parte de los 16 ppm de haz disperso se concentran dentro del agujero en el soporte de acero.
Pero hay una suposición que se puede atacar de forma de asegurarse estar por debajo del ppm: la consideración de que todo el perímetro de la apertura objeto contribuye con haz disperso. Seguramente, gran parte de esta indeterminación no contribuye con haz disperso, y reduciendo en la Ecuación 64 este parámetro fácilmente se llega a disminuir el factor 16 veces.

La otra suposición bastante dudosa es la de asumir que la cantidad de haz disperso generada por cada ξ es constante. Esto sería lo equivalente a decir que el haz disperso proviene de la interacción del haz con un perfil triangular de 100 μm de alto y 11.4 μm de base.
Otra situación que puede ser considerada es decir que proviene de la interacción con una distribución que presenta un perfil redondeado. Desde ese punto de vista cabe considerar que si el haz atraviesa un perfil redondeado (por ejemplo el que se presenta en la Ilustración 14, aunque el caso no corresponda) la cantidad de haz que va a estar expuesto a atravesar ξ chicos es mucho menor a la que atravesaría ξ grandes, con lo que la suposición de una distribución uniforme se cae. Y esto iría en beneficio de disminuir el número de 16 ppm, ya que los ξ grandes contribuyen con haz disperso que más probablemente se desvía y no ingresa a la cámara.

Diseño instalación y puesta en marcha del microhaz.

Layout (croquis), criterio de diseño.

El componente principal del microhaz es el triplete de cuadrupolos magnéticos que actúa como lente enfocando la imagen de la apertura objeto sobre la muestra con una demagnificación del orden de 80 en el eje vertical y 25 en el eje horizontal. Estos valores de demagnificación se obtienen con una distancia lente-objeto de 6 m y una distancia lente-imagen de 18 cm. De esa forma, para lograr un tamaño del haz de 1 x 1 μm^2 sobre la muestra es necesario definir una apertura objeto de 25 x 80 μm^2. Es necesario limitar la emitancia del haz de iones que pasan por la lente magnética dentro de una región en donde sus aberraciones sean mínimas, lo que se logra con la apertura antiscattering, generalmente abierta a 1 x 1 mm^2.

Estabilidad mecánica y vibraciones.

Obtener un tamaño de haz de 1 x 1 μm^2 sobre la muestra implica formar la imagen de la apertura objeto sobre una determinada posición de la muestra y que permanezca en esa posición durante todo el tiempo que el análisis requiera. Por este motivo es necesario asegurar que la variación de la posición relativa entre la lente magnética y la muestra debe mantenerse muy por debajo del micrón, y la variación de la posición relativa entre la lente magnética y la apertura objeto, por debajo del tamaño de esta apertura.

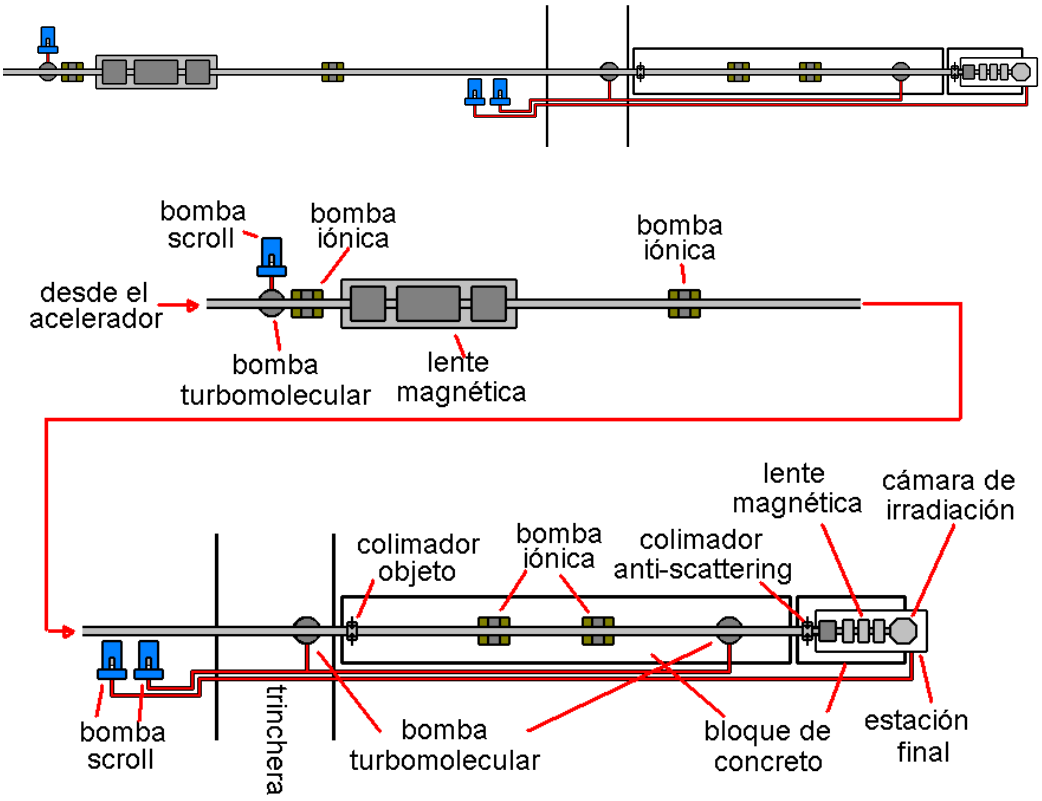


Ilustración 29: Distribución de los principales componentes de la línea. En la parte superior del gráfico se observa un esquema completo, luego está dividido en la sección original de la línea (común a todas las líneas del acelerador), y la sección específica del microhaz.

Desde el punto de vista de la estabilidad mecánica y la aislación de vibraciones, la línea del microhaz está dividida en tres secciones (ver Ilustración 29):

1. Una primer sección, construida siguiendo el mismo tipo de ensamblaje que las líneas estándar del acelerador, que por un lado se conecta al imán analizador del acelerador y la apertura que define la variación en energía admitida, y por otro, transporta el haz hasta la apertura objeto. En este tramo se encuentra la óptica estándar utilizada en el acelerador para enfocar el haz de dimensiones milimétricas sobre la muestra, compuesta por el triplete de cuadrupolos magnéticos, y dos conjuntos de deflectores electrostáticos. En el microhaz esta sección se utiliza para enfocar el haz de iones sobre la apertura objeto.
2. Una segunda sección, montada sobre un bloque de concreto de 8 metros de longitud aislado del piso de la sala experimental donde se encuentra la apertura objeto y el tramo de línea que la separa de la lente magnética de precisión. La estabilidad mecánica requerida en esta sección debe asegurar que el máximo corrimiento de la apertura objeto con respecto a la lente de la estación final sea menor que el tamaño de haz deseado sobre la muestra, multiplicado por la demagnificación de la lente. Por ejemplo, para asegurar una un tamaño de haz de 1 x 1 μm^2, el corrimiento de la apertura objeto con respecto a la lente debe estar muy por debajo de 80 μm en el eje vertical y 25 μm en el eje horizontal, suponiendo una demagnificación de 80 x 25. Aparte de la apertura objeto, el resto de la línea sólo transporta el haz, y los requerimientos de estabilidad son mínimos. Sólo se debe procurar no introducir vibraciones que puedan ser transmitidas hacia componentes críticos. Esta sección se acopla a la primera por medio de un bellow especialmente diseñado para atenuar las vibraciones producidas por el acelerador.
3. Una última parte, en donde se encuentra la estación final compuesta por la lente magnética de precisión, las bobinas de barrido, la apertura anti-scattering, y la cámara de irradiación con toda la instrumentación asociada. En esta sección la estabilidad mecánica es crítica: cualquier corrimiento relativo entre la lente magnética y la muestra se traduce directamente en un error en el posicionamiento del haz, y variaciones entre los cuadrupolos generan aberraciones en el funcionamiento de la lente. Según simulaciones (ver Tabla 7) una rotación de 10 mrad en el singlete de la lente produce un agrandamiento del tamaño del haz de 1 a 5 μm. Además, cualquier corrimiento de la muestra produce un error en la posición seleccionada para que el haz interactúe. La aislación de vibraciones de la estación final se observa en la ver Ilustración 29 el bloque de concreto de 6 metros de alto se encuentra dentro de un pozo más profundo que la primer napa de agua, desacoplado del piso de la sala experimental y del bloque de la segunda sección. El peso de este bloque es de aproximadamente 40 toneladas. Sobre este bloque se encuentran dos bloques de 60 cm de altura separados por piezas de plomo. La estación final se encuentra ensamblada sobre un chasis de aluminio que asegura la rigidez del conjunto. Este chasis descansa sobre una platina de aluminio vinculada al bloque superior. El propósito de esta platina, aparte de sostener la estación final, es servir de soporte para toda la instrumentación.

Para no introducir vibraciones, los sistemas de bombeo de las dos secciones más sensibles se basan en bombas turbo-moleculares de levitación magnética. El pre-vacío requerido por estas bombas se efectúa por medio de bombas scroll ubicadas en una zona alejada para no transmitir vibraciones. Para esto se aprovechó que el piso de la sala experimental se encuentra dividido por una trinchera. La primera sección de

microhaz, junto con las bombas scroll de la segunda y tercera sección quedó de un lado de esta trinchera, y el resto, las secciones más críticas, del otro lado. Para conectar las bombas scroll a las turbo-moleculares se utilizó caño de hidrobronze de 1.5 pulgadas de sección, con un recorrido aproximado de 10 m para el tramo más extenso. La impedancia introducida de esta forma se refleja en un aumento temporal de la presión en la salida de la bomba turbo-molecular en el momento de ser encendida, que no tiene ninguna consecuencia importante sobre el tiempo total de bombeo o la presión final.
Además de las bombas turbo-moleculares en la primer y segunda sección se encuentran 3 bombas combinadas iónicas y de sublimación, y una bomba iónica (bombas totalmente estáticas), que mantienen el vacío en niveles aceptables una vez que se llegó a régimen de trabajo (del orden de 10^{-6} mbar), permitiendo que se apague la bomba turbo-molecular de la primer sección y la turbo-molecular de levitación magnética de la segunda.

Interferencias electromagnéticas (EM).

Las interferencias EM repercuten en dos aspectos importantes del microhaz, en el guiado del haz, y en la instrumentación.
Debido a que el microhaz utiliza un guiado muy preciso de los iones, cualquier campo eléctrico o magnético puede apartar a los iones de su trayectoria y por lo tanto ser contraproducente para el funcionamiento. Sin embargo, los campos magnéticos o eléctricos estáticos, en general, no son un inconveniente para el funcionamiento del microhaz. Por ejemplo, el campo magnético terrestre no es un inconveniente porque como es estático, aunque produce una desviación del haz, esta puede ser compensada alineando los componentes del microhaz teniendo en cuenta esta desviación. Por este motivo, como se verá más adelante, primeramente se procede con un procedimiento óptico para la alineación del microhaz, y luego se alinean las lentes magnéticas utilizando el haz de iones. Por el contrario, un campo externo variable no puede ser compensado con correcciones estáticas, y por lo tanto debe ser anulado.
En lo que respecta al guiado del haz, en la práctica, sólo las interferencias de baja frecuencia son molestas, ya que para altas frecuencias son suficientes unos pocos milímetros de hierro (la pared del caño de la línea) para atenuarlas completamente.
En el diseño del microhaz se tomó extrema precaución al respecto, y como primer medida se optó por anular todas las fuentes de interferencias EM:

1. Todas las máquinas eléctricas (transformadores, motores, etc.) fueron apartadas de las regiones más críticas, y blindadas dentro de gabinetes de hierro.
2. Todas las líneas de potencia que transportan corriente alterna viajan dentro de bandejas cerradas de hierro, que a su vez se encuentran dentro de las trincheras subterráneas cubiertas con chapas de hierro.
3. La fuente de alimentación de los solenoides de las válvulas electro-neumáticas está perfectamente estabilizada, con valores de ripple despreciable. Esto tiene dos propósitos: primero, que los cables que van hacia los solenoides no generen campos EM, y segundo, que el campo magnético generado en los solenoides sea estático.

Las interferencias EM, en lo que respecta a la instrumentación, se manejan tomando las precauciones utilizadas generalmente, ya que la instrumentación utilizada en el microhaz es similar a la utilizada en el resto de las líneas experimentales.

Montaje del microhaz y alineación.

Alineación óptica.

Antes de comenzar el montaje del microhaz se colocó en posición el imán analizador del acelerador, y un teodolito al fondo de donde posteriormente se colocó la línea, apuntando al centro de la boca de salida del imán, de forma tal que el eje del teodolito determine la dirección de montaje.
Posteriormente, se montaron todos los componentes y caños del microhaz de a uno, comenzando por los que van más cerca del imán. A cada uno de estos componentes se los colocó y alineó con la ayuda de guías para el centrado colocadas en sus bridas. Por ejemplo, al montar un caño, se colocó en cada brida de este caño un centrador, y se regularon los sujetadores del caño para que las guías del centrador coincidiesen con el eje del teodolito.
Una vez cerrada la línea se posicionaron las pantallas fosforescentes cercanas al colimador objeto y al colimador anti-scattering, usando como referencia los correspondientes colimadores. Es decir, al centro la pantalla del colimador objeto se lo hizo coincidir con el punto que define el colimador al estar cerrado, y lo propio con la pantalla del colimador anti-scattering.

Alineación de las lentes magnéticas y la bobina de barrido.

La alineación de las lentes magnéticas se realiza utilizando el haz de iones, y una pantalla fosforescente colocada en la cámara de irradiación para controlar el haz.
Típicamente, para esta operación, se comienza trabajando con los colimadores objeto abiertos a 500 x 500 μm^2, y las aperturas anti-scattering en 1.5 x 1.5 mm^2. La corriente del haz inyectada en la línea se limita a 100 nA por razones de seguridad radiológica. Como pantalla fosforescente se utiliza un cubre-objeto estándar utilizado en los microscopios ópticos.

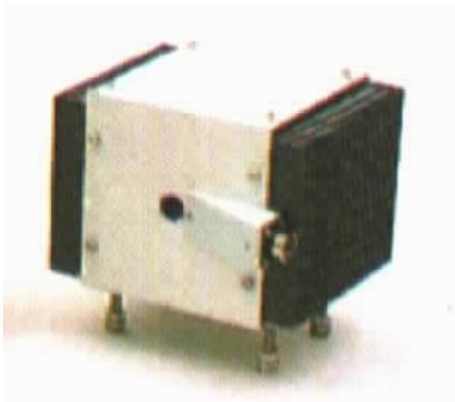


Ilustración 30: Bobina de barrido.

Inicialmente se alinean los cuadrupolos independientemente, y luego el conjunto completo. Las bobinas de barrido deben permanecer apagadas. A cada cuadrupolo se lo alimenta individualmente, dejando el resto sin corriente, y se enfoca el haz hasta lograr una línea vertical u horizontal, dependiendo del sentido de circulación de la corriente, como se observa en la Ilustración 31. Entonces, utilizando los micrómetros para la

regulación de traslación de la lente se la mueve hasta que la línea queda centrada en la pantalla. Ver Ilustración 33.

ATENCIÓN: NO DESCONECTAR LOS CABLES QUE ALIMENTAN A LOS CUADRUPOLOS MIENTRAS CIRCULA CORRIENTE!!!

Una vez logrado esto, se invierte la polaridad de la fuente de alimentación y se ajusta el eje ortogonal. Este procedimiento se realiza iterativamente con cada uno de los cuadrupolos hasta lograr una correcta alineación.

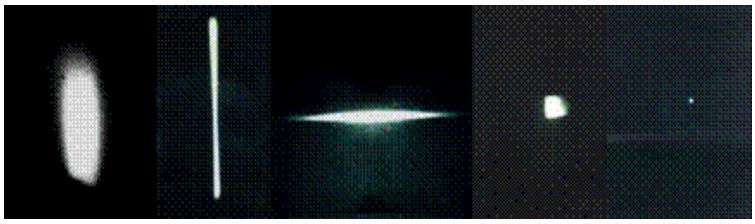


Ilustración 31: Distintas condiciones de enfoque. En los dos primeros cuadros se observa el enfoque del haz hasta lograr una línea vertical, utilizando sólo un cuadrupolo, lo mismo que en el cuadro central, pero invirtiendo la polaridad del cuadrupolo. Los dos últimos cuadros muestran el proceso de enfoque utilizando toda la lente, hasta llegar al mínimo foco.

A continuación se conectan todos los cuadrupolos en la configuración definitiva, (ver Ilustración 32) y se enfoca el haz sobre la pantalla.

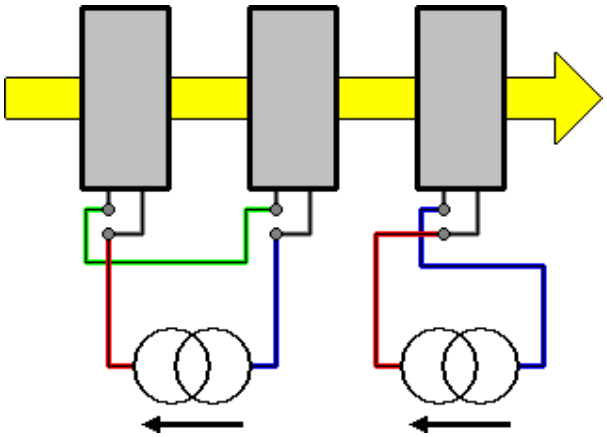


Ilustración 32: Conexión de las fuentes de corriente a los cuadrupolos. La flecha grande indica el sentido de circulación de los iones dentro de la lente.

En este momento es conveniente reducir las aperturas, dejando en los colimadores objeto algún valor que siga la relación 80:25 para obtener una imagen cuadrada sobre la pantalla. Lo ideal para esta operación sería colocar las aperturas para obtener un foco de 1 x 1 μm^2, sin embargo, con la limitación en la corriente inyectada en la línea, para esta

configuración, la fluorescencia en la pantalla es muy débil como para verla. Por lo tanto se debe llegar a alguna situación de compromiso.

Rotación del 3er cuadrupolo [μrad]	***Arco recorrido a 10 cm de radio [μm]***	***Tamaño del microhaz [μm]***
0	0	1
10	1	1.1
50	5	1.5
100	10 μm = 100 μrad x 10 cm	2

Tabla 7

La imagen del colimador objeto debe aparecer rectangular, sin embargo con una mínima desalineación de rotación relativa entre los cuadrupolos, aparece una figura romboidal. Este problema se corrige ajustando la rotación de un sólo cuadrupolo.

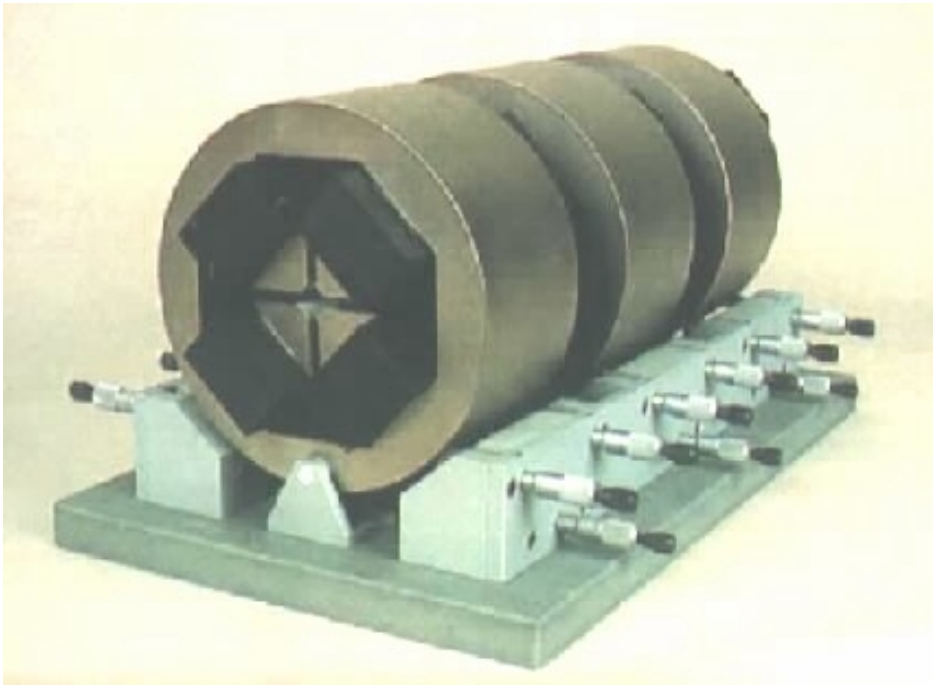


Ilustración 33: Platina para el ajuste fino de los cuadrupolos

Para la alineación de las bobinas de barrido, se enfoca el haz sobre la pantalla fosforescente y se lo hace barrer siguiendo la figura de una cruz inscripta dentro de un cuadrado de aproximadamente 1 mm. Ajustando los dos tornillos micrométricos de las bobinas de barrido se debe conseguir que ambos segmentos de la cruz queden a 90 grados. Para este procedimiento la configuración de los colimadores no es crítica. Se puede utilizar aperturas grandes que permitan visualizar claramente el haz sobre la pantalla.

La calibración de la ganancia individual de cada una de las bobinas de barrido (horizontal y vertical), se realiza reemplazando la pantalla fosforescente por una grilla

de las utilizadas en microscopía electrónica. En general una grilla de 400 mesh[16] es suficiente. Colocando las aperturas en la configuración requerida para un foco de 1 x 1 μm^2 se barre la grilla y utilizando el sistema de adquisición se obtiene el mapa de distribución del cobre. Usando esta imagen como referencia, se ajustan las ganancias individuales para obtener una imagen con la relación de aspecto correcta. En las siguientes ilustraciones se ejemplifica este procedimiento:

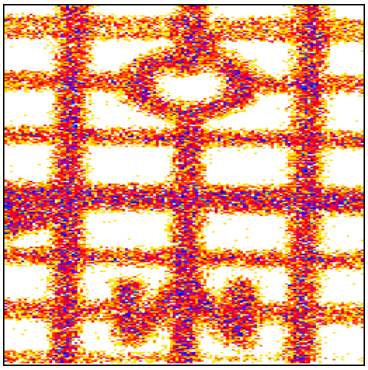


Ilustración 34: Demasiada ganancia en el deflector horizontal. Se ven 3 líneas verticales, y 7 horizontales.

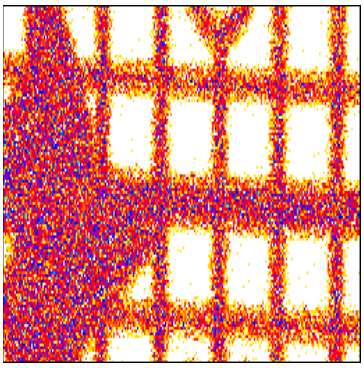


Ilustración 35: Demasiada ganancia en el deflector vertical.

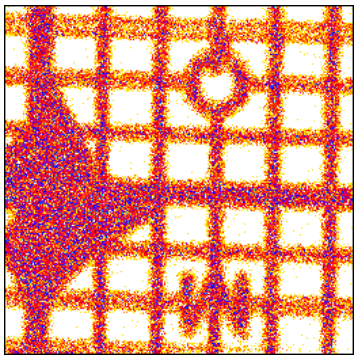


Ilustración 36: Relación de aspecto correcta entre el eje vertical y el horizontal. Para verificarlo se debe comprobar que la cantidad de píxeles entre dos líneas consecutivas sea la misma en ambos ejes.

[16] 400 mesh son 400 líneas por pulgada, es decir, una línea cada 64 μm.

Al mismo tiempo se puede calibrar en unidades de μm la imagen obtenida. En la Ilustración 37 se observa la imagen obtenida de una reja de 400 mesh en la que la relación de aspecto parece estar calibrada apropiadamente, pero la falta de ortogonalidad entre las barras evidencia una desalineación rotacional en las bobinas de barrido.

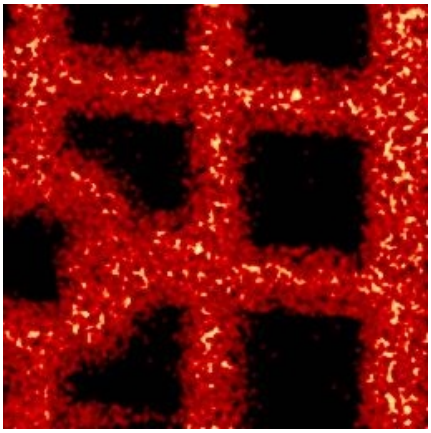


Ilustración 37: Reja de 400 mesh.

En el procedimiento final para lograr una alineación óptima, se debe estudiar el perfil de las barras de cobre de la grilla obtenido al barrer la grilla. En general, el punto más crítico es la desalineación rotacional entre los cuadrupolos. Este fenómeno es fácil de observar, ya que el perfil de las barras de la grilla aparece asimétrico. Por ejemplo, en el siguiente gráfico del perfil de rayos X obtenidos al barrer una barra de la reja de Cu en el sentido vertical, se observa que el flanco de subida está un poco más inclinado que el de bajada, lo que evidencia una pequeña desalineación rotaciónal en alguno de los cuadrupolos.

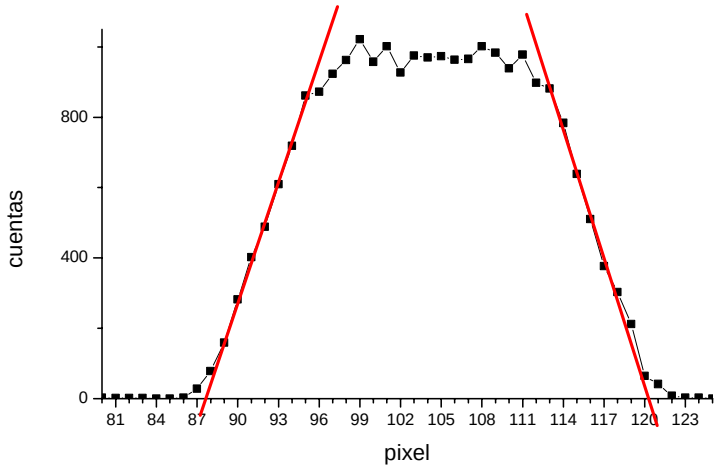


Ilustración 38: Efecto de la alinealidad de rotación de un cuadrupolo reflejado como una pequeña inclinación en el perfil de una barra de la reja de cobre.

Iterativamente se pueden ajustar los tornillos micrométricos de la platina de los cuadrupolos, y verificar con el mapa de cobre, hasta obtener un resultado aceptable.

Sistema de vacío

Descripción y criterios de diseño.

Desde el punto de vista del vacío, el microhaz se divide en dos partes. La cámara de irradiación, en la que se requiere una velocidad de bombeo relativamente alta, para no demorar mucho tiempo cuando se ventea para cambiar las muestras, y el resto de la línea que típicamente permanece con un vacío estático.

El vacío de la cámara de irradiación se logra por medio de una bomba turbomolecular de levitación magnética que aparte tiene incorporada una etapa de prevacío (turbo-drag) que le permite trabajar con una bomba primaria mecánica de tipo scroll. La bomba scroll utilizada para tal fin es de 300 l/m, y tiene una presión final del orden de 2.5e-2 mbar. La razón para utilizar bombas scroll es que son bombas secas, es decir, no utilizan aceite, lo que permite obtener un vacío sin vapores de aceites, pero en general, tienen una presión final mucho más alta que las que sí utilizan aceite.

La bomba turbomolecular de levitación magnética, de 500 l/s, asegura un muy bajo nivel de vibraciones. Adicionalmente, el acoplamiento de esta bomba a la cámara de irradiación, se realizó utilizando un bellow especialmente provisto por el fabricante para minimizar la transmisión de vibraciones.

Para ventear la cámara de irradiación se inyecta nitrógeno gaseoso por medio de una válvula aguja. Durante las pruebas iniciales, se implementó el ciclo de venteo con nitrógeno hasta presión atmosférica partiendo de una presión inferior a 10^{-5} mbar, y posteriormente se reinició el bombeo hasta alcanzar la misma presión, El tiempo insumido es de menos de 15 minutos sin realizar venteos ni evacuaciones bruscas.

El resto de la línea está diseñado para permanecer siempre en vacío. Debido a su extensión, está dividida en dos secciones estancas de aproximadamente 10 metros cada una. Cerca de la unión de ambas secciones se encuentra una estación de bombeo compuesta por una bomba turbomolecular de 1000 l/s más una bomba scroll que se utiliza cuando es necesario ventear la línea para realizar algún mantenimiento. Bajo estas circunstancias, típicamente se demora varias horas hasta que se llega a un vacío del orden de 1e-6 mbar. En ese momento se inicia el bombeo con las bombas estáticas.

La primer sección, que se acopla con el acelerador, cuenta con una bomba iónica de 50 l/s y una bomba combinada iónica/sublimación de 300 l/s, y la otra sección con dos bombas combinadas más. Estas bombas mantienen el vacío en niveles estáticos que llega a valores de $3x10^{-8}$ mbar en algunos puntos.

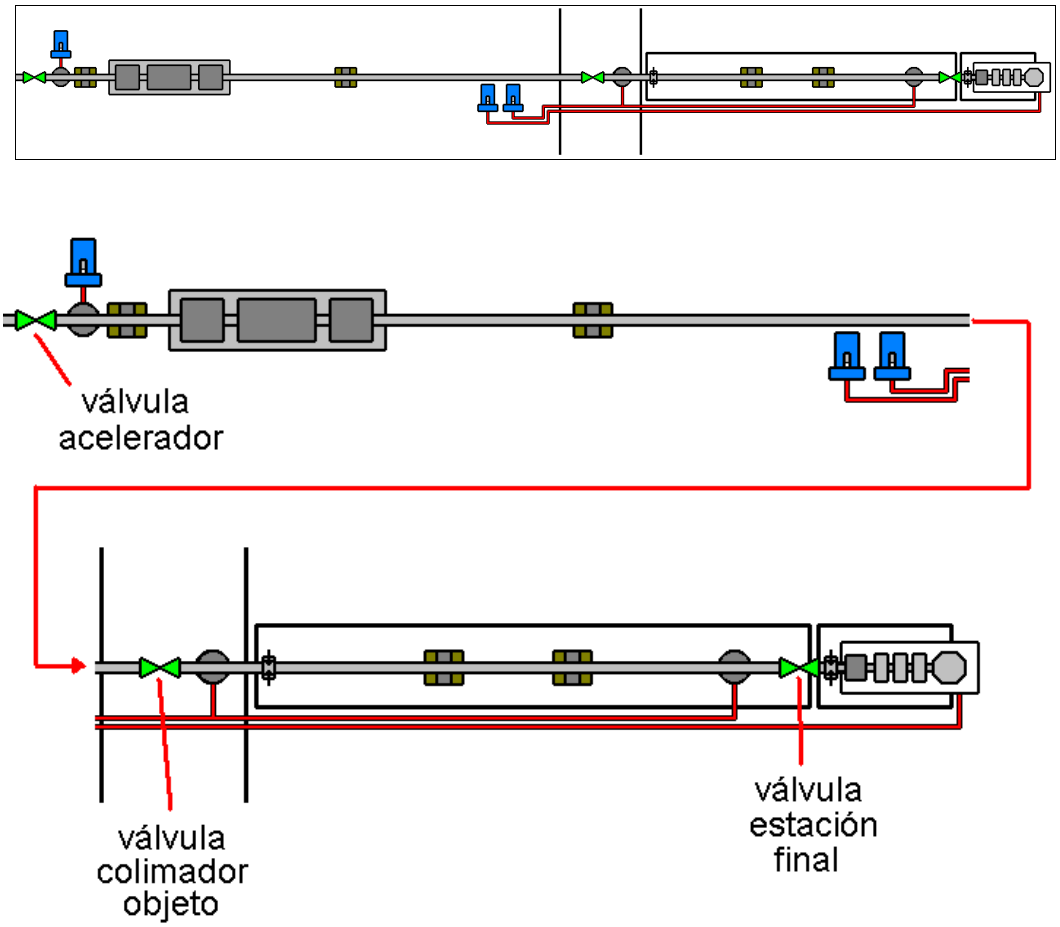


Ilustración 39: Posición de las tres válvulas que dividen la línea en distintos compartimientos estancos.

Adicionalmente, cerca de la apertura anti-scattering (lugar en el que se encuentra la válvula plato que desacopla la cámara de irradiación del resto de la línea) se encuentra una tercer estación de bombeo compuesta por una turbomolecular de levitación magnética de 300 l/s con una scroll (que comparte con la bomba turbomolecular de 1000 l/s). Al ventear la cámara de irradiación, también se ventea el tubo que transporta el haz dentro de las lentes magnéticas de precisión, y el recinto que contiene estos colimadores, ya que no es posible colocar una válvula que aísle únicamente la cámara. Por lo tanto, este sistema de bombeo provee una capacidad de bombeo extra cuando se abre la válvula plato que separa la cámara de irradiación luego de un ciclo de venteo de la misma. Cabe acotar que el tubo que transporta el haz dentro de las lentes magnéticas de precisión tiene un diámetro interno de 4 mm, por lo que presenta una impedancia tan grande, que el sistema de bombeo de la cámara de irradiación no tiene efecto del otro lado de este tubo.

Una vez instalado el microhaz se observó que la presión de vacío en el acelerador era demasiado alta como para la operación con las bombas iónicas cuando se abría la válvula que conecta con el acelerador. Por eso, se instaló una bomba turbomolecular con una scroll de 600 l/s para apoyo cerca del punto de conexión del acelerador.

Para su funcionamiento, las bombas iónicas utilizan campos magnéticos estáticos de mucha intensidad. Algo de este campo magnético se “escapa” por la boca de la bomba. En general, estos campos producen desviaciones muy pequeñas en el haz, pero en la zona de la línea en donde se conforma el microhaz (después de que el haz atraviesa la apertura objeto) pueden desviar considerablemente el haz. Por lo tanto se optó por separar las bombas de la trayectoria del haz, y además rotarlas 90 grados.

Un sistema de refrigeración a circuito cerrado fue especialmente instalado para las bombas turbomoleculares.

Sistema de control.

La línea del microhaz cuenta con más de 30 componentes necesarios para producir y monitorear el nivel de vacío, lo que motivó la implementación de un sistema de control que le provea al usuario una consola desde donde verificar y controlar a todos estos dispositivos al mismo tiempo. El sistema desarrollado para tal fin cumple con estos requerimientos, y además permite la operación vía Internet a través de una pagina HTML. En la Ilustración 40 se presenta el mímico presentado en esa página al usuario, desde donde controla los componentes de vacío.

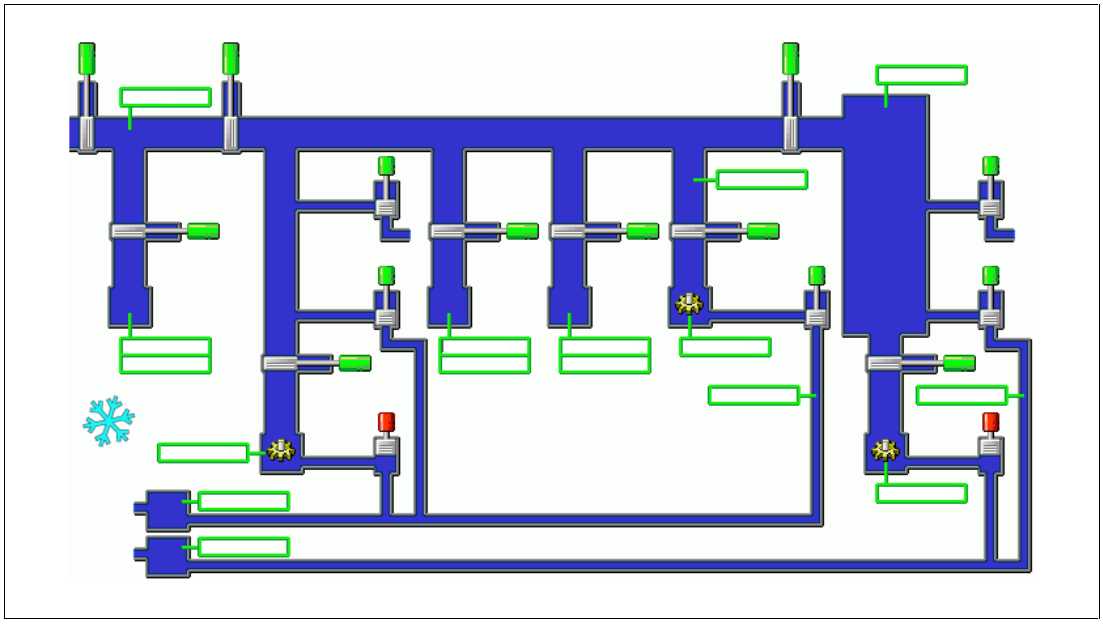
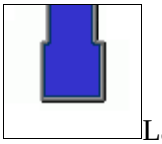


Ilustración 40: Interfaz gráfica del sistema de control de vacío.

Dispositivos controlados.

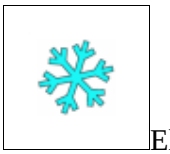
A continuación se enumeran los dispositivos controlados por el sistema de vacío, y se describe brevemente su operación. Para más información, referirse a los manuales de cada equipo en particular.

Bombas iónicas

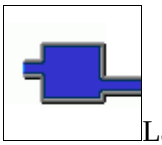


Las bombas iónicas[33] vienen asociadas a sus controladores, los IonVac. A una de las bombas iónicas la controla un IonVac con una sola salida, mientras que a las otras dos iónicas las controla un IonVac con 2 salidas. Como es normal en bombas iónicas, la fuente puede funcionar en modo “start” o en modo “run”. En modo “run”, la potencia máxima que se le entrega a la bomba está limitada un poco por arriba de la requerida en funcionamiento estándar, mientras que en modo “start” es posible entregarle mucha más potencia, para el arranque de la bomba. Por lo tanto, la lógica del sistema de control considera que la condición de arranque de la bomba requiere que sea realizada en forma local, permitiendo únicamente monitorear el estado de las bombas a través del sistema de control.

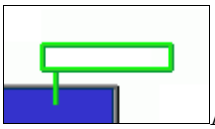
Sistema de refrigeración

 El sistema de refrigeración[29][30] tiene sólo dos parámetros de control conectados al sistema vía la unidad de control de potencia (UCPS). Por un lado es posible conmutar su alimentación, y es posible verificar la circulación de agua con un detector de flujo de agua conectado a la salida de la bomba.

Bombas scroll

 La alimentación de las bombas scroll se conmuta también en la unidad de control de potencia. El sistema de control sólo permite encender y apagar las bombas, mientras que para verificar su correcto funcionamiento se utilizan los cabezales de vacío que sensan directamente[17] a la salida de la bomba.

Sensores de vacío

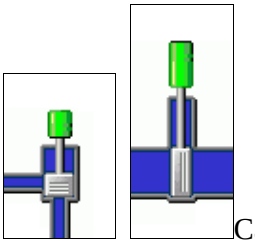
 A lo largo de la línea hay dos tipos de sensores[35][36], los cabezales Pirani y de rango completo, interfaceados a través de dos controladores Maxigauge de Varian, y la indicación de presión que proveen las bombas iónicas por medio de sus controladores. Sin embargo, el sistema de control presenta al usuario la información filtrada de forma tal que el usuario ignora la fuente de la medición. En el caso de que un sensor este fuera de rango, el sistema lo indica.

Bombas turbomoleculares

Cada bomba turbomolecular[28][31][32] se controla a través de su propio controlador, el TCM1601 de Pfeiffer. El sistema de control desde la interfaz para los usuarios sólo permite encender y apagar la bomba, e indica su velocidad de rotación, sin embargo, registra también los códigos de falla que eventualmente la bomba puede entregar. Al presentarse una falla, el controlador entra en modo falla, deteniendo la bomba y no permitiendo arrancarla nuevamente hasta que el modo falla sea reseteado. El sistema de control no realiza esta operación, el usuario debe resetear la falla desde el panel frontal del TCM1601.

[17] En este contexto, directamente significa que no hay ninguna válvula entre la boca de la bomba y el cabezal.

Válvulas electroneumáticas en ángulo recto y válvulas plato.



Cada válvula electroneumática se conecta al sistema de control a través de una unidad de control de válvula mediante protocolo serie (UCVS). Por medio de esta, el sistema de control puede activar o desactivar el solenoide, y leer los sensores de fin de carrera, que indican si la válvula está abierta, cerrada, o en una posición intermedia.

Topología del sistema de control.

Todos los dispositivos a controlar se encuentran comunicados con la computadora de control mediante una red propietaria basada en la norma RS-485[18]. Esta computadora se encuentra en la sala experimental, cerca de la línea del microhaz (experimental).

El protocolo de comunicaciones se basa en una topología maestro-esclavo. Esto significa que toda comunicación es originada únicamente por la PC de control (maestro) dirigida hacia un único dispositivo (esclavo), el cual sólo puede generar tráfico en la red como respuesta a un requerimiento del maestro.

El cuello de botella del sistema de control es la línea serie, por lo tanto la computadora de control ejecuta un programa administrador de tareas propietario que administra una cola de acceso a la interfaz serie.

En la computadora de control se ejecuta un proceso por lotes indefinido que continuamente releva el estado de todos los dispositivos, enviando requerimientos de solicitud de información a la cola. Toda esta información se almacena en un conjunto de archivos de registro. Al mismo tiempo, cualquier requerimiento generado asincrónicamente por el usuario (por ejemplo, abrir una válvula), se introduce en la misma cola. Por último, en función de la información entregada por el proceso por lotes, se implementó un proceso supervisor autónomo, que ante ciertas anomalías envía a la cola requerimientos (con prioridad de ejecución inmediata) que coloca al sistema en estado de "falla segura".

En esta computadora corre un servidor de web (Apache[19]) con el motor CGI[20] habilitado con lo que provee una interfaz amigable para los usuarios (GUI) por medio de una página HTML con un APPLET JAVA[21] incrustado que, vía el motor CGI, introduce comandos en la cola de la interfaz serie.

---

[18] RS485: Protocolo de la EIA para comunicaciones series. Permite que varios dispositivos distribuidos en una gran área sean conectados a un único. http://www.tiaonline.org/standards/

[19] Apache: servidor web de distribución libre. Fue desarrollado en 1995 y ha llegado a ser el más usado de Internet.

[20] CGI: (Common Gateway Interface), interfaz común de salida, especificación para transferencia de información entre un servidor WWW y un programa CGI. La mayoría de las páginas HTML que contienen formularios, usan un programa CGI[7].

[21] Applet: un componente u objeto (precisamente clase) que se incorpora en una página web para que se cargue y se ejecute por una aplicación Java ya en ejecución, como los

Cola de acceso a la interfaz serie.

Cada uno de los controladores conectados a la red RS-485 se identifica por una dirección única dentro de la red, el 485ID. Este número de identificación resuelve el problema de ruteo que se presenta por tener varios controladores sobre un mismo canal de comunicación, pero una de estas direcciones puede involucrar a varios dispositivos. Por ejemplo, uno de los controladores de las bombas iónicas responde a una única dirección dentro de la red RS-485, el 485ID 30, pero controla 2 bombas. Por lo tanto todos los dispositivos controlados por el sistema de control se identifican con un número único, el dID (*device* ID). El controlador citado en el ejemplo previo se individualiza con el dID 60, y las bombas que él controla con el dID 61 y el dID 62, y a la hora de interactuar con las bombas o con el controlador, los comandos que se envíen por la línea RS-485 deben dirigirse a la dirección 485ID 30.

Como cada uno de los controladores tiene un protocolo distinto de comunicación[22] y un conjunto de comandos específico. Existe un conjunto de ejecutables que interactúan directamente con los dispositivos conectados en la red RS-485 vía el puerto serie de la PC de control. Entre ellos se encuentran:

"if_fc.c"	Mueve el posicionador de la copa de Faraday y el detector de barrera de superficie de la cámara de irradiación.
"if_mg.c"	Envía comandos y lee el estado de los controladores de los cabezales de vacío.
"if_ión.c"	Lee el estado de los controladores de las bombas iónicas Varian[33].
"if_tcm.c"	Envía comandos y lee el estado de los controladores de las bombas turbomoleculares Pfeiffer[31].
"if_ucps.c"	Envía comandos y lee el estado de las unidades de control de las válvulas.
"if_ucvs.c"	Envía comandos y lee el estado de la unidad de control de potencia.

Tabla 8

En el apéndice "Descripción de los programas específicos que interactúan con los controladores" se detallan estos programas. El sistema de control posee un archivo de configuración a modo de base de datos que contiene para cada dID (es decir, dispositivo controlable) la dirección de la red RS-485 en la que se encuentra, a que programa está asociado (if_fc, if_mg, etc...), un flag de activación, y, para los dispositivos que comparten controladores con otros dispositivos, un sub-direccionamiento.

Tener un conjunto de programas que utilizan un mismo recurso, el puerto serie, desencadena un problema conocido como el problema de la sección crítica. Por ejemplo, si el programa if_mg está comunicándose con el controlador de los cabezales de vacío, está ejecutando una sección de código crítica. Ningún otro proceso (o instancia del mismo) puede ejecutar un segmento de código que utilice el puerto serie en forma concurrente. Por lo tanto, la ejecución de secciones críticas es mutuamente excluyente en el tiempo.

últimos browser web que implementan la máquina virtual Java, que sería el interprete del componente[9].

[22] El termino "protocolo de comunicación" en este párrafo se refiere al handshake. No olvidar que la norma RS-485 sólo especifica niveles lógicos y, vagamente, timing.

Este problema se soluciona utilizando un planificador de tareas por prioridad que sólo permite la ejecución de uno de estos procesos a la vez, el ejecutable “dispacher”. Cada proceso que necesita acceder al puerto serie tiene asociado una prioridad. Cuando el puerto serie está disponible, el planificador de tareas ejecuta el proceso con mayor prioridad. Los procesos con igual prioridad son ejecutados según el orden de llegada (planificación FCFS – el primero en llegar, primero en ser servido). De esta forma se asegura la “exclusión mutua” de los procesos que deben acceder a un recurso crítico, el canal de comunicaciones.

¿Porque un planificador por prioridad?. La respuesta implica decir que el planificador es un “planificador por prioridad sin desalojo”. Sin desalojo significa que el sistema no puede detener (o interrumpir) la ejecución del proceso una vez iniciada. Esto no es apropiado ya que puede ocurrir la siguiente situación: se inicia la ejecución del programa if_mg, que tiene una baja prioridad, pero no hay ningún otro proceso en la tabla de procesos pendientes. El mismo envía por la línea serie el comando requiriendo el valor de presión que mide el cabezal 1. Suponiendo que existiese la posibilidad de desalojar procesos, y que en ese momento se desalojase al proceso para dar lugar a la ejecución del programa if_ucvs, que tiene alta prioridad, y se envía por la línea el comando para averiguar el estado de la válvula 9. Es probable que el controlador de los cabezales de vacío responda antes que el controlador de la válvula, lo que va a desencadenar una mala interpretación de la respuesta por parte del if_ucvs entendiendo que proviene del controlador de la válvula[23].

Sin embargo, la prioridad es necesaria, porque la cola de procesos pendientes puede tener 12 requerimientos de información referente al estado de las presiones que miden los cabezales en el momento que llega un requerimiento de apagar una bomba turbomolecular urgentemente.

El programa “dispacher”, a grandes rasgos tiene dos funciones: 1) instala el planificador de la cola de la interfaz serie, y 2) agrega procesos en la cola.
La primera vez que se lo ejecuta, o si detecta que el planificador no está corriendo, instala e inicializa el planificador, que queda corriendo en *background.*
Las subsiguientes ejecuciones de este programa ejecutan como clientes que sólo agregan procesos a la cola, y terminan su ejecución inmediatamente a menos que el proceso a agregar en la cola deba correr sincrónicamente, condición en la cual terminará su ejecución al finalizar la ejecución del proceso insertado en la cola.

Sistema de bitácoras

Los programas que interactúan con los controladores (if_fc, if_mg, etc...) no proveen información a través de la salida estándar, sino que generan entradas en el sistema de bitácoras. El mismo consta de 2 archivos por cada dispositivo. La válvula con dID 19 posee el archivo “19.last” y el archivo “19.log”. Cada vez que se ejecuta una operación, en el archivo con extensión “log” se agrega el resultado, y el de extensión “last” se borra y se guarda el mismo resultado. Como el sistema de control corre bajo el sistema

[23] En general, las respuestas de los controladores no incluyen información acerca del controlador que origina el mensaje.

operativo linux[24], se emplea la utilidad “logrotate” para administrar el backup y tamaño de los archivos “.log”.

Scripts de interfaz para el usuario.

En principio, contando con los programas específicos que interactúan con los controladores (if_fc, if_mg, etc...) y el planificador de tareas, es posible operar todo el sistema. Sin embargo la operación puede resultar muy confusa y existe una gran probabilidad de cometer errores. Para simplificar la operación se crearon una serie de programas que pueden ser llamados directamente o a través del servidor HTML utilizando el módulo CGI.

Un primer programa que apunta a ser la interfaz del planificador de tareas es el “operate”. Provee una primera interfaz para interactuar con todos los dispositivos instalados, excepto el posicionador de la Faraday cup. Si se desea encender el cabezal de vacío con dID 44, se ejecuta el script con la línea de comando “operate 44 -o”, con lo cual el script encontrará en la base de datos que debe enviar al planificador de tareas el programa “if_mg” con el switch -o.
Además del switch -o, que indica que se debe abrir, en el caso de una válvula, o encender, en el caso de un cabezal de vacío o una bomba, o activar, en el caso de un relay de la unidad de control de potencia, el script “operate” permite cerrar/apagar/desactivar, mediante el switch -c, y requerir información, usando -i.

El script “ref_mg” envía continuamente requerimientos de información a todos los dispositivos del sistema para mantener la bitácora actualizada. Esto resulta en una actualización cada 2 segundos de todas las presiones que miden los cabezales de vacío, las velocidades de rotación de las bombas turbo-moleculares, y el estado de las bombas iónicas, y cada 30 segundos, el estado de todas las válvulas. No obstante, si, aparte de este script, se realiza alguna operación sobre algún dispositivo, su estado se actualiza al concluir tal operación.

Operación desde Internet.

Sobre la capa definida por los scripts de interfaz con el usuario, se encuentra una capa que permite el acceso a estas funciones desde Internet. Si el usuario desde Internet invoca a la página http://tandar110/cgi-bin/info.cgi obtiene la siguiente información:

[24] Linux: implementación gratuita de UNIX, que puede utilizarse con PC y Macintosh. http://www.linux.org/

```
#9;C;163;;;
#10;C;125;;;
#11;C;34;;;
#12;C;432;;;
#13;C;277;;;
#14;I;3;;;
#15;C;34;;;
#16;C;3;;;
#17;C;370;;;
#18;C;94;;;
#19;C;64;;;
#20;C;60;;;
#21;C;247;;;
#22;A;34;;;
#23;I;339;;;
#24;C;124;;;
#31;I;412684;7.020E-2;;
#32;I;412695;4.275E-2;;
#33;I;412695;2.299E-1;;
#34;I;412695;2.399E+1;;
#35;E;0;;;
#36;E;0;;;
#41;I;412685;2.529E-4;;
#42;U;412687;;;
#43;E;0;;;
#44;I;412687;7.200E-2;;
#45;I;412687;5.926E+1;;
#46;E;0;;;
#50;E;5;;;
#51;E;19;;;
#61;E;2;;;
#62;E;29;;;
#66;;1075195191;;;
#70;I;53820703;;;
```

Esta información es el resumen del estado de todos los dispositivos controlados por el sistema de control, ordenada como una lista de variables por cada uno, por cada línea. La información de cada una de estas variables debe ser interpretada en función del dispositivo al cual se refiera, por ejemplo, la línea que comienza con #24 es la información de una válvula electroneumática. En esta, la letra C indica que está cerrada, y el número 124 indica que la información sobre esta válvula tenía fue tomada 124 segundos antes de enviar esta página.
Si al momento de invocar esta página web, se agrega un conjunto de "strings de búsqueda"[25], se le puede ordenar al sistema de control que realice operaciones sobre un determinado dispositivo.

[25] String de búsqueda: es el nombre que recibe la información que se envía después de la dirección de la pagina (que comienza con el carácter '?'), cuando se solicita en el navegador una URL. por ejemplo, cuando se hace una búsqueda de la palabra

Esta nueva capa, no está concebida para que la use un usuario. Cuando el usuario invoca a la página http://tandar110 se accede a la interfaz gráfica de control, que se observa en la Ilustración 40. El mímico que se muestra en esa página, es realmente la cara visible de un applet java que continuamente realiza consultas a la dirección http://tandar110/cgi-bin/info.cgi, y presenta la información en un formato más amigable. Además, este applet captura el clic del mouse, y presenta un menú de opciones que básicamente permite al usuario enviar comandos de control al sistema, como se muestra en la Ilustración 41.

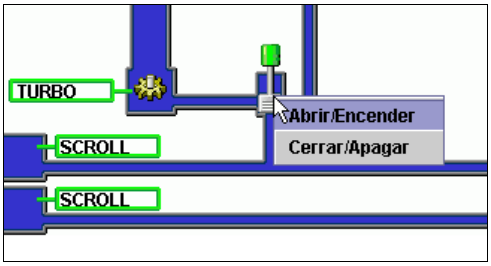


Ilustración 41: Menú con las opciones de abrir o cerrar una válvula.

Por razones obvias, aspectos referidos a seguridad no se discutirán en este documento.

"microhaz" utilizando el google, se puede observar en el navegador que uno está realmente solicitando la página:
http://www.google.com/search?q=microhaz&sourceid=opera&num=0&ie=utf-8&oe=utf-8.
todo lo que sigue al signo de pregunta, y este inclusive, se llama string de búsqueda.

Instrumentación.

Cámara de irradiación.

Actualmente la cámara de irradiación tiene instalada la instrumentación necesaria para realizar experimentos de PIXE y STIM:

1. Microscopio con zoom de 100x.
2. Detector de Si(Li) de 30 mm2 de área, sin ventana.
3. Detector de Si(Li) de 80 mm2 de área, con ventana de 1 mil de berilio.
4. Intercambiador de atenuadores
5. Detector de barrera de superficie
6. FC
7. Escalera portamuestra comandada por un microposicionador XYZ.

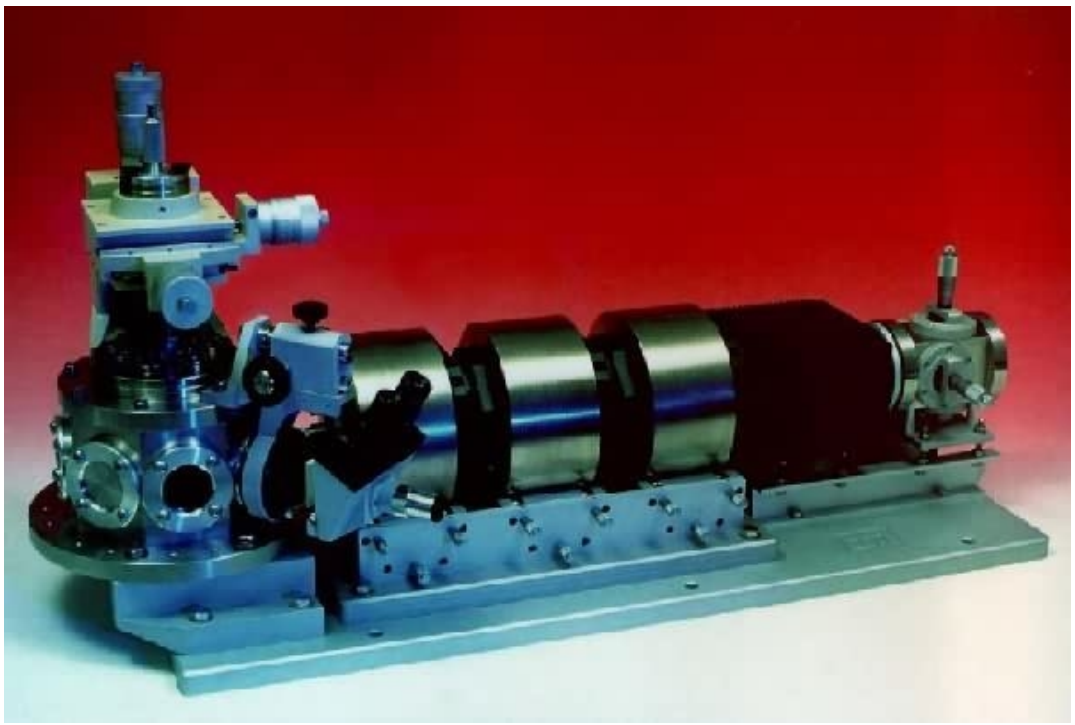


Ilustración 42: Estación final del microhaz. Se observa, de derecha a izquierda, los colimadores antiscattering, la bobina de barrido, los tres cuadrupolos, y finalmente la cámara de irradiación con el microscopio y el micromanipulador para posicionar la muestra.

Para usar la configuración de PIXE (Ilustración 43) se coloca la copa de Faraday para medir la carga que atraviesa la muestra, información útil a la hora de cuantificar las distintas concentraciones. Entonces, el haz es enfocado sobre la muestra, la cual barre siguiendo un patrón preseleccionado. Los rayos X generados por la interacción entre el haz de iones y la muestra son colectados por los detectores de rayos X y almacenados para su posterior análisis.

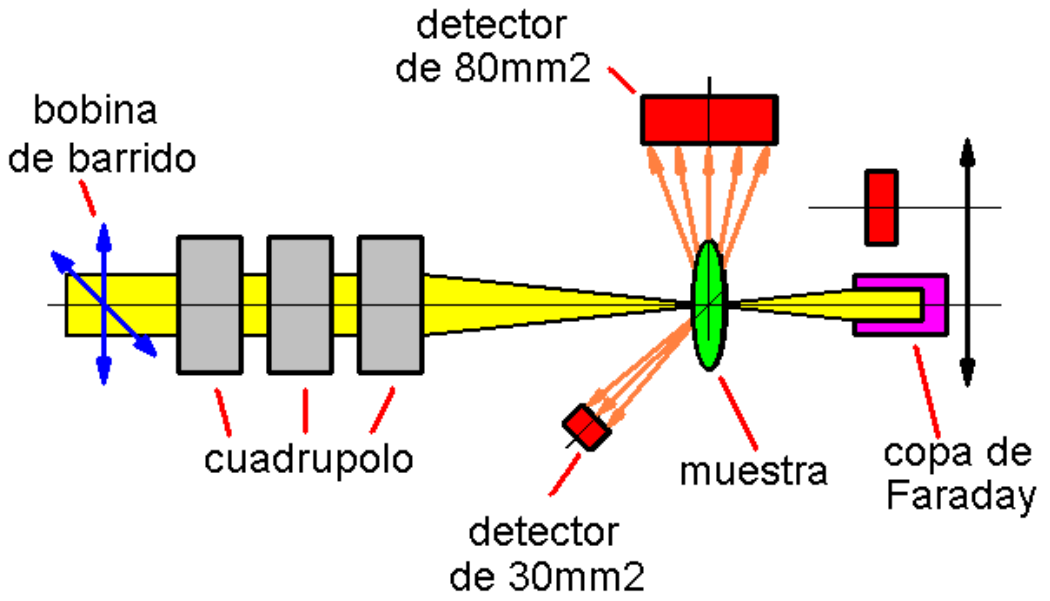


Ilustración 43: Arreglo experimental de la etapa final de la línea del microhaz con la copa de Faraday en posición para realizar un experimento de PIXE.

En la configuración de STIM (Ilustración 44), en cambio, no se utiliza la copa de Faraday. En su lugar, un detector de barrera de superficie hace espectroscopia sobre los iones transmitidos a través de la muestra. En STIM se utilizan corrientes tan bajas (del orden de pocos cientos de partículas por segundo) que no tiene sentido acumular la información de los rayos X generados para realizar al mismo tiempo PIXE. La sección eficaz de producción de rayos X, sumada a la eficiencia de los detectores de rayos X es varios ordenes de magnitud inferior a la unidad. En STIM, cada ión que llega al detector, trae información de la densidad de la muestra, y la eficiencia de colección es uno.

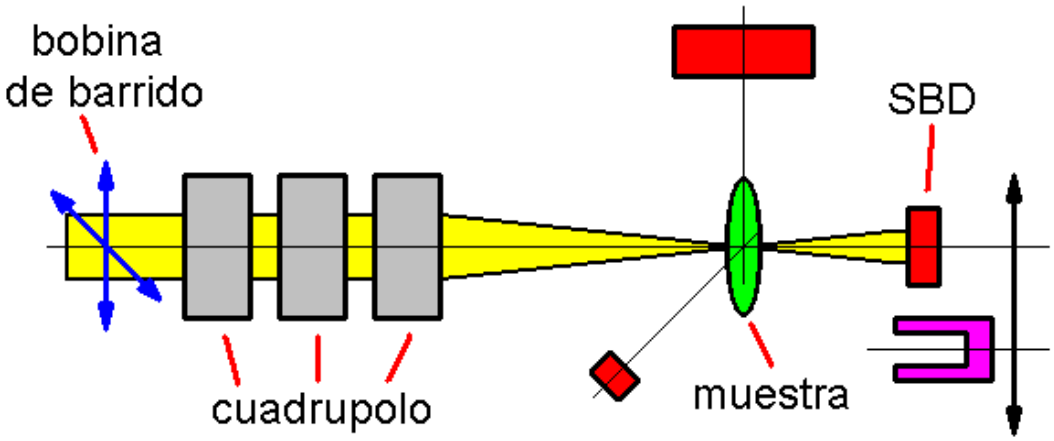


Ilustración 44: Arreglo experimental de la etapa final de la línea del microhaz con el detector de barrera de superficie en posición para realizar un experimento de STIM.

Detectores de rayos X.

El principal detector utilizado para los experimentos de PIXE es un Si(Li) conectado a un procesador digital que admite un contaje de hasta 30000 cuentas por segundo.
Inicialmente se usó el detector de 30 mm^2 con una ventana super ATW[26], sin embargo luego, gracias a la incorporación de una cámara exclusa que permite mantener el detector en vacío aunque se ventee la cámara de irradiación, se lo utilizó sin ninguna ventana. Este tipo de ventana permite medir rayos X con energías a partir de la línea K del Be, esto es 80 eV.
Ya sea que se utiliza el detector con la ventana ATW, o sin ventana, es necesario colocarle un filtro de electrones que evite que los electrones emitidos de la muestra por la interacción con el haz de iones alcancen al cristal. La desventaja de este filtro, es que aleja al detector de la muestra. La mínima distancia a la que se puede acercar al detector sin el filtro es del orden de 20 mm, con lo que cubre un 0.006 de los 4π. Con el filtro de electrones, que obliga a alejarlo aproximadamente 10 mm más, esta eficiencia cae 2.25 veces.
Una alternativa, utilizada en este trabajo, fue reemplazar el filtro de electrones por un absorbente de Kapton de 70 μm de espesor, que aparte de detener a los electrones, corta toda la parte del espectro de bajas energías que no interesa medir.

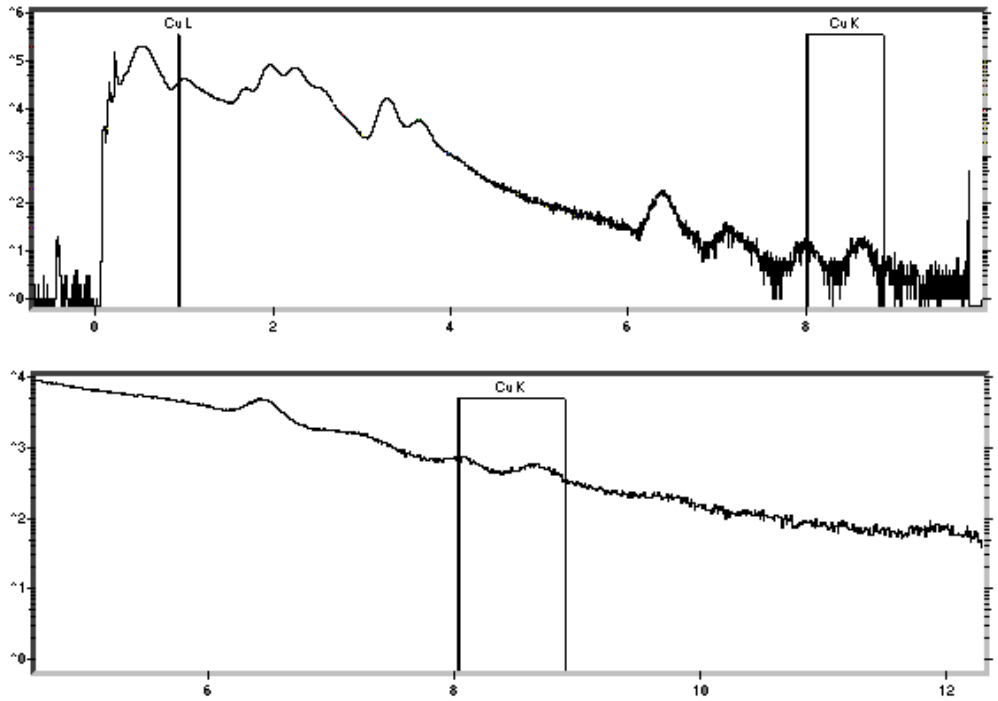


Ilustración 45: comparación entre la relacion pico a fondo en la zona del fotopico de Cu. Es obvia la degradación del espectro debido a la peor resolucion del detector de 80 mm2 (espectro inferior).

También se dispone de un segundo detector de Si(Li) de 80 mm^2 de área útil en la cámara de irradiación. Este cuenta con una ventana de Be de 25 μm de espesor. Como se observa en la Ilustración 46, el detector de 80 mm^2 en mucho más voluminoso que el

[26] Ventana compuesta por un polímero muy delgado que permite la transmisión de rayos X a partir del Boro sin una atenuación muy considerable[51].

de 30 mm^2, por lo que se debe retirar el microscopio cuando se utilizan ambos detectores.
Las cadenas de procesamiento de ambos detectores son completamente distintas.
El detector de 80 mm^2 tiene un preamplificador sensible a la carga[27] estabilizado por una realimentación a resistencia[28] que permite un rate máximo de alrededor de 5000 c/s antes de que se sature la línea de base[29]. La señal que entrega este preamplificador es amplificada y conformada por un amplificador para espectroscopia estándar con una conformación de séptimo orden con 6 μs de constante de tiempo[30]. Finalmente la señal conformada se introduce al ADC.
El detector de 30 mm^2, que es bastante más moderno que el otro, tiene un preamplificador sensible a la carga realimentado por medio de un penta-fet, y un amplificador/conformador digital específicamente diseñado para este detector, el XP3, provisto por la gente de Oxford Instruments, al igual que el detector.
En este tipo de preamplificador la estabilización de la línea base se realiza inyectando un pulso de carga a través de un terminal del FET[31] específicamente diseñado para este propósito. Este tipo de realimentación es conceptualmente similar a la realimentación por LED[32], salvo que el fabricante dice que minimiza considerablemente el tiempo muerto que se produce en el momento de la inyección de carga.
Prácticamente no se dispone de ningún detalle de funcionamiento del amplificador/conformador. Sólo se puede decir que el rate de contaje que admite el conjunto asciende a 30000 c/s para un tiempo de procesamiento de 2.5 μs con un tiempo

---

[27] Un preamplificador sensible a la carga es un circuito que convierte un pulso de carga en un pulso de tensión. La transferencia de este circuito se expresa en términos de capacitancia: $V_{OUT} = Q_{IN}/C$

[28] A un preamplificador sensible a la carga es necesario estabilizarlo, ya que implícitamente realiza una integración de la corriente de entrada, teóricamente durante un tiempo infinito, por lo que cualquier offset presente en la entrada termina por saturarlo. Tradicionalmente, el método más simple y utilizado para estabilización utiliza una resistencia realimentando señal de la salida del circuito hacia la entrada. Este método adolece de dos defectos importantes: la resistencia introduce mucho ruido térmico, y para evitar un efecto llamado "defecto balístico" es necesario reducir considerablemente el ancho de banda del preamplificador, y por lo tanto su máximo rate de contaje. El defecto balístico degrada la resolución.

[29] La saturación de la línea de base de la señal de salida evidencia una saturación del circuito integrador debido a que la realimentación no llega a estabilizar al preamplificador.

[30] Una "conformación de séptimo orden con 6 μs de constante de tiempo" está diciendo que la transferencia del circuito conformador es una función racional con un polo de séptimo orden de 6 μs de constante de tiempo.

[31] FET: típicamente un transistor de efecto de campo (Field Efect Transistor) es el principal componente de la primer etapa de amplificación de todo preamplificador sensible a la carga para detectores semiconductores. Este transistor es particularmente importante porque básicamente el desempeño del preamplificador depende del desempeño de este componente.

[32] La realimentación por LED es muy usada en reemplazo de la realimentación por resistencia. Conceptualmente se basa en inyectar un pulso de luz que induce a la formación de cargas, lo que resetea el circuito integrador. Este sistema soluciona los problemas de la realimentación por resistencia, pero introduce un tiempo muerto mientras se está inyectando luz.

muerto del 50%, y unas 1500 c/s para un tiempo de procesamiento de 80 μs con el mismo tiempo muerto.
Cabe hacer notar que al hablar de 80 μs de tiempo de procesamiento se está diciendo que este es el intervalo de tiempo durante el cual el conformador procesa la señal. Esto difiere del concepto de la constante de tiempo del conformador del otro detector. 6 μs de constante de tiempo implica un tiempo de procesamiento que puede llegar a superar los 30 μs.
Además, el XP3 tiene incorporado algún tipo de mecanismo para "pile up rejection"[33], lo que no fue implementado para el detector de 80 mm^2.

A ambos detectores se les incluyó un pulser para corrección de tiempo muerto.

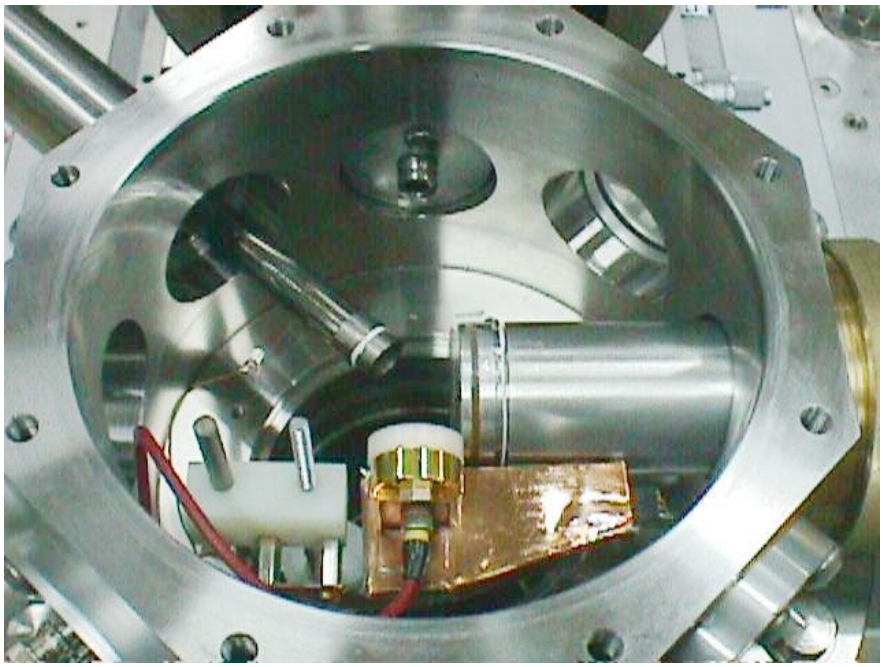


Ilustración 46: fotografía del interior de la cámara de irradiación en la que se observa la copa de Faraday y el detector de barrera de superficie con su sistema de posicionamiento, el detector de 30 mm^2, y el de 80 mm^2. El microscopio fue retirado para dar paso al detector de 80 mm^2.

Copa de Faraday.

El diseño de la copa de Faraday (FC) debe cumplir con una serie de requisitos particulares en el microhaz, aparte de los habitualmente requeridos, como se detalla a continuación:

- Como va colocada inmediatamente atrás de la muestra a irradiar, tiene un filtro para electrones diseñado para impedir el ingreso de electrones de alta energía arrancados de la muestra por el haz. Para esto se diseño un filtro magnético que produce un campo suficientemente intenso como para rechazar electrones de hasta

[33] Pile up es un efecto que se produce cuando al sistema ingresa un segundo fotón antes de que se termine de procesar al primero.

aproximadamente 1 keV con un gap de 5 mm. Tanto los polos de este circuito magnético, como el blindaje de la FC, que se observa en la Ilustración 47, se encuentran a potencial de tierra, mandando a masa la carga suministrada por estos electrones. Cabe destacar que no se optó por usar filtrado electrostático porque como la FC es sensible a corrientes del orden del fA, el preamplificador integrado en la misma, e inclusive, la misma FC es extremadamente sensible a campos eléctricos intensos.

- Además, la cercanía con la muestra posibilita que cualquier reacción producida por el haz en la FC sea confundida con una proveniente de la muestra. En particular, a la hora de hacer análisis PIXE, el ángulo de visión del detector de rayos X abarca a una gran porción de la FC. Por este motivo, la FC fue construida de carbono de alta pureza, elemento rara vez evaluado en PIXE, y con rayos X de tan baja energía que probablemente queden atenuados en el soporte de la muestra.
- Como en cualquier FC, se debe minimizar la emisión de electrones producido por la colisión de los iones en la superficie interna. El filtro de electrones colocado a la entrada podría mandar a tierra estos electrones, con lo que introduciría un error en la medición, por lo tanto se diseñó la geometría de la misma FC como un tubo de 5 mm de diámetro interno y 25 mm de longitud. Esto hace que el ángulo sólido subtendido por un electrón generado en el fondo de la FC sea de un 4% de 4π para que se escape de la misma. Aparte, como se puede ver en la figura, la FC pasa por dentro del núcleo de hierro que cierra el circuito magnético del supresor de electrones. Para minimizar aun más la posibilidad de que electrones se escapen de la FC, se redujo la sección de esta pieza hasta que se logro saturarla. De esta forma se consiguió establecer un campo magnético mínimo dentro de la FC para proveer un mínimo filtrado magnético que impida el escape de los electrones de menor energía. El campo resultante dentro de la FC resultó aproximadamente 2 ordenes inferior al del gap, y no se realizaron cálculos para determinar que tipo de filtrado efectúa.
- Como la resolución de la FC es del orden del fA, no es admisible utilizar cables de conexión “largos” entre la FC y el preamplificador porque el microfonismo que puede introducir ante la más mínima vibración enmascararía completamente una medición. Además que sería un punto delicado (y probablemente, casi imposible) el diseño de los conectores, geometría de los cables, aislantes, y eventualmente pasantes de vacío requeridos. Por esto se optó por colocar la primer etapa de amplificación dentro del housing de la FC, simplificando considerablemente el diseño. Como se puede apreciar en la figura 48, la FC está directamente conectada a la entrada del circuito integrado amplificador por medio de una conexión rígida y corta. También se observa la resistencia de realimentación encapsulada en vidrio, encargada de retirar la carga acumulada en la FC, conectada directamente sin la necesidad de ningún aislante que soporte el nodo de suma. Aparte, como todo este circuito se encuentra en la cámara de irradiación en alto vacío, se asegura que no hay humedad depositada sobre la resistencia o el encapsulado del amplificador. Obviamente esto va en contra de obtener un vacío elevado, pero consideramos que es un precio aceptable a pagar, y en la práctica resultó una perturbación despreciable.

ATENCIÓN: DE LO DICHO EN ESTE ÍTEM SE PUEDE INFERIR QUE SI SE ABRE EL HOUSING DE LA COPA DE FARADAY Y SE DEPOSITA SUCIEDAD, O SIMPLEMENTE SE TOCA CON EL DEDO, EL ENCAPSULADO DEL CIRCUITO INTEGRADO O LA RESISTENCIA ENCAPSULADA EN VIDRIO, SE ESTARÍA ESTABLECIENDO UN CIRCUITO DE RELATIVAMENTE BAJA RESISTENCIA POR EL CUAL CIRCULARÍAN CARGAS QUE DESCALIBRARÍAN COMPLETAMENTE LA MEDICIÓN.

- Un punto crítico fue también el modo de sujeción de la FC. Si se la sujeta a un punto que tenga un potencial distinto del de ella por medio de algo que no sea suficientemente aislante, se introducirá error en la medición. Como se puede ver en la figura, la pieza que soporta la FC, por medio de un tubito de vidrio, se encuentra soldada al chasis, al que también se encuentran soldados los terminales de referencia del preamplificador. Esto asegura que el potencial entre la FC y el chasis nunca supere los 10 mV, por lo que se requiere una resistencia superior a los 10^{14} Ω para asegurar una inyección de corriente inferior a los 0.1 fA, resistencia fácilmente lograda con el vidrio, siempre y cuando se encuentre limpio.

ATENCIÓN: POR ESTA RAZÓN, ES EXTREMADAMENTE IMPORTANTE NO INDUCIR NI HACER CIRCULAR NINGUNA CORRIENTE SOBRE EL HOUSING DE LA COPA DE FARADAY[34], YA QUE DE HACERLO SE ESTARÍA AUMENTANDO EL POTENCIAL ENTRE LOS EXTREMOS DEL AISLANTE DE VIDRIO QUE SUJETA LA FC Y SE ESTARÍA INYECTANDO CORRIENTE EN LA MISMA.

El sistema fue diseñado para que el housing de la FC sirva de nodo equipotencial (además de blindaje electrostático), y la cámara de irradiación oficie de blindaje EM principal.

[34] O sea, no conectarle nada, ni atornillarle nada que no sea aislante, ni ponerlo en contacto con nada que no sea aislante.

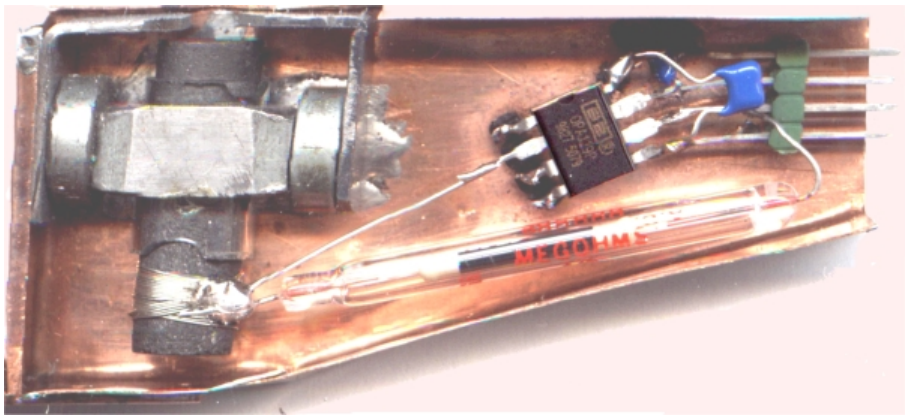


Ilustración 47: Vista del interior de la caja de cobre de la copa de Faraday que actua de blindaje. Se observa el circuito magnético para la supresión de electrones, la copa hecha de grafito, y el circuito de la primer etapa de amplificación.

El detector de barrera de superficie se encuentra montado sobre el blindaje de la FC. Un sistema de posicionamiento conectado al sistema de control de vacío de la línea se encarga de colocar en la trayectoria del haz a estos dos, o si es necesario, retirarlos. En particular, este sistema de posicionamiento fue diseñado para despejar completamente el campo visual cuando se desea ver a través de la ventana posterior de la cámara.

Sistema de adquisición[4]

Una vez que el haz está enfocado sobre la muestra, para realizar mapas de distribución de elementos, micromaquinado, o prácticamente para cualquier otro uso es necesario utilizar un conjunto de instrumentos descriptos a continuación. Básicamente se dividen en 4 grupos:

1. Generador de barrido: se encarga de posicionar el haz sobre la muestra, y en general, moverlo siguiendo un patrón predeterminado.
2. Detectores de rayos X y de partículas.
3. Instrumentos de normalización: sirve para cuantificar la dosis que recibe la muestra.
4. Sistema de adquisición: recoge la información generada por los detectores y la presenta y almacena en correlación con la posición del haz sobre la muestra.

Por ejemplo, para realizar el mapa de distribución de cobre sobre una superficie de 1 x 1 mm^2 de la muestra es necesario que el haz barra la muestra cubriendo esta zona, para lo que se usa el generador de barrido.

Un detector de rayos X, como su nombre lo indica, detecta los rayos X provenientes de la muestra, los cuales deben ser almacenados por el sistema de adquisición. Entonces el software de adquisición genera matrices bidimensionales de distribución de Cu, donde cada elemento de la matriz es la cantidad de rayos X de cobre que provienen de cada posición de la muestra. La información de la posición, que se correlaciona con la ubicación del elemento en la matriz, se determina verificando las corrientes de las bobinas de barrido en el momento que se detecta el rayo X, es decir, cada vez que arriba una señal del detector de rayos X, se disparan 3 conversores analógicos a digitales (ADC) en el sistema de adquisición. Un ADC se encarga de digitalizar el pulso que viene del detector, y los otros dos, digitalizan las señales X e Y que entrega el generador de barrido. Estos tres datos se almacenan como un vector. Los ADC's que determinan la posición del haz sobre la muestra son de 8 bits, por lo tanto sólo es posible discriminar entre 256 posiciones en cada eje. El ADC utilizado para el detector es de 2048 canales.

Para determinar la cantidad de rayos X de cobre en cada píxel se pueden usar varios métodos, que van desde simplemente integrar el espectro en un cierto rango de energía, hasta utilizar algoritmos que ajusten modelos matemáticos a los espectros. Seleccionar uno u otro método no es trivial. Se debe tener en cuenta que si se utiliza toda la resolución espacial que permite el sistema, se cuentan con 65536 píxeles por imagen (256 x 256), lo que hecha por tierra cualquier intento de ajustar manualmente el espectro correspondiente a cada píxel. Por eso, el algoritmo de ajuste debe ser automático, lo que complica al mismo, y aumenta la posibilidad de que aparezcan artefactos. Por otro lado, si simplemente se integra el espectro, se está considerando el fondo como parte del área del fotopico. El programa de adquisición provisto por Oxford Microbeams integra en el espectro sin descontar el fondo para realizar los mapas de distribución, y el software utilizado en la sección "Generación de mapas de distribución de cobre" de este trabajo, mejora este método haciendo un estimado del fondo bajo el pico para descontarlo del área bruta.

Una vez que se tiene la matriz con la información de la distribución de rayos X, es necesario correlacionar cada posición con la dosis suministrada. Para esto se utiliza la copa de Faraday (FC), siempre y cuando la muestra no desvíe considerablemente la trayectoria de los iones. Aunque lo ideal sería almacenar la información de la carga suministrada en cada píxel correlacionada con la posición, el sistema de adquisición no lo permite. La alternativa utilizada en este trabajo es considerar que la carga se

distribuye uniformemente, y dividir la dosis total suministrada por la cantidad de píxeles para saber la carga que recibe cada punto.
Finalmente, se aplica el procedimiento descrito en la sección “Generación de mapas de distribución de cobre” para determinar la concentración en cada punto, y realizar el mapa de distribución.
En la Ilustración 48 se observa el espectro integral PIXE de una reja depositada sobre un vidrio, y los mapas obtenidos al filtrar en función de los rangos de energías indicados.

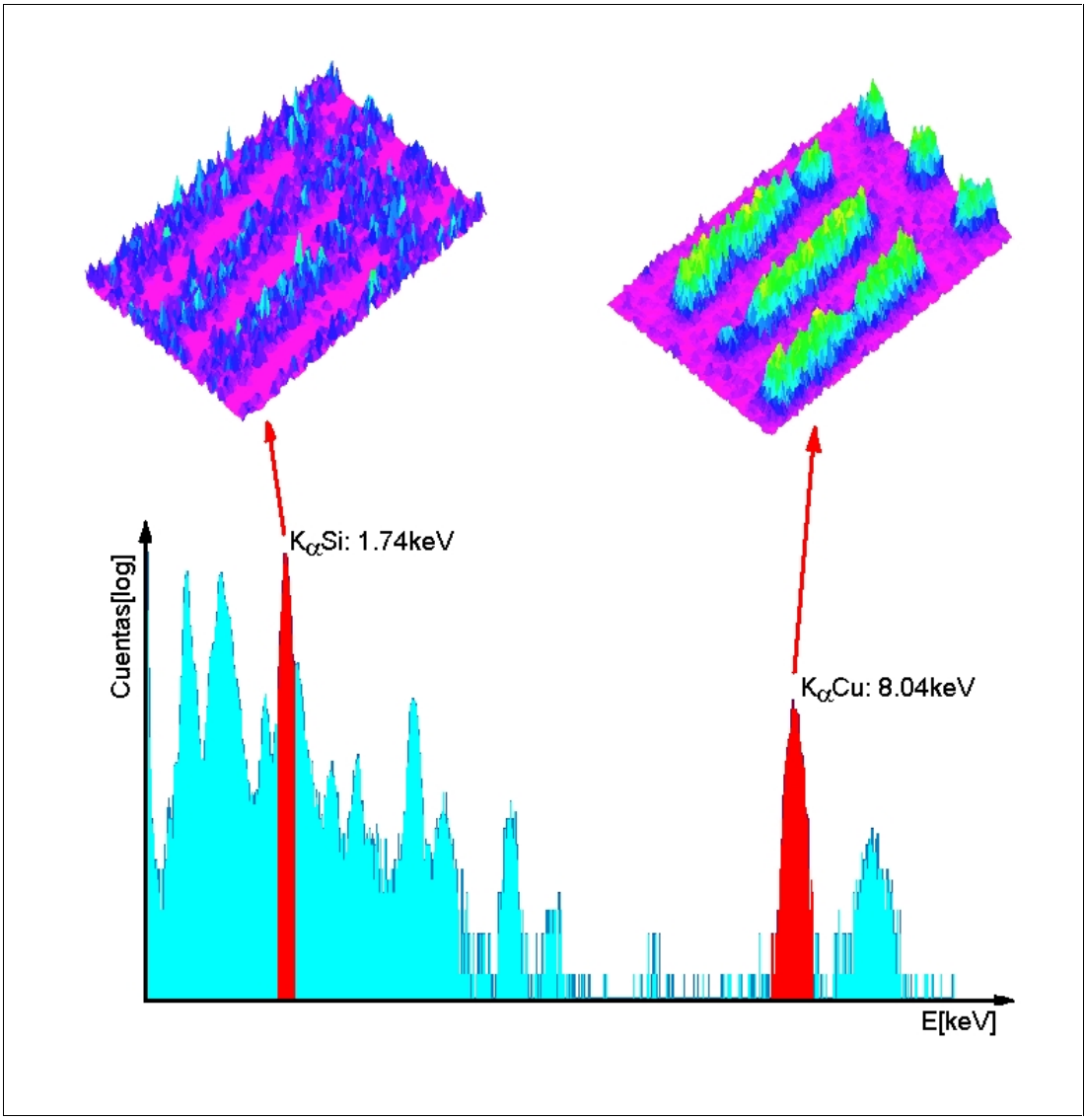


Ilustración 48: Mapas de distribución y espectro integral PIXE de una reja depositada sobre un vidrio. El espectro tiene indicados los fotopicos de Cu y Si utilizados para generar los mapas.

Nota sobre las dimensiones físicas del microhaz.

En varios lugares de este trabajo se utilizaron valores aproximados para la distancia entre los colimadores objeto y la lente magnética, en general 6.6 m, que es la distancia aproximada entre los colimadores objeto y los anti-sacttering.
La distancia exacta entre el centro del cuerpo de los colimadores provistos por Oxford Microbeams y el polo del primer cuadrupolo que atraviesa el haz en la lente magnética de precisión es de (7085 ± 5) mm. Debe considerarse que las hojas de este colimador que limitan el haz en la dirección horizontal se encuentran 12.5 mm más cerca del cuadrupolo, y los que limitan en vertical, 12.5 mm más lejos.
Los colimadores de precisión se encuentran (199 ± 1) mm más cerca de la lente, es decir, el cuerpo que contiene los colimadores de precisión se encuentra a (6886 ± 5) mm del mismo punto de la lente. El fabricante no especifica medidas de la posición de los colimadores dentro del mismo, pero ninguno de los filos de los colimadores están desplazados más de 10 mm del centro.

Nota sobre el funcionamiento de los colimadores.

La línea del microhaz cuenta con un tipo de colimadores, los provistos por Oxford Microbeams, que debido a la pobre información entregada por el fabricante pueden ser utilizados erróneamente.

Ilustración 49: Juego de colimadores provisto por Oxford Instruments, que permiten una apertura de hasta 5 x 5 mm^2 con una precisión de 1 μm.

Como se observa en la figura cada una de las hojas del colimador tiene asociado un micrómetro en donde se puede leer el apartamiento de esa hoja con respecto al eje de simetría **más un offset de 250 μm**. Por lo tanto la apertura en el plano horizontal será la suma de las lecturas de los dos micrómetros correspondientes **menos 500 μm**, y lo propio en el eje vertical.
Sin embargo, en este trabajo, al hablar de aperturas de colimadores se habla concretamente de la apertura, no se tienen en cuenta offsets ni detalles particulares de cada implementación mecánica.

Operación del microhaz

Colimadores – operación por encima de 2 micrones – alta corriente

En operación estándar, las imágenes que obtiene el microhaz son grillas de 256 x 256 píxeles. Para esto, las bobinas de barrido van barriendo todos los puntos de esta grilla, deteniéndose un intervalo de tiempo en cada punto, típicamente 100 μseg, con lo que se demora 6.5536 seg. en tomar una imagen. Al terminar este barrido, continua realizando otros barridos, acumulando la estadística de cada punto.

El generador de barrido está compuesto por una plaqueta con dos conversores digitales a analógico comandados por el software de control OMDAQ. La señal que entregan estos DAC's varía entre 0 y 10 volts. Una tensión de 5 volts significa que el generador de barrido pretende dejar las bobinas de barrido sin alimentación, o sea, que no desvíe el haz. 0 y 10 volts implican desviaciones del haz máximas en uno y otro sentido. Estas señales se inyectan en los amplificadores de barrido OM-40, que no son otra cosa que amplificadores de transconductancia, es decir, amplificadores que entregan una corriente proporcional a la tensión de entrada. Cada uno de estos amplificadores tiene un control de ganancia individual, y uno que es común para ambos.

En las bobinas de barrido, el desplazamiento del haz en función de la corriente depende del tipo de haz: la carga, la energía y la masa, por lo tanto, cada vez que se cambian uno de estos parámetros se debe recalibrar el amplificador de la bobina de barrido. Una forma de hacerlo es poniendo el control de ganancia común en 10, y ajustar cada uno de los controles individuales hasta lograr un barrido de 1 x 1 mm^2. Para seleccionar otro tamaño de barrido, se cambia el control común, por ejemplo, poniéndolo en 1 se logra un barrido de 100 x 100 μm^2.

Para ^{16}O a 50 MeV con carga 5^+ los valores son:

Barrido de 1 x 1 mm²	
Calibración X	1.45
Calibración Y	10
Ganancia	10

Tabla 9

Estos valores, teóricamente, escalean como:

$$\frac{Q}{\sqrt{m \cdot E}}$$

Ecuación 101

para iones con otra masa, carga, y/o energía.

Una vez seleccionada el área a barrer, se debe verificar que el tamaño de haz sobre la muestra asegure una cobertura completa. Por ejemplo, si un barrido de 1 x 1 mm^2 se realiza con un haz más pequeño de 1/256 x 1/256 mm^2 no se cubre completamente el área barrida, quedando franjas de muestra sin irradiar entre dos puntos consecutivos. Por el contrario, si en ese caso el haz es mayor que 4 x 4 μm^2, habrá una superposición entre dos puntos consecutivos.

Teniendo en cuenta que la demagnificación del sistema es de 25 x 80, para lograr un foco de 4 x 4 μm^2 es necesario una apertura objeto de 100 x 320 μm^2.

El microhaz cuenta con dos juegos de colimadores objeto, uno de precisión [49] que permite aperturas entre 0 y 140 μm con una precisión de 0.1 μm, y otro que permite aperturas de hasta 5 mm, con precisión de 1 μm.

Cuando no se requieren haces de tamaño inferior a 1.75 μm, se retiran los colimadores de precisión del trayecto del haz de iones, y sólo se utilizan los de baja precisión. Estos colimadores tienen una superposición de 500 μm, por lo que para una apertura objeto de 100 x 320 μm^2 se deben abrir los micrómetros verticales para que indiquen una apertura total (suma de ambas lecturas) de 820 μm, y 600 μm en horizontal.

Los colimadores antiscattering no son críticos cuando se utilizan haces de gran tamaño (por encima de 2 x 2 μm^2) por lo que conviene abrirlos a 2 x 2 mm^2. Cálculos teóricos demuestran que aperturas mayores provocarían que parte del haz toque el caño mientras transita por las lentes magnéticas.
Bajo estas condiciones, aperturas objeto a 100 x 320 μm^2 y colimadores antiscattering a 2 x 2 mm^2, la aceptancia del microhaz es:

$$a_x = 100\mu m \cdot \frac{2mm}{6.6m} = 30.3\mu m \cdot mrad$$

$$a_y = 320\mu m \cdot \frac{2mm}{6.6m} = 96.97\mu m \cdot mrad$$

teniendo en cuenta que la distancia entre ambos colimadores es 6.6 m.
El "volumen" dado por estas aceptancias determina que porción del haz entregado por el acelerador se transmitirá hasta la muestra. Típicamente, la emitancia del haz de iones de acelerador Tandar es del orden de 10 mm.mrad en ambos ejes. Considerando una distribución uniforme de la densidad de corriente dentro de ese volumen, la transmisión en estas condiciones será:

$$T = \frac{a_x}{e_x} \cdot \frac{a_y}{e_y} = \frac{30.3\mu m \cdot mrad}{10mm \cdot mrad} \cdot \frac{96.97\mu m \cdot mrad}{10mm \cdot mrad} = 34000^{-1}$$

Ecuación 102

Esto indica que inyectando en la línea una corriente de 1 μA, se obtendrá un microhaz de 30 pA.

Colimadores – operación por debajo de 2 micrones – alta resolución

Cuando se requieren barridos de menor tamaño, con focos de alrededor de 1 x 1 μm^2, o corrientes muy bajas (algunas centenas de partículas por segundo para STIM), se deben utilizar los colimadores objeto de alta precisión. Por ejemplo, para lograr un foco de 1 x 1 μm^2 los colimadores deben estar abiertos a 25 x 80 μm^2. En este modo de operación, se utilizan también los colimadores de baja precisión, que se encuentran inmediatamente antes que los de precisión, abiertos a 500 x 500 μm^2 para proteger a los otros colimadores.
Los colimadores antiscattering deben cerrarse a tamaños de típicamente 500 x 500 μm^2. En estas condiciones la aceptancia del microhaz resulta:

$$a_x = 25\mu m \cdot \frac{0.5mm}{6.6m} = 0.75\mu m \cdot mrad$$

$$a_y = 80\mu m \cdot \frac{0.5mm}{6.6m} = 6.1\mu m \cdot mrad$$

quedando la transmisión del orden de:

$$T = \frac{a_x}{e_x} \cdot \frac{a_y}{e_y} = \frac{0.75\mu m \cdot mrad}{10mm \cdot mrad} \cdot \frac{6.1\mu m \cdot mrad}{10mm \cdot mrad} = \left(22 \cdot 10^6\right)^{-1}$$

Ecuación 103

Lo que indica que la corriente del haz, ingresando a la línea con 1 μA, sería de 45 fA.
Para trabajar con bajas corrientes, por ejemplo 500 partículas por segundo (lo que representa 0.4 fA con carga 5^+), se empieza trabajando con los colimadores objeto totalmente cerrados. Se coloca un detector de barrera de superficie midiendo la corriente de partículas del microhaz, y entonces se comienza a abrir las aperturas objeto en forma simétrica hasta lograr la corriente deseada. Típicamente, para corrientes de algunas centenas de cuentas por segundo se utilizan las aperturas objeto abiertas por debajo de 5 x 5 μm^2. También es inferior la corriente que se inyecta en la línea.

Medición del tamaño del foco.

Se usaron 3 métodos distintos para determinar el tamaño del microhaz. Básicamente proponen distintas formas para deconvolucionar el tamaño del microhaz de las mediciones de una grilla de cobre usando STIM y PIXE.

Medición 213018

Utilizando esta medición como ejemplo se pretende mostrar el procedimiento utilizado para determinar el tamaño del haz.

Habiendo caracterizado la reja, es posible determinar el tamaño del haz ya que las imágenes de la reja obtenidas con el microhaz son la convolución entre la reja real y el spot del haz. Para esto se usaron las imágenes del microhaz obtenidas seleccionando (ventaneando en) la línea K_α de Cu, de 8.04 keV. Esta energía es suficientemente grande como para no sufrir ninguna atenuación considerable. La Ilustración 45 muestra la diferencia entre considerar el área de todo el espectro de rayos X obtenido y sólo el de la línea de 8 keV del Cu a la hora de obtener el perfil de un barrido horizontal de la reja.

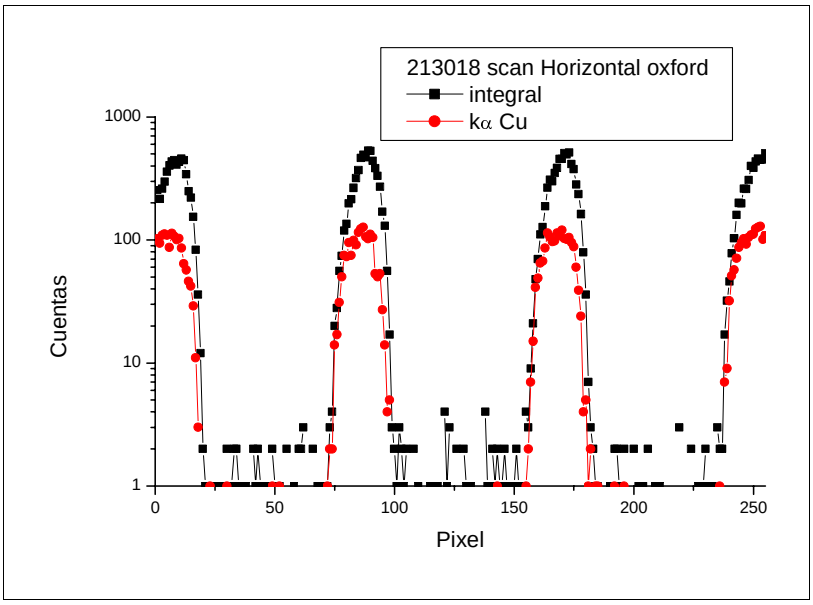


Ilustración 45: Diferencia entre el perfil obtenido considerando el área de todo el espectro de rayos X versus el obtenido considerando sólo el K_α del Cu. Se observa una mayor definición de los bordes en el obtenido usando la línea de 8 keV.

Ajustando dos normales al perfil se determinó el factor de conversión píxeles/μm de la imagen obtenida con el microhaz, procedimiento mostrado en la Ilustración 46.

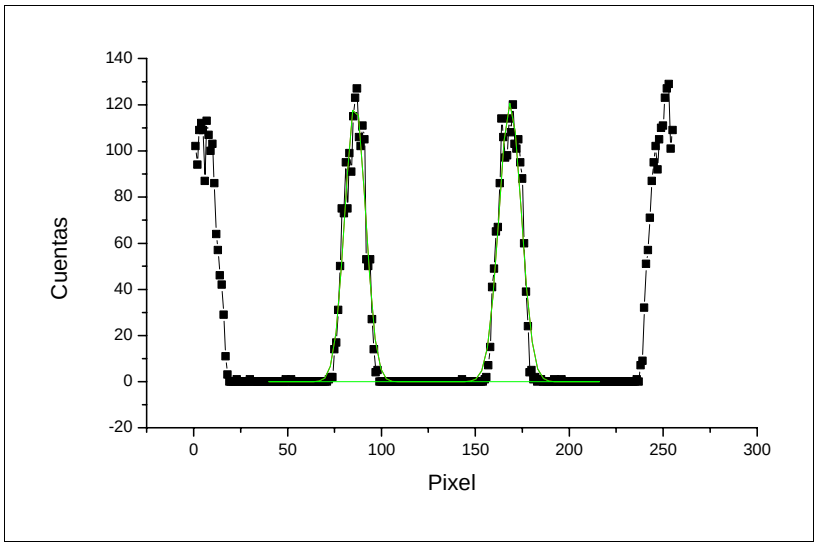


Ilustración 46: Ajuste de dos distribuciones normales para calcular el factor de conversión.

El resultado de este ajuste dio:

Peak	Area	Center	Width	Height
1	1666.7	86.035	11.001	120.89
2	1793.9	168.49	11.860	120.68

Yoffset = 0

Tabla 10

Lo que da un factor de conversión de:

$$f = \frac{c_2 - c_1}{d} = \frac{82.46\,px}{63\,\mu m} = 1.31\,\frac{px}{\mu m}$$
$$\Delta f = 0.02\,\mu m$$

Ecuación 104

Asignándole un error de 1 μm a la determinación del paso.
La siguiente ilustración presenta el detalle del perfil de una barra de la reja:

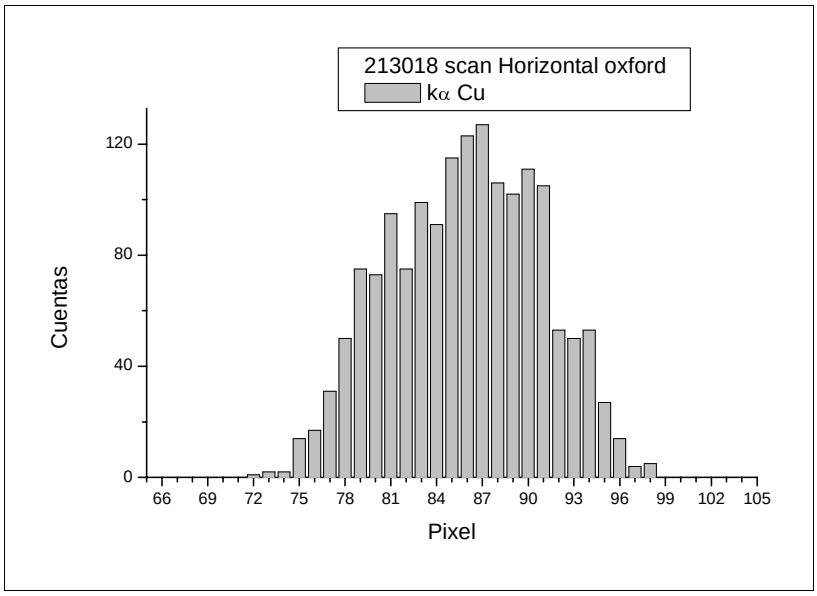


Ilustración 50: Distribución de cuentas en función de la posición en una de las barras de la reja.

Tomando que la reja ocupa entre el píxel 73 y el 98, el espesor de la reja que indicaría el microhaz es de:

$$e_1 = \frac{26\,px}{f} = 19.8\,\mu m$$

$$\Delta e_1 = e_1 \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2 + \left(\frac{2\,px}{26\,px}\right)^2} = 1.6\,\mu m$$

Ecuación 105

Tomando 2 píxeles como la indeterminación en el número de píxeles que ocupa.
La diferencia entre este resultado y el valor obtenido en la caracterización de la reja por medio de STIM (ver más adelante) (12.48 ± 0.42) μm, evidencia el tamaño del haz:

$$h = 19.8\,\mu m - 12.48\,\mu m = (7.36 \pm 1.7)\,\mu m$$

Ecuación 106

De la Ilustración 51 se puede medir el espesor de la otra barra usada para el ajuste, lo mismo que con la Ilustración 52 y la Ilustración 53 que pertenecen al experimento 213020, para determinar el tamaño vertical.

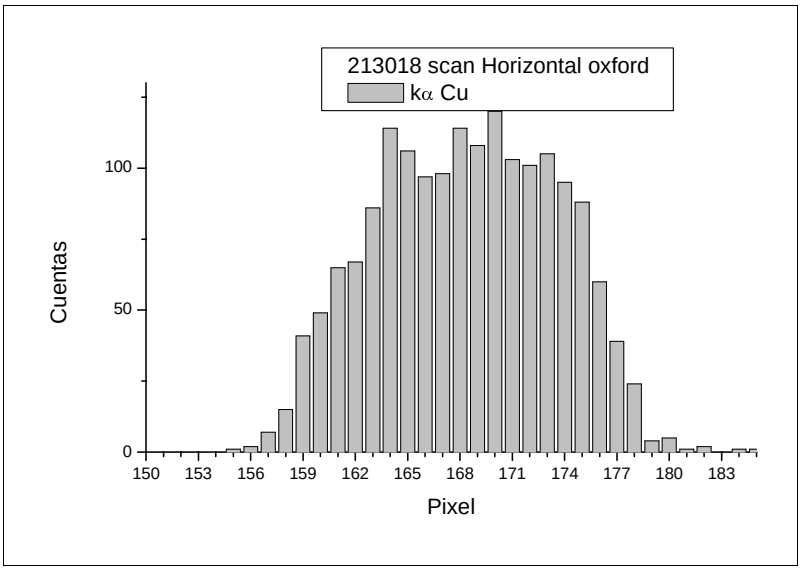


Ilustración 51: Perfil de una barra horizontal de la reja de cobre. En 25 píxeles se generaron cuentas.

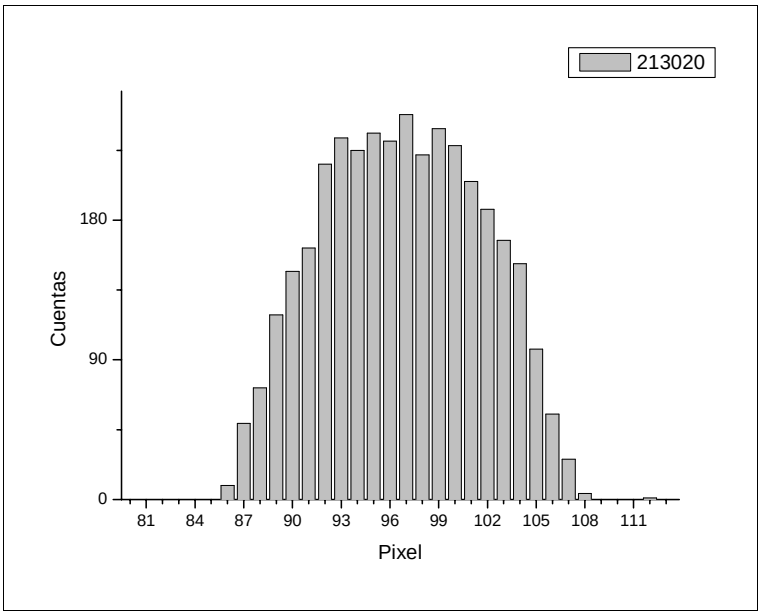


Ilustración 52: Perfil de una barra vertical de la reja de cobre. En 23 píxeles se generaron cuentas

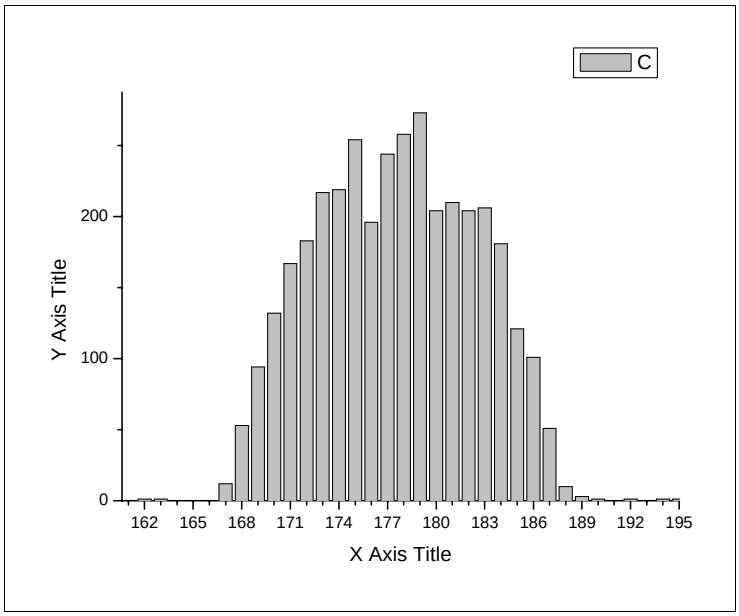


Ilustración 53: : Perfil de una barra vertical de la reja de cobre. En 23 píxeles se generaron cuentas

El factor de corrección para el experimento 213020 se calcula con el siguiente ajuste:

Peak	Area	Center	Width	Height
1	3683.1	96.761	11.278	260.56
2	3766.8	177.53	11.418	263.22

Yoffset = 0

Tabla 11

Lo que da un factor de conversión de (1.28 ± 0.02) μm. La siguiente tabla resume los valores obtenidos:

Experimento	*Barra*	*Ancho de haz medido*	*Ilustración*
213018	1	(7.36 ± 1.7) μm	Ilustración 50
213018	2	(6.60 ± 1.7) μm	Ilustración 51
213020	1	(5.49 ± 1.7) μm	Ilustración 52
213020	2	(5.49 ± 1.7) μm	Ilustración 53

Promediando, se obtiene un tamaño de haz de (7 ± 1.2) (H) x (5.5 ± 1.2) (V) μm^2.

Mediciones 214025, 214026, y 214027.

Este juego de mediciones comprende un barrido horizontal, un barrido vertical, y un barrido en raster. En estas mediciones se utilizaron ambos detectores de rayos X (el de

80mm^2 y el de 30 mm^2). La Ilustración 54 muestra la diferencia en los perfiles obtenidos con los 2 detectores al tomar una línea horizontal. La Ilustración 55 muestra lo mismo sobre la línea vertical.

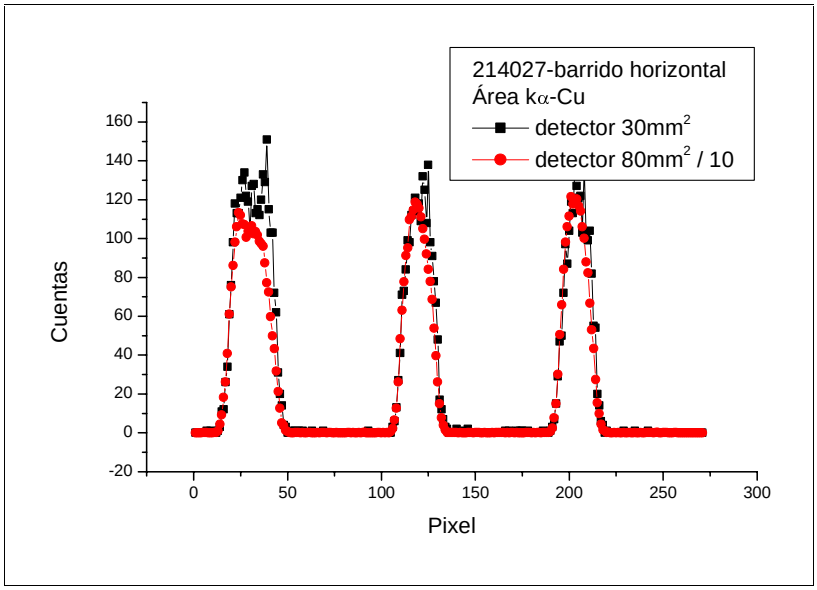


Ilustración 54: Barrido horizontal realizado sobre una sección de la reja.

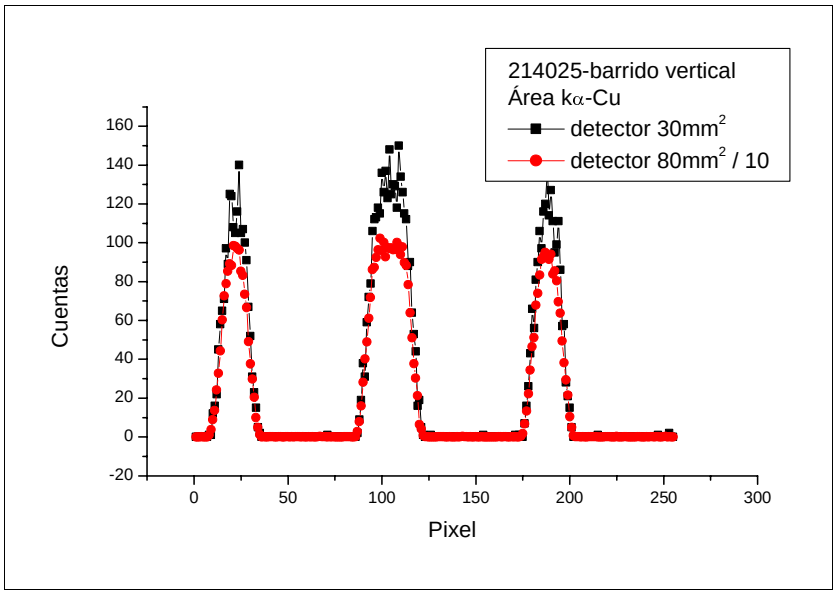


Ilustración 55: Barrido vertical realizado sobre una sección de la reja.

La Ilustración 56 muestra el mapa de Cu obtenido seleccionando la línea K_α en el detector de 80 mm^2. La falta de ortogonalidad refleja un error en la alineación de las bobinas de barrido. En la Ilustración 57 se muestra el mapa con este defecto corregido por software.

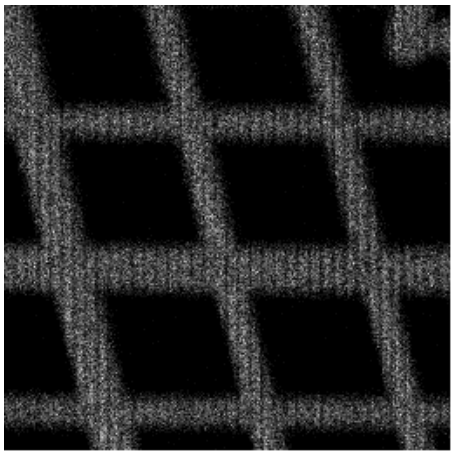


Ilustración 56: Mapa de distribución de cobre.

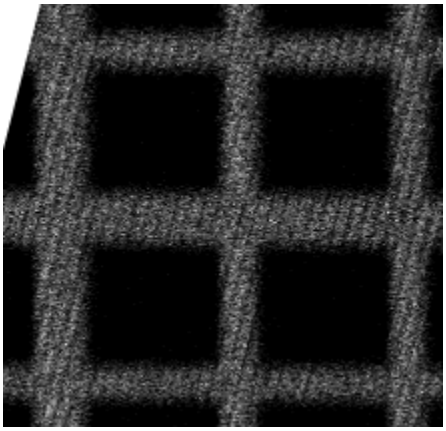


Ilustración 57: Imagen corregida por software.

A continuación se presentan los ajustes realizados para determinar el factor de conversión en X y en Y del mapa.

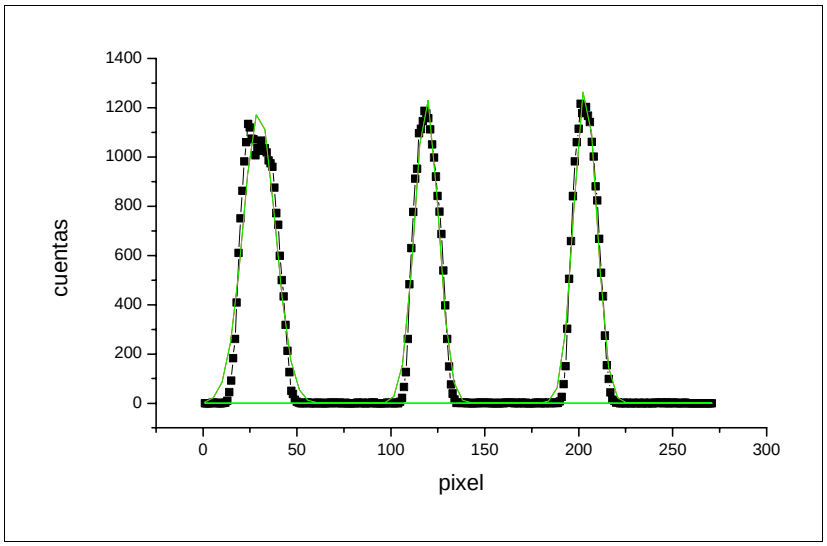


Ilustración 58: Ajuste realizado para determinar el factor de conversión horizontal.

Peak	Area	Center	Width	Height
1	25561	29.901	17.173	1187.6
2	19631	119.06	12.599	1243.3
3	19423	203.51	12.046	1286.6

Yoffset = 0

Tabla 12: Resultado del ajuste para determinar el factor de conversión horizontal.

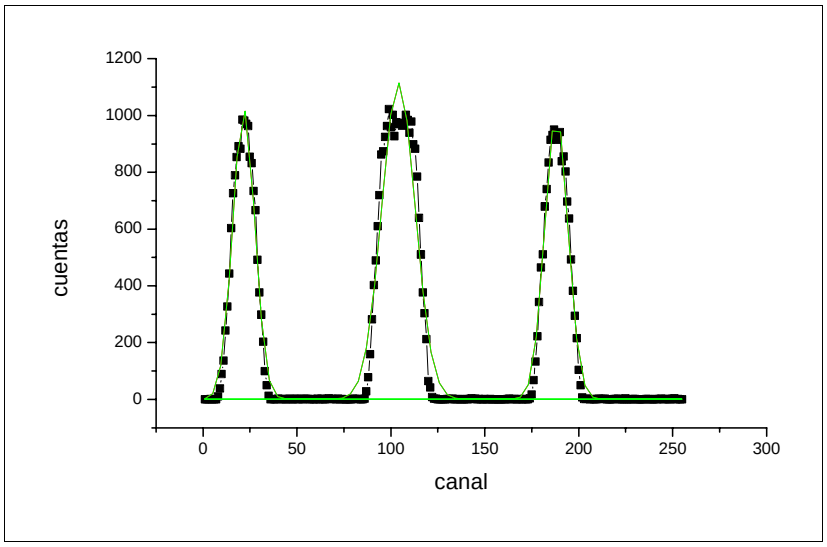


Ilustración 59: Ajuste realizado para determinar el factor de conversión vertical.

Peak	Area	Center	Width	Height
1	14987	21.745	11.676	1024.2
2	24901	104.13	17.837	1113.8
3	15450	188.24	12.291	1003.0

Yoffset = 0

Tabla 13: Resultado del ajuste para determinar el factor de conversión vertical.

De los picos 2 y 3 del ajuste sobre el perfil horizontal se determina que el factor de conversión horizontal es de 1.34 px/μm. De los picos 1 y 2 se puede determinar que la distancia entre el centro de una barra gruesa y una fina es un 5.6% superior a la distancia entre dos barras finas.

El factor de conversión vertical resulta 1.25 px/μm.

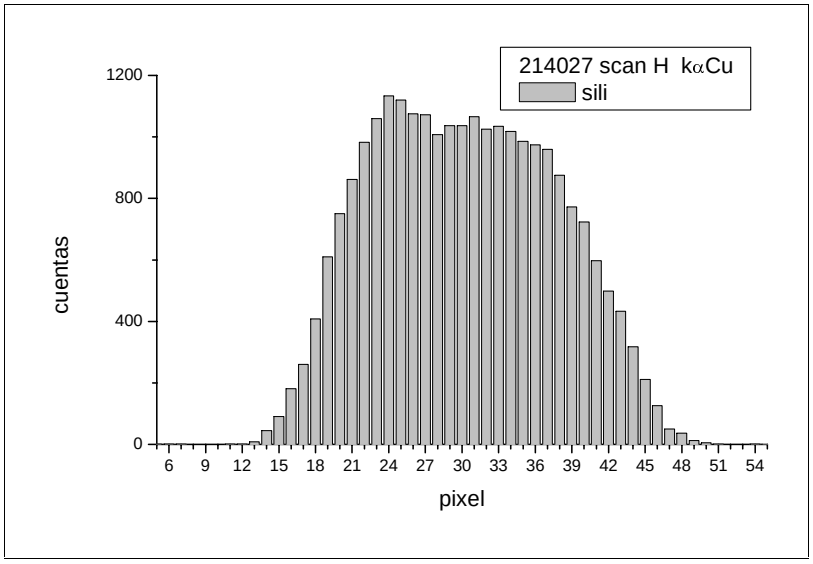


Ilustración 60: Perfil de una barra horizontal de la reja de cobre. En 32 píxeles se generaron cuentas.

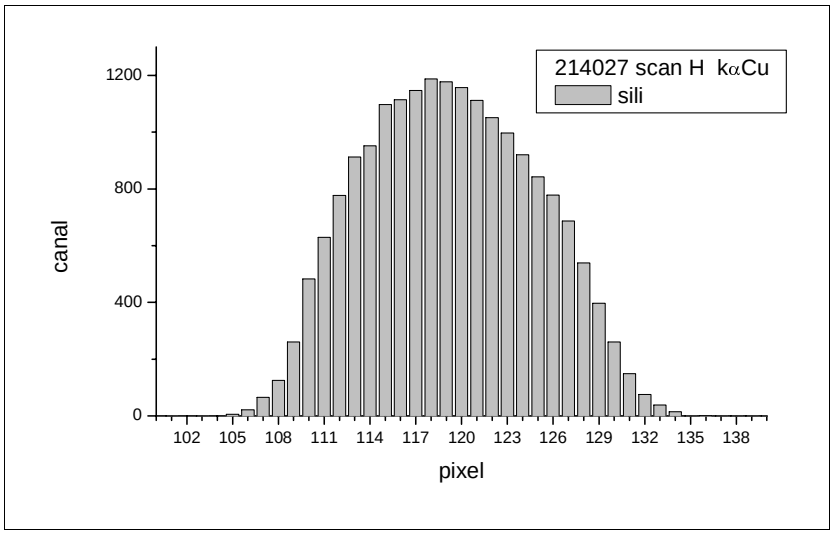


Ilustración 61: Perfil de una barra horizontal de la reja de cobre. En 25 píxeles se generaron cuentas.

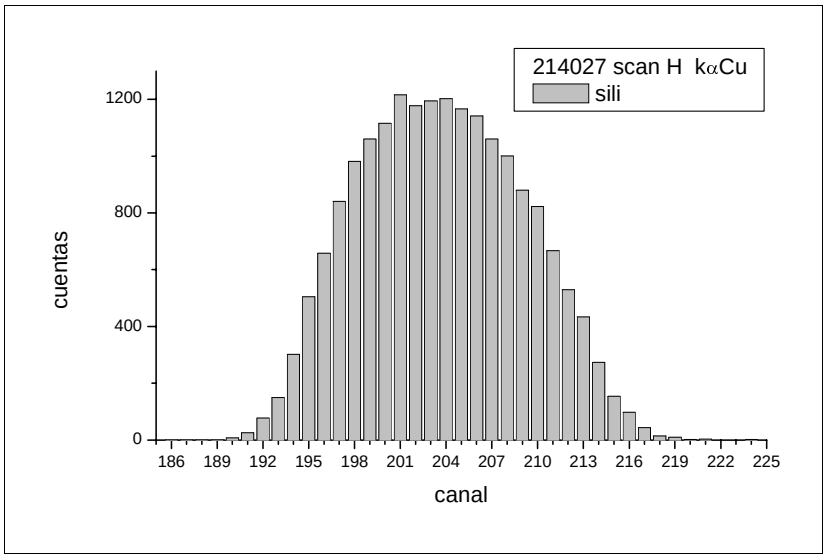


Ilustración 62: Perfil de una barra horizontal de la reja de cobre. En 23 píxeles se generaron cuentas.

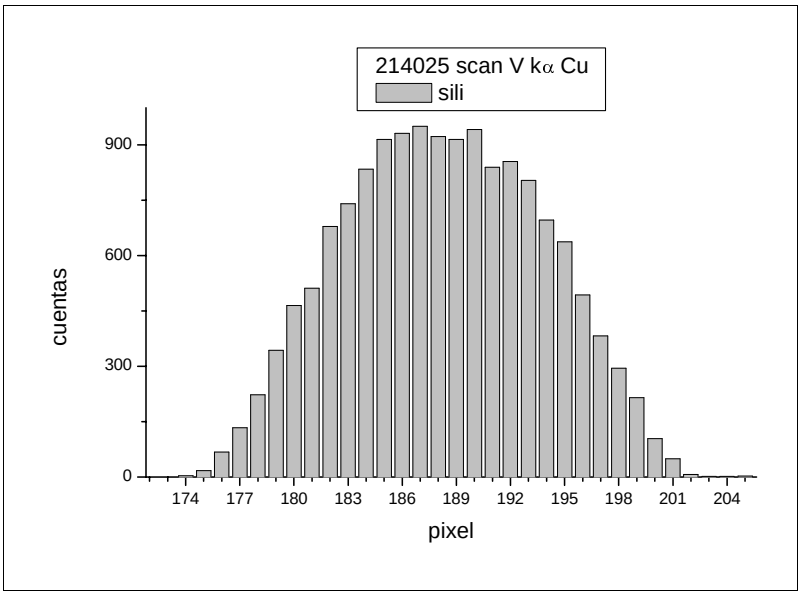


Ilustración 63: Perfil de una barra vertical de la reja de cobre. En 24 píxeles se generaron cuentas.

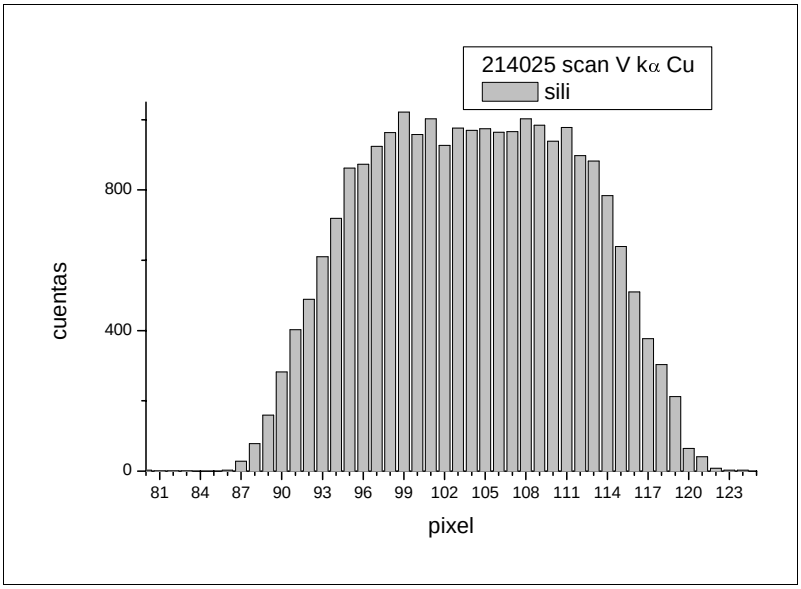


Ilustración 64: Perfil de una barra vertical de la reja de cobre. En 32 píxeles se generaron cuentas.

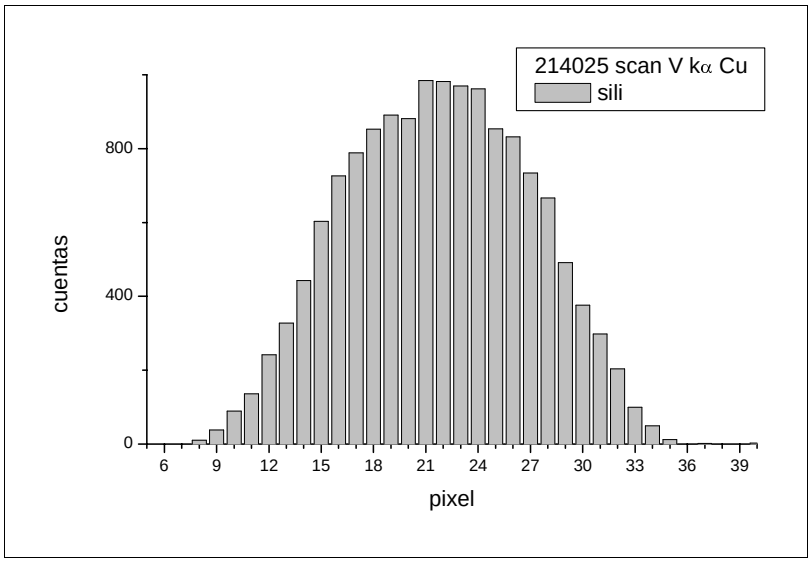


Ilustración 65: Perfil de una barra vertical de la reja de cobre. En 24 píxeles se generaron cuentas.

Ancho de la barra	*Gráfico*	*Barrido*	*Píxeles que ocupa la barra*	*Ancho medido con el microhaz*	*Ancho de haz que evidencia*
Medio	Ilustración 60	H	32 ± 2	23.9 ± 8%	
Fina	Ilustración 61	H	24 ± 2	17.9 ± 10%	5.4 ± 0.5 μm
Fina	Ilustración 62	H	24 ± 2	17.9 ± 10%	
Fina	Ilustración 63	V	24 ± 2	19.2 ± 10%	6.7 ± .7 μm
Medio	Ilustración 64	V	32 ± 2	25.6 ± 8%	
Fina	Ilustración 65	V	24 ± 2	19.2 ± 10%	

Tabla 14: Recordar que la conversión horizontal es de 1.34 px/μm y el factor de conversión vertical es 1.25 px/μm para este conjunto de valores con error del 5%. El ancho de una barra fina es de 12.48 ± 0.42 μm.

Tamaño del haz y caracterización de la reja en STIM.

La Ilustración 66 muestra el resultado del experimento 221017, un STIM de la reja de cobre.

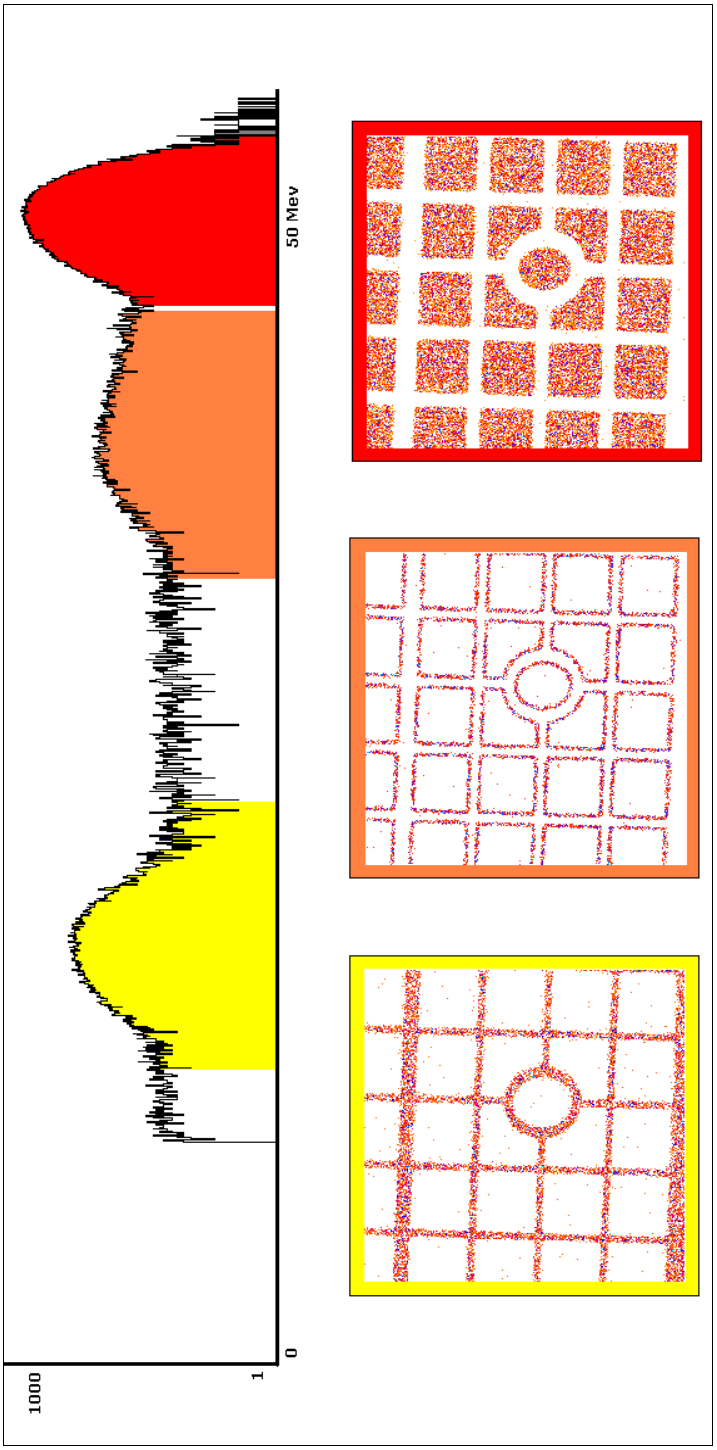


Ilustración 66: Análisis STIM de la reja de cobre.

Los mapas obtenidos son la convolución entre la reja y el microhaz, por lo tanto conociendo el perfil de la reja es posible deconvolucionar el perfil del microhaz.
Por esto se trabajó con el mapa obtenido ventaneando los iones que llegaron al detector utilizado para el STIM sin pérdida de energía, es decir, los que no tocaron la reja.

Para poder manejar analíticamente este problema se supone que el perfil del microhaz es gaussiano, representado por la ecuación:

$$g = \frac{1}{s \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{-\left(x/s\right)^2}$$

Ecuación 107

con un s (parámetro relacionado con el σ por $2^{½}$). El ancho a mitad de altura está relacionado con s por:

$$FHWM = s \cdot 2 \cdot \sqrt{\ln(2)} = 1.66511 \cdot s$$

Ecuación 108

En la Ilustración 67 se indican las 4 zonas utilizadas para evaluar el perfil en X del haz.

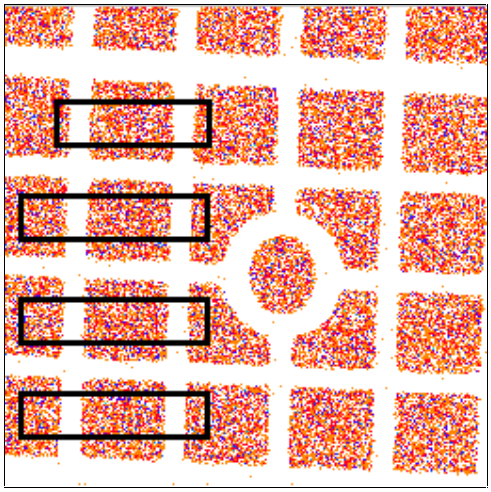


Ilustración 67: Zonas seleccionadas para evaluar el perfil del haz en la dirección X.

La información de cada una de estas se organizó en forma de un histograma, donde cada canal contiene la sumatoria de la estadística de los píxeles situados sobre una línea vertical.
Cada uno de los histogramas obtenidos de esta forma tienen un error debido a la inclinación de la reja. La Ilustración 68 explica este problema.

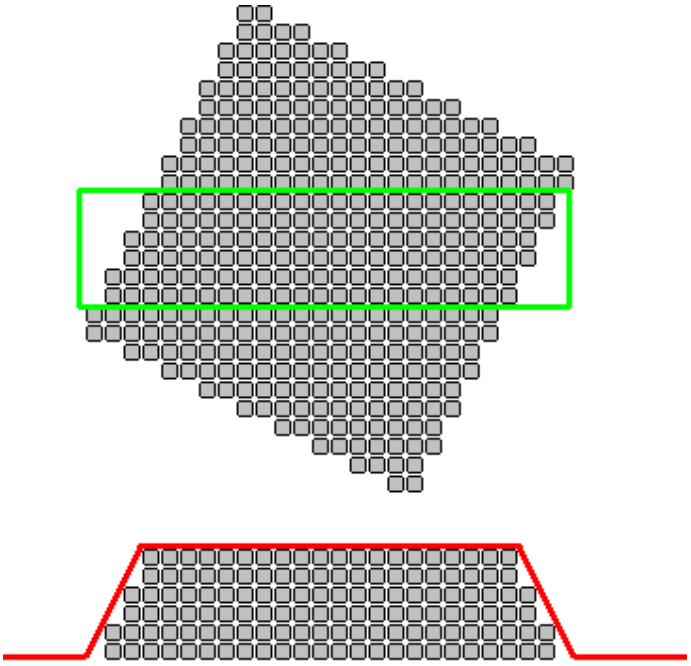


Ilustración 68: Efecto causado por la inclinación de la reja.

En la parte superior de esta ilustración está representado uno de los cuadrados de la Ilustración 67, con el ángulo de rotación y la pixelación exageradas. El rectángulo verde abarca la zona integrada para obtener el histograma representado en la parte inferior, y con trazo rojo se presenta la función que ajustaría a los datos del histograma. Como se puede apreciar, esta función no tiene flancos verticales, sino, en los flancos se refleja la inclinación de la reja.
Por este motivo se optó por usar la siguiente ecuación para representar el perfil (el primer flanco de subida) de la reja en el ajuste:

$$r = \begin{cases} 1 & b < x \\ x/b & x - b \le 0 \wedge x > 0 \\ 0 & x \le 0 \end{cases}$$

Ecuación 109

donde b queda determinado por:

$$b = nl \cdot \arctan(\alpha)$$

Ecuación 110

En función del ángulo de rotación α entre el eje sobre el que se integra para hacer el histograma (en el caso ejemplificado en la Ilustración 68, el eje vertical), y la recta que determina el borde del flanco inclinado en la imagen. *nl* es el número de líneas sobre las que se integra.
Este ángulo fue determinado promediando los ángulos de varias rectas trazadas a mano. Para el caso del barrido horizontal quedo determinado en 0.0288 radianes, y 0.045 radianes en el vertical.

La Ilustración 69 muestra las dos funciones que representan el perfil de la reja corregido por el ángulo de inclinación y la distribución de densidad de corriente del haz.

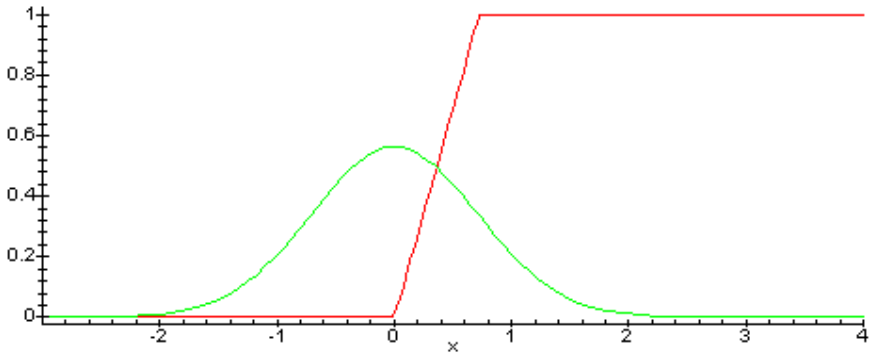


Ilustración 69: Funciones utilizadas para representar el perfil del la reja y la distribución de densidad de corriente del haz.

La información obtenida en los histogramas es el resultado de la convolución de estas dos funciones:

$$y = \int_{-\infty}^{\infty} g(x-t)\cdot r(t)\cdot dt$$

Ecuación 111

Como la Ecuación 109 está definida por partes, queda:

$$y = \frac{1}{b\cdot s\cdot\sqrt{\pi}}\cdot\int_{0}^{b} e^{-\left(x-t/s\right)^2}\cdot t\cdot dt + \frac{1}{s\cdot\sqrt{\pi}}\cdot\int_{b}^{\infty} e^{-\left(x-t/s\right)^2}\cdot dt$$

Ecuación 112

En la Ilustración 70 está graficada la convolución, superpuesta al perfil de la reja.

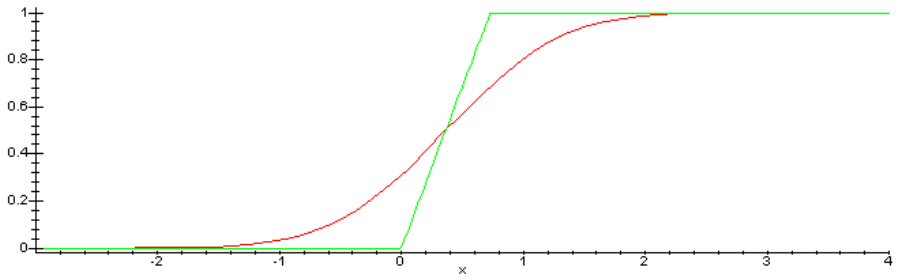


Ilustración 70: Función utilizada para representar el perfil de la reja, y la misma convolucionada con la función que representa el perfil del haz.

Para ajustar todo un histograma a la vez, se llegó a la siguiente expresión:

$$y := \left(-1+\left(1-\left(\frac{.2820947918\ p1\left(\mathbf{e}^{-\frac{(.7198-x+p3)^2}{p1^2}}+\mathbf{e}^{-\frac{(x-p3)^2}{p1^2}}\right)}{.7198}+\frac{1-\operatorname{erf}\left(\frac{.7198-x+p3}{p1}\right)}{2}+\frac{(x-p3)\left(\operatorname{erf}\left(\frac{.7198-x+p3}{p1}\right)+\operatorname{erf}\left(\frac{x-p3}{p1}\right)\right)}{2\ .7198}\right)\right)\right.$$
$$+\left(\frac{.2820947918\ p1\left(\mathbf{e}^{-\frac{(.7198-x+p4)^2}{p1^2}}+\mathbf{e}^{-\frac{(x-p4)^2}{p1^2}}\right)}{.7198}+\frac{1-\operatorname{erf}\left(\frac{.7198-x+p4}{p1}\right)}{2}+\frac{(x-p4)\left(\operatorname{erf}\left(\frac{.7198-x+p4}{p1}\right)+\operatorname{erf}\left(\frac{x-p4}{p1}\right)\right)}{2\ .7198}\right)$$
$$+\left(1-\left(\frac{.2820947918\ p1\left(\mathbf{e}^{-\frac{(.7198-x+p5)^2}{p1^2}}+\mathbf{e}^{-\frac{(x-p5)^2}{p1^2}}\right)}{.7198}+\frac{1-\operatorname{erf}\left(\frac{.7198-x+p5}{p1}\right)}{2}+\frac{(x-p5)\left(\operatorname{erf}\left(\frac{.7198-x+p5}{p1}\right)+\operatorname{erf}\left(\frac{x-p5}{p1}\right)\right)}{2\ .7198}\right)\right)$$
$$\left.+\left(\frac{.2820947918\ p1\left(\mathbf{e}^{-\frac{(.7198-x+p6)^2}{p1^2}}+\mathbf{e}^{-\frac{(x-p6)^2}{p1^2}}\right)}{.7198}+\frac{1-\operatorname{erf}\left(\frac{.7198-x+p6}{p1}\right)}{2}+\frac{(x-p6)\left(\operatorname{erf}\left(\frac{.7198-x+p6}{p1}\right)+\operatorname{erf}\left(\frac{x-p6}{p1}\right)\right)}{2\ .7198}\right)\right)p2$$

Ecuación 113

donde se alternan dos flancos de bajada y dos de subida. En esta expresión el parámetro b fue sustituido por su valor (0.7198). Los parámetros a ajustar, p1 a p6 representan:

Parámetro	***Significado***
P1	Parámetro de ancho de la normal
P2	Factor de altura
P3	posición 1er flanco de bajada
P4	posición 1er flanco de subida
P5	posición 2do flanco de bajada
P6	posición 2do flanco de subida

Tabla 15

La Ilustración 71 presenta esta ecuación, superpuesta el perfil de la reja.

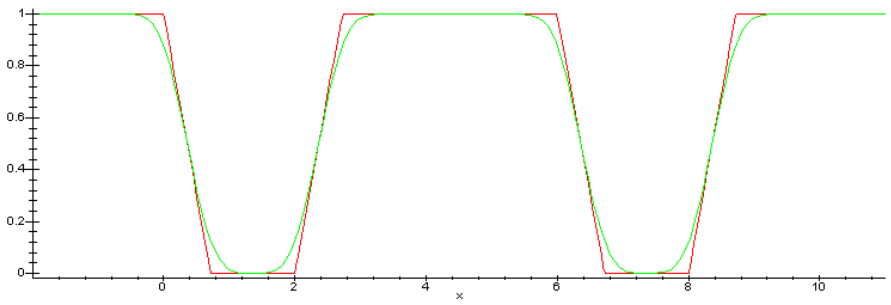


Ilustración 71: En rojo, modelo utilizado para representar el perfil de la reja, tomando en cuenta el ángulo de inclinación. En verde, función presentada en la Ecuación 98 con el parámetro de ancho P1 igual a 1.

Las siguientes ilustraciones presentan los ajustes a los histogramas de las cuatro regiones:

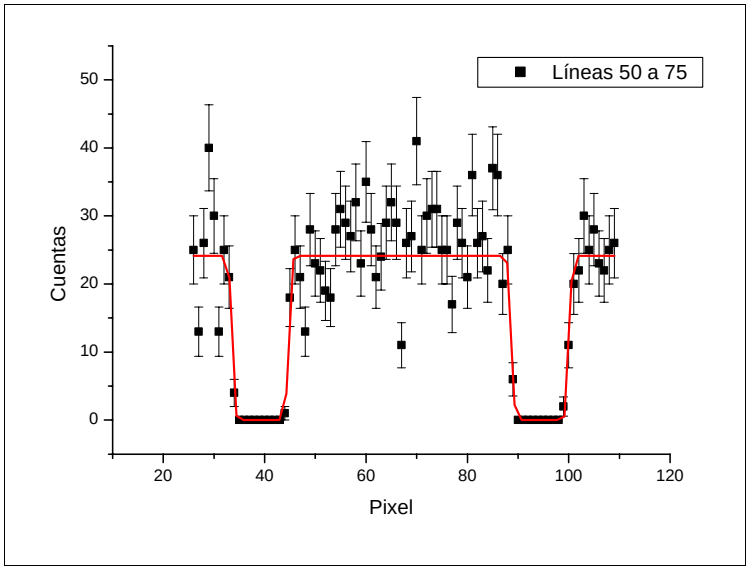


Ilustración 72: Histograma obtenido al integrar todas las líneas de la 1er región seleccionada, con el resultado del ajuste superpuesto.

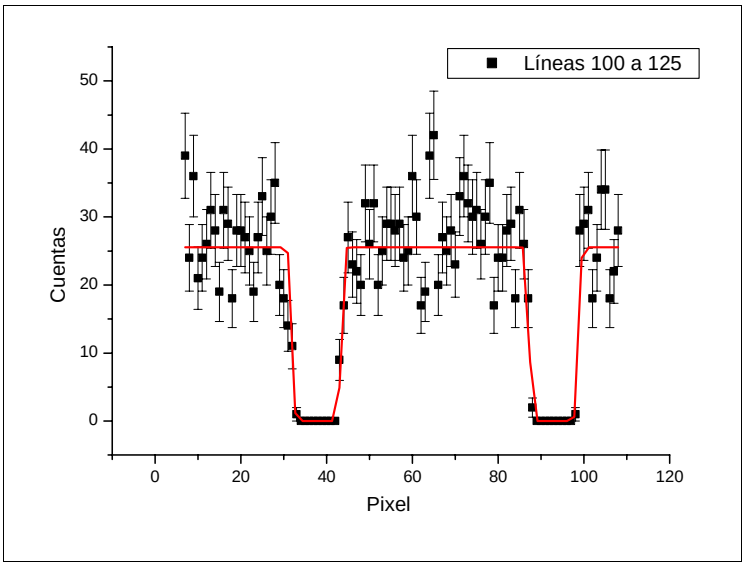


Ilustración 73: Histograma obtenido al integrar todas las líneas de la 2da región seleccionada, con el resultado del ajuste superpuesto.

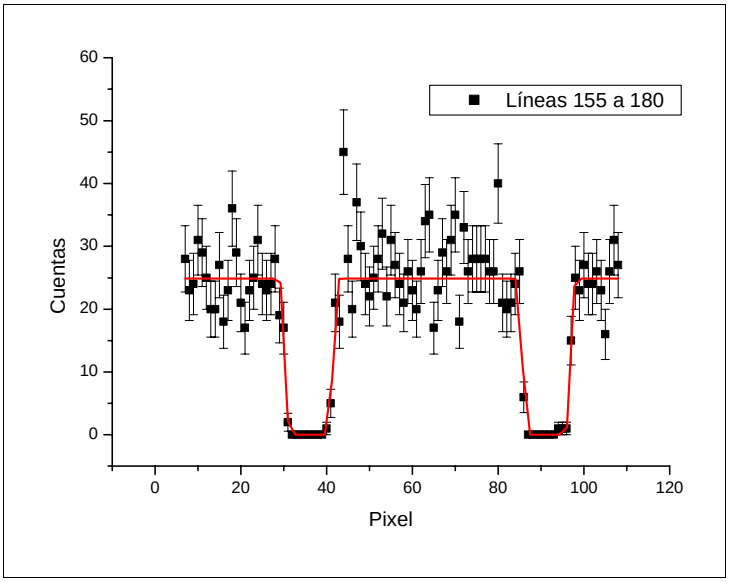


Ilustración 74: Histograma obtenido al integrar todas las líneas de la 3er región seleccionada, con el resultado del ajuste superpuesto.

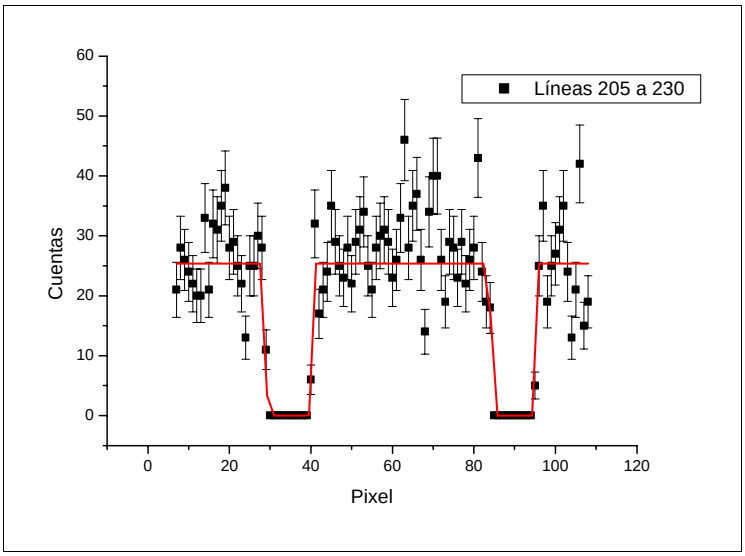


Ilustración 75: Histograma obtenido al integrar todas las líneas de la 4ta región seleccionada, con el resultado del ajuste superpuesto.

La siguiente tabla presenta los resultados de los ajustes y algunos cálculos básicos para obtener las medidas de los anchos de las barras, del espacio entre ellas, el cálculo de la periodicidad de la reja (nomenclado como paso), y el ancho a mitad de altura. Todas estas medidas están expresadas en unidades de píxeles.

Línea 50 a 75		$\chi^2 = 1.34$		Valor [px]	Error [px]
	Valor [px]	Error [px]	barra 1	11.20	0.27
P1	0.59	0.18	barra 2	11.40	0.28
P2	24.14	0.75	espacio	43.94	0.26
P3	33.19	0.17	paso 1	55.14	0.23
P4	44.39	0.21	paso 2	55.34	0.31
P5	88.33	0.16	FWHM	0.97	0.30
P6	99.73	0.23			
Línea 100 a 125		$\chi^2 = 1.15$	barra 1	11.51	0.27
P1	0.62	0.14	barra 2	11.43	0.27
P2	25.54	0.62	espacio	43.88	0.25
P3	31.50	0.17	paso 1	55.39	0.21
P4	43.01	0.21	paso 2	55.31	0.31
P5	86.89	0.14	FWHM	1.03	0.24
P6	98.33	0.23			

Tabla 16

Línea 155 a 180		$\chi^2 = 0.86$	barra 1	11.18	0.22
P1	0.67	0.13	barra 2	11.22	0.23
P2	24.87	0.53	espacio	44.21	0.22
P3	29.90	0.14	paso 1	55.39	0.20
P4	41.08	0.17	paso 2	55.43	0.25
P5	85.29	0.13	FWHM	1.11	0.22
P6	96.51	0.18			
Línea 205 a 230		$\chi^2 = 1.45$	barra 1	11.25	0.33
P1	0.22	1.08	barra 2	11.08	0.82
P2	25.38	0.69	espacio	43.96	0.50
P3	28.59	0.12	paso 1	55.21	0.41
P4	39.84	0.31	paso 2	55.04	0.79
P5	83.80	0.39	FWHM	0.36	1.80
P6	94.88	0.73			

Tabla 16 (cont.)

La siguiente tabla presenta los resultados de algunos cálculos estadísticos sobre los valores obtenidos de los ajustes:

	FWHM [px]	***barra [px]***	***espacio [px]***	***paso [px]***
	0.97	11.20	43.94	55.14
	1.03	11.40	43.88	55.34
	1.11	11.51	44.21	55.39
		11.43	43.96	55.31
		11.18		55.39
		11.22		55.43
		11.25		55.21
		11.08		55.04
promedio	1.04	11.28	44.00	55.28
desvío estándar	0.07	0.15	0.15	0.14

Tabla 17

Teniendo en cuenta que el paso de la reja es de (63 ± 1) μm:

Horizontal	
Factor de conversión	(1.14 ± 0.018) μm
FWHM del haz	(1.18 ± 0.08) μm
Ancho barra	(12.86 ± 0.27) μm
Espacio entre barras	(50.14 ± 0.82) μm

Tabla 18

Con un procedimiento similar se obtienen los parámetros en el sentido vertical:

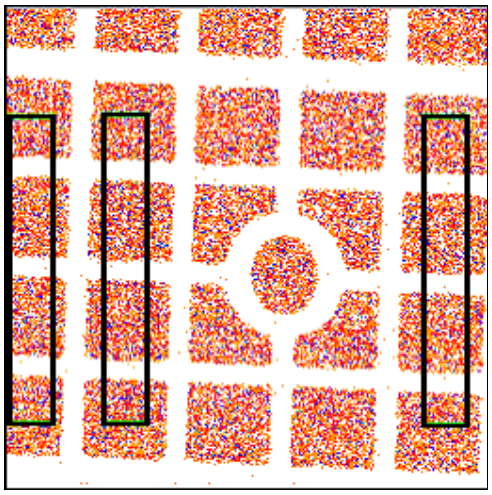


Ilustración 76: Zonas seleccionadas para evaluar el perfil del haz en la dirección Y.

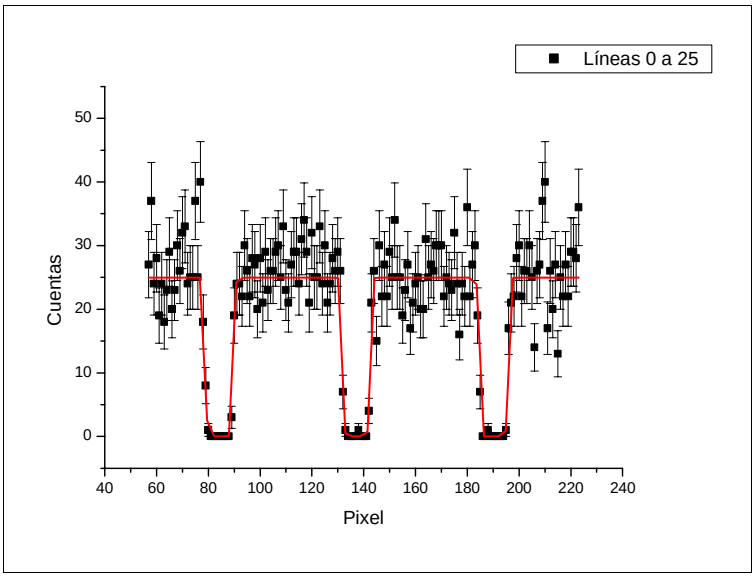


Ilustración 77: Histograma obtenido al integrar todas las líneas de la 1er región seleccionada, con el resultado del ajuste superpuesto.

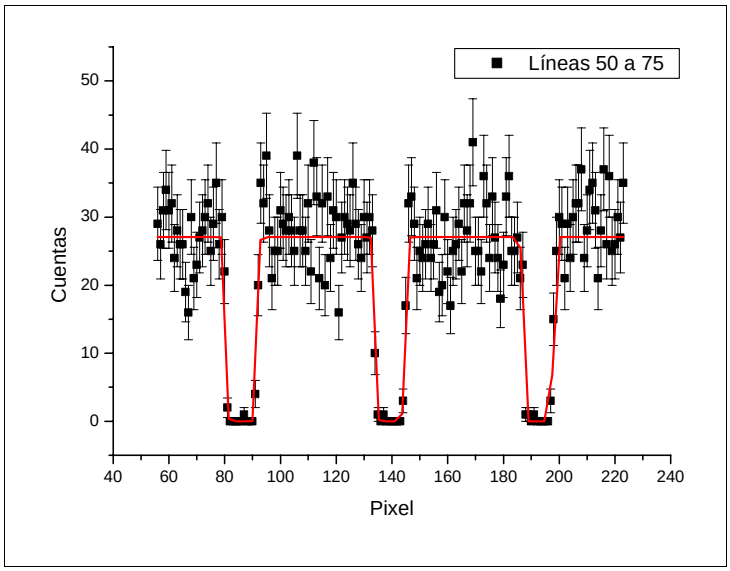


Ilustración 78: Histograma obtenido al integrar todas las líneas de la 2da región seleccionada, con el resultado del ajuste superpuesto.

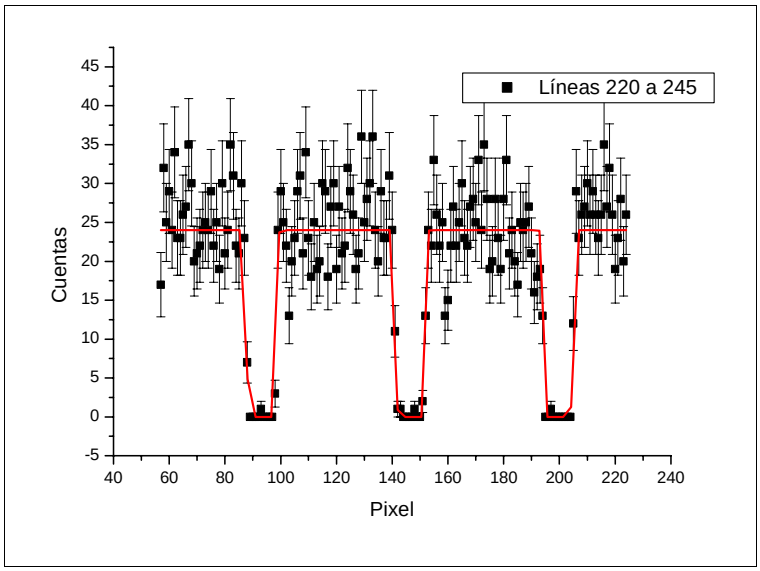


Ilustración 79: Histograma obtenido al integrar todas las líneas de la 3er región seleccionada, con el resultado del ajuste superpuesto.

Línea 0 a 25		$\chi^2 = 0.84$		Valor [px]	Error [px]
	Valor [px]	Error [px]	barra 1	10.90	0.23
P1	0.69	0.13	barra 2	10.77	0.24
P2	24.96	0.41	barra 3	11.30	0.28
P3	78.19	0.14	espacio 1	42.10	0.22
P4	89.09	0.19	espacio 2	42.10	0.25
P5	131.20	0.12	paso 1	53.01	0.18
P6	141.96	0.20	paso 2	52.87	0.28
P7	184.06	0.15	paso 3	52.87	0.19
P8	195.36	0.23	paso 4	53.40	0.31
			FWHM	1.15	0.21
Línea 50 a 75		$\chi^2 = 0.83$	barra 1	11.35	0.21
P1	0.65	0.14	barra 2	10.83	0.22
P2	27.06	0.42	barra 3	10.83	0.23
P3	79.68	0.12	espacio 1	42.31	0.20
P4	91.03	0.18	espacio 2	42.35	0.21
P5	133.34	0.10	paso 1	53.66	0.16
P6	144.17	0.19	paso 2	53.14	0.26
P7	186.52	0.08	paso 3	53.18	0.13
P8	197.35	0.21	paso 4	53.18	0.29
			FWHM	1.09	0.23
Línea 220 a 245		$\chi^2 = 0.88$	barra 1	10.72	0.23
P1	0.46	0.17	barra 2	10.82	0.22
P2	24.00	0.40	barra 3	10.90	0.30
P3	87.17	0.13	espacio 1	42.65	0.21
P4	97.90	0.18	espacio 2	42.10	0.29
P5	140.54	0.09	paso 1	53.37	0.16
P6	151.36	0.20	paso 2	53.47	0.27
P7	193.47	0.20	paso 3	52.92	0.22
P8	204.37	0.22	paso 4	53.01	0.30
			FWHM	0.77	0.29

Tabla 19

	FWHM [px]	*barra [px]*	*espacio [px]*	*paso [px]*
	1.15	10.90	42.10	53.01
	1.09	10.77	42.10	52.87
	0.77	11.30	42.31	52.87
		11.35	42.35	53.40
		10.83	42.65	53.66
		10.83	42.10	53.14
		10.72		53.18
		10.82		53.18
		10.90		53.37
				53.47
				52.92
				53.01
promedio	1.00	10.94	42.27	53.17
desvío estándar	0.20	0.23	0.22	0.26

Tabla 20

Vertical	
Factor de conversión	(1.18±0.02) μm
FWHM del haz	(1.19±0.24) μm
Ancho barra	(12.1±0.32) μm
Espacio entre barras	(50.08±0.87) μm

Tabla 21

El tamaño de la barra de la reja, promediando ambos resultados, resulta 12.48μm ± 0.42μm

Ajuste de espectros PIXE para determinar el tamaño del haz.

La siguiente ilustración presenta la imagen óptica de la reja de cobre, con los bordes resaltados[35]:

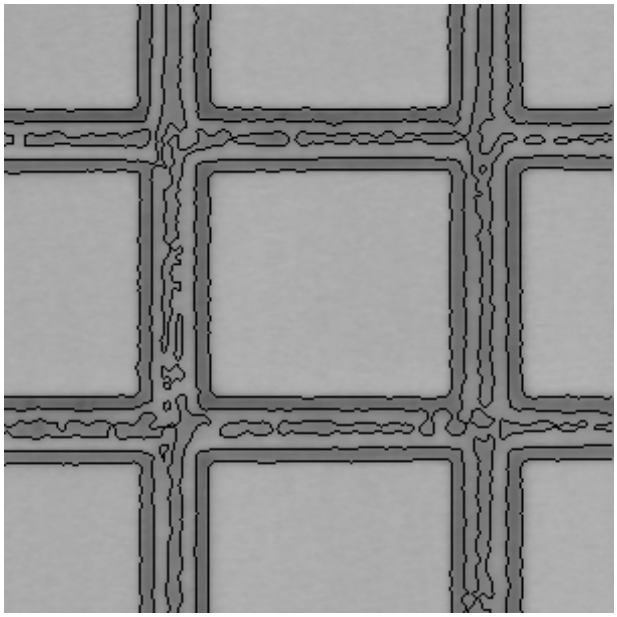


Ilustración 80: Imagen óptica de la reja de cobre con los bordes resaltados.

Principalmente se observan dos características. Primero, que las barras parecen tener un escalón hacia los costados, y una marcada irregularidad en la parte central de la reja, atribuida al ataque químico utilizado para la confección de la reja.

Del espectro de STIM obtenido de la reja se puede obtener información extra sobre el perfil de la reja, en concreto, sobre la distribución de la masa de Cu, que refleja el espesor si se considera una densidad constante. Esta información debería confirmar lo visto en la imagen óptica.

[35] Utilizando el filtro Edge-detector LoG del software GNU GIMP[46]

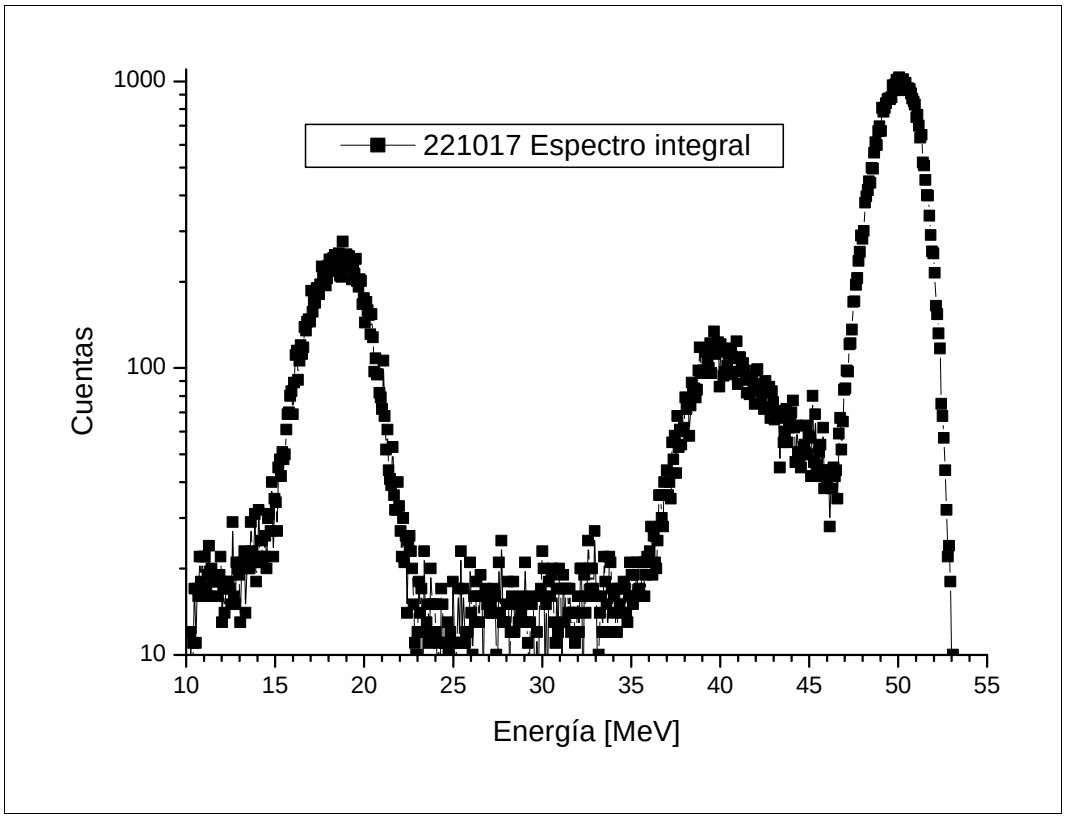


Ilustración 81: Espectro de energías de los proyectiles (^{16}O) medido con detector de barrera de superficie.

Las siguientes tablas presentan los resultados obtenidos al ajustar distribuciones normales de la forma

$$y = y_0 + \frac{A}{w \cdot \sqrt{\pi/2}} \cdot e^{-2\frac{(x-xc)^2}{w^2}}$$

Ecuación 114

a los picos gaussianos del espectro de STIM:

χ^2		
1.42729		
Parameter	Value	Error
y0	10.61922	1.23038
xc	18.4902	0.01939
w	3.216	0.04802
A	929.53351	15.49559

Tabla 22

χ^2		
4.34376		
Parameter	Value	Error
y0	0.03463	0.19294
xc	49.89568	0.01252
w	2.33057	0.01722
A	3030.05256	31.25011

Tabla 23

El pico situado en 18.5 MeV indica que el espesor de la zona central de la reja es de 9.25 μm, y el hecho de que su dispersión en energía sea mínima (comparando su *w* con el del pico de 50 MeV) indica una aparente constancia en ese ancho. Esto indica que la irregularidad atribuida al ataque químico realmente no es muy grande, en lo que a variación del espesor se refiere.

Alrededor de 40 MeV se encuentra el pico correspondiente a la periferia de las barras de la reja. La Ilustración 82 muestra la correlación entre el mapa que se obtiene ventaneando este pico y la imagen óptica de la reja.

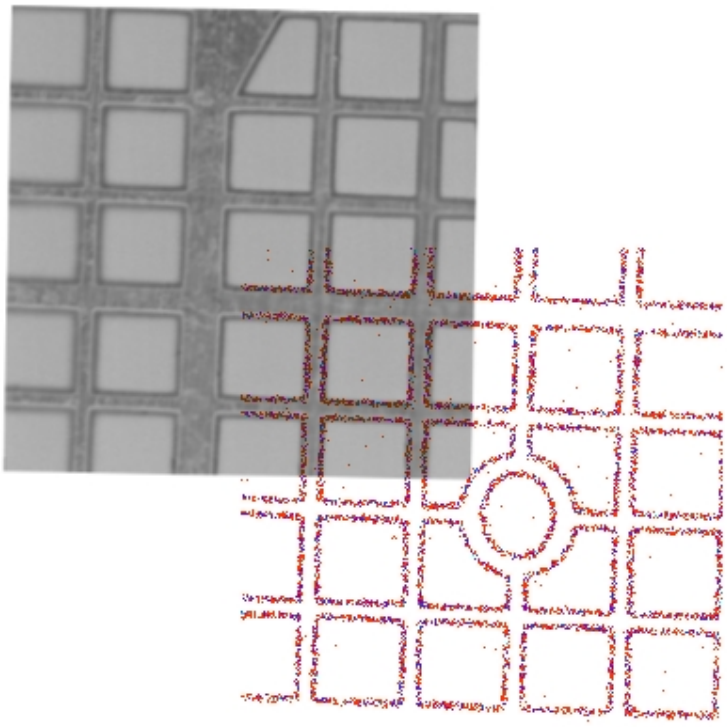


Ilustración 82: Superposición del mapa generado al ventanear los iones con energía levemente degradada y la imagen óptica.

La cola hacia altas energías que tiene este pico da información acerca del perfil de esta región. Reemplazando el eje de energía por el correspondiente espesor de cobre que representa se llegó a la Ilustración 83, donde cada punto representa el área de un entorno de 1 MeV alrededor de la energía correspondiente al ancho especificado en el eje X.

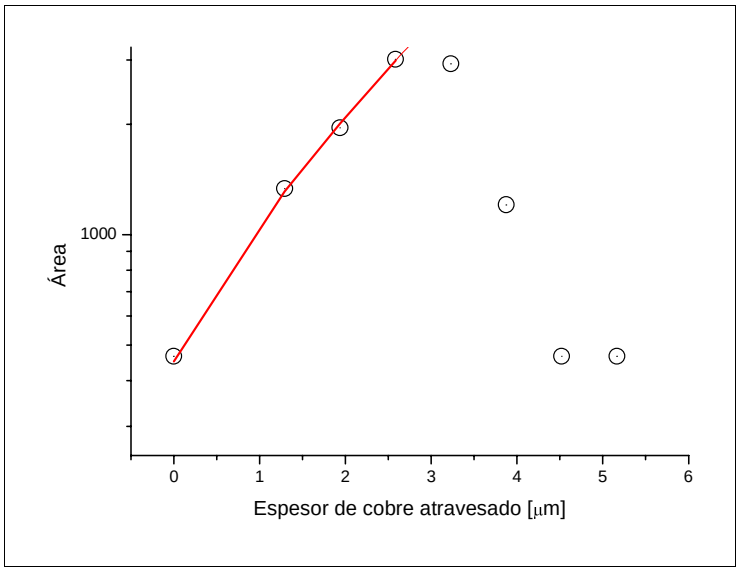


Ilustración 83: Distribución de los iones que atraviesan la reja con energía levemente degradada, en función del espesor atravesado. También se presenta el resultado del ajuste con un modelo exponencial en el flanco de subida.

El ajuste sobre la cola hacia altas energías, que en este gráfico está como una cola hacia espesor cero, dio:

$$y = 774 \cdot e^{0.5617977528 \cdot x} - 765$$

Ecuación 115

Suponiendo que esta distribución representa un aumento gradual en el espesor de la reja (o lo que es lo mismo, la cantidad de masa), el espesor y_r a una cierta distancia del borde x_r quedará definido por la integral:

$$x_r = \frac{\int_0^{y_r} y(x) \cdot dx}{\int_0^{3.23} y(x) \cdot dx}$$

Ecuación 116

Donde el denominador se encarga de normalizar los valores de x_r entre 0 y 1.
Graficando $y_r = f(x_r)$:

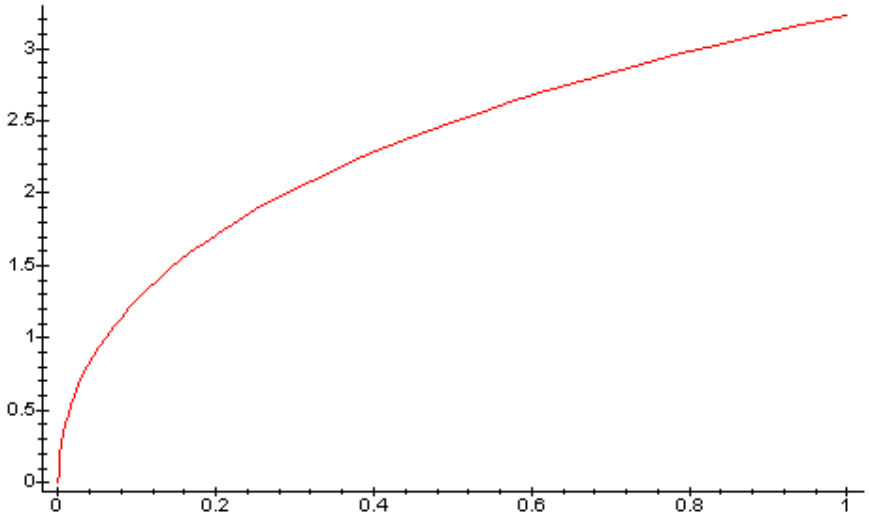


Ilustración 84: Modelo propuesto para la distribución de cobre en los bordes de la reja.

Para manejar analíticamente esta función, se reemplazó por la ecuación

$$y_r = \ln(1.256 + 22.45 \cdot x_r)$$

Ecuación 117

para representar el perfil de la reja.

Como se vio en la sección “PIXE”, el área de un pico utilizando esta técnica cuando se considera que el ión pierde energía mientras atraviesa el blanco es:

$$A(Z) = N_p \cdot C(Z) \cdot \frac{1}{\Delta E} \cdot \int_{E_i}^{E_f} \frac{\sigma_Z(E) \cdot T_Z(E)}{\rho^{-1} \cdot \frac{dE}{dx}} \cdot dE$$

Ecuación 118

Obviando todos los términos constantes, y despreciando la autoabsorción en la muestra, la producción de rayos X cuando el haz impacta en la reja de cobre es proporcional a:

$$A(E_i, E_f) \propto \int_{E_i}^{E_f} \frac{\sigma_Z(E)}{\frac{dE}{dx}(E)} \cdot dE$$

Ecuación 119

El siguiente gráfico presenta los valores de dE/dx para ^{16}O ingresando en cobre, y el ajuste realizado sobre el intervalo comprendido entre 20 y 50 MeV:

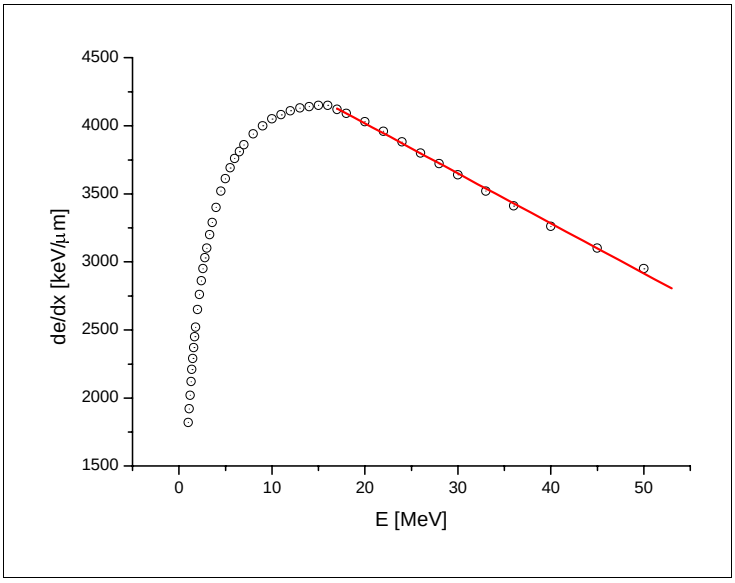


Ilustración 85: dE/dx para ^{16}O ingresando en cobre. También se presenta el ajuste lineal realizado sobre la zona para iones de mayor energía.

La sección eficaz de producción en las mismas condiciones, junto con el ajuste que se le realizó, se presentan en el siguiente gráfico:

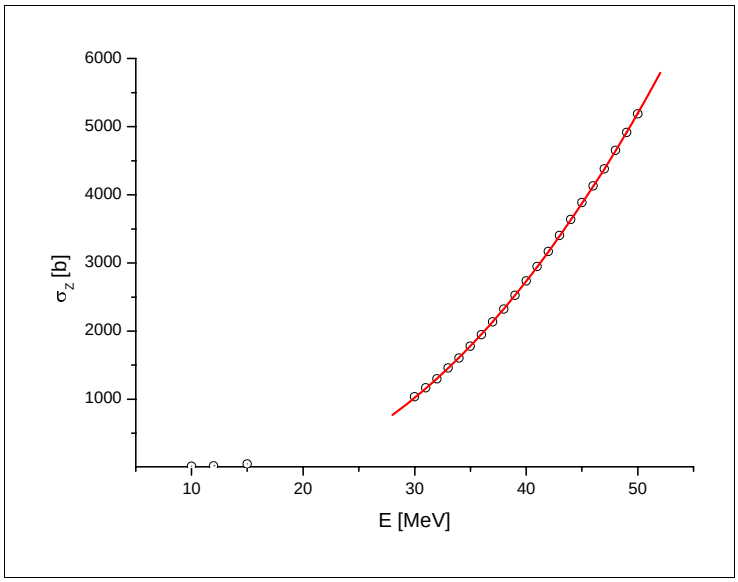


Ilustración 86: Sección eficaz de producción para ^{16}O ingresando en cobre. También se presenta el ajuste realizado.

Los resultados de los ajustes fueron las funciones:

$$\frac{dE}{dx}(E) = 4752.74578 - 36.75199 \cdot \mathrm{E}$$

Ecuación 120

$$\sigma_Z(E) = 451.94603 - 95.10108 \cdot \mathrm{E} + 3.80242 \cdot \mathrm{E}^2$$

Ecuación 121

Con lo que el resultado de la Ecuación 119 integrando entre 50 MeV y una energía de final E_f resulta:

$$A(E_f) \propto -28109.85516 + .05173080424 \cdot E_f{}^2 + 10.79195012 \cdot E_f + \\ + 1407.905842 \cdot \ln(475274578 - 3675199 \cdot E_f)$$

Ecuación 122

El siguiente gráfico, obtenido al integrar el dE/dx del cobre, muestra la relación entre la energía de salida del ión, y el espesor de cobre atravesado, y el ajuste lineal que se le realizó:

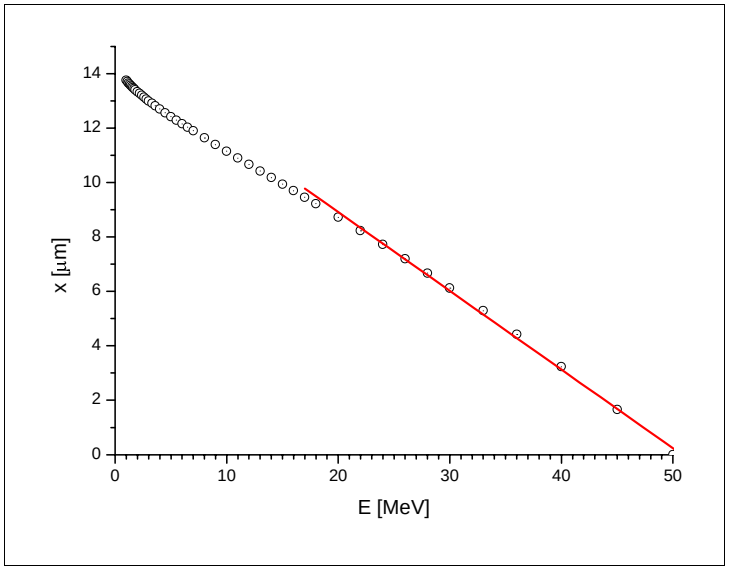


Ilustración 87: Espesor de cobre que tiene que atravesar un ión de ^{16}O para que su energía baje de 50 a E MeV. También se presenta el ajuste lineal realizado sobre la zona de mayor energía.

Con la información obtenida de este ajuste es posible hacer un cambio de variables, y expresar la Ecuación 122 en términos del espesor de la reja, *h*.

$$A(h) \propto -27570.25765 + .05173080424 \cdot (-3.440366973 \cdot h + 50)^2 - \\ - 37.12826877 \cdot h + 1407.905842 \cdot \ln(291514628. + 12644033.26 \cdot h)$$

Ecuación 123

Sin tomar en cuenta las constantes de proporcionalidad, esta ecuación puede ser aproximada por una función de la forma:

$$p(h) = 1 - e^{-k \cdot h}$$

Ecuación 124

donde *h* es el espesor de Cu en la zona de la reja en que le pega el haz, expresado en µm, y la constante de forma *k* resulta 0.319 μm^{-1}.

En el siguiente gráfico se observa el modelo propuesto para representar el perfil de la reja de cobre:

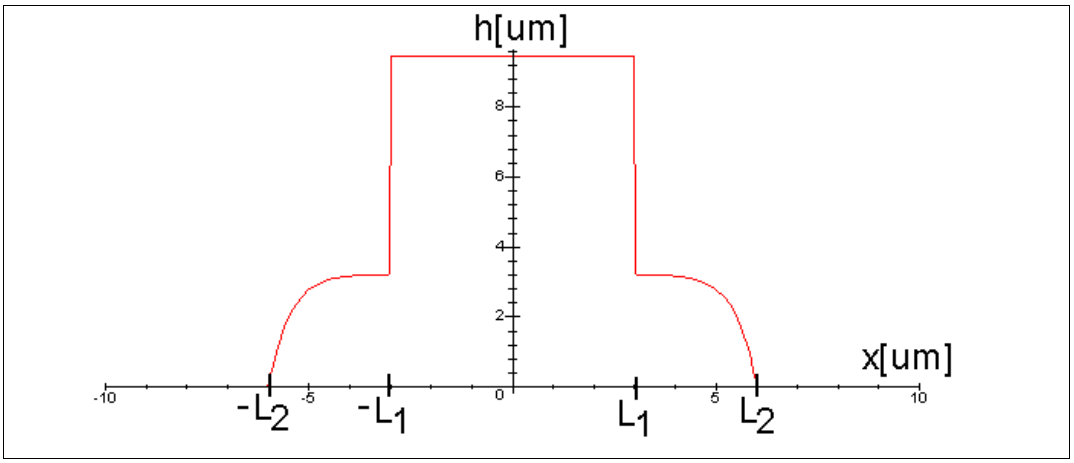


Ilustración 88: Modelo propuesto para representar la distribución de masa de cobre a lo largo del perfil de una barra de la reja.

modelado como una zona plana entre las coordenadas –l1 y l1, y dos zonas con el perfil que se determinó previamente. La Ecuación 117 requiere un cambio de coordenadas para que el dominio pase de [0 ... 1] a [l2 ... l1]:

$$h_1 = \frac{3.23\mu m}{\ln(1.256+22.45)} \cdot \ln\left(1.256+22.45 \cdot \frac{l2-x}{l2-l1} \cdot\right)$$

Ecuación 125

$$h_1 = \frac{3.23\mu m}{\ln(1.256+22.45)} \cdot \ln\left(1.256+22.45 \cdot \frac{l2}{l2-l1} - \frac{22.45}{l2-l1} \cdot x\right)$$

Ecuación 126

introduciendo las constantes

$$\alpha = \frac{3.23\mu m}{\ln(1.256+22.45)}$$

Ecuación 127

$$\beta = 1.256+22.45 \cdot \frac{l2}{l2-l1}$$

Ecuación 128

$$\gamma = \frac{22.45}{l2-l1}$$

Ecuación 129

resulta

$$h_1 = \alpha \cdot \ln(\beta - \gamma \cdot x)$$

Ecuación 130

y *h* en función de la posición

$$h = \begin{cases} \alpha \cdot \ln(\beta + \gamma \cdot x) & -l2 \le x \le -l1 \\ 9.25\mu m & -l1 < x < l1 \\ \alpha \cdot \ln(\beta - \gamma \cdot x) & l1 \le x \le l2 \end{cases}$$

Ecuación 131

Reemplazando h en la Ecuación 124:

$$p = \begin{cases} 1 - e^{-k \cdot \alpha \cdot \ln(\beta + \gamma \cdot x)} & -l2 \le x \le -l1 \\ 1 - e^{-k \cdot 9.25\mu m} \cong 1 & -l1 < x < l1 \\ 1 - e^{-k \cdot \alpha \cdot \ln(\beta - \gamma \cdot x)} & l1 \le x \le l2 \end{cases}$$

Ecuación 132

o, simplificando

$$p = \begin{cases} 1 - (\beta + \gamma \cdot x)^{-k \cdot \alpha} & -l2 \le x \le -l1 \\ 1 & -l1 < x < l1 \\ 1 - (\beta - \gamma \cdot x)^{-k \cdot \alpha} & l1 \le x \le l2 \end{cases}$$

Ecuación 133

El modelo utilizado para modelar al microhaz, no es el mismo que se utilizó para modelarlo en el experimento de STIM.

Cuando se hace STIM los colimadores objeto son cerrados a dimensiones del orden de unos pocos microns limitando la cantidad de iones que ingresan al microhaz. Si se toma en consideración la demagnificación típica de la lente, el microhaz debería tener dimensiones muy inferiores al micrón. Por ejemplo, si los colimadores objeto se cierran a 5 x 5 μm^2, el microhaz debería ser 80 veces más chico en el eje vertical y 25 en el horizontal, resultando un haz de 0.2 x 0.06 μm^2. El haz medido, sin embargo, tiene aproximadamente 1 x 1 μm^2, por lo que se considera que algún factor (sobre el cual se discutirá más adelante) agranda el haz. Este efecto es el modelado por la distribución normal.

En cambio, en PIXE, los colimadores se encuentran abiertos para proyectar una imagen de dimensiones considerables. En el caso del experimento que se analizará a continuación, se espera un microhaz de 1.75 x 1.75 μm^2, por lo que se utiliza otro modelo formado por una zona central donde se espera una densidad de corriente constante, con una cola a cada lado formada por la mitad de una distribución normal:

$$g = \begin{cases} \frac{1}{s \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{x+a}{s}\right)^2} & x < -a \\ \frac{1}{s \cdot \sqrt{\pi}} & -a < x < a \\ \frac{1}{s \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{x-a}{s}\right)^2} & x > a \end{cases}$$

Ecuación 134

El área de la reja comprendida entre -l2 a -l1 más la comprendida entre l1 y l2 es proporcional al área del pico de 40 MeV del espectro de STIM. De la misma forma, el área comprendida entre -l1 y l1 es proporcional al pico de 18 MeV. Por lo tanto, la relación entre ambas áreas puede calcularse de las áreas de los picos en el espectro de STIM.
Estas áreas están definidas como

$$A_{pico\,40MeV} \propto 2 \cdot (l2 - l1) \cdot \Delta_a$$

Ecuación 135

$$A_{pico\ 18\ MeV} \propto 2 \cdot l1 \cdot \Delta_b$$

Ecuación 136

donde Δa y Δb dan cuenta de la longitud a lo largo de la barra sobre la cual se evalúa la superficie.

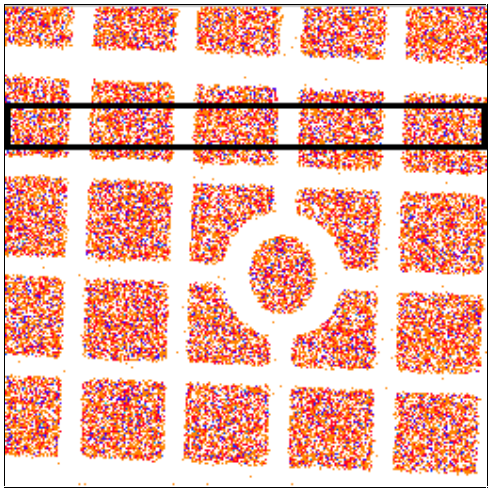


Ilustración 89: Zona del mapa de STIM considerada para obtener la relación entre l1 y l2.

Seleccionando la región sobre la cual se evalúa el área de los picos como se muestra en la Ilustración 89, Δa y Δb son iguales, y la relación entre l1 y l2 queda:

$$\frac{l1}{l2} = \frac{A_{pico18MeV}}{A_{pico40MeV} + A_{pico18MeV}}$$

La siguiente ilustración muestra el espectro ventaneando la región indicada en la Ilustración 89:

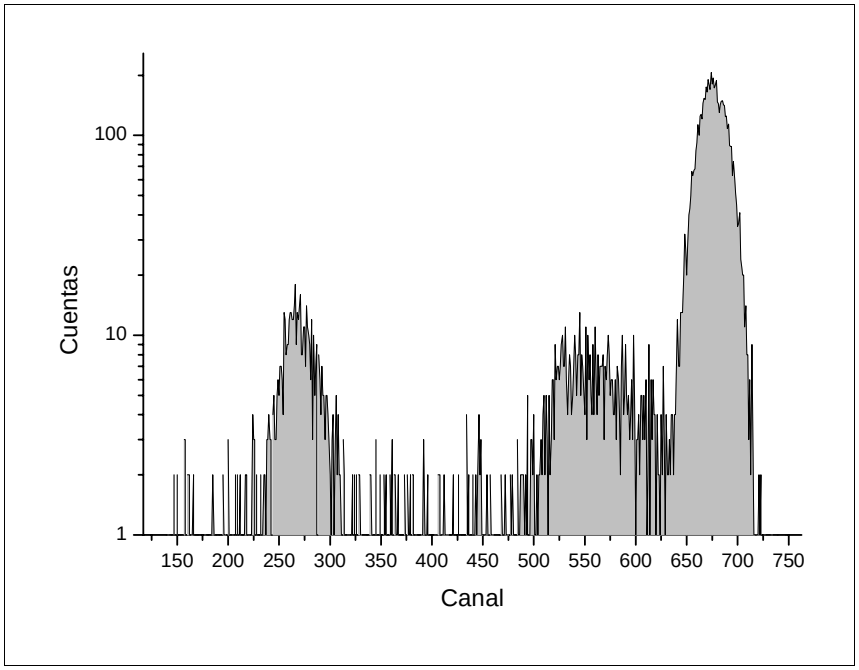


Ilustración 90: Espectro obtenido al integrar la zona del mapa de STIM considerada para obtener la relación entre l1 y l2.

Las áreas de los dos picos considerados, y de una porción de fondo del espectro son:

Zona	***Canales***	***Área***
Pico de 18 MeV	231 --> 318	520.5
Pico de 40 MeV	477 --> 630	716
Fondo	339 --> 475	126.5

Tabla 24

Del área del fondo se calcula que el nivel de fondo es de 1.3177 cuentas por canal. Descontando el fondo de los picos se obtiene que el área conjunta de los picos de 18 y 40 MeV es de 1187.74 cuentas[36], y el área del pico de 18 MeV es 504.69 cuentas[37]. Teniendo en cuenta que el espesor medido de l2 es de 12.48 μm, l1 resulta 5.3 μm.

Esto determina que la función a ajustar es la resultante del producto de convolución entre la Ecuación 133 y la Ecuación 134 como se describe en la Ecuación 111, fijando l1, l2, y el parámetro de ancho, s. Este s está relacionado con el FWHM de la gaussiana

[36] (520.5 + 716) – (12 + 25) * 1.3177 = 1187.74
[37] (520.5) – (12) * 1.3177 = 504.69

original (según la Ecuación 108), es decir, la distribución normal de la Ecuación 134 sin agregarle una zona plana central de longitud *2 x a*.
El ajuste fue realizado sin llegar a una solución analítica de la ecuación modelo. El producto de convolución que esta requiere fue calculado numéricamente por el mismo programa que realizó el ajuste. Al mismo tiempo, se realizó un cambio de variable, reemplazando la *x* por $(x-x_0)$ para dejar libre el centroide de las distribuciones a ajustar.
La Ilustración 91 y la Ilustración 92 presentan el conjunto de datos sobre los que se realizó el ajuste, en las regiones indicadas en la Tabla 25.

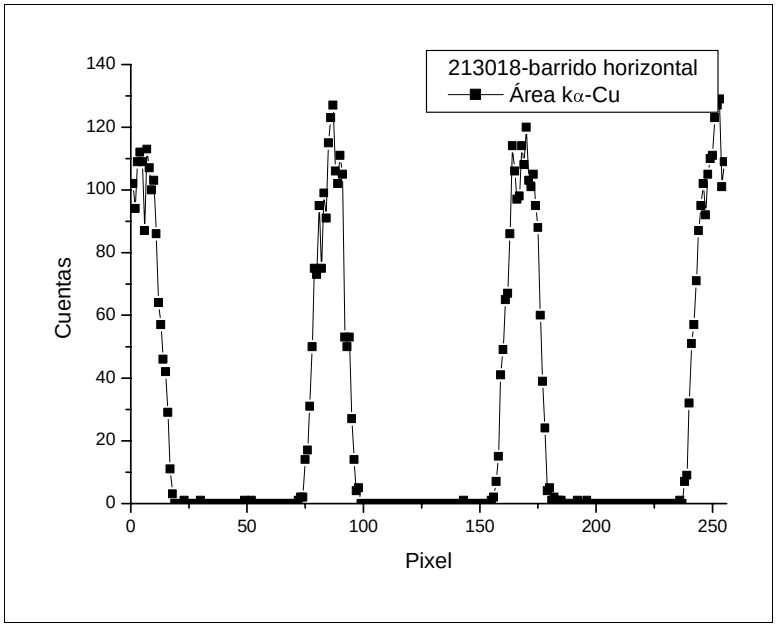


Ilustración 91: Distribución del área del pico de cobre al barrer la reja en sentido horizontal.

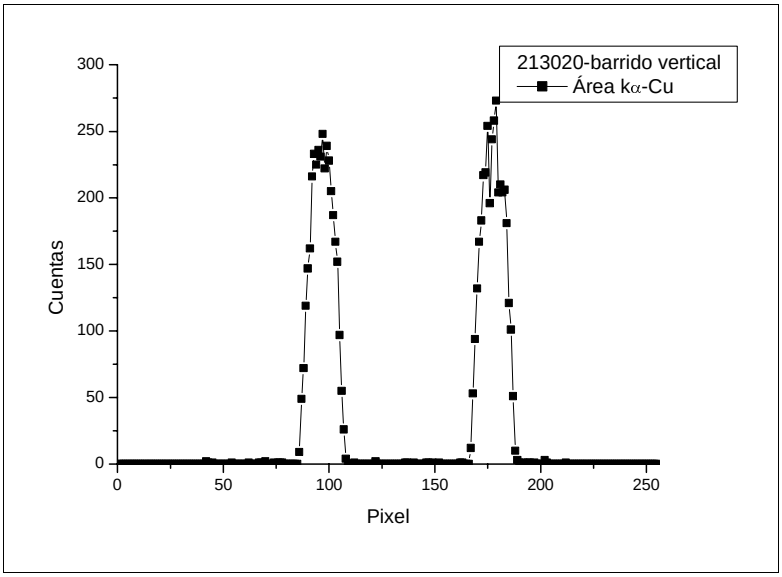


Ilustración 92: Distribución del área del pico de cobre al barrer la reja en sentido vertical.

Espectro	*Región*	x_0	*s*	*h*	*a*	χ^2
213018	60 – 120	84.85	0.78	132.00	3.69	0.95
213018	140 – 200	167.15	0.78	138.00	3.80	1.46
213020	70 – 120	95.80	0.76	295.50	3.19	2.41
213020	120 – 250	176.55	0.76	295.51	3.00	1.49

Tabla 25

Esta tabla además presenta el resultado de los ajustes sobre las cuatro barras. Los parámetros dejados libres fueron el centroide de la distribución x_0, un factor de escala para ajustar la altura de los picos *h*, y la longitud de la zona plana del modelo de distribución de corriente del haz *a x 2*.

La siguiente tabla resume los valores obtenidos del ancho del haz[38]:

	213018 Horizontal	***213020 Vertical***
Factor de conversión	1.306	1.282
a	(3.748 ± 0.078) px	(3.095 ± 0.134) px
	(2.869 ± 0.060) μm	(2.415 ± 0.105) μm
zona plana del haz	(5.738 ± 0.120) μm	(4.829 ± 0.210) μm
FWHM gaussiana	1 μm	1 μm
FWHM total del haz	(6.738 ± 0.120) μm	(5.829 ± 0.210) μm

Tabla 26

[38] Comparar estos valores con los obtenidos en la sección “Medición 213018”: (7 ± 1.2) (Horizontal) x (5.5 ± 1.2) (Vertical) μm^2.

Instrumentación para el guiado del haz.

Para el guiado del haz hasta la cámara de irradiación se utilizan una serie de dispositivos siguiendo el procedimiento descrito a continuación. Para seguir la explicación, referirse a la Ilustración 93.

Primeramente, siguiendo el procedimiento estándar usado en todas las líneas experimentales del acelerador Tandar, el operador inyecta el haz en la línea, valiéndose de la copa de Faraday (FC a la salida del imán analizador) y del monitor de perfil del haz (BPM, Beam Profile Monitor) para verificar las dimensiones y la corriente del haz. Inmediatamente se retira la FC y se enfoca el haz en la primer pantalla fosforescente. Esta pantalla tiene en el centro un agujero de 4 mm de diámetro. Como la pantalla está centrada-alineada con las aperturas objeto, que típicamente están abiertas a no más de 1 x 1 mm^2, se enfoca y centra el haz sobre la pantalla de forma tal que la mayor parte pase por el agujero. De esta forma se asegura que el haz cubre todo el agujero del colimador objeto. Para este primer paso, se empieza utilizando corrientes relativamente bajas (del orden de 10 nA) para no quemar la pantalla fosforescente.

Luego, una vez que se hace pasar el haz por el agujero de la pantalla, se incrementa la corriente hasta 100 nA[39] y se abren las aperturas objeto a 2.5 x 2.5 mm^2, y se trabaja con los deflectores magnéticos (steerers) de la línea para centrar el haz en la segunda pantalla fosforescente. Debido a la divergencia que sufre el haz entre la apertura objeto y la segunda pantalla, en general cubre totalmente la pantalla por lo tanto el hecho de centrar el haz, significa hacer que la pantalla quede uniformemente cubierta.

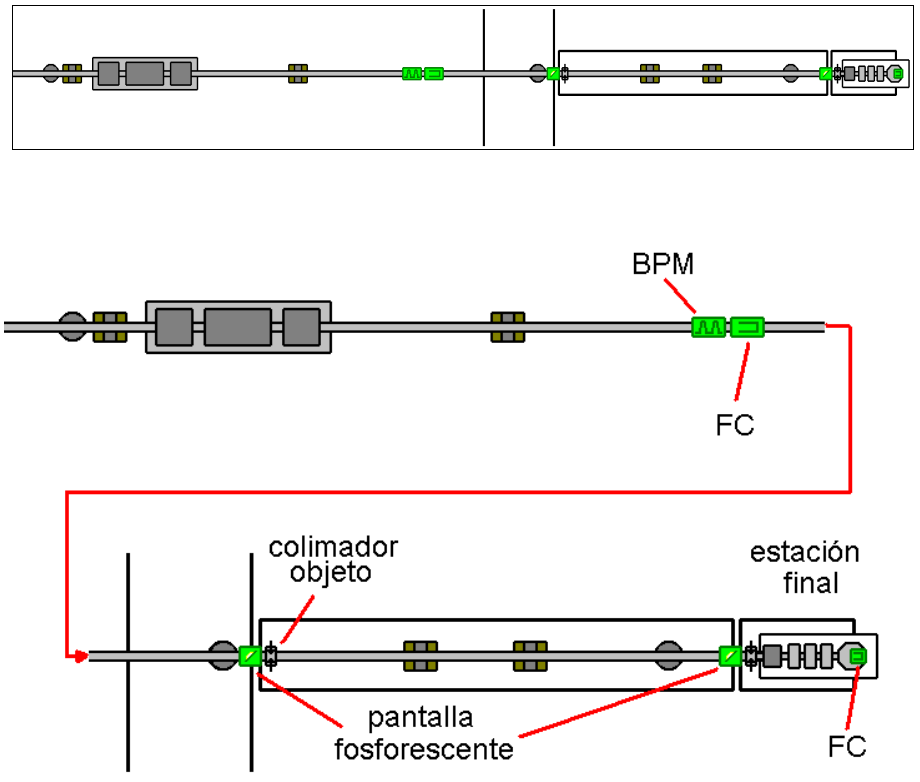


Ilustración 93: Elementos utilizados para el guiado del haz.

[39] Límite impuesto por el oficial de radioprotección.

Esta segunda pantalla, al igual que la primera, tiene un agujero suficientemente grande como para que no interfiera con el colimador antiscattering que se encuentra inmediatamente después. Mientras se intenta centrar el haz sobre ambas pantallas, se coloca la copa de Faraday en la cámara de irradiación. Esta copa tiene una sensibilidad del orden de los fempto-amperes, por lo tanto, no bien se logra enhebrar un poco de haz entre las dos pantallas, el contaje en esta FC empieza a indicar corriente, y el operador del acelerador puede seguir guiando el haz a través del microhaz utilizando esta lectura. El procedimiento de guiado finaliza cuando se maximiza la corriente que ingresa en la cámara de irradiación.
Durante la operación normal del microhaz las pantallas fosforescentes quedan en su posición. La primer pantalla resulta particularmente útil para que el operador del acelerador controle que el haz sigue ingresando correctamente en el microhaz sin interferir con el experimento.

Uso del microscopio para posicionar la muestra.

El procedimiento estándar para posicionar la muestra es el siguiente:
Primero, se coloca la pantalla fosforescente (o vidrio) en el centro de la cámara, y sin ningún tipo de barrido, mirando por el microscopio se enfoca el haz en el centro del campo del mismo. En el caso de que la posición del haz quede a un costado de la cruz del microscopio, se debe mover la muestra en la dirección Z, acercándola o retirándola de la lente magnética.
Una vez que se logra llevar el haz a la posición de la cruz del microscopio, se debe poner en foco el mismo, y se coloca la muestra a irradiar en posición. Es importante, además de hacer coincidir la cruz del microscopio con el centro de la región de la muestra que se desea barrer, mover la muestra en dirección Z para que la imagen que se observa quede en foco sin ajustar el control de foco del microscopio. De lo contrario, la muestra se posicionaría en un plano que no es el plano focal de la lente magnética, con la consecuente degradación de la resolución espacial.

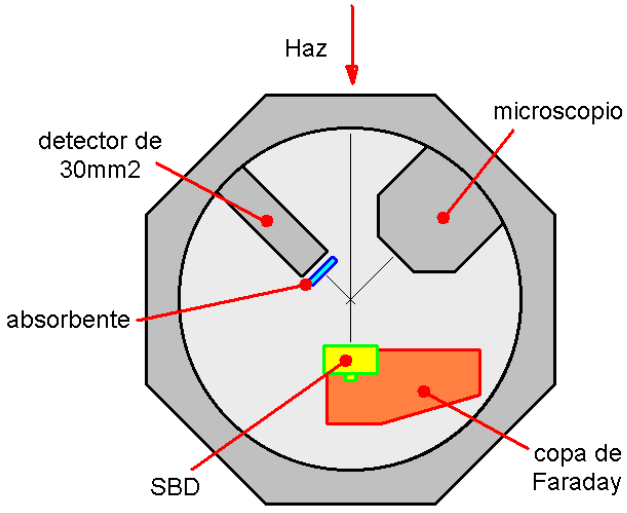


Ilustración 94: La copa de Faraday, los detectores de barrera de superficie y el de rayos X, un atenuador en posición, y el puerto de entrada del microscopio dentro de la cámara de irradiación. En este esquema falta indicar la escalera portamuestra, que ubica la muestra en el centro de la cámara.

Aplicaciones.

Introducción.

La terapia por captura neutrónica (BNCT; en desarrollo a nivel internacional) [54] es una técnica "binaria" para el tratamiento de tumores. En esta técnica se le suministra al paciente una droga con un compuesto que contiene ^{10}B. Esta droga tiene la función de portar el boro hasta las células cancerígenas de manera selectiva. La segunda etapa consiste en irradiar al paciente con neutrones. Dado que el ^{10}B tiene una sección eficaz de captura para neutrones térmicos muy grande se induce a la reacción $n(^{10}B,\alpha)^{7}Li$ sólo en los tejidos cargados con boro. Los fragmentos de esta reacción depositan una gran cantidad de energía (del orden del MeV) en un radio de aproximadamente 10 μm (del orden del diámetro celular) destruyendo sólo las células que han incorporado boro.

La eficiencia de esta técnica depende de dos factores: de la calidad de los neutrones utilizados, y de la selectividad del compuesto portador de boro para concentrarse únicamente en el tejido afectado. En este trabajo se intenta contribuir a este segundo aspecto.
En concreto, los resultados obtenidos contribuyen a estudiar la selectividad a nivel microscópico de una de las drogas portadoras de boro, la tetrafenilporfirina CuTCPH [53], para acumularse en tejidos cancerosos (la molécula de CuTCPH tiene 40 átomos de ^{10}B y un átomo de Cu).
Esta información puede ser muy útil para evaluar el potencial terapéutico y optimizar las estrategias de administración de diferentes compuestos. Este estudio se inscribe en ese contexto y es una colaboración entre físicos y radiobiólogos.

Preparación de las muestras.

Los cortes de tejidos frescos fueron obtenidos a partir de muestras de animales de laboratorio inyectados (y no inyectados como controles) con la droga en cuestión. Se prepararon cortes de tejidos de hígado (nomenclados como H), bolsa de la mejilla normal (BN1), bolsa de la mejilla contralateral (BNC), tumor (T) y tejido precanceroso (TP) de la bolsa de la mejilla de Hámster. Las piezas fueron inmediatamente llevadas a un crióstato y congeladas a temperaturas de entre -10 y –20 ºC a los efectos de evitar cualquier migración de iones que pudiera alterar la distribución in-vivo. Posteriormente se efectuaron cortes de 10 μm de espesor que fueron depositados sobre soportes ultralimpios y ultradelgados (0.15 μm) de policarbonato. Siempre congeladas se transfirieron al liofilizador para la eliminación de la humedad de la muestra.
En resumen, el procedimiento utilizado para la preparación de muestras es:
1. Se obtienen piezas de hamster: hígado, bolsa de mejilla normal, tumor y tejido precanceroso de la bolsa.
2. Cada pieza es seccionada (de ser necesario) en porciones menores de 1cm y colocadas en una cápsula de Petri con camisa de hielo.
3. Dichas piezas se llevan a un criomicrótomo, equipo que permite hacer cortes histológicos congelados, a temperaturas que oscilan entre –10ºC y –20ºC .
4. Se hacen cortes de 10 μm de espesor y se los deposita sobre un backing de policabonato de 0.15 μm de espesor.
5. Luego, son colocados dentro de un recipiente a –20ºC y trasladados a un liofilizador (equipo de vacío que extrae la humedad de las muestras por sublimación), donde permanecen durante toda una noche.
6. La liofilización hace que los cortes se vuelvan extremadamente higroscópicos, por lo que son guardados en un desecador con silicagel hasta su irradiación.

7. En el momento de la misma, las muestras son transportadas en un recipiente especial, con silicagel e introducidas en la cámara de irradiación.
8. Inmediatamente se hace vacío por un sistema de bombeo ultra-limpio (utilizando bombas que no despiden aceite).
9. Una vez irradiadas, el vacío de la cámara se rompe con un gas inerte para evitar el ingreso abrupto de humedad, y son conservadas en las condiciones anteriores.

Instrumentación y planificación del experimento.

Para esta serie de experimentos básicamente se usaron las configuraciones descritas en la sección "Instrumentación.". A esto le faltaría agregar que se utilizó un haz de ^{16}O con una energía de 50 MeV con estado de carga 5+.
Es extremadamente complicado realizar un análisis PIXE del boro porque su línea K es de muy baja energía, 180 eV. El principal problema que se presenta es la autoabsorción de los rayos X en la muestra, es decir, por su baja energía los fotones se atenúan casi completamente en menos de un micrón de tejido, y cualquier análisis PIXE que se realice sólo indicará la concentración de boro a nivel superficial.
Sin embargo, la droga estudiada contiene cobre en una relación determinada por la estequiometría: la cantidad de masa de boro es 6.805 mayor que la de cobre, por lo que en este trabajo se realizó el estudio de la distribución de cobre, y utilizando esta relación se pueden traducir las concentraciones de cobre obtenidas en concentraciones de boro. Las mediciones obtenidas de esta forma fueron contrastadas con otros métodos analíticos útiles para determinar concentraciones de boro y cobre (pero sin resolución espacial). Los resultados obtenidos muestran que la droga es estable y por ende está justificado el uso del factor estequiométrico.

Análisis PIXE de muestras.

El procedimiento de análisis consta de 3 etapas:

- Medición de la sección eficaz de producción del Cu para las energías del haz involucradas en el análisis.
- Determinación de una curva de correlación característica entre la sección eficaz de producción del Cu y el fondo del espectro.
- Generación de mapas de distribución de cobre

Medición de la sección eficaz de producción del Cu para las energías involucradas en el análisis.

Tiempo muerto del sistema de adquisición.

Para determinar el tiempo muerto del sistema de adquisición se colocó un pulser en la entrada de test del preamplificador del detector de Si(Li). Este pulser inyecta a la entrada del preamplificador un pulso de carga equivalente a la carga que inyectaría un rayo X cada 20 ms. Esta cantidad de carga se fijó de forma tal que emule a fotones de 17 keV, una zona del espectro en la que generalmente no aparece ningún fotopico.

Analizando la frecuencia con la cual se almacenan los eventos provenientes del pulser en los archivos modo lista, se puede determinar el tiempo muerto del sistema. Por ejemplo, si la frecuencia media con que aparecen eventos de 17 keV es de 25 Hz, quiere decir que el tiempo muerto es del 50%, o que se pierde 1 de cada 2 eventos.

El tiempo muerto que de esta forma se mide está compuesto por el tiempo muerto de la cadena de amplificación (preamplificador, amplificador, y conformador de pulsos) y del tiempo muerto del sistema de adquisición. El tiempo muerto del detector de Si(Li) de Oxford Instruments puede hacerse despreciable para el rate de eventos de un experimento típico, que generalmente no supera las 500 c/s, lo mismo que se esperaría para el sistema de adquisición[40].
Sorpresivamente, las mediciones del tiempo muerto determinaron que era común que llegue a valores del 80%, o sea, que perdía 4 de cada 5 eventos, o más, por lo que se realizó un estudio detallado de este fenómeno.

Se determinó que debido a razones de hardware (la forma en que en el sistema de adquisición introduce la información a la PC) la adquisición se detiene cuando el software de adquisición está ocupado haciendo alguna tarea. Una de las situaciones en la que esto ocurre, por ejemplo, es cuando alguien despliega un menú dentro del sistema de adquisición. En esta condición, la adquisición y el barrido del haz sobre la muestra, prácticamente se detienen. En la Ilustración 95 se observa un gráfico de la corrección de tiempo muerto (DTC) a cada instante que debe aplicarse al experimento 225002. Un DTC de 3 significa que el sistema sólo adquiere 1 de cada 3 eventos, es decir, pierde 2 de cada 3 eventos.

[40] Nadie esperaría que 500 c/s genere tiempo muerto en un sistema de adquisición medianamente moderno.

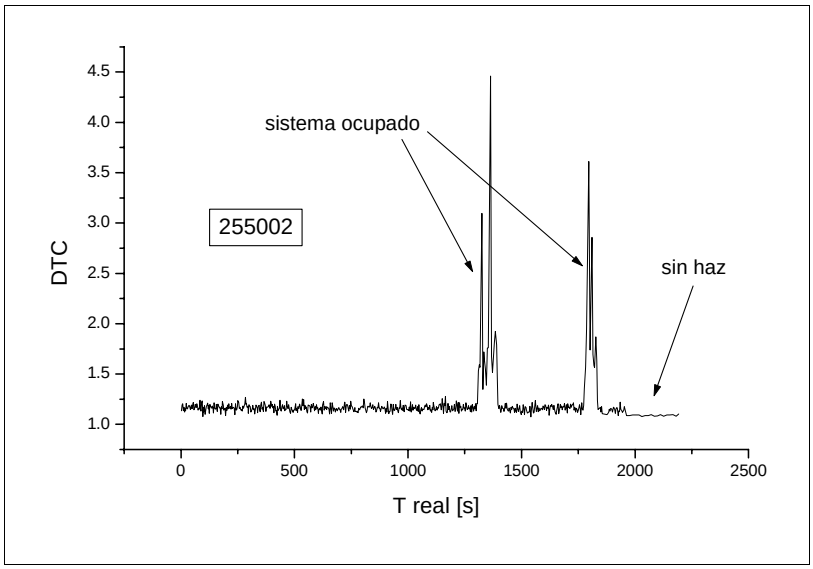


Ilustración 95: Perfil de corrección de tiempo muerto del experimento 255002.

En este gráfico se observan dos momentos en el que el tiempo muerto se elevó considerablemente, debido a que el sistema desvío recursos a otra tarea. También, se ve que hacia el final del experimento, se cortó el haz, por lo que el rate de rayos X generado disminuyó, lo mismo que el tiempo muerto del sistema. Debe tenerse en cuenta que aunque no haya haz, el sistema de adquisición sigue adquiriendo cuentas provenientes del ruido en el detector, que típicamente tienen una frecuencia del orden de los 100 Hz y del generador de pulsos (pulser).
En la Ilustración 96 se muestra el perfil de tiempo muerto en un experimento de alrededor de 12 horas de duración realizado de noche, donde se observa que el haz se cortó por más de una hora.

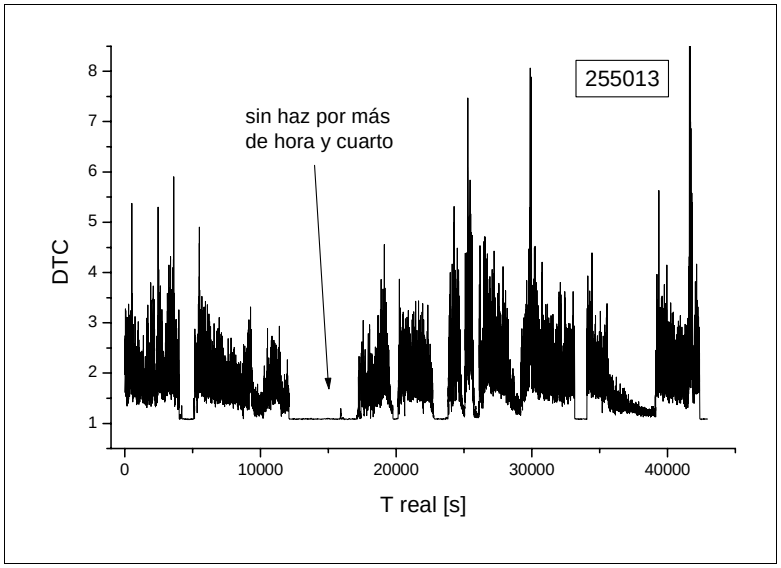


Ilustración 96: Perfil de corrección de tiempo muerto del experimento 255013.

En la Ilustración 97, que corresponde al patrón de SCu irradiado en el experimento 256029, se observa muy claramente la caída en el contaje debido al tiempo muerto.

Cada uno de los puntos corresponden a un bloque de 2048 eventos. Cuando el tiempo muerto es prácticamente 0, se observa que los puntos están contiguos en el tiempo, sin embargo, cuando el tiempo muerto asciende a un DTC de 5, la separación en los puntos evidencia que el counting rate efectivo[41] cae.

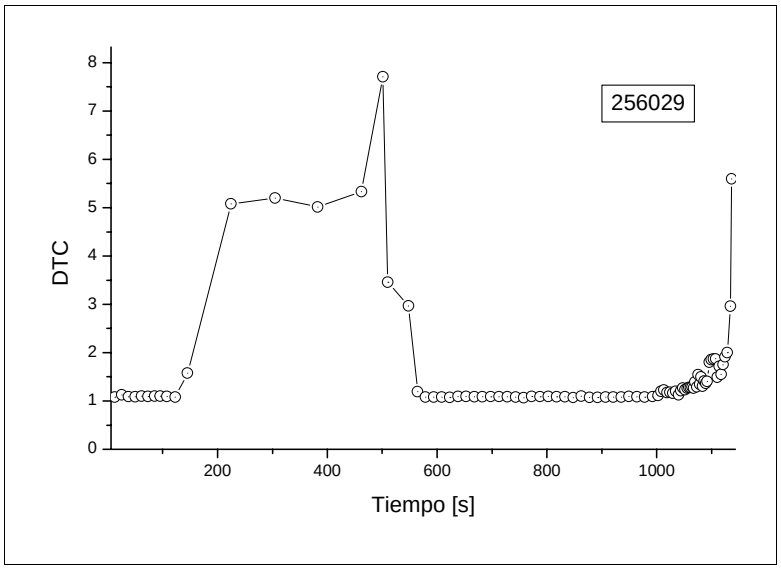


Ilustración 97: Perfil de corrección de tiempo muerto del experimento 257029.

En la Ilustración 98 se observa otro caso interesante, en el que el haz estaba barriendo una muestra con una zona de mucha masa y otra con muy poca.

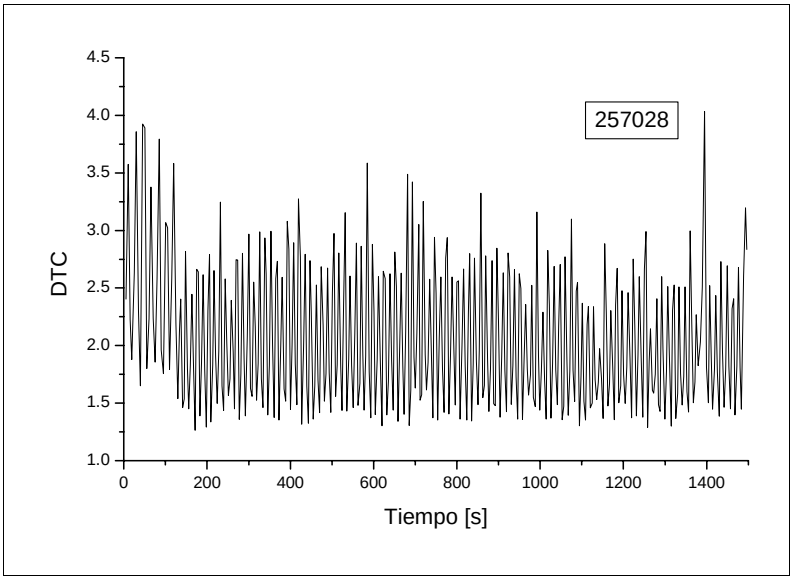


Ilustración 98: Perfil de corrección de tiempo muerto del experimento 257028.

[41] Al decir counting rate efectivo, se hace referencia a la cantidad de eventos adquiridos por unidad de tiempo.

Corrección por tiempo muerto.

Tradicionalmente, la corrección de tiempo muerto se realiza evaluando el área del pulser en el espectro integral obtenido. Es decir, se evalúa el área del pulser en el espectro, se la compara con el área que realmente el pulser generó, y se utiliza este cociente como corrección de tiempo muerto (DTC) para corregir cada canal del espectro. Sin embargo esto adolece de un grave defecto, ya que intrínsecamente se está considerando que la DTC es constante en función del tiempo.
A continuación se estudia esto más detalladamente.
El área A_X de un fotopico (o cualquier región del espectro) es la integral a lo largo del tiempo del counting rate (CR), sin embargo, el CR que adquiere el sistema está afectado por el tiempo muerto:

$$A_X = \int_T CR_X \cdot dt = \int_T DTC(t) \cdot CR'_X(t) \cdot dt$$

Ecuación 137

donde CR_X es la frecuencia con la que llegan los rayos X al detector[42], CR_X' es el counting rate que adquiere el sistema, y DTC es la corrección de tiempo muerto, definida como la relación entre CR_X y CR_X'. De los perfiles de tiempo muerto presentados queda claro que la DTC no es constante, por lo que en esta última ecuación fue necesario especificar que tanto la DTC como el CR' son función del tiempo aunque el CR original sea constante.
Esta DTC, como se dijo, se estima utilizando el pulser, como la relación entre el CR del pulser en el espectro CR_P', y la frecuencia del pulser, en general, 50 Hz:

$$A_X = \int_T \frac{50}{CR'_P(t)} \cdot CR'_X(t) \cdot dt$$

Ecuación 138

El procedimiento tradicional asume que CR_P' es constante, lo que implica un tiempo muerto constante:

$$A_X = \frac{50}{CR'_P} \cdot \int_T CR'_X(t) \cdot dt \qquad ; CR'_P(t) = cte$$

Ecuación 139

o, integrando los counting rates:

$$A_X = \frac{50 \cdot T}{A'_P} \cdot A'_X \qquad ; CR'_P(t) = cte$$

Ecuación 140

[42] No se entra el en detalle de considerar la eficiencia del detector, que a este nivel se considera 1.

Sin embargo en este tipo de experimentos esta simplificación no puede realizarse. En particular se detectó que se cometía un considerable error en los casos en que durante gran parte del experimento el haz del acelerador está cortado. Por ejemplo, considerando un experimento de 100 s de duración, en el que durante 50 s hubo haz, y el CR de rayos X de un determinado fotopico fue de 1000 c/s, lo que producía un tiempo muerto del 50%, resultando un CR_X' de 500 Hz, un CR_P' de 25 Hz, y un DTC de 2. los restantes 50 segundos el haz estuvo cortado, por lo que no se generaron rayos X y por lo tanto el tiempo muerto fue despreciable, es decir, CR_X' igual a 0, un CR_P' de 50 Hz, y un DTC de 1. El espectro total obtenido tiene un área de 25000 cuentas en el fotopico y 3750 en el pulser. El espectro corregido tendría que tener 50000 cuentas en el fotopico y 5000 en el pulser. Analizando esta situación según la Ecuación 140:

$$A_X = \frac{50 \cdot T}{A'_P} \cdot A'_X = 1.33 \cdot 25000 = 33333 \qquad ; CR'_P(t) = cte$$

Ecuación 141

En cambio según la Ecuación 138:

$$A_X = \int_0^{50} \frac{50}{CR'_P(t)} \cdot CR'_X(t) \cdot dt + \int_{50}^{100} \frac{50}{CR'_P(t)} \cdot CR'_X(t) \cdot dt = 2 \cdot 25000 + 0 = 50000$$

Ecuación 142

En este trabajo, la adquisición de datos se realizó almacenando los datos en el formato ".lmf" que entrega el programa OMDAQ[4]. En este formato, los datos se guardan en bloques compuestos, entre otros, por 2048 eventos (en este caso, provenientes del detector de rayos X o del de barrera de superficie), el tiempo transcurrido desde el comienzo del experimento hasta la escritura del bloque, y la carga acumulada en ese intervalo de tiempo. Por lo tanto la corrección por tiempo muerto se realizó bloque a bloque con el procedimiento que sigue.

El área con corrección de tiempo muerto $Adtc_{ci}$ de un canal *c*, en el bloque *i*, y en el píxel (*x,y*) es[43]:

$$Adtc_i[x, y, c] = An_i[x, y, c] \cdot k_i$$

Ecuación 143

[43] La información que entrega el sistema de adquisición está dividida en bloques de 2048 eventos. Cada uno de estos eventos tiene una determinada energía y proviene de una determinada posición de la muestra. La cantidad de posiciones de la muestra desde donde provienen los eventos está limitada a 65536 lugares, o píxeles, organizados como una matriz de 256 por 256. Los eventos se pueden organizar en un conjunto de histogramas, uno por cada píxel. El número de canales de estos histogramas es variable. Para este trabajo se utilizan 1024.

donde An_i es el número de cuentas adquirida en el canal *c* correspondiente al espectro asociado al píxel (*x,y*) , y k_i es la corrección de tiempo muerto para el bloque i. Esta corrección se obtiene de la siguiente ecuación:

$$k_i = \frac{t_i \cdot 50}{10^5 \cdot A_{pi}}$$

Ecuación 144

donde t_i es el tiempo real transcurrido en el bloque, y A_{pi} es el área del *pulser* (que genera pulsos con una frecuencia de 50 Hz). El factor 10^5 es para pasar de las unidades de tiempo que entrega el sistema de adquisición (unidades de 10 μs) a segundos. La propagación de errores se obtiene de la siguiente forma:

$$\sigma_{Adtc_i[x,y,c]}{}^2 = \sigma_{An_i[x,y,c]}{}^2 \cdot k_i{}^2 + \sigma_{ki}{}^2 \cdot An_i[x,y,c]^2$$

Ecuación 145

$$\sigma_{ki}{}^2 = \frac{k_i{}^2}{A_{pi}{}^2} \cdot \sigma_{Api}{}^2$$

Ecuación 146

Tomando $\sigma_{A_i[x,y,c]}{}^2 = An_i[x,y,c]$, resulta:

$$\sigma_{Adtc_i[x,y,c]}{}^2 = An_i[x,y,c] \cdot k_i{}^2 + \frac{k_i{}^2}{A_{pi}{}^2} \cdot \sigma_{Api}{}^2 \cdot An_i[x,y,c]^2 = An_i[x,y,c] \cdot k_i{}^2 \left(1 + \frac{An_i[x,y,c]}{A_{pi}{}^2} \cdot \sigma_{Api}{}^2\right)$$

Ecuación 147

Si se considera $\sigma_{Api}{}^2 = A_{pi}$, el error del área del *pulser* es:

$$\sigma_{Adtc_i[x,y,c]}{}^2 = \sigma_{An_i[x,y,c]} \cdot k_i{}^2 \left(1 + \frac{An_i[x,y,c]}{A_{pi}}\right)$$

Ecuación 148

Por el contrario, si se considera $\sigma_{Api} = 2$, la cual refleja 1 cuenta de error a cada "costado" del bloque:

$$\sigma_{Adtc_i[x,y,c]}{}^2 = An_i[x,y,c] \cdot k_i{}^2 \left(1 + \frac{An_i[x,y,c]}{A_{pi}{}^2} \cdot 4\right)$$

Ecuación 149

Para un experimento completo, que conste de N bloques, el número de cuentas de un canal c, en el píxel x, y, $Adtc_i[x,y,c]$ y su indeterminación resultan:

$$Adtc[x,y,c] = \sum_{i=1}^{N}\left(An_i[x,y,c] \cdot \frac{t_i \cdot 50}{10^5 \cdot A_{pi}} \right)$$

Ecuación 150

$$\sigma_{Adtc[x,y,c]}{}^2 = \sum_{i=1}^{N}\left(An_i[x,y,c] \cdot k_i{}^2 \left(1 + \frac{An_i[x,y,c]}{A_{pi}{}^2} \cdot 4 \right) \right)$$

Ecuación 151

Estudio de la ventaja de la corrección de tiempo local vs. global

A continuación se muestra con el resultado del experimento 214009, un patrón de SCu, la diferencia entre la corrección de tiempo muerto global, y la local.

Del espectro integral se calculó el área del Kα del Cu, que arrojó un valor de 375800 cuentas. Corrigiendo este valor por tiempo muerto, usando una DTC de 1.664 calculada del cociente entre el área del pulser en el espectro y el número total de pulsos que entregó, resulta un área corregida por tiempo muerto global de 625331 cuentas. El error que se le asigna a este tipo de estadística es la raíz del área, es decir, ±790 cuentas.

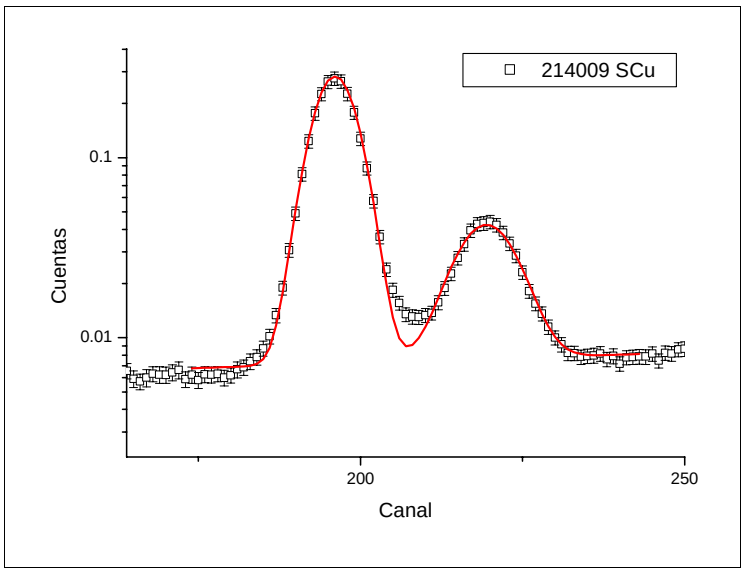


Ilustración 99: Espectro integral de PIXE obtenido en el experimento 214009.

La corrección de tiempo muerto local entregó el espectro integral corregido de la Ilustración 99, del cual el ajuste de los picos entregó los parámetros:

χ^2	= 1.45199	
P1	0.0042904821	± 5.69341281E-4
P2	0.00262	± 6.24783482E-4
P3	2.19707655	± 0.049927696
P4	196.078000	± 0
P5	6.36000000	± 0
P6	0	± 0
P7	210.000000	± 0
P8	8.00000000	± 0
P9	0.395325804	± 0.0118222040
P10	219.410000	± 0
P11	9.07000000	± 0

Tabla 27

de donde se obtiene un área corregida y normalizada a carga de 2.197. Los detalles sobre este ajuste se presentan en la sección "Determinación de la concentración de cobre en espectros integrales." .Multiplicando por la carga (335218) para desnormalizar, resulta un área de 736474 ± 16761 cuentas.

Comparando ambos resultados se aprecia un incremento del 18% en el área, y un importante incremento en el error, debido a todo el procesamiento matemático involucrado.

Estudiando el perfil de corriente de este último experimento (Ilustración 100) se descubre que esta diferencia se debe a que una considerable parte del experimento el haz estuvo cortado, por lo que practicamemente no se produjo tiempo muerto. Sin embargo todo este tiempo queda implicitamente considerado en el tiempo muerto global.

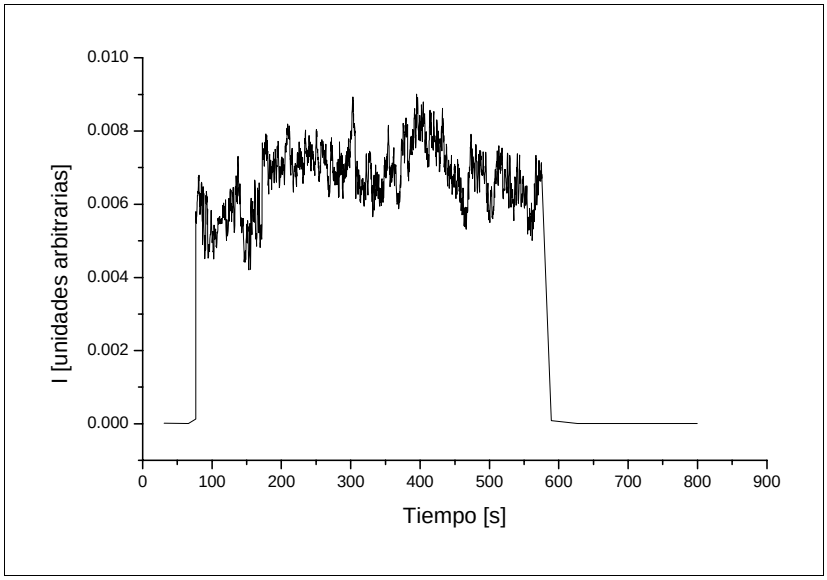


Ilustración 100: Historia de irradiación del estándar de referencia de SCu en el experimento 214009.

Obtención de espectros integrales y cálculo de la sección eficaz de producción.

Como se observa en la Ecuación 35, para cuantificar la concentración de un elemento, en este caso Cu, mediante PIXE en una muestra gruesa es necesaria la determinación del cociente entre la sección eficaz de producción en función de la energía de este elemento y el dE/dx, para las condiciones experimentales utilizadas, S(Z, E)[44].
Mediante el análisis STIM de las muestras se determinó que la pérdida de energía de los iones al atravesarlas nunca supera los 10 MeV. Aplicando el modelo ECPSSR [47] para estudiar la variación de la sección eficaz de producción en función de la energía del ión, dentro de este rango de variación de la energía de los iones, se observa que la sección eficaz puede modelarse como una función lineal que depende de la energía[45]:

$$\sigma(Z,E) = \sigma(Z,E_i) - m(Z)\cdot \Delta E$$

Ecuación 152

donde la ordenada al origen es la sección eficaz de producción cuando el ión no pierde energía, es decir, E_i = 50 MeV, y la pendiente se determina midiendo con iones de otra energía, E_a.

$$m(Z) = \frac{\sigma(Z,E_i) - \sigma(Z,E_a)}{E_i - E_a}$$

Ecuación 153

Para este procedimiento se colocó el patrón de SCu de forma tal que el haz de oxígeno atraviesa el soporte (*backing)* de Mylar antes de interactuar con el SCu, ya que el haz pierde 5.7 MeV en el espesor del soporte de Mylar.

La medición a E_i se realizó juntando estadística hasta que el área del pico Kα del Cu fue de por lo menos 10000 cuentas, de forma tal de obtener un error estadístico despreciable.
A fin de obtener el espectro integral con la corrección de tiempo muerto del patrón de Cu se debe compilar el programa "pixe.c" (ver sección Programa "pixe.c" en el apéndice) definiendo el macro "PROJ" y forzando el factor de corrección "f" a 1. Además es posible definir el canal del ADC que adquiría la señal de PIXE en el macro "ADC" y la ventana en la que se encuentra el pulser en el macro "IS_PULSER".
Para irradiar el patrón a una segunda energía se lo colocó de forma tal que el haz de oxígeno atraviesa el soporte de Mylar antes de interactuar con el SCu, ya que el haz pierde 5.7 MeV en el espesor del soporte de Mylar.
Luego, para el cálculo del área se procede de forma similar al procedimiento para 50 MeV.
La Tabla 28 presenta los valores medidos para distintos experimentos del área del pico de Cu normalizado a pulsos de carga medidos en unidades de 184 fC, para 44.3 MeV y 50 MeV.

[44] Suponiendo que la transmisión de rayos X es 1.
[45] Ver Ilustración 86 en la sección "Ajuste de espectros PIXE para determinar el tamaño del haz."

Medición	*50 MeV*	*44.3 MeV*
1	0.968	0.554
2	0.897	0.506
3	0.944	0.446
4	0.898	0.527
5	0.881	0.527
6	0.835	0.482
7	0.842	0.527
8	0.847	
9	0.86	
10	0.926	
11	0.85	
12	0.872	
13	0.885	
14	0.885	
Media	**0.885**	**0.51**
Error típico	**0.0105**	**0.0135**
Desviación estándar	0.0394	0.0358

Tabla 28: Valores medidos para distintos experimentos del área del pico de Cu normalizado a normalizado a carga.

Las secciones eficaces de producción para estas dos energías son proporcionales a:

$$\sigma(Cu,50MeV) \propto 0.885 \quad ; \quad \sigma(Cu,44.3MeV) \propto 0.51$$

Ecuación 154

Esta proporcionalidad queda explicitada al combinar la sección eficaz con la constante k, como se realizó entre la Ecuación 38 y la Ecuación 39. Estrictamente hablando, estos valores medidos son la constante k' (ver Ecuación 45) normalizada a carga y densidad superficial de cobre:

$$k'(50MeV,Cu) = \frac{1}{(\rho_{Cu} \cdot \Delta x)_p} \cdot 0.885 \quad ; \quad k'(44.3MeV,Cu) = \frac{1}{(\rho_{Cu} \cdot \Delta x)_p} \cdot 0.51$$

Ecuación 155

Donde $(\rho_{Cu}.\Delta X)_p$ es la densidad superficial de cobre en el patrón de referencia. Tener en cuenta que esta constante fue calculada normalizando con respecto a la carga que atravesó el patrón expresada en unidades de pulsos de carga entregados por el integrador de carga (184 fc/pulso).
A partir de estos valores se obtiene la función de variación de esta constante en función de la pérdida de energía al atravesar la muestra:

$$k'(\Delta E, Cu) = \frac{1}{(\rho_{Cu} \cdot \Delta x)_p} \cdot (0.885 - 0.06579 \cdot \Delta E)$$

Ecuación 156

Determinación de una curva de correlación característica entre la sección eficaz de producción del Cu y el fondo del espectro

Con el procedimiento descrito en la sección "Medición de la sección eficaz de producción del Cu para las energías involucradas en el análisis." se determinó la variación de la sección eficaz de producción de cobre a distintas energías.

Como se expresa en la Ecuación 39, a la hora de realizar el análisis PIXE de las muestras es necesario integrar el cociente entre la función k' (que refleja la variación de la sección eficaz de producción en función de la energía) y el *dE/dx* a lo largo de la trayectoria del ión.

No se pudo obtener información acerca del dE/dx para estas muestras, por lo tanto, se consideró constante al dE/dx utilizando un procedimiento similar al utilizado en la Ecuación 41.

Para evaluar que tan grande puede ser el error que se comete al suponer que dE/dx es constante se calculó para carbono amorfo y para piel humana como:

$$\varepsilon = \frac{\int_{E_i}^{E_f} \frac{k'(E, Cu)}{S_M(E)} \cdot dE}{\rho \cdot k'\left(E_i - \Delta E/2, Cu\right)} - 1$$

Ecuación 157

Lo que arrojó las siguientes curvas en función del *ΔE*:

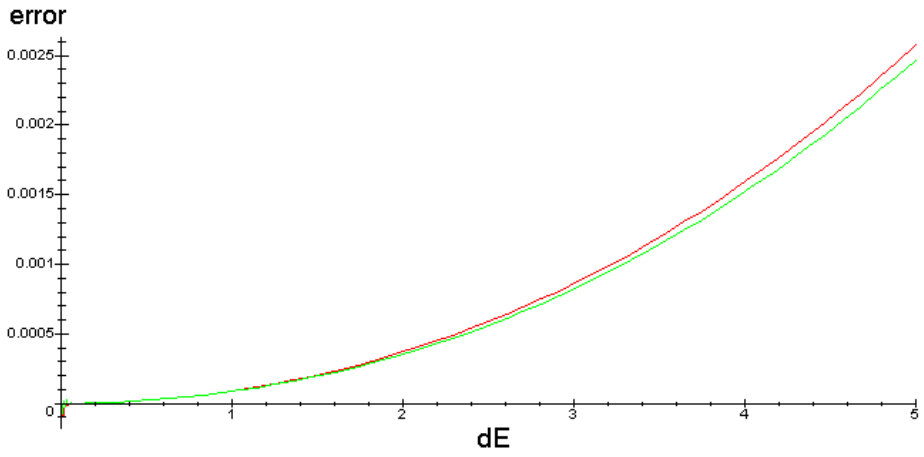


Ilustración 101: Error en el término integral cometido por suponer dE/dx constante evaluado para piel humana (rojo) y carbono amorfo (verde).

Lo que indica que el error cometido por considerar el dE/dx constante prácticamente no es sensible al tipo de material en el que se frena el ion, pero aumenta a medida de que la pérdida de energía en la muestra se hace más grande. Sin embargo, para cuando el ión

pierde 5 MeV en la muestra, el error se hace del orden del 0.25%, valor despreciable en función del cálculo que se está realizando.
Por lo tanto, considerando constante al dE/dx, y suponiendo que la distribución de cobre a lo largo de la trayectoria del haz es uniforme[46]:

$$A(Z) = q \cdot C(Z) \cdot \frac{1}{S'_M} \cdot \int_{E_i}^{E_f} k'(E,Z) \cdot dE$$

Ecuación 158

Como k' es lineal con respecto a la energía, la integral se puede reemplazar como el valor medio de k' en el intervalo multiplicada por el mismo intervalo:

$$A(Z) = q \cdot C(Z) \cdot \frac{1}{S'_M} \cdot k'\left(E_i + \Delta E/2, Z\right) \cdot \Delta E$$

Ecuación 159

Reemplazando S_M según la Ecuación 37, y la concentración de cobre según la Ecuación 43:

$$A_m(Cu) = q_m \cdot \frac{\rho_{Cu}}{\rho} \cdot \frac{1}{\rho^{-1} \cdot \frac{\Delta E}{\Delta x}} \cdot k'\left(50MeV - \Delta E/2, Cu\right) \cdot \Delta E$$

Ecuación 160

Simplificando:

$$A_m(Cu) = q_m \cdot (\rho_{Cu} \cdot \Delta x)_m \cdot k'\left(50MeV - \Delta E/2, Cu\right)$$

Ecuación 161

Reemplazando según la Ecuación 156:

$$A_m(Cu) = q_m \cdot \frac{(\rho_{Cu} \cdot \Delta x)_m}{(\rho_{Cu} \cdot \Delta x)_p} \cdot (0.885 - 0.0329 \cdot \Delta E)$$

Ecuación 162

Despejando, la densidad superficial de cobre en la muestra resulta:

[46] Razón por la cual C_m sale de la integral.

$$\left(\rho_{Cu}\cdot\Delta x\right)_m=\left(\rho_{Cu}\cdot\Delta x\right)_p\cdot\frac{A_m(Cu)\big/q_m}{0.885-0.0329\cdot\Delta E}$$

Ecuación 163

Lo que indica que para este tipo de experimento es necesario conocer la pérdida de energía del ión. Esta información se obtiene del análisis STIM. Sin embargo esta información no está siempre disponible, y en este trabajo se intentó encontrar alguna función que correlacione el área del fondo continuo de los espectros de PIXE con la pérdida de energía del ión:

$$\Delta E=f\left(\int_{.0212keV}^{10.456keV}A(E_\gamma)\cdot dE_\gamma\right)$$

Ecuación 164

donde $A(E_\gamma)$ es el área del espectro PIXE y f la función buscada. A este fin se desarrolló el programa "cu.c" (ver apéndice), que analiza los archivos de modo lista de PIXE y de STIM, y entrega una tabla de valores de correlación, como se observa en la Ilustración 102.

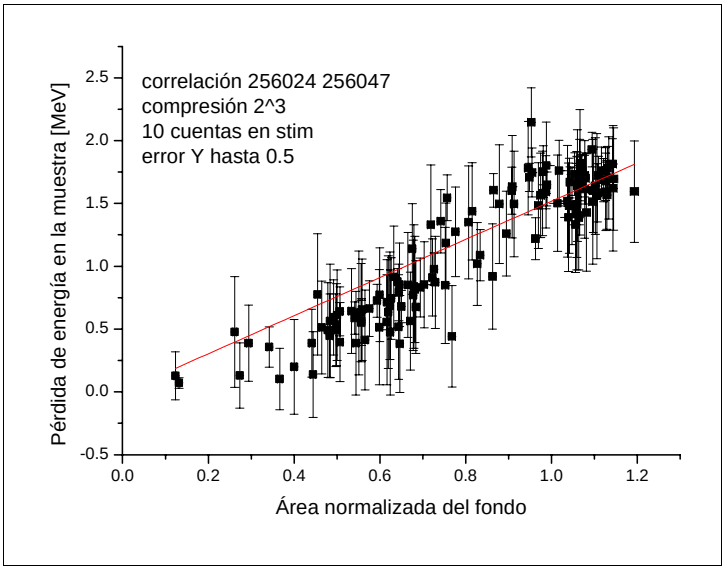


Ilustración 102: Correlación entre la pérdida de energía de los iones que atraviesan la muestra (experimento 256024) y el área del fondo del espectro PIXE (experimento 256047) para el tumor 4.

Del análisis de varias muestras se determinó que una función lineal con ordenada al origen cero representa apropiadamente la relación buscada, por lo tanto:

$$\Delta E=1.64\cdot\left(\int_{.0212keV}^{10.456keV}A(E_\gamma)\cdot dE_\gamma\right)$$

Ecuación 165

y la concentración de Cu queda:

$$\left(\rho_{Cu}\cdot\Delta x\right)_m=\left(\rho_{Cu}\cdot\Delta x\right)_p\cdot\frac{A_m(Cu)/q_m}{0.885-0.054\cdot\left(\int_{.0212keV}^{10.456keV}A(E)\cdot dE\right)}$$

Ecuación 166

Estudio de la corrección por variación de la sección eficaz.

La compresión aumenta la estadística de STIM

En las siguientes tres ilustraciones se observa el efecto de comprimir el número de píxeles de una imagen. Cada píxel tiene asociado un espectro, comprimir píxeles se refiere a sumar los espectros de distintos píxeles canal a canal. En este trabajo todas las compresiones sobre píxeles se hicieron en factores de compresión que van como potencias de 2. Una compresión de 8 quiere decir tomar un conjunto de 8 x 8 píxeles consecutivos, y comprimirlos a uno sólo. De esta forma se reduce la cantidad de píxeles que forma la imagen, pero como se observa en estas ilustraciones, aumenta la estadística.

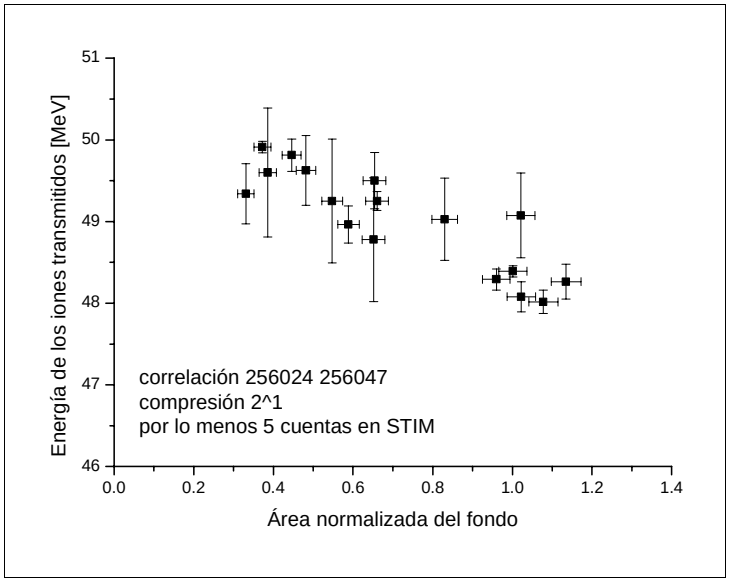


Ilustración 103: Correlación entre la energía del ión trasmitido (información obtenida del espectro de STIM 256024) en un determinado píxel, y el fondo en el espectro de PIXE asociado al mismo píxel (información obtenida del experimento de PIXE 256047). Sólo se consideraron los puntos que tenían por lo menos 5 eventos en los espectros de STIM. Compresión x 2.

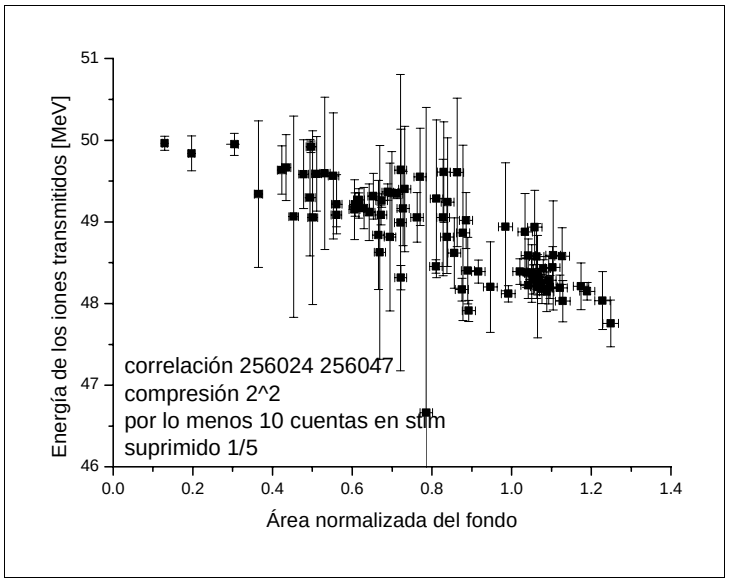


Ilustración 104: Misma correlación que el gráfico anterior, pero con una compresión x 4. En este caso se consideraron los puntos que tenían por lo menos 10 eventos en los espectros de STIM (más restrictivo que en el caso anterior). Considerar que para claridad de la imagen sólo se graficaron 1/5 de los puntos.

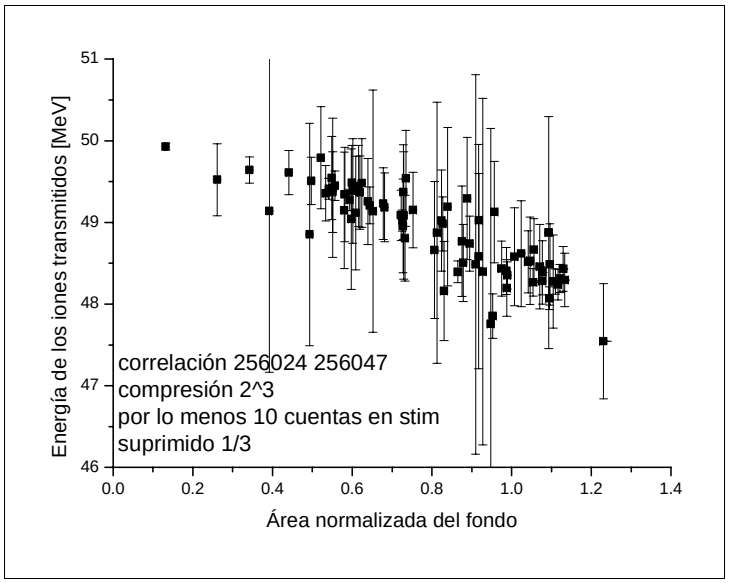


Ilustración 105: Misma correlación que el gráfico anterior, pero con una compresión x 4. En este caso también se consideraron los puntos que tenían por lo menos 10 eventos en los espectros de STIM. Considerar que para claridad de la imagen sólo se graficaron 1/3 de los puntos.

Aumentar la compresión destruye la correlación.

Como comprimir aumenta la estadística en los espectros de STIM, en primera instancia, disminuye el error en la determinación de la energía de salida de los iones. En STIM esta energía queda determinada por el centroide de la distribución energética que

presentan los iones, por lo que al aumentar la estadística se disminuye el error en la determinación de este centroide.
Sin embargo, al comprimir se están mezclando espectros provenientes de distintas localizaciones, con probablemente distintos espesores, por lo que no resulta obvio que el hecho de comprimir reduzca el error en la determinación de la energía. Es más, si se mezclan espectros de píxeles con una gran variación de espesor entre ellos, se puede estar cometiendo un importante error al atribuirle que provienen de un único espesor.
En este sentido, comprimir tiende a destruir la correlación por mezcla de espesores diferentes.
Esto se evidencia en los dos siguientes gráficos de correlación:

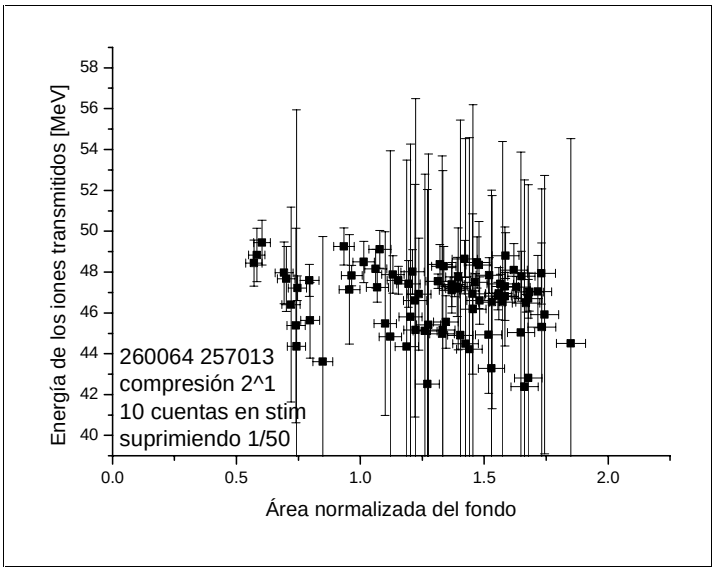


Ilustración 106: Correlación entre la energía del ión trasmitido (información obtenida del espectro de STIM 260064) en un determinado píxel, y el fondo en el espectro de PIXE asociado al mismo píxel (información obtenida del experimento de PIXE 257013). Sólo se consideraron los puntos que tenían por lo menos 10 eventos en los espectros de STIM. La compresión es x 2, y se graficaron 1/50 de los puntos.

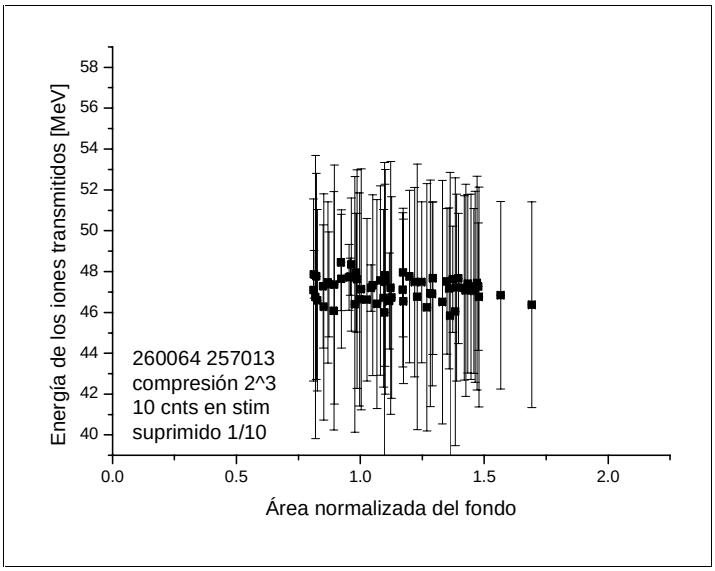


Ilustración 107: Misma correlación que el gráfico anterior, pero con una compresión x 8. Notar el cambio en las barras de error. En este caso también se consideraron los puntos que tenían por lo menos 10 eventos en los espectros de STIM. Para claridad de la imagen sólo se graficaron 1/10 de los puntos.

Este problema fue crítico cuando se quiso hallar la correlación entre la degradación en energía (experimento de STIM 256033) y el área del fondo (experimento de PIXE 255013) para la muestra BN1, que se observa en la Ilustración 108.

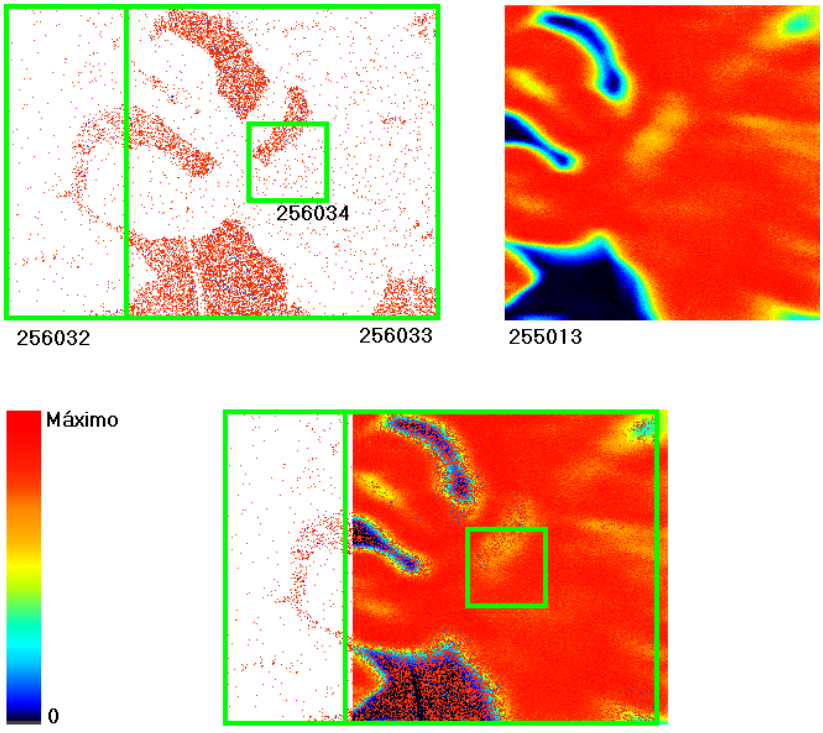


Ilustración 108: Correlación entre los mapa de STIM y PIXE para la serie de experimentos 256032/33/34 y 255013.

En este caso, la imagen de PIXE resultó estar muy fuera de foco, probablemente debido a que se utilizó un microhaz de gran tamaño, ya que no se trabajó lo suficiente para lograr un enfoque óptimo[47]. Como consecuencia de esto, no se pudo determinar ninguna correlación en este caso.

Suprimiendo puntos según el error en energía, correlación TP2

Sin embargo, como ciertamente la compresión debe apuntar a disminuir el error en la determinación de las energías por STIM, si es que los espectros sumados corresponden a píxeles de similar espesor, en este trabajo se optó por suprimir los puntos que luego de una compresión tenían demasiado error. Esto basado en la hipótesis de que luego de una compresión, una pérdida de la correlación sólo puede deberse a que los espectros sumados provienen de distintas distribuciones de energía, por lo que es un error sumarlos. Este estudio se realizó analizando la correlación entre los experimentos 256057 y 256059, que también se muestra a continuación.

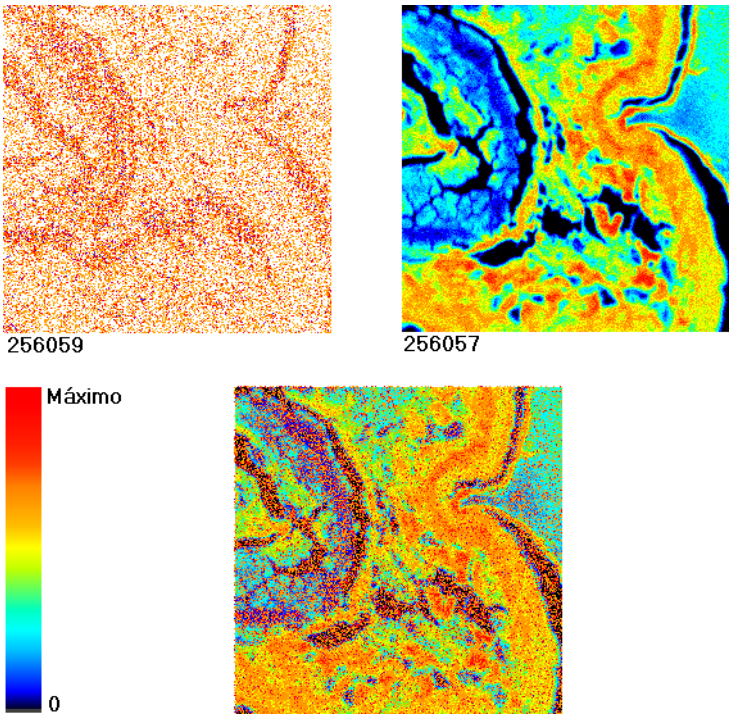


Ilustración 109: Correlación entre los mapas de STIM 256059 y PIXE 256057.

[47] Inicialmente no se consideraba importante trabajar mucho en el enfoque en los experimentos de STIM porque sólo se buscaba tener espectros integrales. No se pretendía hacer una correlación entre STIM y PIXE.

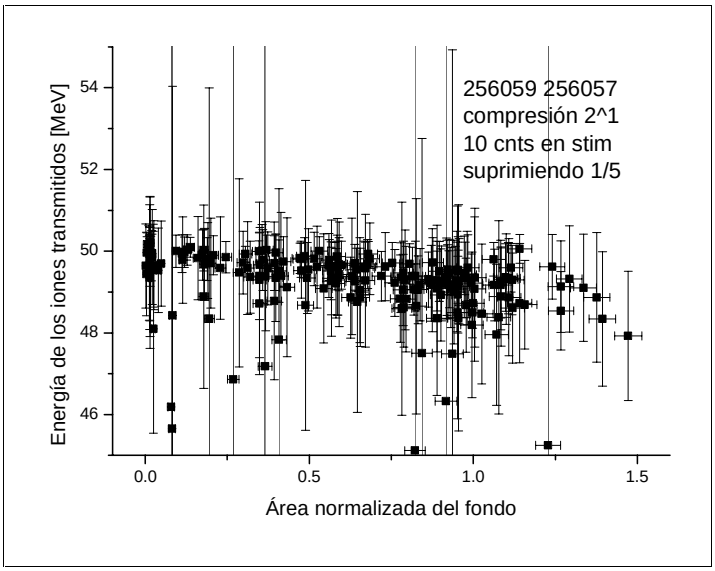


Ilustración 110: Correlación entre la energía del ión trasmitido (información obtenida del espectro de STIM 256059) en un determinado píxel, y el fondo en el espectro de PIXE asociado al mismo píxel (información obtenida del experimento de PIXE 256057). Sólo se consideraron los puntos que tenían por lo menos 10 eventos en los espectros de STIM. La compresión es x 2, y se graficaron 1/5 de los puntos.

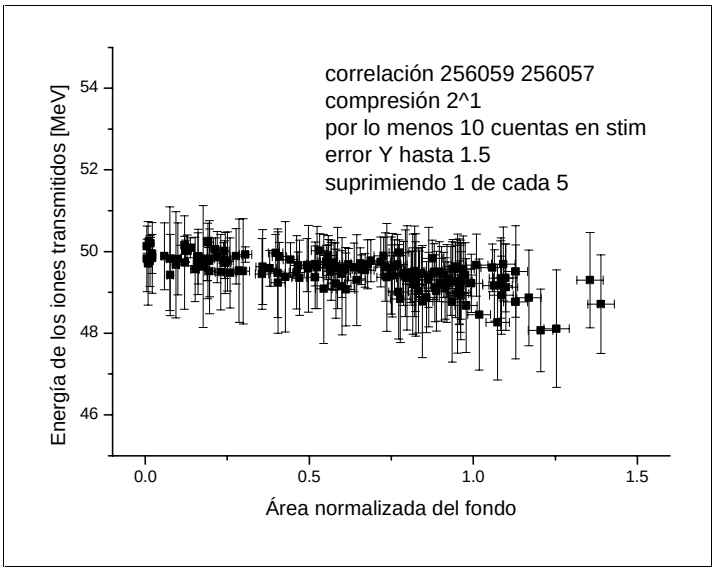


Ilustración 111: Misma correlación que el gráfico anterior, en las mismas condiciones de compresión, requerimiento de estadística para STIM y supresión de puntos, pero eliminando los puntos con error mayor a 1.5 MeV.

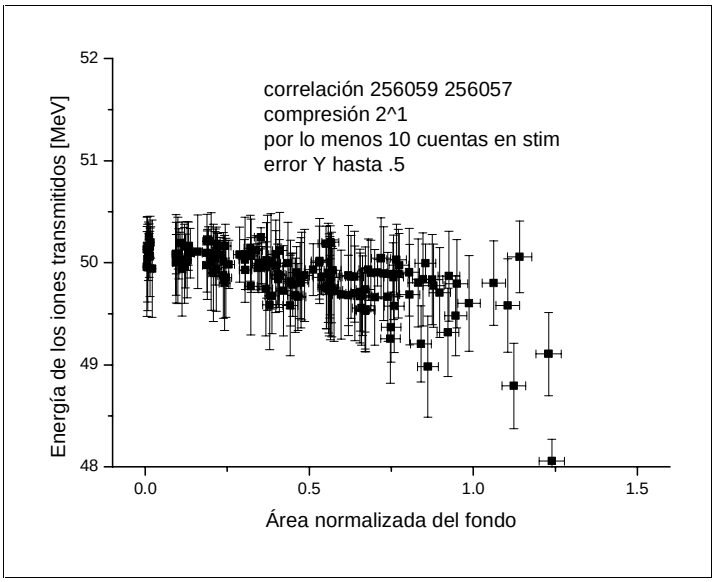


Ilustración 112: Misma correlación que el gráfico anterior, en las mismas condiciones de compresión, y requerimiento de estadística para STIM, pero eliminando los puntos con error mayor a 0.5 MeV. En este caso se graficaron todos los puntos.

Efecto de considerar error en X en el ajuste

Una vez que se seleccionó el conjunto de puntos considerados como representativos de la correlación, se procedió a hacerles un cambio de coordenadas para realizar un gráfico de pérdida de energía en la muestra en función del área del fondo del espectro PIXE corregido por carga. Las siguientes ilustraciones muestran el ajuste de un modelo lineal sobre los gráficos, uno considerando el error en la determinación del área del fondo, y el otro sin. Para el ajuste se fijó la coordenada al origen en 0 basándose en la hipótesis de que si el área de fondo 0, no hay material, y la pérdida de energía es 0.

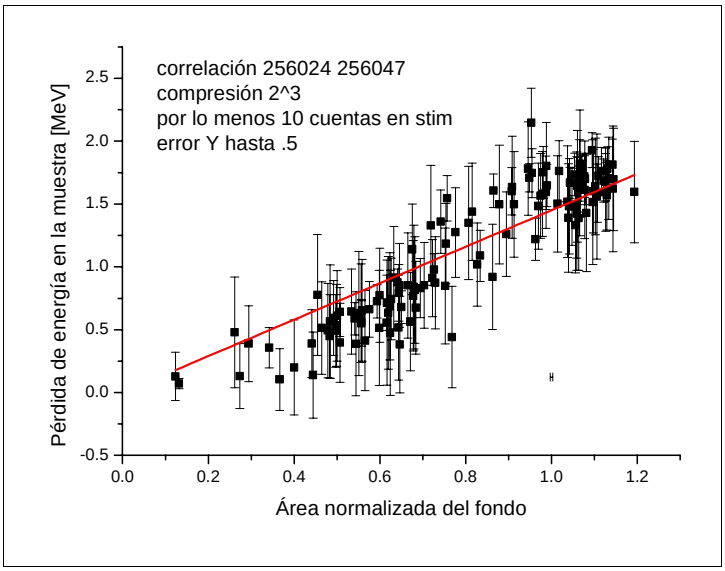


Ilustración 113: Correlación entre la perdida de energía del ión trasmitido (información obtenida del espectro de STIM 256024) en un determinado píxel, y el fondo en el espectro de PIXE asociado al mismo píxel (información obtenida del experimento de PIXE 256047) eliminando los puntos con error mayor a 0.5 MeV. Sólo se consideraron los puntos que tenían por lo menos 10 eventos en los espectros de STIM. La compresión es x 8[48], y para el ajuste lineal no se consideró error en X. La pendiente del ajuste resultó 1.45 ± 0.02

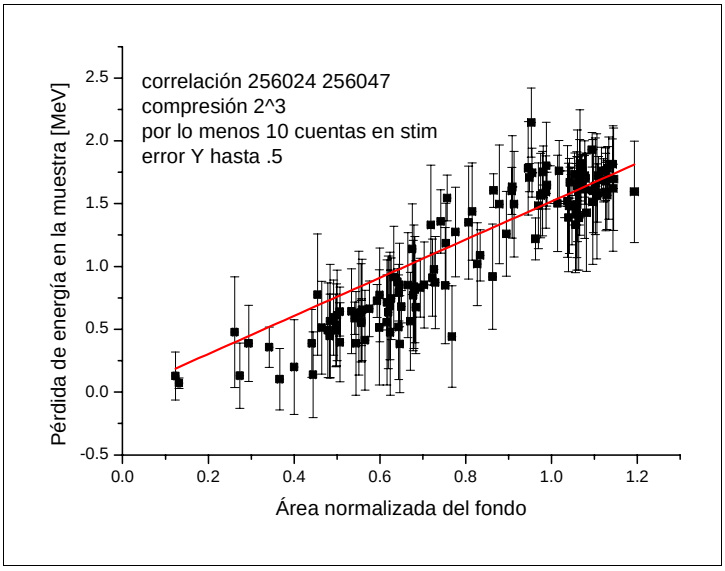


Ilustración 114: Misma correlación que el gráfico anterior, en las mismas condiciones de compresión, requerimiento de estadística para STIM y supresión de puntos, pero considerando error en X. La pendiente del ajuste resultó 1.52 ± 0.02

[48] En este caso, este nivel de compresión no produjo una destrucción de la correlación, debido a que esta muestra no tiene cambios abruptos de espesor.

Procedimiento

En las ilustraciones presentadas a continuación se resume el procedimiento finalmente utilizado para determinar la correlación. Primero se muestra la correlación espacial entre los distintos experimentos, luego la región seleccionada para integrar el área del fondo sobre el espectro PIXE, dos gráficos mostrando la selección de puntos, y por último el ajuste lineal.

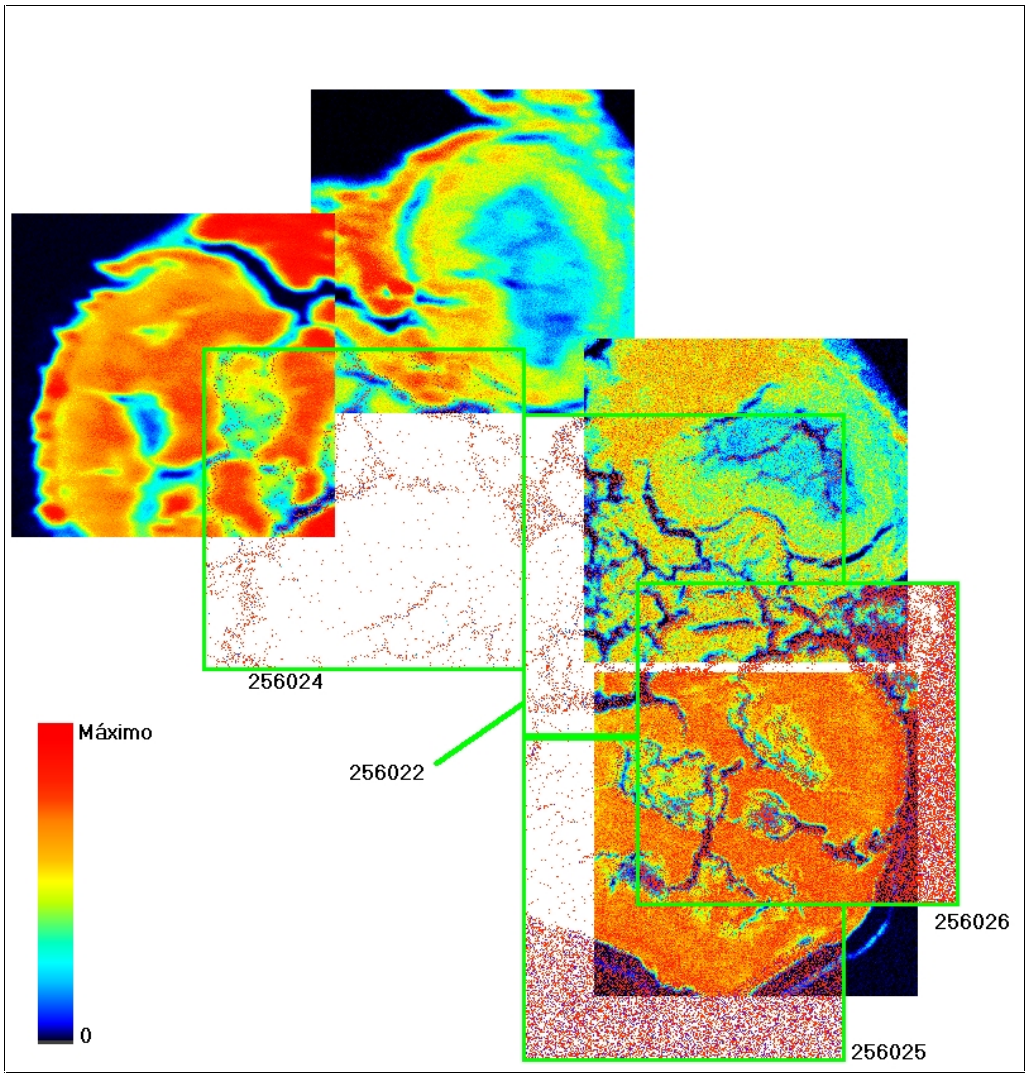


Ilustración 115: Correlación espacial para distintos experimentos realizados sobre el tumor 4.

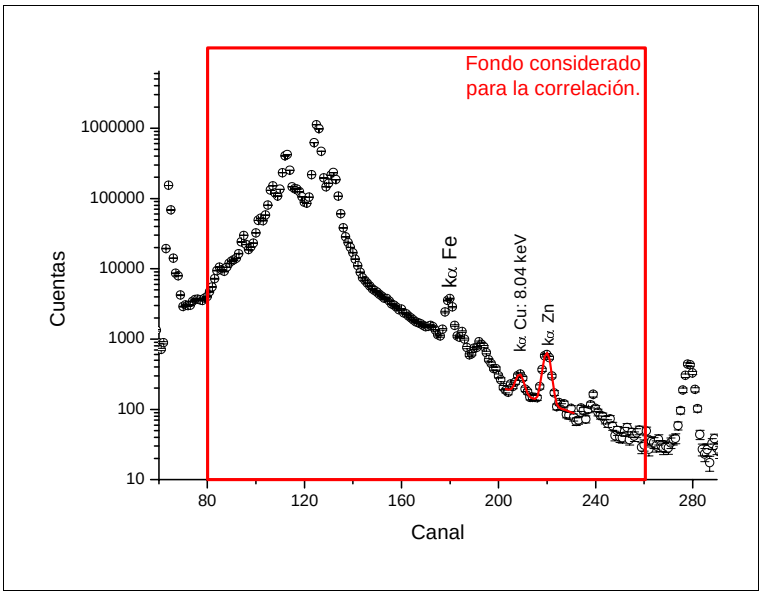


Ilustración 116: Espectro PIXE del tumor 4 (experimento 256047) indicando la región de fondo considerada para determinar la correlación con la pérdida de energía de los iones transmitidos.

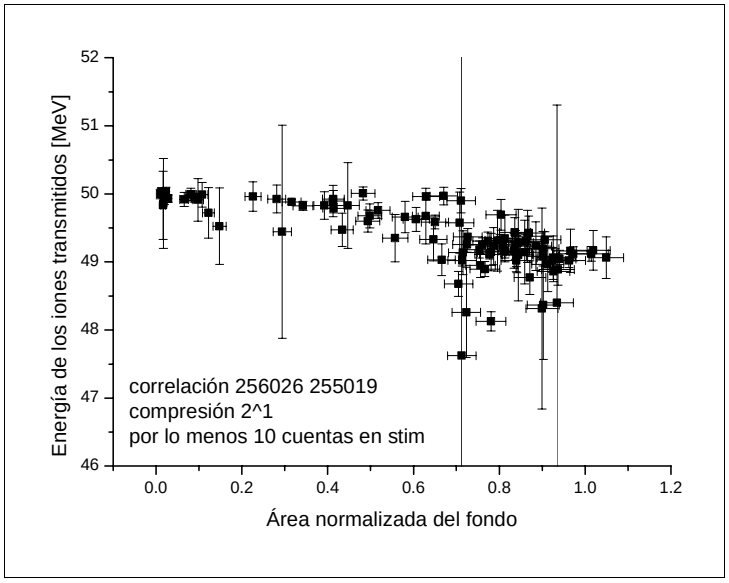


Ilustración 117: Correlación entre la energía del ión trasmitido (información obtenida del espectro de STIM 256026) en un determinado píxel, y el fondo en el espectro de PIXE asociado al mismo píxel (información obtenida del experimento de PIXE 255019). Sólo se consideraron los puntos que tenían por lo menos 10 eventos en los espectros de STIM. La compresión es x 2.

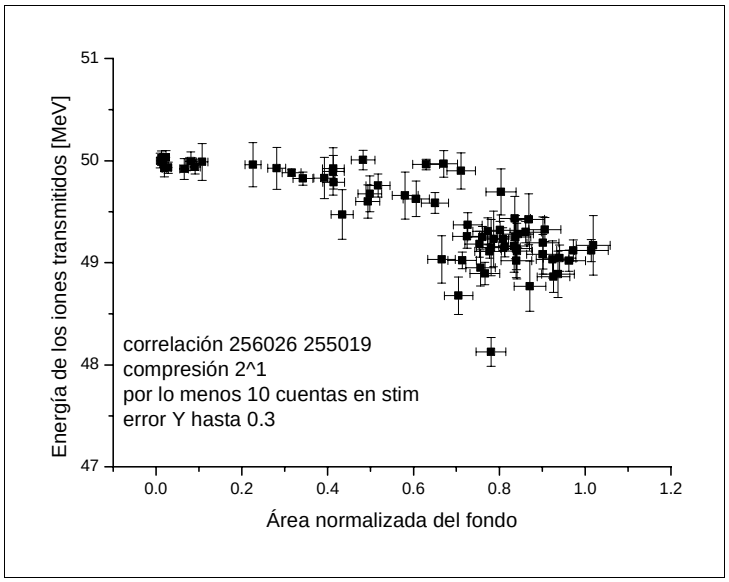


Ilustración 118: Misma correlación que el gráfico anterior, en las mismas condiciones de compresión, y requerimiento de estadística para STIM, pero eliminando los puntos con error mayor a 0.3 MeV.

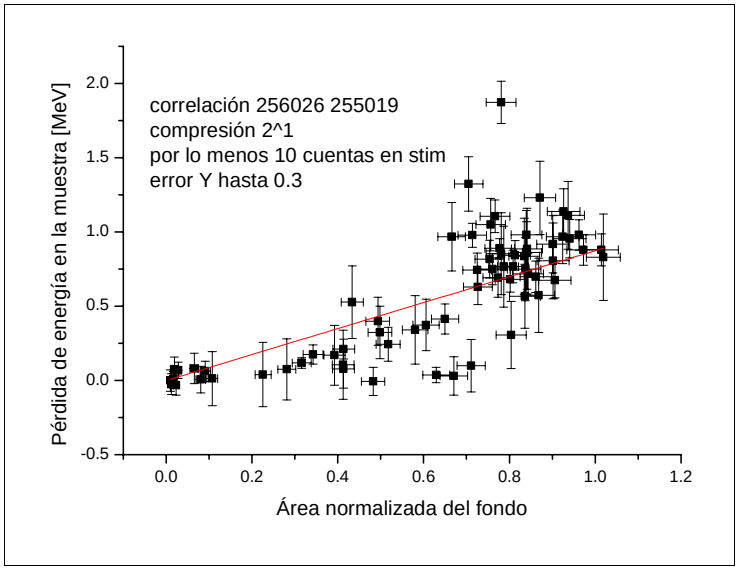


Ilustración 119: Correlación entre la perdida de energía del ión trasmitido (información obtenida del espectro de STIM 256026) en un determinado píxel, y el fondo en el espectro de PIXE asociado al mismo píxel (información obtenida del experimento de PIXE 255019) eliminando los puntos con error mayor a 0.3 MeV. Sólo se consideraron los puntos que tenían por lo menos 10 eventos en los espectros de STIM. La compresión es x 2. La pendiente del ajuste resultó 0.843 ± 0.02

Correlación en la muestra de hígado.

En las ilustraciones presentadas a continuación se muestra a modo de ejemplo el procedimiento utilizado para determinar la correlación en la muestra de hígado. Primero se muestra la correlación espacial entre los distintos experimentos, y luego el ajuste lineal. Promediando el valor de pendiente obtenido en esta muestra con los obtenidos en

otras muestras se llegó al valor indicado en la Ecuación 165, valor considerado como representativo para todos los tipos de tejidos analizados.

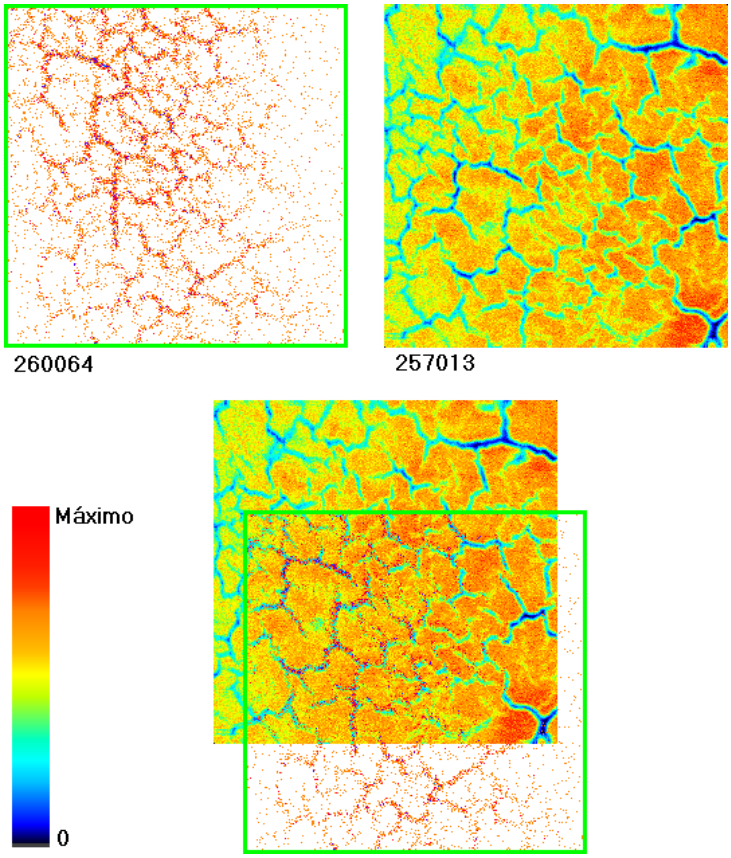


Ilustración 120: Correlación espacial entre los mapas STIM y PIXE obtenidos para el hígado.

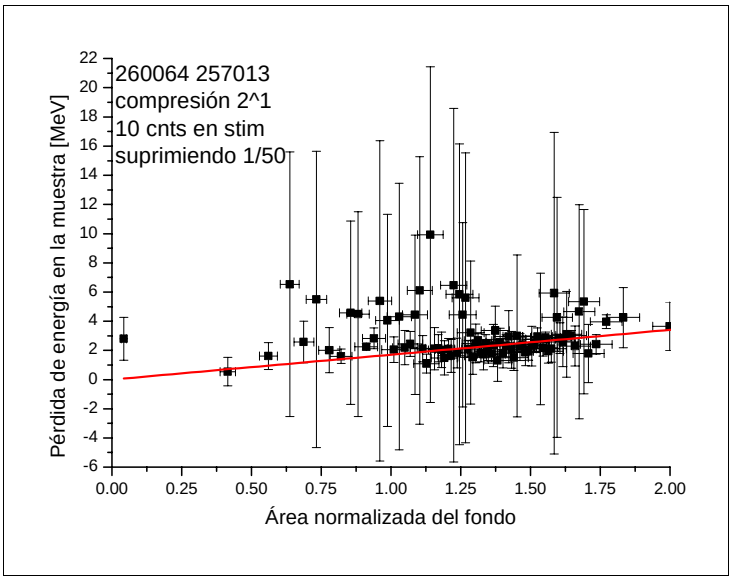


Ilustración 121: Correlación entre la perdida de energía del ión trasmitido (información obtenida del espectro de STIM 256026) en un determinado píxel, y el fondo en el espectro de PIXE asociado al mismo píxel (información obtenida del experimento de PIXE 255019). Sólo se consideraron los puntos que tenían por lo menos 10 eventos en los espectros de STIM. La compresión es x 2. La pendiente del ajuste resultó 1.7 ± 0.01. Sólo se graficaron 1/50 de los puntos.

Generación de mapas de distribución de cobre

Para generar los mapas de distribución del cobre se debe aplicar la Ecuación 166 sobre los archivos de modo lista de los experimentos de PIXE, tarea que realiza el programa "pixe.c" con el procedimiento que se especifica a continuación.

El término del denominador de la Ecuación 166 y su error se calculan como $f[x,y]$, indicando que existe un coeficiente distinto para cada píxel del mapa:

$$f[x,y] = 0.885 - \frac{0.054}{q[x,y]} \cdot \sum_{c=V_i}^{V_f} Adtc[x,y,c]$$

Ecuación 167

$$\sigma_{f[x,y]}^{\,2} = \frac{1}{f[x,y]^2} \cdot \left(\left(0.02 \cdot f[x,y] \cdot \frac{1}{q[x,y]} \cdot \sum_{c=V_i}^{V_f} Adtc[x,y,c] \right)^2 + \sigma_{Adtc[x,y,c]}^{\,2} \cdot \left(\frac{0.054}{q[x,y]} \right)^2 \right)$$

Ecuación 168

El área del canal c del *píxel x,y,* A_{dtc} y su error se obtienen por el procedimiento descrito en la sección 135, mientras que $q[x,y]$ es el número de pulsos de carga que recibió ese píxel, y V_i y V_f especifican la ventana de integración.

El área del canal c, corregida por la variación de sección eficaz de producción de rayos X de cobre según el espesor, y normalizada al área del patrón es:

$$A_{\sigma Cu}[x,y,c] = \frac{Adtc[x,y,c]}{f[x,y]} \cdot \frac{1}{q[x,y]}$$

Ecuación 169

Para determinar el área neta del Cu, se determina una ventana de Cu, y dos ventanas de fondo, a ambos lados del pico de Cu:

$$A_{Cu}[x,y] = \frac{1}{f[x,y]} \cdot \frac{1}{q[x,y]} \cdot \left(\sum_{c=Cu_i}^{Cu_f} Adtc[x,y,c] - \sum_{c=f1_i}^{f1_f} Adtc[x,y,c] - \sum_{c=f2_i}^{f2_f} Adtc[x,y,c] \right)$$

Ecuación 170

teniendo en cuenta que la cantidad de canales que abarca el fondo debe ser igual al número de canales en los que se integra el pico.
El sistema de adquisición no almacena la información de la carga que recibió cada píxel de la muestra, sino que almacena la carga integral que recibe la muestra. Por eso, se considera que la carga de cada píxel es:

$$q[x,y] = qt \cdot \left(\frac{256}{comp} \right)^{-2}$$

Ecuación 171

donde q_t es la carga total, el coeficiente 256^2 representa la cantidad de píxeles en el mapa sin comprimir, y *comp* el factor de compresión. Reemplazando:

$$A_{Cu}[x,y] = \frac{1}{f[x,y]} \cdot \frac{1}{qt} \cdot \left(\frac{256}{comp} \right)^2 \cdot \left(\sum_{c=Cu_i}^{Cu_f} Adtc[x,y,c] - \sum_{c=f1_i}^{f1_f} Adtc[x,y,c] - \sum_{c=f2_i}^{f2_f} Adtc[x,y,c] \right)$$

Ecuación 172

Propagando los errores al área neta:

$$\sigma_{A_{Cu}[x,y]}^2 = A_{Cu}[x,y]^2 \cdot \left(\frac{\left(\sum_{c=Cu_i}^{Cu_f} \sigma_{Adtc[x,y,c]}^2 + \sum_{c=f1_i}^{f1_f} \sigma_{Adtc[x,y,c]}^2 + \sum_{c=f2_i}^{f2_f} \sigma_{Adtc[x,y,c]}^2 \right)}{\left(\sum_{c=Cu_i}^{Cu_f} Adtc[x,y,c] - \sum_{c=f1_i}^{f1_f} Adtc[x,y,c] - \sum_{c=f2_i}^{f2_f} Adtc[x,y,c] \right)^2} + \sigma_{f[x,y]}^2 \right)$$

Ecuación 173

Para determinar la concentración de cobre en cada *píxel*, se debe multiplicar $A_{Cu}[x,y]$ por la concentración del patrón utilizado para determinar el coeficiente $f[x,y]$
El programa "pixe.c" genera 2 matrices de dimensión $(256/comp)^2$, en una entrega:

$$M_A[x,y] = \text{int}\left(A_{Cu}[x,y]\cdot 10^6\right) \quad ; \quad 0 \le x < \left(\frac{256}{comp}\right) \quad ; \quad 0 \le y < \left(\frac{256}{comp}\right)$$

Ecuación 174

información útil a la hora de convertir el mapa a un formato gráfico, y en la segunda, el número de cuentas por píxel, corregido por tiempo muerto y espesor de la muestra, y su error:

$$M_B[x,y] = \left(A'_{Cu}[x,y],\ \sigma'_{A'_{Cu}}[x,y]\right) \quad ; \quad 0 \le x < \left(\frac{256}{comp}\right) \quad ; \quad 0 \le y < \left(\frac{256}{comp}\right)$$

Ecuación 175

donde

$$A'_{Cu}[x,y] = \frac{1}{f[x,y]}\cdot\left(\sum_{c=Cu_i}^{Cu_f} Adtc[x,y,c] - \sum_{c=f1_i}^{f1_f} Adtc[x,y,c] - \sum_{c=f2_i}^{f2_f} Adtc[x,y,c]\right)$$

Ecuación 176

$$\sigma'_{A_{Cu}[x,y]} = \sqrt{A'_{Cu}[x,y]^2 \cdot \left(\frac{\left(\sum_{c=Cu_i}^{Cu_f} \sigma_{Adtc[x,y,c]}^{\ 2} + \sum_{c=f1_i}^{f1_f} \sigma_{Adtc[x,y,c]}^{\ 2} + \sum_{c=f2_i}^{f2_f} \sigma_{Adtc[x,y,c]}^{\ 2}\right)}{\left(\sum_{c=Cu_i}^{Cu_f} Adtc[x,y,c] - \sum_{c=f1_i}^{f1_f} Adtc[x,y,c] - \sum_{c=f2_i}^{f2_f} Adtc[x,y,c]\right)^2} + \sigma_{f[x,y]}^{\ 2}\right)}$$

Ecuación 177

Determinación de la concentración de cobre en espectros integrales.

De cada irradiación se puede extraer un espectro integral de PIXE, que a diferencia del mapa, no contiene información sobre la distribución espacial de los elementos, pero tiene una estadística muy superior a la de cada píxel del mapa. Estos espectros integrales son útiles para determinar con precisión la concentración media de los elementos sobre el área irradiada. Luego, el análisis de cada píxel puede indicar, con menos precisión, como se distribuye esta concentración en este área.

Como se indicó en la introducción teórica, en PIXE la concentración de un determinado elemento se determina comparando el área del fotopico asociado a ese elemento entre la muestra a analizar y un patrón de referencia.

El procedimiento utilizado en este trabajo para determinar las áreas de los fotopicos de cobre fue realizar el ajuste de una función que modela la producción de rayos X sobre un entorno del espectro integral obtenido alrededor del fotopico K_α del Cu.

El modelo utilizado es una sumatoria de términos, donde el primero representa un fondo exponencial, y los siguientes una sumatoria de distribuciones normales asociadas a los fotopicos presentes en el intervalo evaluado:

$$y = P_1 \cdot e^{P_2} + \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{P_{2+i3}}{P_{4+i3} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \cdot e^{-2 \cdot \left(\frac{x - P_{3+i3}}{P_{4+i3}} \right)^2} \right]$$

Ecuación 178

Donde *n* representa el número de normales consideradas. En el entorno del K_α del cobre se encuentran los siguientes picos:

Z	*Elem.*	*Kα1*	*Kα2*	*Kβ1*	*Lα1*	*Lα2*	*Lβ1*	*Lβ2*	*Lγ1*
27	Co	6.93032	6.9153	7.64943	0.7762	0.7762	0.7914		
28	Ni	7.47815	7.46089	8.26466	0.8515	0.8515	0.8688		
29	Cu	8.04778	8.02783	8.90529	0.9297	0.9297	0.9498		
30	Zn	8.63886	8.61578	9.572	1.0117	1.0117	1.0347		
64	Gd	42.9962	42.3089	48.697	6.0572	6.025	6.7132	7.1028	7.7858
65	Tb	44.4816	43.7441	50.382	6.2728	6.238	6.978	7.3667	8.102
66	Dy	45.9984	45.2078	52.119	6.4952	6.4577	7.2477	7.6357	8.4188
67	Ho	47.5467	46.6997	53.877	6.7198	6.6795	7.5253	7.911	8.747
68	Er	49.1277	48.2211	55.681	6.9487	6.905	7.8109	8.189	9.089
69	Tm	50.7416	49.7726	57.517	7.1799	7.1331	8.101	8.468	9.426
70	Yb	52.3889	51.354	59.37	7.4156	7.3673	8.4018	8.7588	9.7801
71	Lu	54.0698	52.965	61.283	7.6555	7.6049	8.709	9.0489	10.1434
72	Hf	55.7902	54.6114	63.234	7.899	7.8446	9.0227	9.3473	10.5158
73	Ta	57.532	56.277	65.223	8.1461	8.0879	9.3431	9.6518	10.8952
74	W	59.31824	57.9817	67.2443	8.3976	8.3352	9.67235	9.9615	11.2859
75	Re	61.1403	59.7179	69.31	8.6525	8.5862	10.01	10.2752	11.6854
76	Os	63.0005	61.4867	71.413	8.9117	8.841	10.3553	10.5985	12.0953

Tabla 29: Elementos que presentan líneas características cercanas a 8 keV [50].

De todos estos elementos, los únicos detectados en estas muestras fueron el Cu y el Zn. La comparación de áreas para determinar la concentración de cobre fue realizada sobre

el pico K_α de este elemento, por lo que la región ajustada incluyó el pico K_α del Cu, el K_α del Zn, y el K_β del cobre.
En general, la cantidad de cobre resultó ser inferior, o comparable a la cantidad de zinc presente en la muestra, y la cola del pico de zinc hacia altas energías enmascaraba completamente el pico K_β del cobre, por lo que fue suficiente utilizar un modelo con sólo 2 gaussianas, una representando al K_α del Cu y otra al K_α del Zn. Sin embargo, en algunos pocos espectros fue necesario considerar una tercer gaussiana para el K_β del Cu.

Concentración de cobre en la serie 255/6/7

En las siguientes páginas se presentan los resultados del análisis realizado sobre esta serie de experimentos a fin de determinar la concentración integral de cobre.
El análisis de esta serie fue realizado por dos métodos distintos, sin realizar ninguna corrección por espesor de la muestra, es decir, considerando las muestras como finas y además, considerándolas como gruesas.
Por cada experimento se presenta la imagen cualitativa de densidad proveniente del área del fondo de bremsstrahlung, el espectro integral corregido por tiempo muerto sobre el cual se realizó el ajuste, la carga acumulada en la copa de Faraday a lo largo del experimento, el resultado del ajuste, y la concentración medida.
La carga está expresada en unidades de 184 fC, y para determinar la concentración de cobre en función de los datos sin corregir por espesor se debe aplicar la fórmula:

$$c = 45.9\,{\mu g}/{cm^2} \cdot \frac{{P_3}/{q}}{0.885}$$

Ecuación 179

donde 45.9 $\mu g/cm^2$ es la concentración de Cu del estándar de referencia utilizado, 0.885 es la relación entre el área y la carga medida en el patrón, q la carga que atravesó la muestra y P_3 el área del pico de cobre determinada por el ajuste presentado en la sección "Determinación de la concentración de cobre en espectros integrales.".
Para determinar la concentración en base a los espectros con corrección por variación de la sección eficaz de producción, simplemente se debe multiplicar el valor del P3 ajustado por la concentración del estándar de referencia.
Adicionalmente, se incluye el espectro corregido por espesor de la muestra (tomando en cuenta que la muestra es gruesa), y el resultado del ajuste sobre el mismo.

255019

Carga = 10587287

Ajuste sin corrección por espesor
Concentración Cu = (1.35 ± 0.23) ng/cm^2

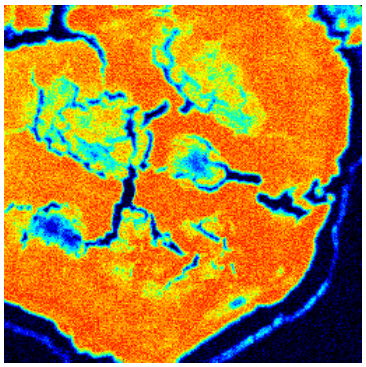
χ^2 = 1.32309

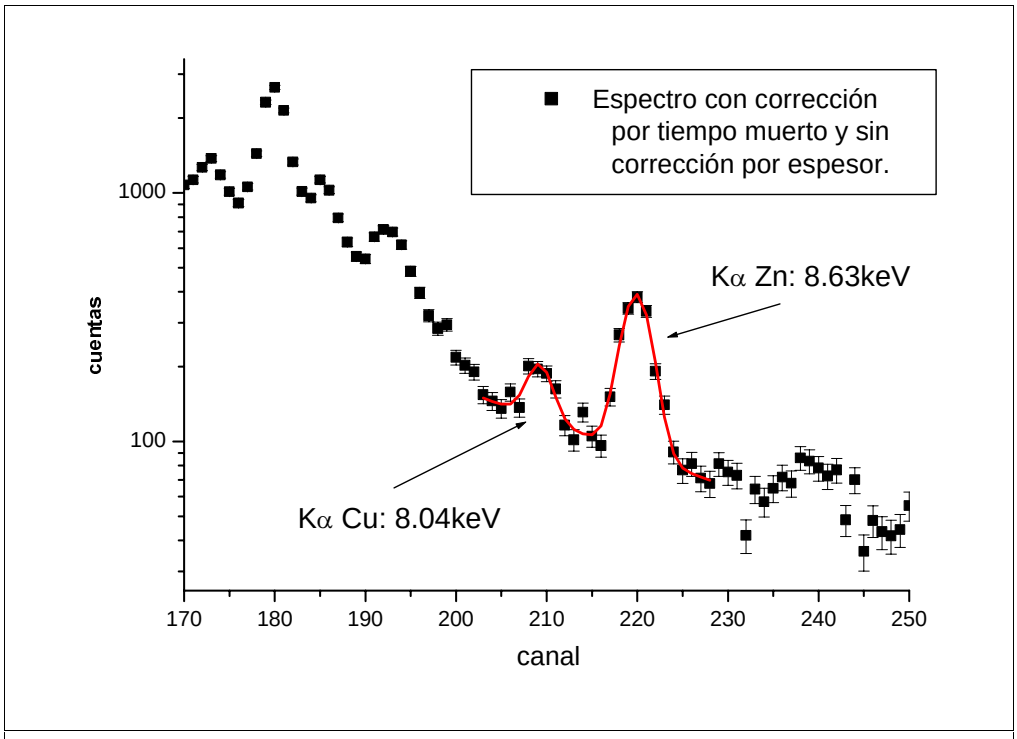
P1	72349.26085	±49916.43328
P2	-0.03045	±0.00318
P3	275.62288	±46.3435
P4	209.21655	±0.22622
P5	2.70054	±0.46544
P6	1199.05415	±53.97689
P7	219.88888	±0.07386
P8	3.16886	±0.14531

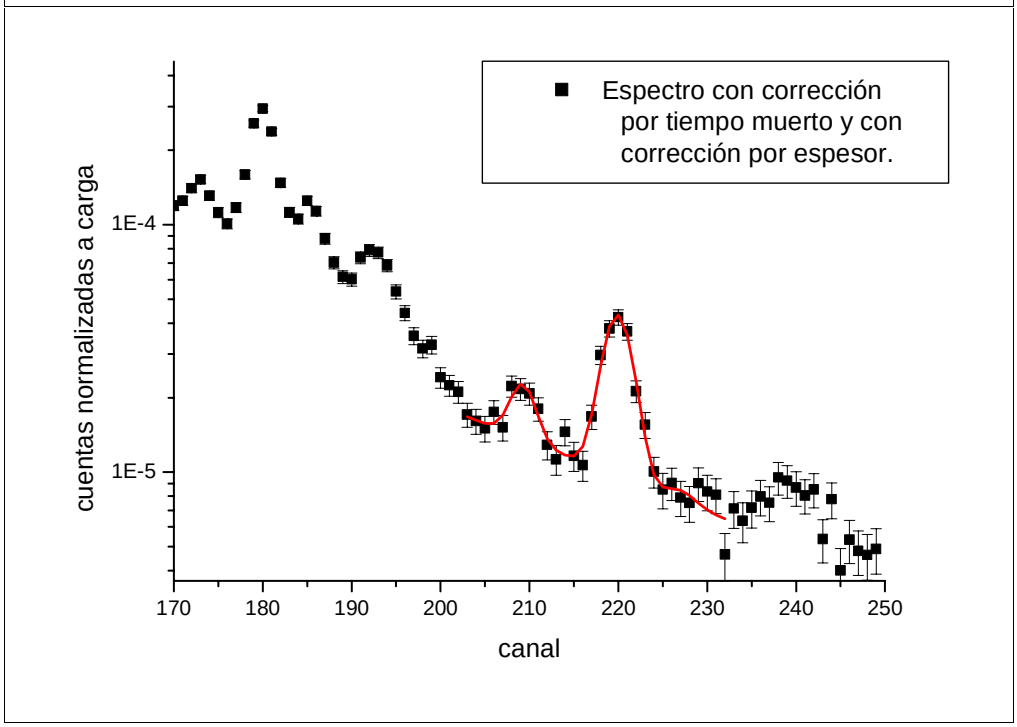
Ajuste con corrección por espesor
Concentración Cu = (1.42 ± 0.35) ng/cm^2

χ^2 = 0.90574

P1	0.0128276940	±0.0117761200
P2	-0.032718543	±0.0042374289
P3	3.100081E-5	±7.22424437E-6
P4	209.240240	±0.312115300
P5	2.72075130	±0.646890704
P6	1.35046E-4	±8.36802379E-6
P7	219.890162	±0.101759441
P8	3.20035673	±0.200340675
P9	3.0964972E-6	±4.24283412E-6
P10	227.000000	±0 (parámetro fijado)
P11	3.00000000	±0 (parámetro fijado)




Espectro con corrección por tiempo muerto y sin corrección por espesor.
Kα Zn: 8.63keV
Kα Cu: 8.04keV
cuentas
1000
100
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal


Espectro con corrección por tiempo muerto y con corrección por espesor.
cuentas normalizadas a carga
1E-4
1E-5
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal

255020

Carga = 6800769

Ajuste sin corrección por espesor
Concentración Cu = (1.24 ± 0.2) ng/cm^2

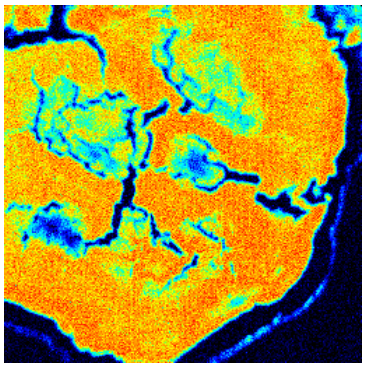
χ^2 = 2.23369

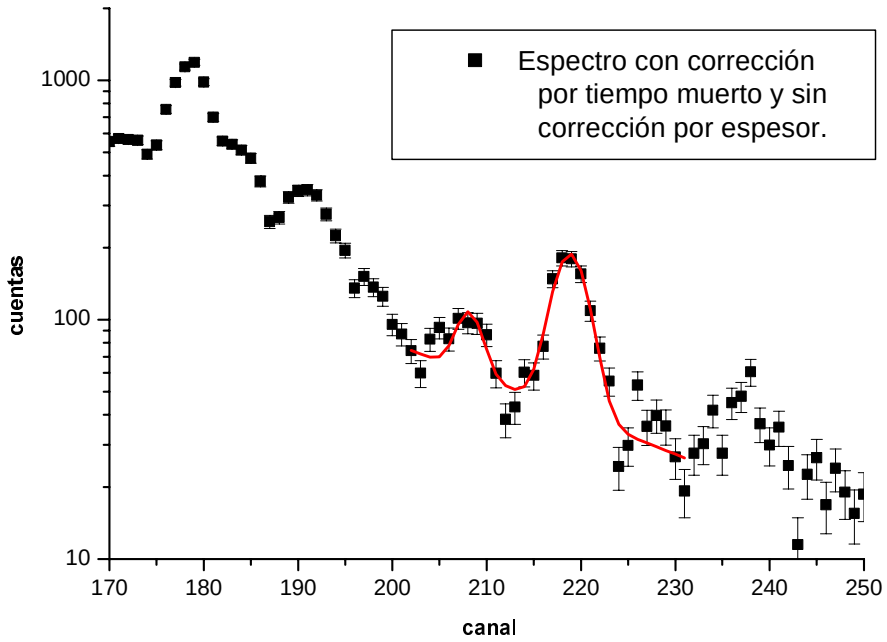
P1	101279.23495	77614.31514
P2	-0.03572	0.00352
P3	162.50065	25.76662
P4	208.16314	0.25464
P5	2.7	0 (parámetro fijado)
P6	669.5108	37.68239
P7	218.85238	0.10866
P8	3.60873	0.207

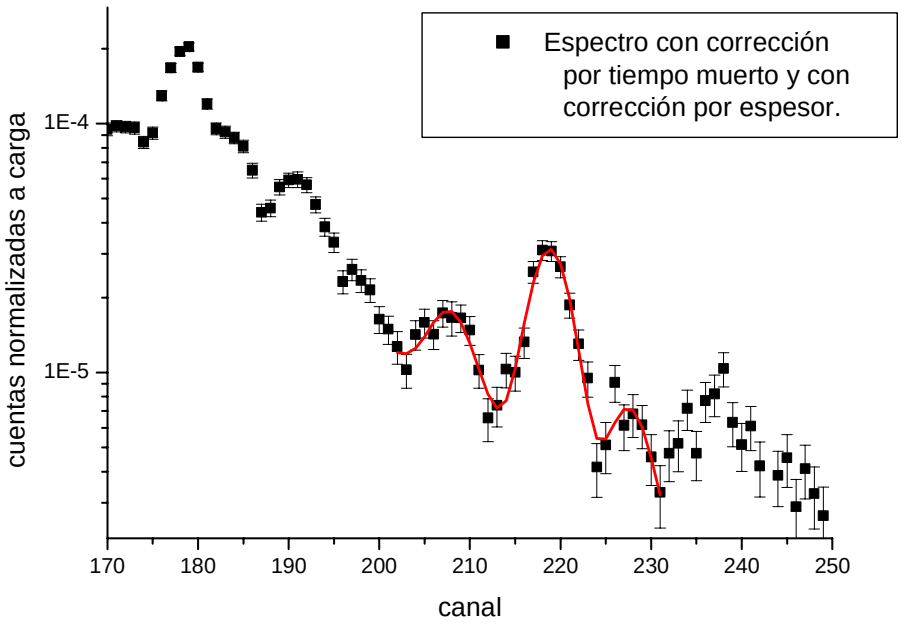
Ajuste con corrección por espesor
Concentración Cu = (2.43 ± 1.01) ng/cm^2

χ^2 = 1.02698

P1	2.50633097	±15.1052211
P2	-0.060768332	±0.0288564999
P3	5.300472E-5	±2.19197314E-5
P4	207.847596	±0.461665498
P5	4.46856165	±1.29132015
P6	1.425727E-4	±2.26990847E-5
P7	218.854920	±0.134131671
P8	4.19177338	±0.445906289
P9	2.449246E-5	±1.78195351E-5
P10	227.600960	±0.443065573
P11	4.12772966	±1.61330209




Espectro con corrección por tiempo muerto y sin corrección por espesor.
cuentas
1000
100
10
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal


Espectro con corrección por tiempo muerto y con corrección por espesor.
cuentas normalizadas a carga
1E-4
1E-5
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal

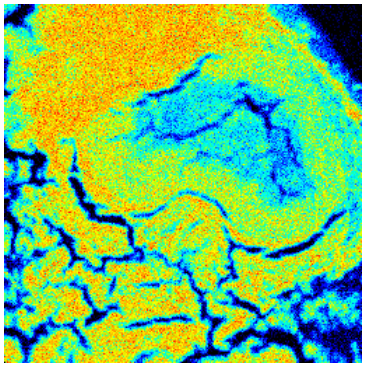
255023

Carga = 2518595

Ajuste sin corrección por espesor
Concentración Cu = (2.98 ± 0.45) ng/cm^2

χ^2 = 1.68176

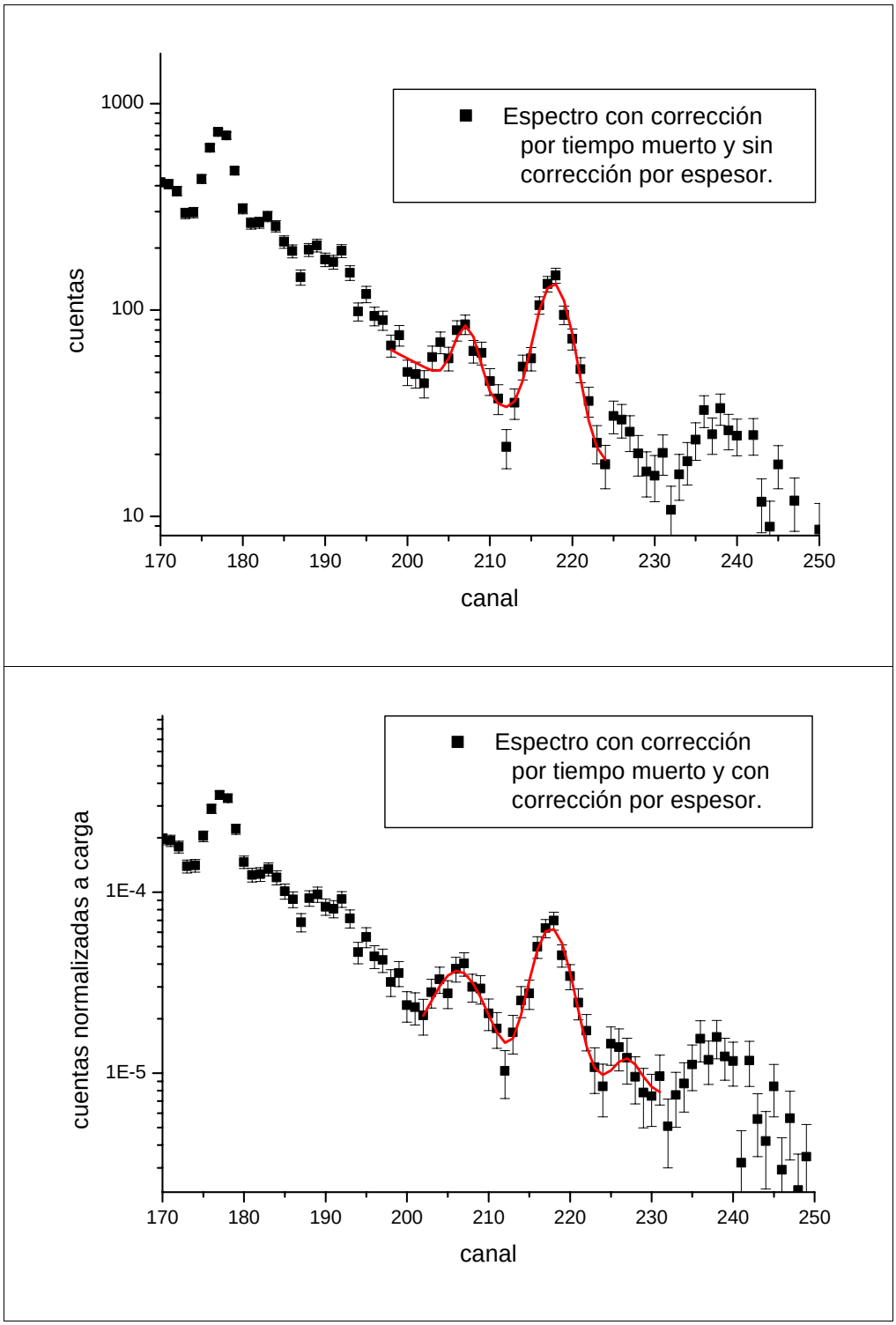
P1	869294.73522	±1226251.93422
P2	-0.04806	±0.00675
P3	144.92503	±22.06408
P4	207.11821	±0.25205
P5	2.7	±0 (parámetro fijado)
P6	523.81081	±39.82705
P7	217.73278	±0.12209
P8	3.79768	±0.27755



Ajuste con corrección por espesor
Concentración Cu = (7.23 ± 5.07) ng/cm^2

χ^2 = 0.68348

P1	0.00100039	±0.0070777004
P2	-0.02102	±0.0308436387
P3	1.575105E-4	±1.10552065E-4
P4	206.269582	±0.525939096
P5	5.28707027	±2.27752868
P6	2.629285E-4	±3.8573962E-5
P7	217.656874	±0.179157775
P8	3.94460485	±0.484209418
P9	1.34448E-5	±1.13778239E-5
P10	227.000000	±0 (parámetro fijado)
P11	3.00000000	±0 (parámetro fijado)


1000
100
10
cuentas
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal
Espectro con corrección por tiempo muerto y sin corrección por espesor.
1E-4
1E-5
cuentas normalizadas a carga
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal
Espectro con corrección por tiempo muerto y con corrección por espesor.

256035

Carga = 3444354

Ajuste sin corrección por espesor
Concentración Cu = (2.4 ± 0.37) ng/cm^2

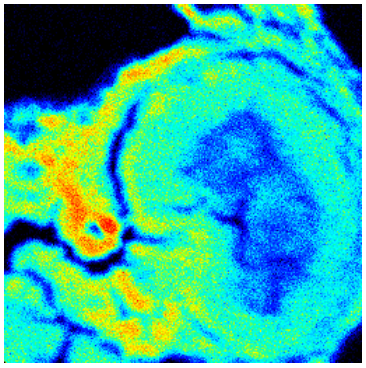
χ^2 = 1.302

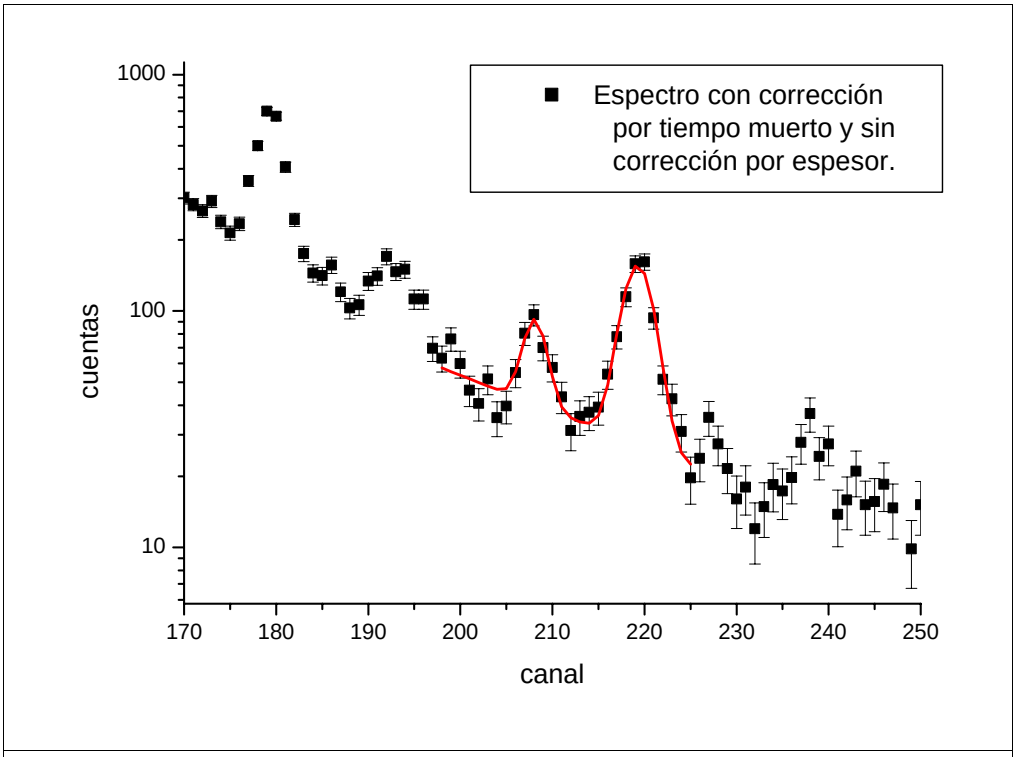
P1	61847.8961	±75431.51492
P2	-0.03526	±0.00583
P3	159.53028	±24.35423
P4	208.08729	±0.21383
P5	2.43844	±0.4102
P6	538.10784	±36.63281
P7	219.27904	±0.10442
P8	3.31825	±0.22438

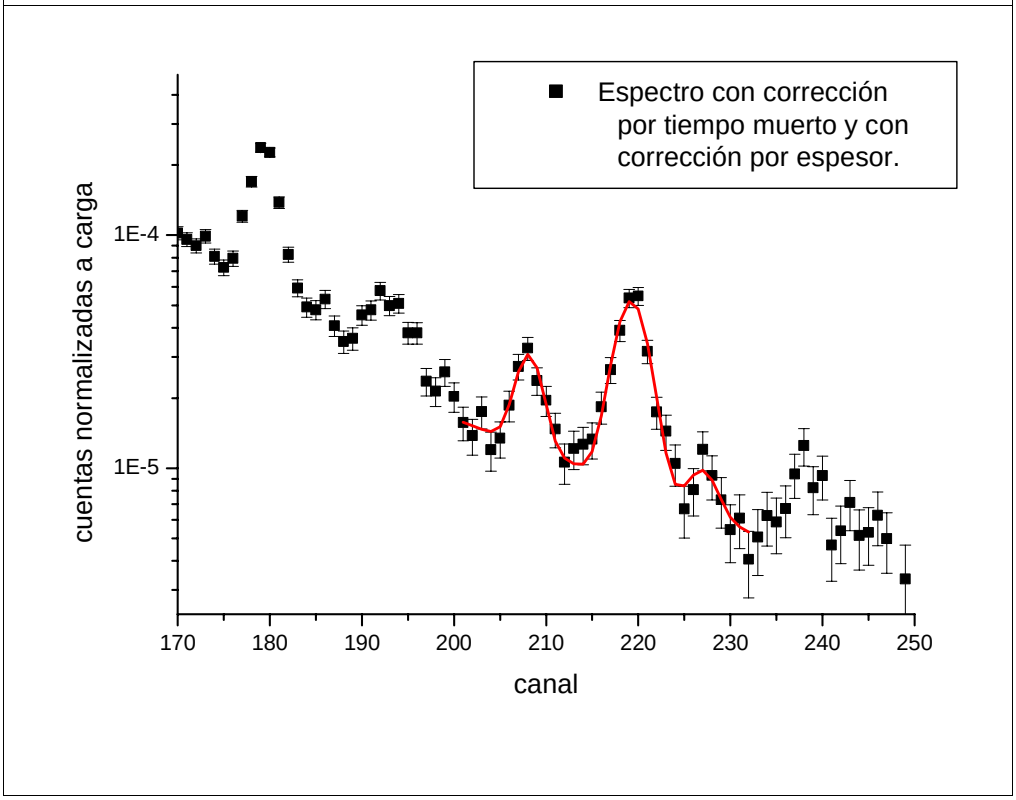
Ajuste con corrección por espesor
Concentración Cu = (2.91 ± 0.47) ng/cm^2

χ^2 = 0.75051

P1	0.0180235	±0.0220558691
P2	-0.035042168	±0.0057091265
P3	6.348482E-5	±1.01652126E-5
P4	208.120918	±0.229548456
P5	2.72898636	±0.463324597
P6	1.90962E-4	±1.25707545E-5
P7	219.258782	±0.116968243
P8	3.46105738	±0.235680551
P9	1.303935E-5	±6.22776863E-6
P10	227.000000	±0 (parámetro fijado)
P11	3.00000000	±0 (parámetro fijado)




Espectro con corrección por tiempo muerto y sin corrección por espesor.
cuentas
1000
100
10
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal


Espectro con corrección por tiempo muerto y con corrección por espesor.
cuentas normalizadas a carga
1E-4
1E-5
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal

256045

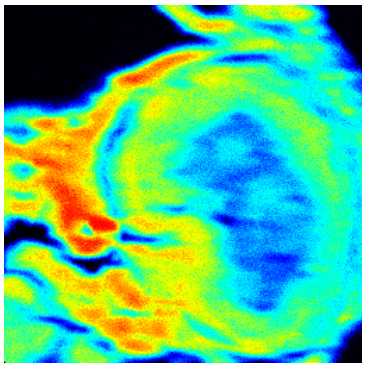
Carga = 11967102

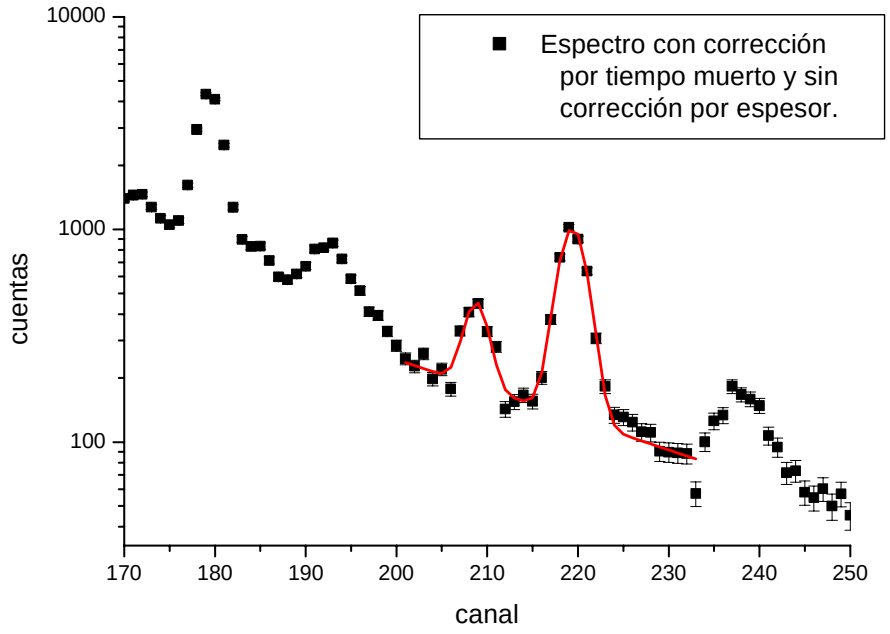
Ajuste sin corrección por espesor
Concentración Cu = (3.75 ± 0.24) ng/cm^2

χ^2 = 2.98401

P1	166762.97325	±60377.67325
P2	-0.03263	±0.00165
P3	864.32745	±55.33991
P4	208.8036	±0.09065
P5	2.52871	±0.17811
P6	3344.6592	±71.03577
P7	219.40343	±0.03593
P8	2.99911	±0.06543

El ajuste con corrección por espesor se encuentra en la sección “Mapas cuantitativos de distribución de cobre.”





256046

Carga = 9813758

Ajuste sin corrección por espesor
Concentración Cu = (3.78 ± 0.3) ng/cm^2

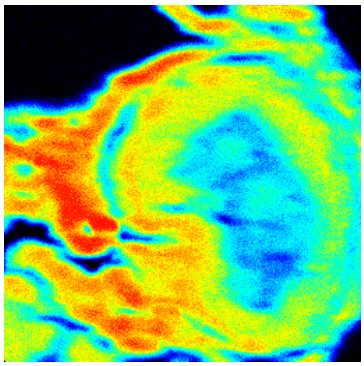
χ^2 = 1.59896

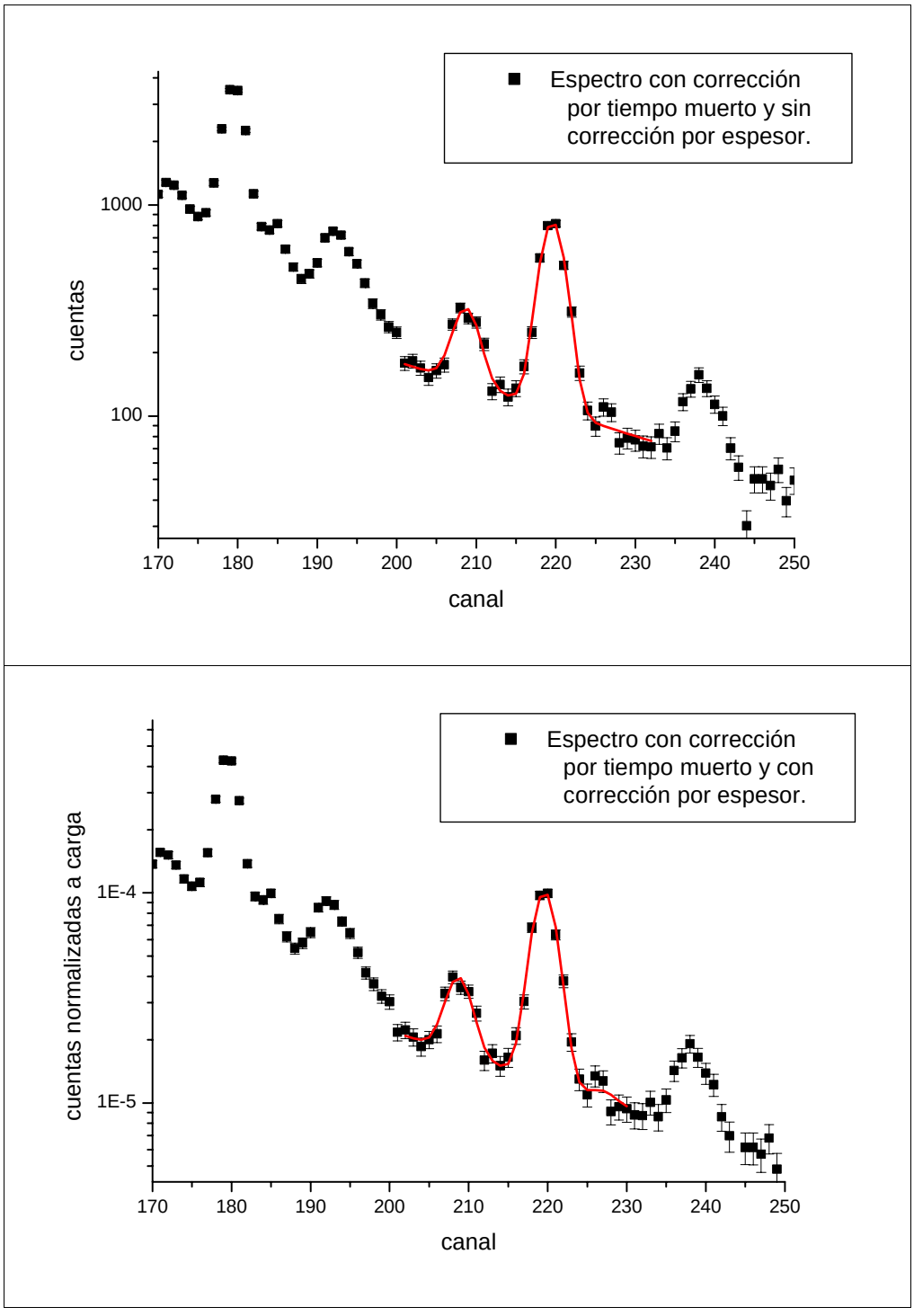
P1	40374.08117	±17543.49292
P2	-0.02704	±0.00198
P3	714.47176	±56.29004
P4	208.72099	±0.12414
P5	3.12132	±0.25138
P6	2726.38299	±64.58952
P7	219.57153	±0.03966
P8	2.98711	±0.07268

Ajuste con corrección por espesor
Concentración Cu = (4.05 ± 0.42) ng/cm^2

χ^2 = 1.22

P1	0.0060802014	±0.0056858386
P2	-0.028090	±0.0043857265
P3	8.826431E-5	±9.04979618E-6
P4	208.732230	±0.153633943
P5	3.14377651	±0.318136273
P6	3.3442E-4	±1.12514441E-5
P7	219.575126	±0.049365848
P8	3.00471784	±0.097473108
P9	4.0863E-6	±5.78007035E-6
P10	227.000000	±0 (parámetro fijado)
P11	3.00000000	±0 (parámetro fijado)




Espectro con corrección por tiempo muerto y sin corrección por espesor.
cuentas
1000
100
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal
Espectro con corrección por tiempo muerto y con corrección por espesor.
cuentas normalizadas a carga
1E-4
1E-5
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal

256047

Carga = 13194220

Ajuste sin corrección por espesor
Concentración Cu = (2.29 ± 0.26) ng/cm^2

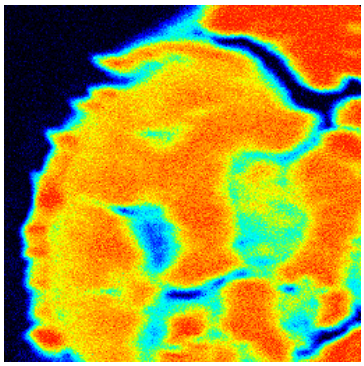
χ^2 = 1.43102

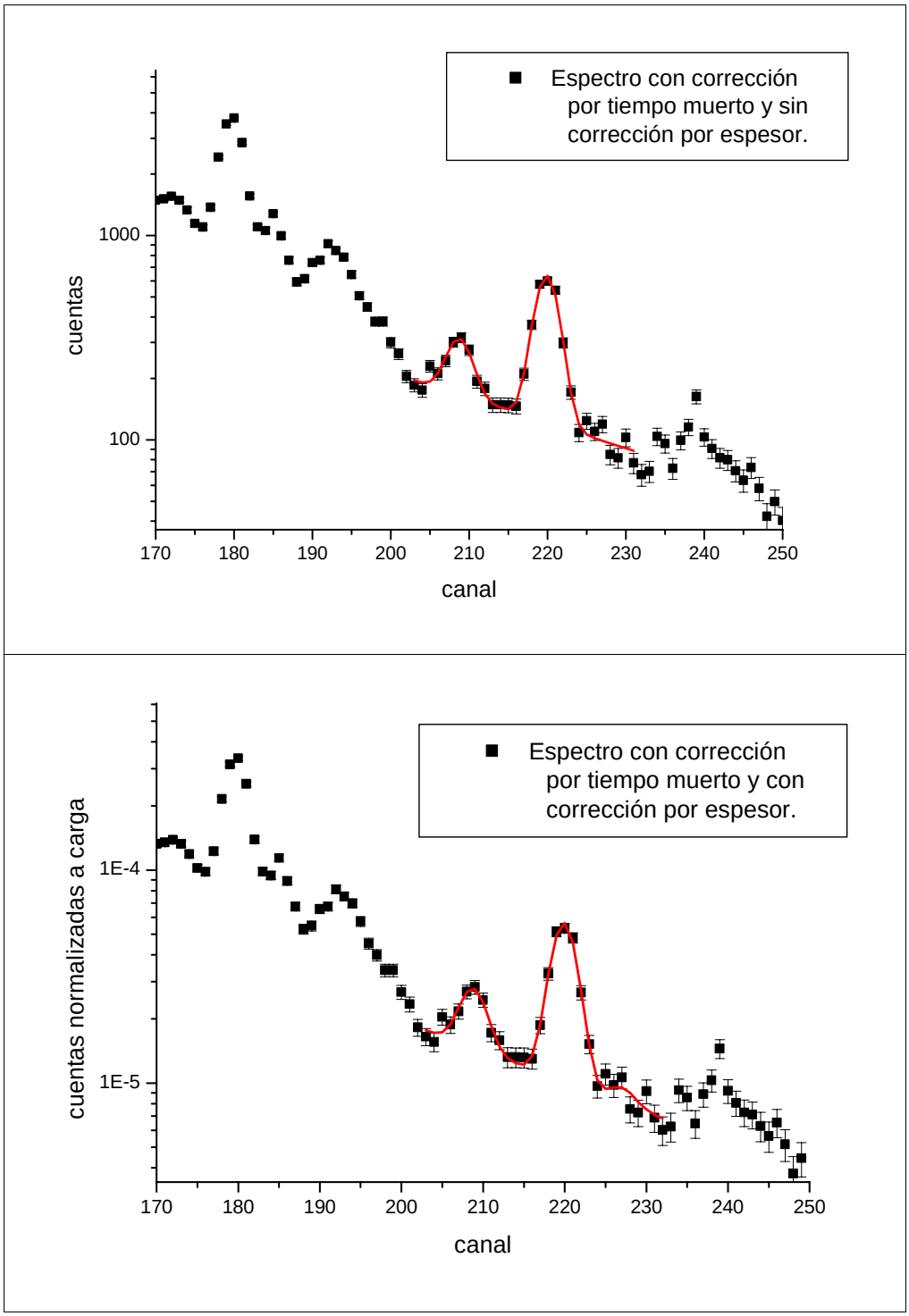
P1	60782.11149	±31947.659
P2	-0.02828	±0.00237
P3	581.60502	±64.89639
P4	208.73822	±0.15453
P5	3.11962	±0.34815
P6	1942.6936	±60.90379
P7	219.88003	±0.05214
P8	2.99621	±0.0981

Ajuste con corrección por espesor
Concentración Cu = (2.44 ± 0.35) ng/cm^2

χ^2 = 0.87175

P1	0.0134320568	±0.0104600281
P2	-0.032681861	±0.0035704140
P3	5.309965E-5	±7.63791547E-6
P4	208.776232	±0.200607043
P5	3.17898325	±0.455916292
P6	1.782385E-4	±7.4881372E-6
P7	219.885177	±0.066909806
P8	3.05854451	±0.129538537
P9	5.585464E-6	±3.80905075E-6
P10	227.000000	±0 (parámetro fijado)
P11	3.00000000	±0 (parámetro fijado)




Espectro con corrección por tiempo muerto y sin corrección por espesor.
cuentas
1000
100
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal
Espectro con corrección por tiempo muerto y con corrección por espesor.
cuentas normalizadas a carga
1E-4
1E-5
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal

256048

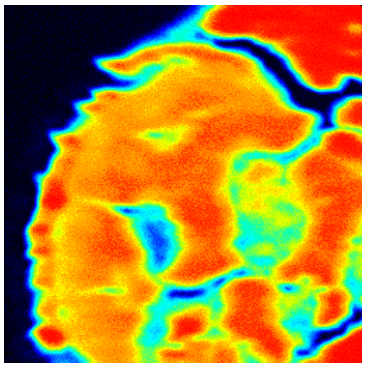
Carga = 67254349

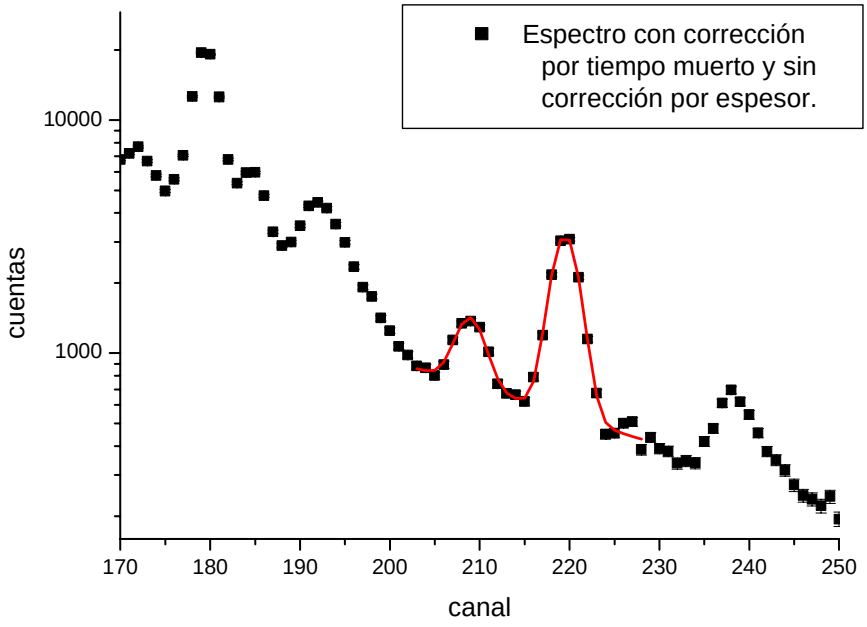
Ajuste sin corrección por espesor
Concentración Cu = (2.13 ± 0.11) ng/cm^2

χ^2 = 2.22828

P1	248729.74846	±73341.68974
P2	-0.02792	±0.00135
P3	2765.77002	±140.76335
P4	208.93597	±0.07134
P5	3.16313	±0.15898
P6	9885.89725	±137.97492
P7	219.50429	±0.0222
P8	2.95813	±0.0426

El ajuste con corrección por espesor se encuentra en la sección “Mapas cuantitativos de distribución de cobre.”





255013

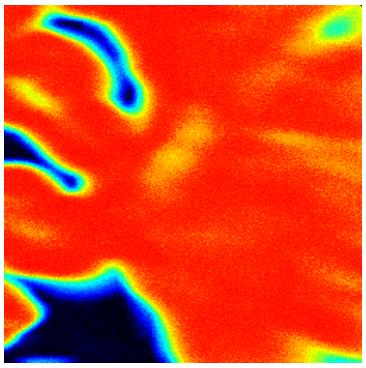
Carga = 54000000

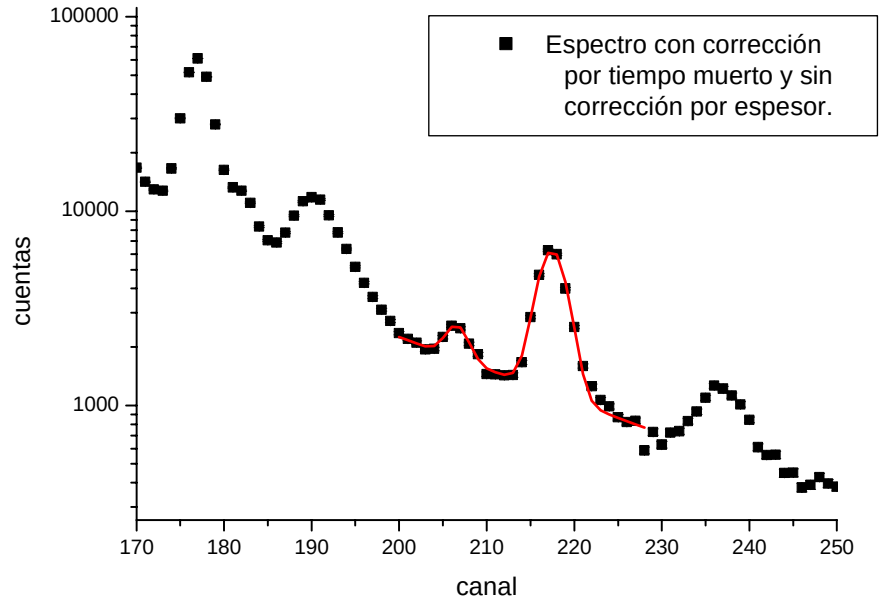
Ajuste sin corrección por espesor
Concentración Cu = (2.53 ± 0.15) ng/cm^2

χ^2 = 9.48367

P1	4779387.0072	±714165.6446
P2	-0.03831	±0.00069
P3	2635.8477	±153.97142
P4	206.61402	±0.07722
P5	2.49409	±0.15797
P6	20590.2354	±197.40863
P7	217.4621	±0.01667
P8	3.19731	±0.03184

El ajuste con corrección por espesor se encuentra en la sección “Mapas cuantitativos de distribución de cobre.”





255012

Carga = 5050000

Ajuste sin corrección por espesor
Concentración Cu = (1.9 ± 0.43) ng/cm^2

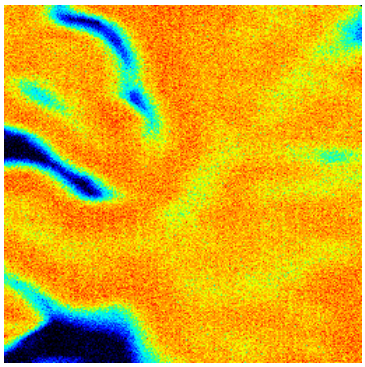
χ^2 = 3.78024

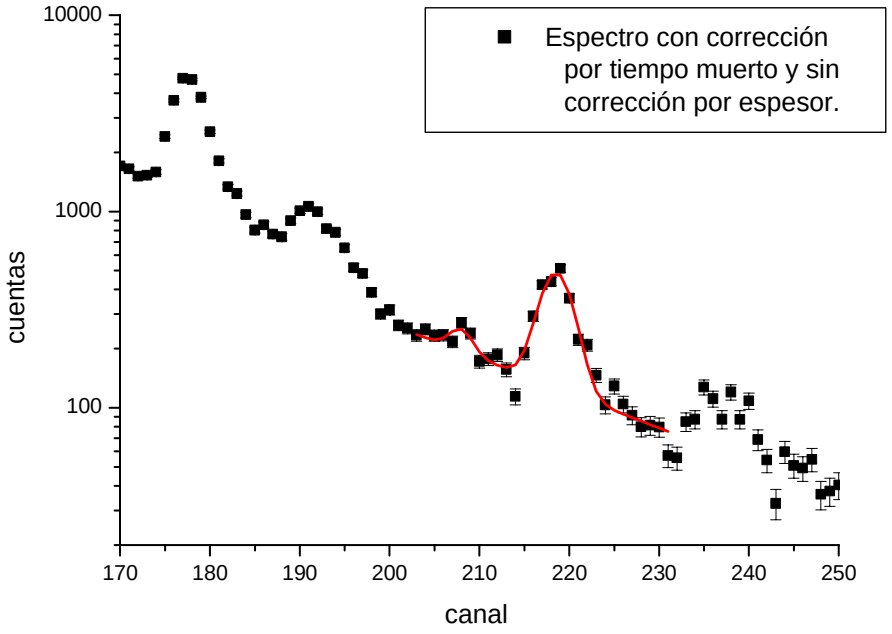
P1	899138.43931	±418066.15704
P2	-0.04061	±0.00212
P3	185.00115	±42.29911
P4	207.95068	±0.31386
P5	2.5	±0 (parámetro fijado)
P6	1634.10848	±62.2615
P7	218.5512	±0.07328
P8	3.59156	±0.14398

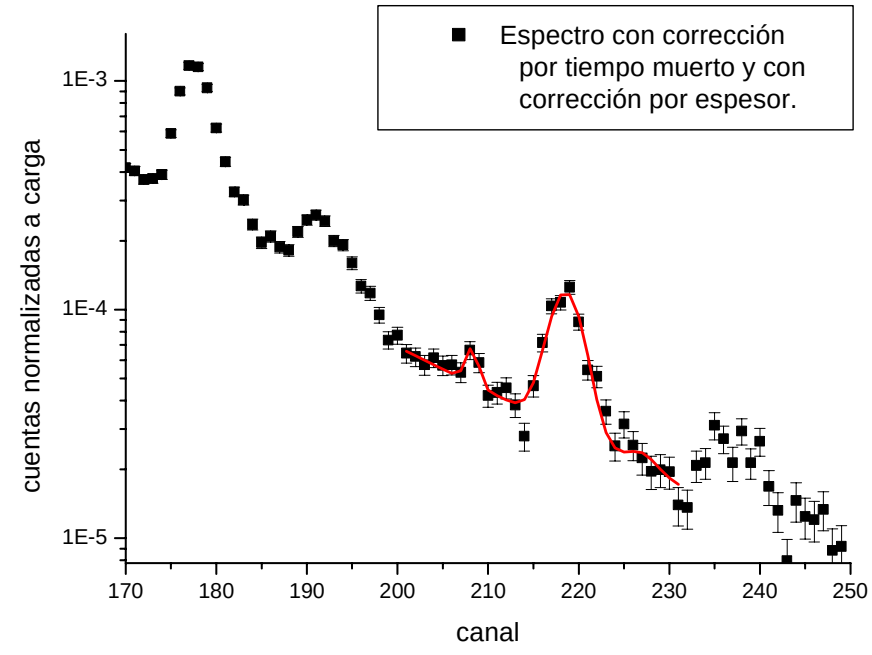
Ajuste con corrección por espesor
Concentración Cu = (1.59 ± 0.55) ng/cm^2

χ^2 = 1.53368

P1	0.545748567	±0.439425663
P2	-0.044904126	±0.0037766969
P3	3.468902E-5	±1.19274145E-5
P4	208.225159	±0.366627352
P5	1.34532037	±0.569245372
P6	4.052378E-4	±2.53021826E-5
P7	218.565235	±0.109512060
P8	3.62072870	±0.226002071
P9	1.210697E-5	±1.18661183E-5
P10	227.000000	±0 (parámetro fijado)
P11	3.00000000	±0 (parámetro fijado)




Espectro con corrección por tiempo muerto y sin corrección por espesor.
cuentas
canal
10000
1000
100
170
180
190
200
210
220
230
240
250


Espectro con corrección por tiempo muerto y con corrección por espesor.
cuentas normalizadas a carga
canal
1E-3
1E-4
1E-5
170
180
190
200
210
220
230
240
250

255005

Carga = 987000

Ajuste sin corrección por espesor
Concentración Cu = (2.6 ± 0.89) ng/cm^2

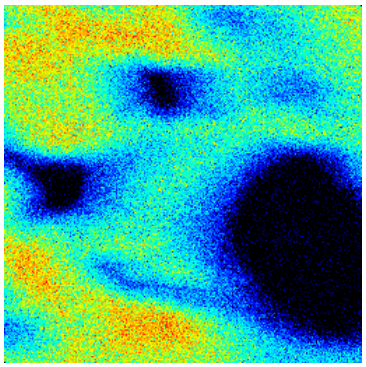
χ^2 = 2.09773

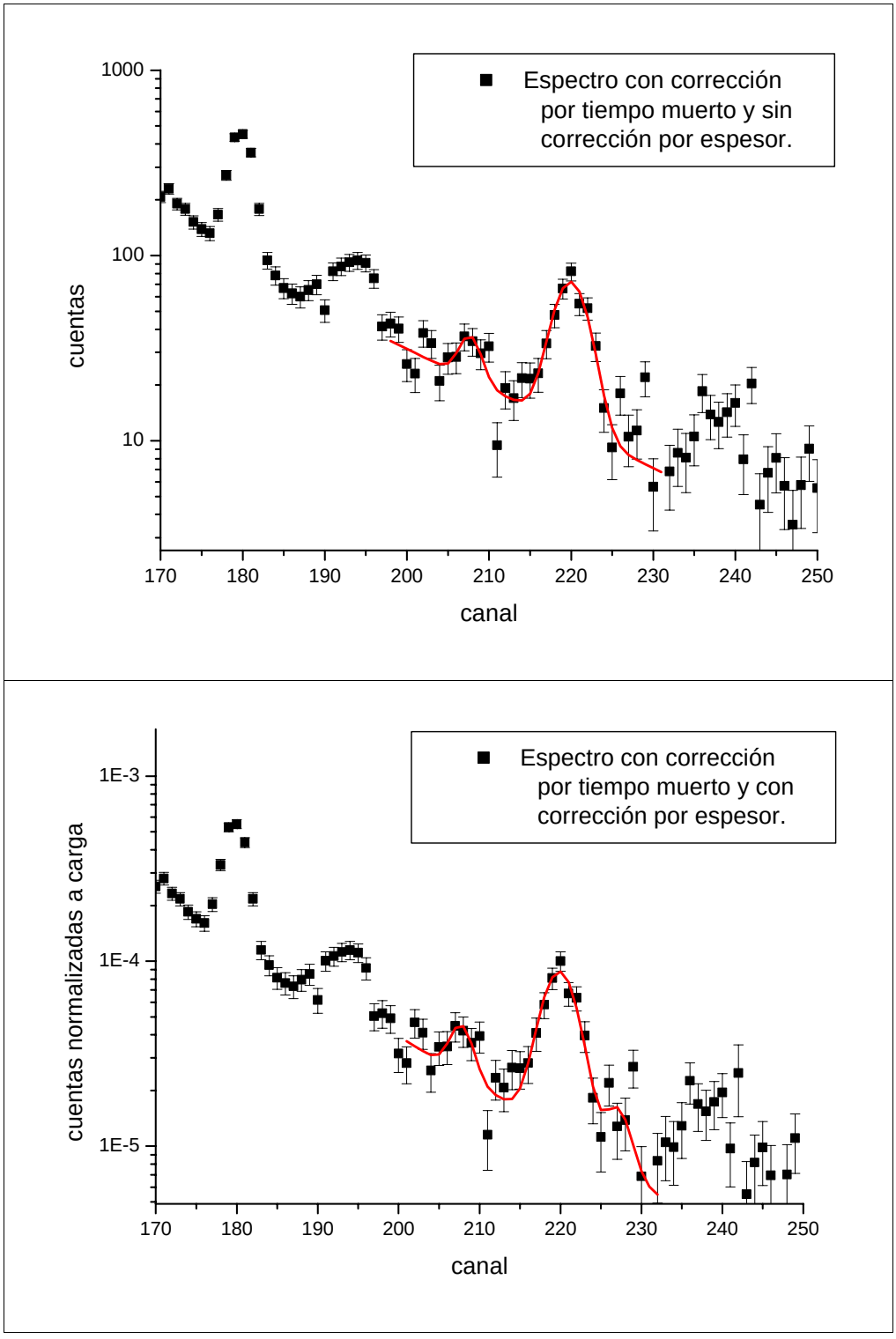
P1	611865.28902	±742367.04219
P2	-0.0494	±0.00572
P3	49.52804	±16.88228
P4	207.68707	±0.48854
P5	2.53767	±0.96009
P6	306.11161	±24.75895
P7	219.94249	±0.16298
P8	4.03946	±0.3240

Ajuste con corrección por espesor
Concentración Cu = (3.21 ± 1.15) ng/cm^2

χ^2 = 1.63021

P1	8.89082555	±19.3614088
P2	-0.061652039	±0.0101968579
P3	6.989816E-5	±2.49511147E-5
P4	207.741568	±0.483618985
P5	2.65441793	±0.998099375
P6	3.992022E-4	±3.50448567E-5
P7	219.881885	±0.174749910
P8	4.16964608	±0.349226096
P9	3.232268E-5	±1.36745378E-5
P10	227.000000	±0 (parámetro fijado)
P11	3.00000000	±0 (parámetro fijado)




Espectro con corrección por tiempo muerto y sin corrección por espesor.
cuentas
1000
100
10
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal
Espectro con corrección por tiempo muerto y con corrección por espesor.
cuentas normalizadas a carga
1E-3
1E-4
1E-5
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal

255008

Carga = 3960000

Ajuste sin corrección por espesor
Concentración Cu = (1.04 ± 0.41) ng/cm^2

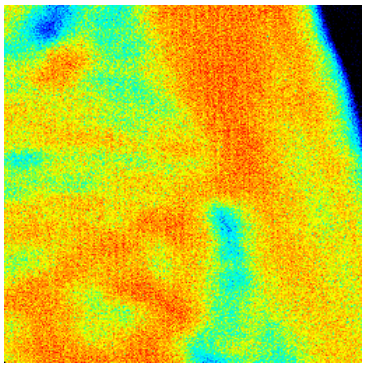
χ^2 = 1.05239

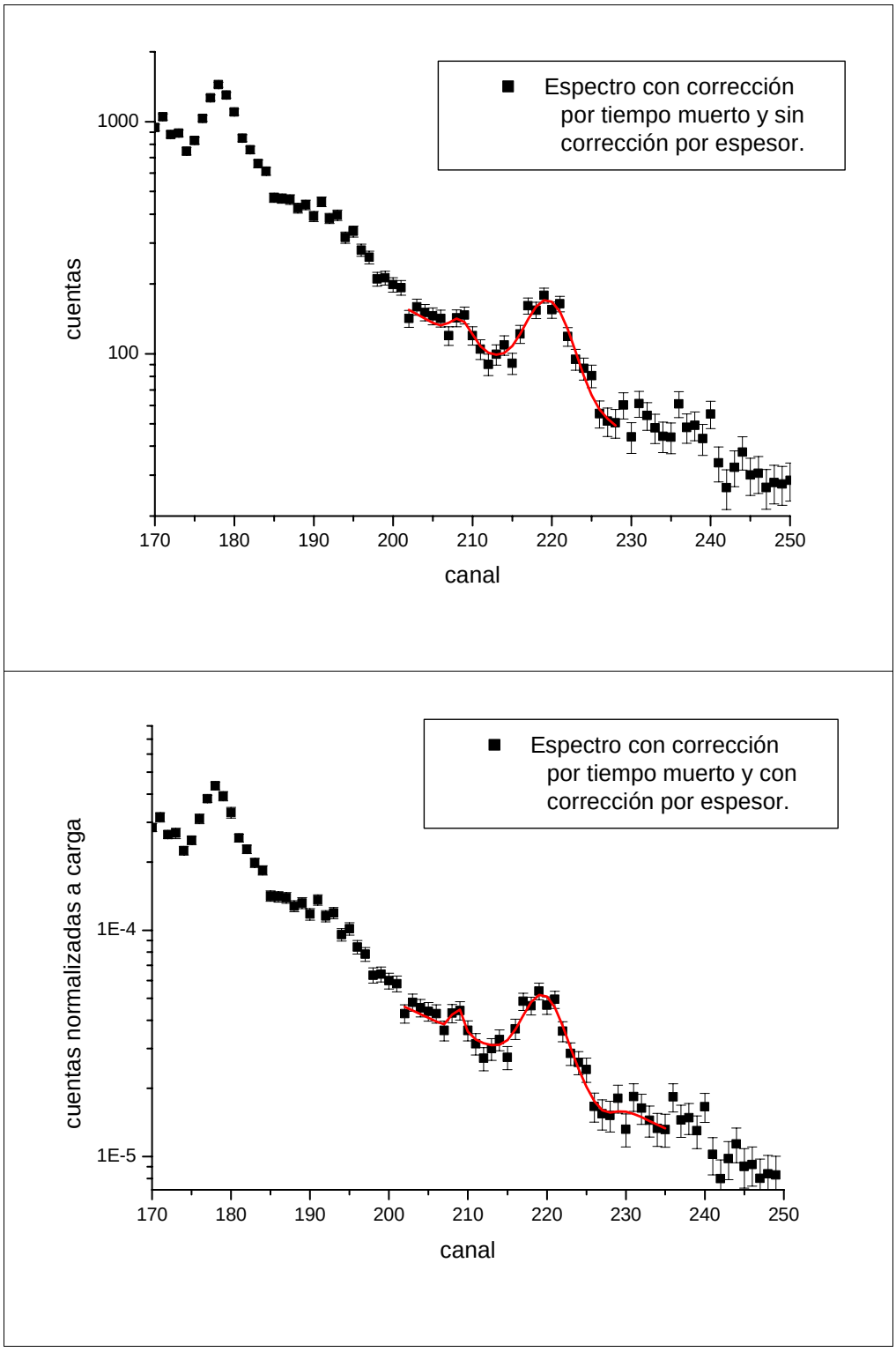
P1	1235892.3641	±1093305.87354
P2	-0.04448	±0.00417
P3	79.39404	±31.48423
P4	208.54135	±0.57121
P5	2.5	±0 (parámetro fijado)
P6	646.20975	±73.09165
P7	219.54144	±0.20065
P8	5.16545	±0.50179

Ajuste con corrección por espesor
Concentración Cu = (0.77 ± 0.39) ng/cm^2

χ^2 = 0.801

P1	0.088858699	±0.049449935
P2	-0.037466299	±0.00256968896
P3	1.685869E-5	±8.52319838E-6
P4	208.715689	±0.492802125
P5	1.32782209	±0.850115682
P6	1.655608E-4	±1.67482845E-5
P7	219.498361	±0.232159037
P8	4.69556583	±0.474286955
P9	-8.1662E-6	±7.0537044E-6
P10	227.000000	±0 (parámetro fijado)
P11	3.00000000	±0 (parámetro fijado)




Espectro con corrección por tiempo muerto y sin corrección por espesor.
cuentas
1000
100
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal
Espectro con corrección por tiempo muerto y con corrección por espesor.
cuentas normalizadas a carga
1E-4
1E-5
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal

256054

Carga = 23648265

Ajuste sin corrección por espesor
Concentración Cu = (6.25 ± 0.24) ng/cm^2

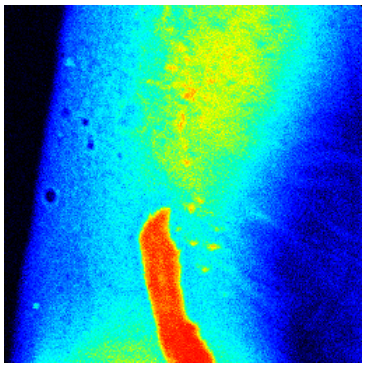
χ^2 = 1.93031

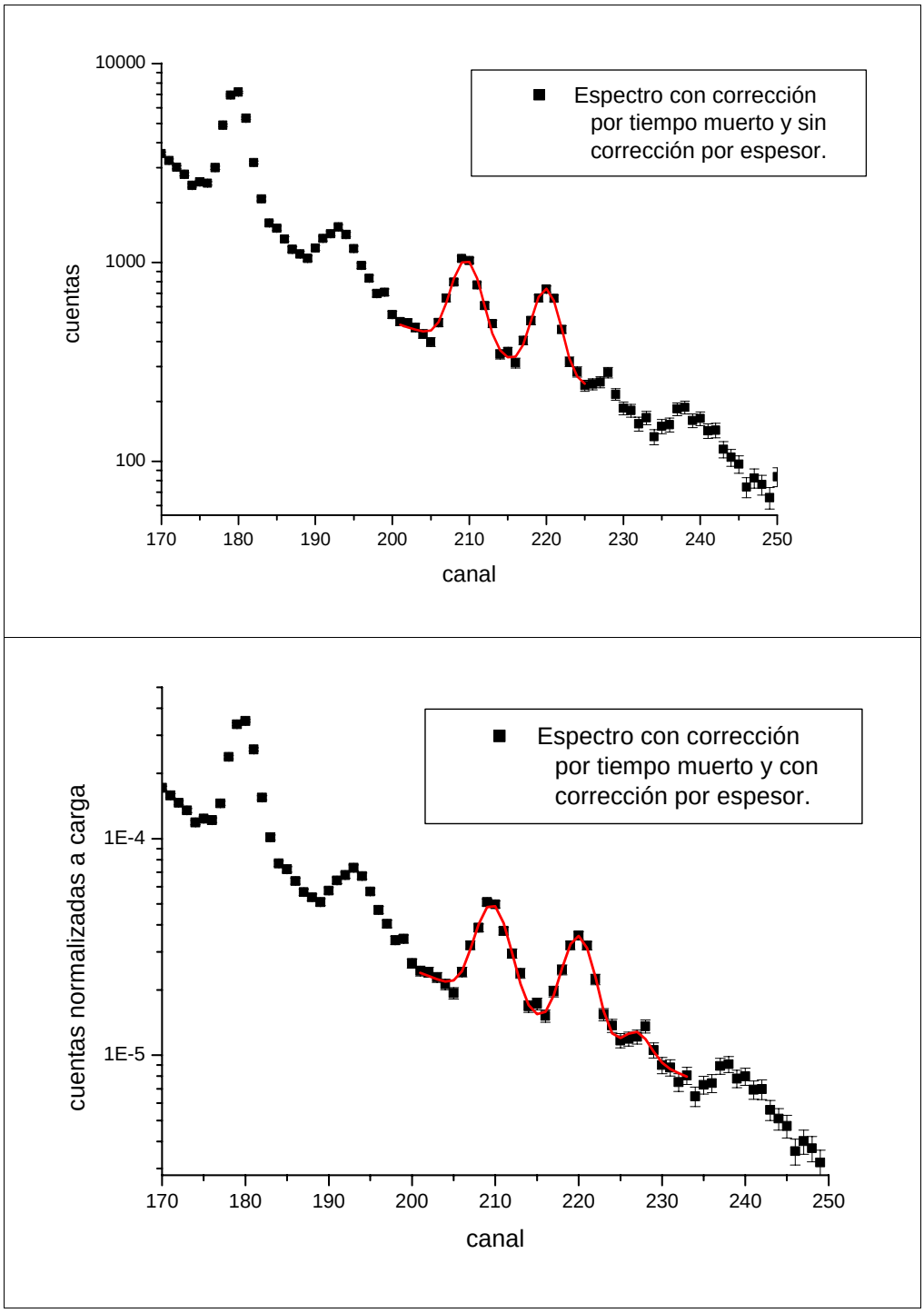
P1	162723.44009	±80368.73751
P2	-0.02891	±0.00235
P3	2848.95843	±109.17769
P4	209.57569	±0.06361
P5	3.50108	±0.13367
P6	1817.06004	±110.42906
P7	219.95739	±0.07292
P8	3.15905	±0.17213

Ajuste con corrección por espesor
Concentración Cu = (6.62 ± 0.28) ng/cm^2

χ^2 = 1.31941

P1	0.0245588754	±0.0088715581
P2	-0.034483231	±0.00168185481
P3	1.442454E-4	±5.99313982E-6
P4	209.611815	±0.072619043
P5	3.61209774	±0.153838639
P6	9.837571E-5	±4.80648453E-6
P7	219.960374	±0.081733149
P8	3.39727670	±0.166933632
P9	1.134876E-5	±2.76275522E-6
P10	227.000000	±0 (parámetro fijado)
P11	3.00000000	±0 (parámetro fijado)




10000
1000
100
cuentas
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal
Espectro con corrección por tiempo muerto y sin corrección por espesor.
1E-4
1E-5
cuentas normalizadas a carga
Espectro con corrección por tiempo muerto y con corrección por espesor.

256057

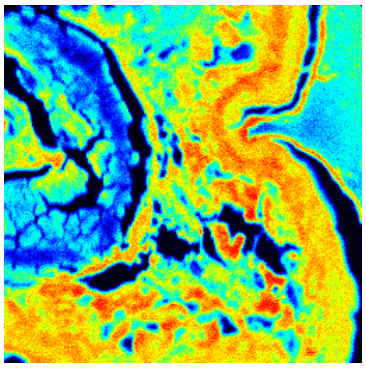
Carga = 13857620

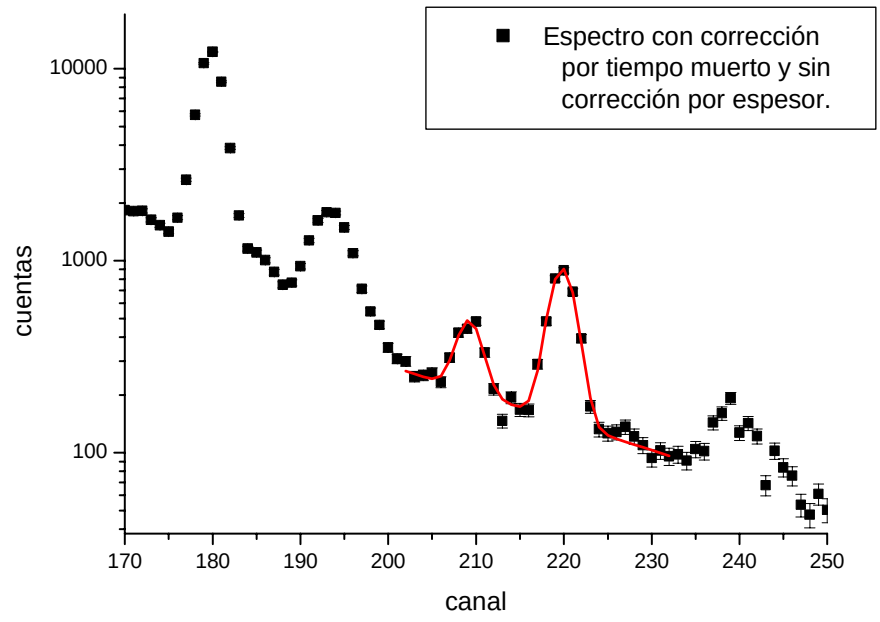
Ajuste sin corrección por espesor
Concentración Cu = (3.63 ± 0.23) ng/cm^2

χ^2 = 1.97613

P1	247874.82241	±96543.90251
P2	-0.03385	±0.00178
P3	970.87391	±62.71187
P4	209.21366	±0.0943
P5	2.74922	±0.18984
P6	2734.46981	±67.91625
P7	219.81553	±0.04004
P8	2.83995	±0.07473

El ajuste con corrección por espesor se encuentra en la sección “Mapas cuantitativos de distribución de cobre.”





256038

Carga = 3343301

Ajuste sin corrección por espesor
Concentración Cu = (2.91 ± 0.48) ng/cm^2

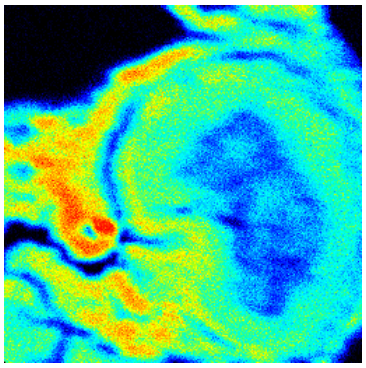
χ^2 = 1.63287

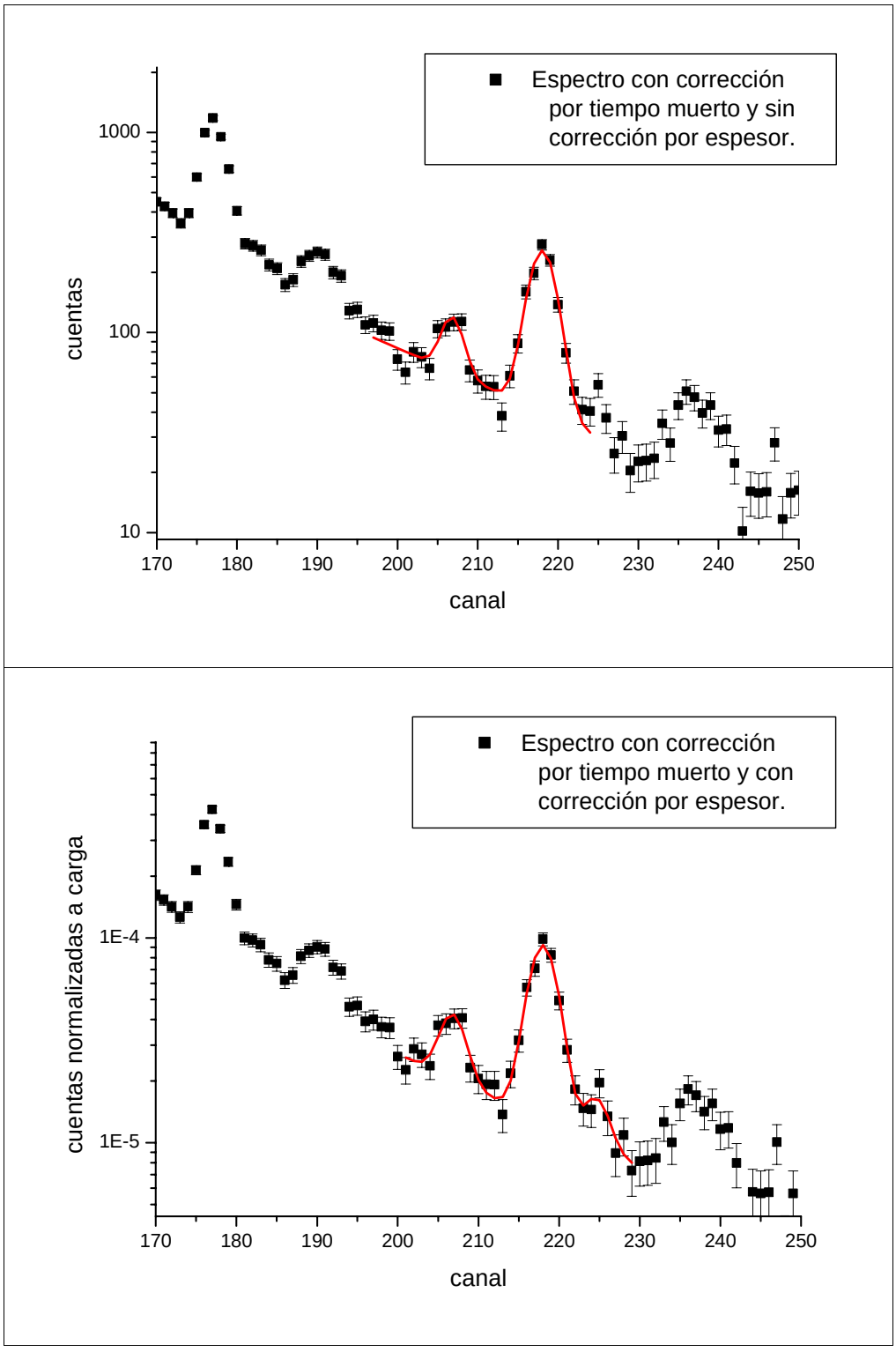
P1	304306.156	±309128.80422
P2	-0.041	±0.00488
P3	187.43518	±31.16025
P4	206.81509	±0.24014
P5	2.63081	±0.47005
P6	913.91242	±47.16251
P7	218.04558	±0.0792
P8	3.34717	±0.1704

Ajuste con corrección por espesor
Concentración Cu = (3.9 ± 0.74) ng/cm^2

χ^2 = 0.90651

P1	0.137958665	±0.217677665
P2	-0.042659591	±0.0074048515
P3	8.487853E-5	±1.62053961E-5
P4	206.808620	±0.267416468
P5	3.04789058	±0.574432332
P6	3.414071E-4	±1.94472805E-5
P7	218.006354	±0.091762967
P8	3.41844282	±0.191395511
P9	2.622843E-5	±1.00079849E-5
P10	224.612841	±0.558658930
P11	3.00000000	±0 (parámetro fijado)




Espectro con corrección por tiempo muerto y sin corrección por espesor.
cuentas
1000
100
10
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal
Espectro con corrección por tiempo muerto y con corrección por espesor.
cuentas normalizadas a carga
1E-4
1E-5
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal

256039

Carga = 4147130

Ajuste sin corrección por espesor
Concentración Cu = (3.57 ± 0.52) ng/cm^2

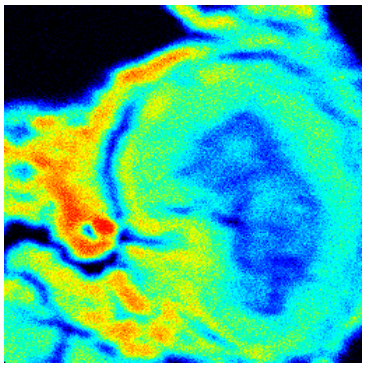
χ^2 = 1.4641

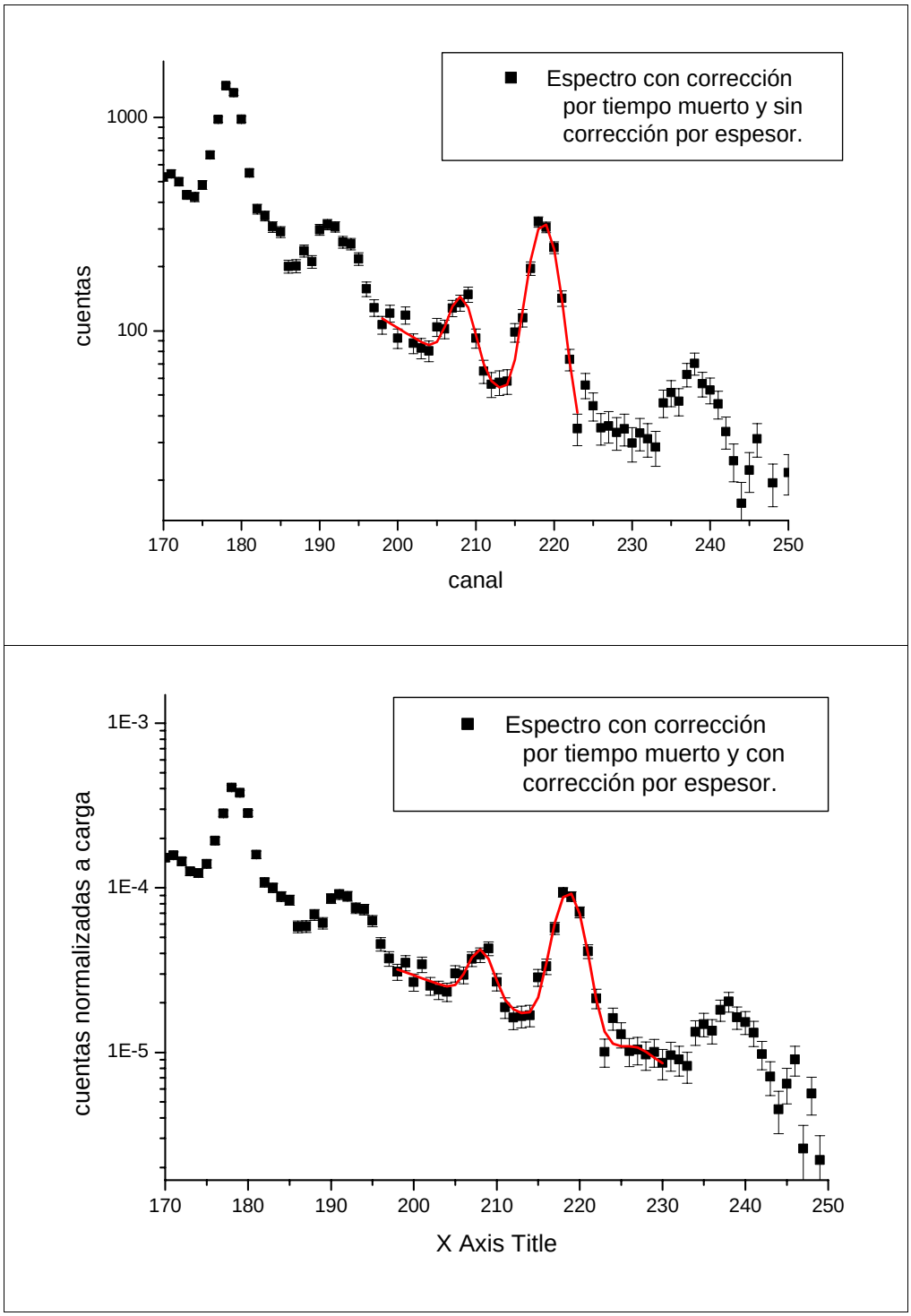
P1	2958991.58	±4115290.07752
P2	-0.05132	±0.00669
P3	285.46519	±41.24514
P4	208.09653	±0.19914
P5	2.97584	±0.41896
P6	1175.93988	±59.12222
P7	218.66213	±0.06636
P8	3.34312	±0.15682

Ajuste con corrección por espesor
Concentración Cu = (3.36 ± 0.53) ng/cm^2

χ^2 = 1.10162

P1	0.120345051	±0.118807427
P2	-0.041582039	±0.0047165705
P3	7.32169E-5	±1.16203032E-5
P4	208.056945	±0.236911139
P5	2.76329432	±0.470352112
P6	3.217549E-4	±1.64369973E-5
P7	218.665882	±0.078940949
P8	3.19321727	±0.161625225
P9	4.27657E-6	±7.3147308E-6
P10	227.000000	±0 (parámetro fijado)
P11	3.00000000	±0 (parámetro fijado)




Espectro con corrección por tiempo muerto y sin corrección por espesor.
cuentas
1000
100
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal
Espectro con corrección por tiempo muerto y con corrección por espesor.
cuentas normalizadas a carga
1E-3
1E-4
1E-5
X Axis Title

257013

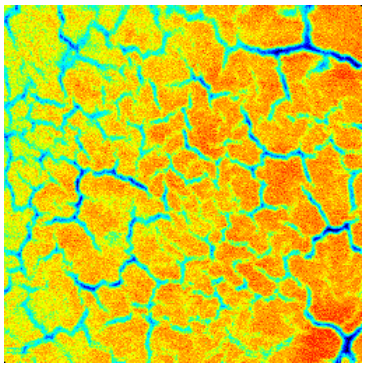
Carga = 8912321

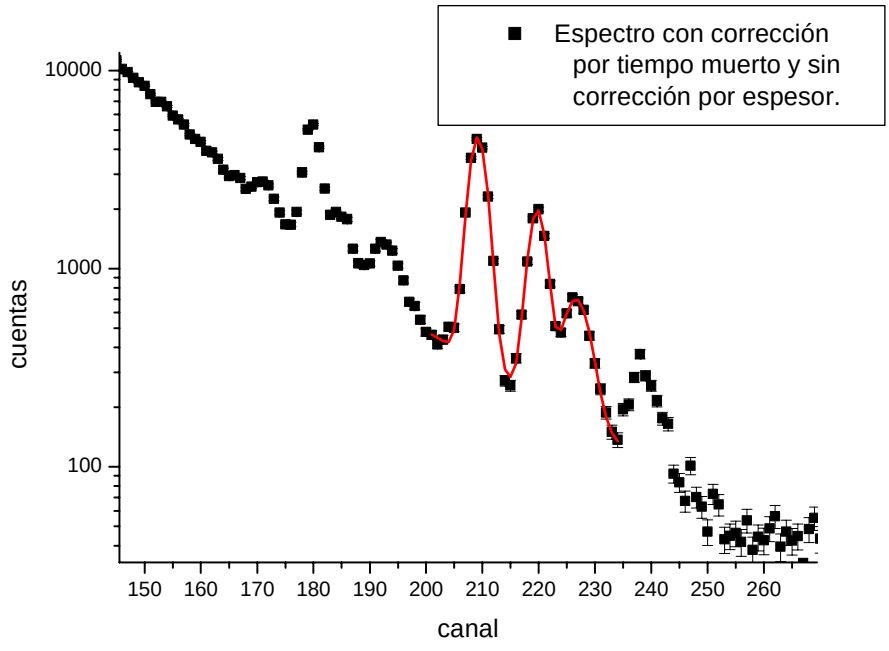
Ajuste sin corrección por espesor
Concentración Cu = (94.38 ± 0.88) ng/cm^2

χ^2 = 2.0828

P1	1025983.44	±444815.37745
P2	-0.03831	±0.00204
P3	16218.6047	±151.03568
P4	209.17594	±0.01503
P5	3.01908	±0.02772
P6	6548.30763	±110.59618
P7	219.75106	±0.0309
P8	2.96599	±0.04984
P9	3047.50685	±127.39436
P10	226.67092	±0.08499
P11	4.59903	±0.20131

El ajuste con corrección por espesor se encuentra en la sección “Mapas cuantitativos de distribución de cobre.”





257004

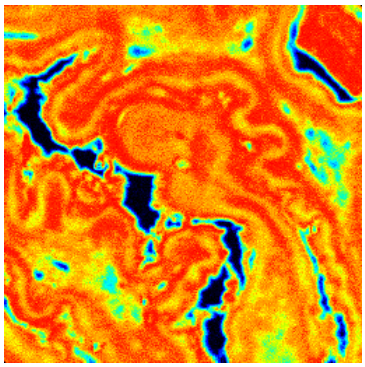
Carga = 17882723

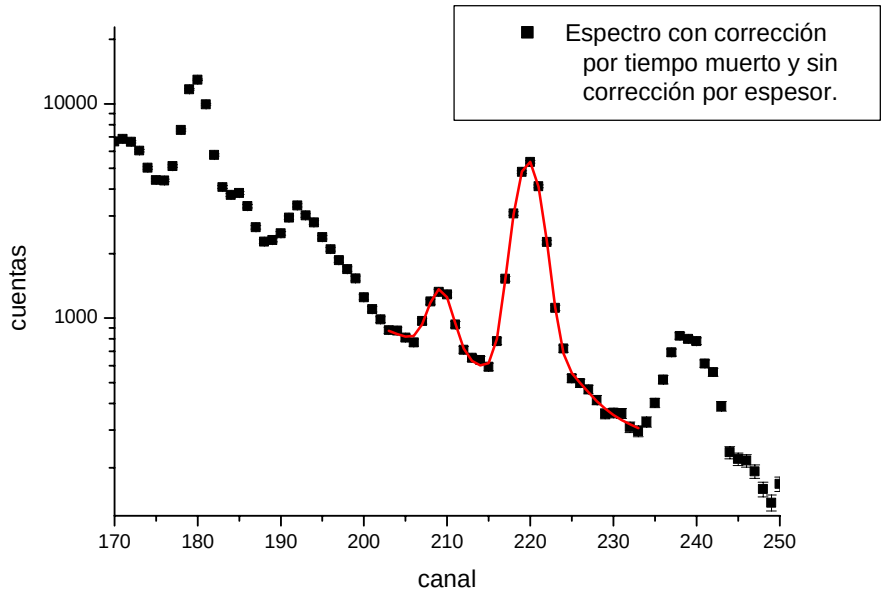
Ajuste sin corrección por espesor
Concentración Cu = (6.6 ± 0.36) ng/cm^2

χ^2 = 1.13194

P1	1054469.7054	±350562.67693
P2	-0.03496	±0.00156
P3	2276.7312	±122.45079
P4	209.22299	±0.06913
P5	2.72381	±0.14773
P6	18672.57684	±999.02454
P7	219.76819	±0.02099
P8	3.07244	±0.0633
P9	1188.84901	±1157.1608
P10	223.28735	±2.96578
P11	5.97875	±4.30283

El ajuste con corrección por espesor se encuentra en la sección “Mapas cuantitativos de distribución de cobre.”





257003

Carga = 17882723

Ajuste sin corrección por espesor

Concentración Cu = (7.6 ± 0.19) ng/cm^2

χ^2 = 1.53076

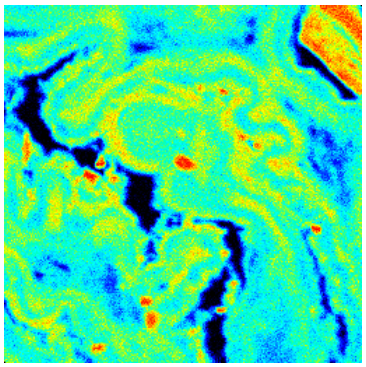
P1	21603.7528	±12645.42353
P2	-0.02518	±0.00274
P3	255.89081	±37.50776
P4	209.07179	±0.19869
P5	2.37403	±0.3816
P6	2618.95798	±64.30303
P7	219.95556	±0.03962
P8	2.88774	±0.07106
P9	331.5321	±43.69503
P10	226.49384	±0.35078
P11	4.6	±0 (parámetro fijado)

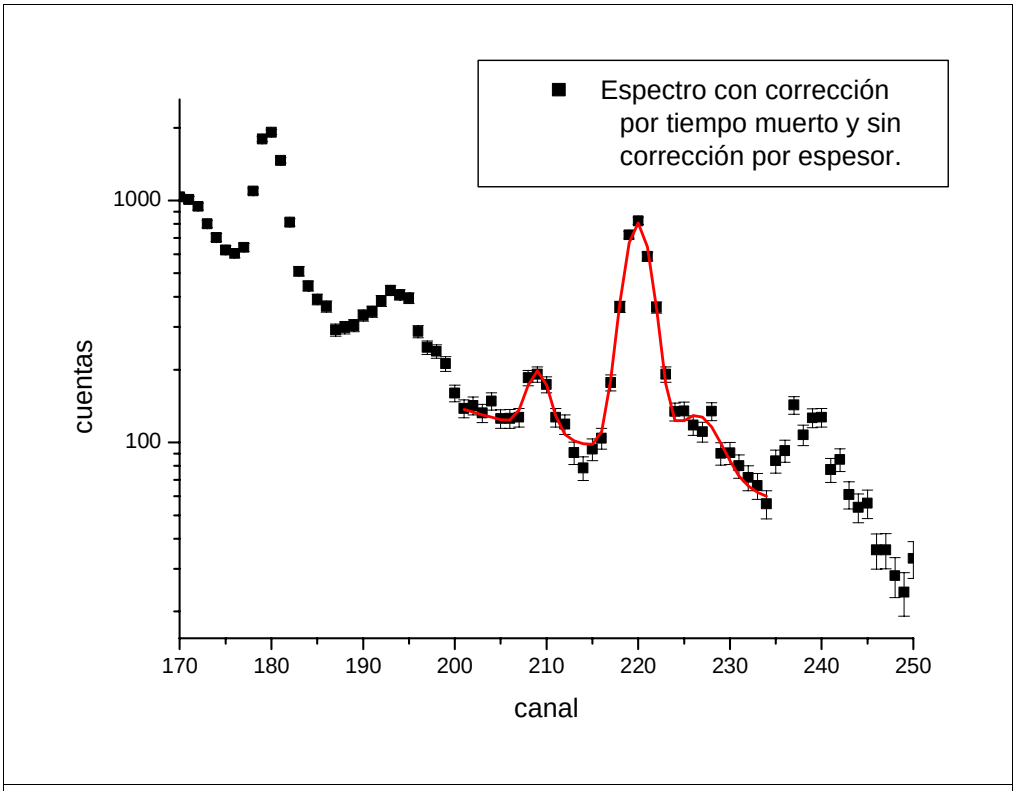
Ajuste con corrección por espesor

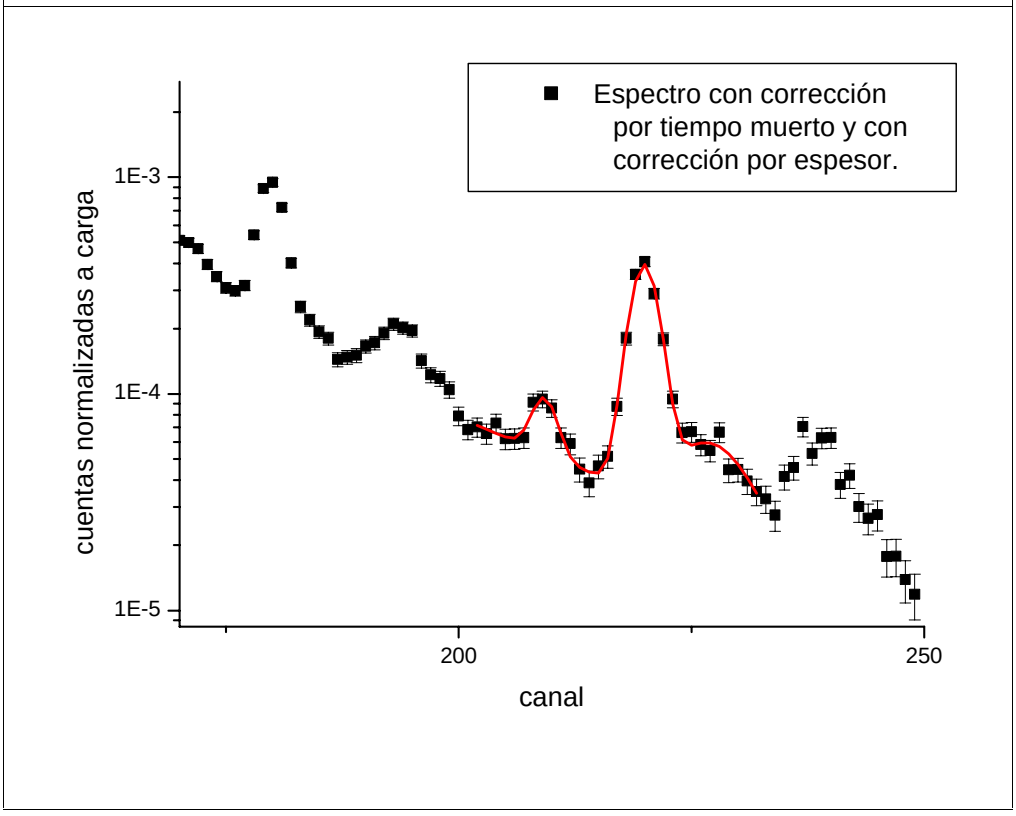
Concentración Cu = (6.49 ± 1.19) ng/cm^2

χ^2 = 0.86227

P1	0.346047463	±0.591073188
P2	-0.042004188	±0.0080805090
P3	1.413613E-4	±2.59877797E-5
P4	209.205132	±0.247248052
P5	2.59826774	±0.485997113
P6	0.0013144	±4.54921325E-5
P7	219.928039	±0.053994128
P8	2.94547786	±0.094569458
P9	3.278584E-4	±8.64753675E-5
P10	227.000000	±0 (parámetro fijado)
P11	7.63793538	±1.56804642




Espectro con corrección por tiempo muerto y sin corrección por espesor.
cuentas
1000
100
170
180
190
200
210
220
230
240
250
canal


Espectro con corrección por tiempo muerto y con corrección por espesor.
cuentas normalizadas a carga
1E-3
1E-4
1E-5
200
250
canal

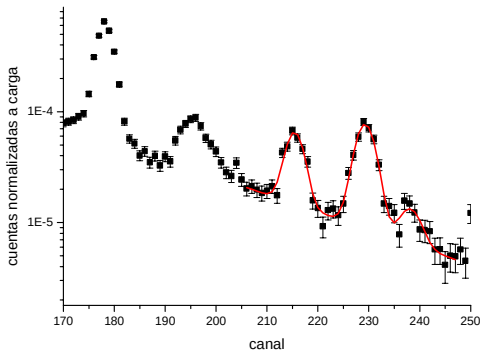
Concentración de cobre en la serie 225/6

A continuación se presentan los espectros corregidos por espesor y tiempo muerto de esta serie de experimentos, y los resultados de los ajustes para obtener el área del pico de cobre. Los mapas de estos experimentos se encuentran en la sección "Mapa cuantitativo del tumor 8."

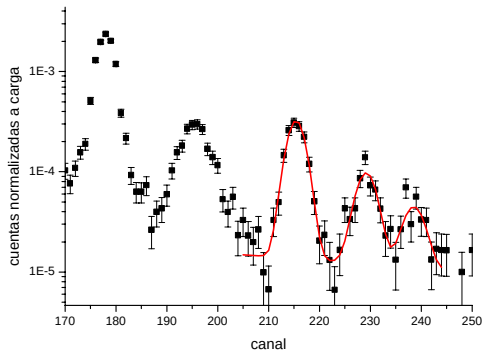
	226011		***225027***		***225018***	
	valor	***error***	***valor***	***error***	***valor***	***error***
χ^2	1.01E+00		1.29E+00		1.31E+00	
P1	3.87E-02	3.33E-02	1.02E-04	3.81E-04	5.94E-02	1.27E-01
P2	-3.66E-02	3.89E-03	-9.41E-03	1.72E-02	-3.94E-02	9.92E-03
P3	2.15E-04	1.43E-05	1.35E-03	7.48E-05	5.10E-04	1.85E-05
P4	2.15E+02	1.19E-01	2.15E+02	1.02E-01	2.16E+02	6.90E-02
P5	3.38E+00	2.30E-01	3.46E+00	1.78E-01	3.81E+00	1.32E-01
P6	3.23E-04	1.47E-05	4.14E-04	5.47E-05	5.06E-04	1.94E-05
P7	2.29E+02	9.22E-02	2.29E+02	2.34E-01	2.29E+02	7.61E-02
P8	3.76E+00	1.72E-01	3.84E+00	4.92E-01	3.90E+00	1.37E-01
P9	3.46E-05	9.39E-06	1.72E-04	5.87E-05	1.10E-04	2.05E-05
P10	2.38E+02	4.91E-01	2.39E+02	4.67E-01	2.38E+02	3.49E-01
P11	4.01E+00	1.13E+00	4.02E+00	1.06E+00	5.67E+00	8.47E-01
Concentración [ng/cm^2]	9.88E+00	6.54E-01	6.21E+01	3.43E+00	2.34E+01	8.47E-01

	226010		***226016***		***225016***	
	valor	***error***	***valor***	***error***	***valor***	***error***
χ^2	7.87E-01		1.12E+00		9.68E-01	
P1	2.62E-03	4.62E-03	3.16E-02	2.20E-02	1.23E-02	1.15E-02
P2	-2.62E-02	8.05E-03	-3.49E-02	3.15E-03	-3.17E-02	4.26E-03
P3	2.61E-04	1.35E-05	2.88E-04	1.61E-05	5.81E-04	1.37E-05
P4	2.16E+02	9.68E-02	2.16E+02	1.14E-01	2.16E+02	4.20E-02
P5	3.78E+00	1.91E-01	3.90E+00	2.26E-01	3.36E+00	7.88E-02
P6	3.21E-04	1.61E-05	4.58E-04	1.66E-05	4.61E-04	1.24E-05
P7	2.29E+02	1.01E-01	2.29E+02	7.28E-02	2.29E+02	5.54E-02
P8	3.67E+00	1.53E-01	3.62E+00	1.29E-01	3.63E+00	9.42E-02
P9	7.00E-05	2.59E-05	2.75E-05	8.84E-06	1.07E-04	1.23E-05
P10	2.37E+02	1.01E+00	2.37E+02	5.79E-01	2.38E+02	2.41E-01
P11	7.96E+00	2.61E+00	3.46E+00	1.21E+00	5.51E+00	5.93E-01
Concentración [ng/cm^2]	1.20E+01	6.19E-01	1.32E+01	7.39E-01	2.67E+01	6.31E-01

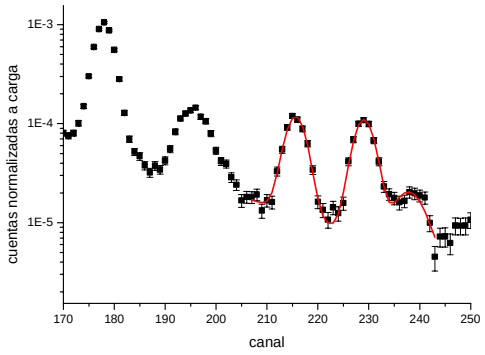
226011



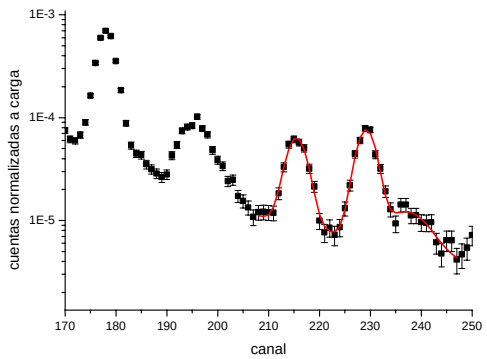
225027



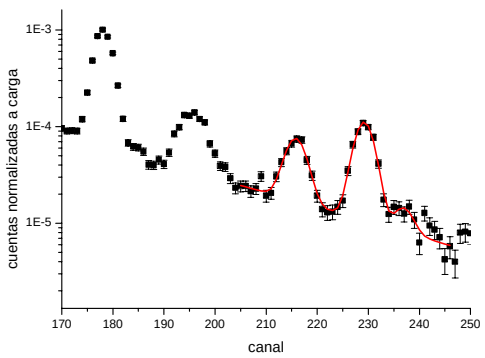
225018



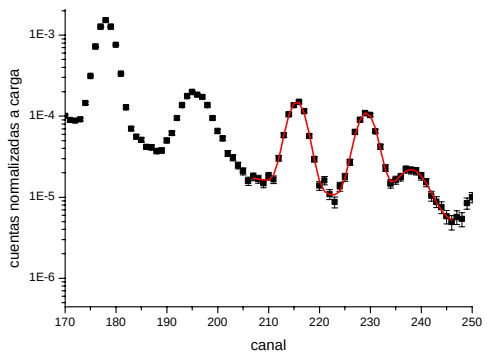
226010



226016



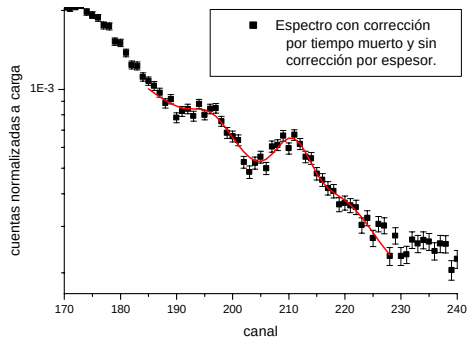
225016

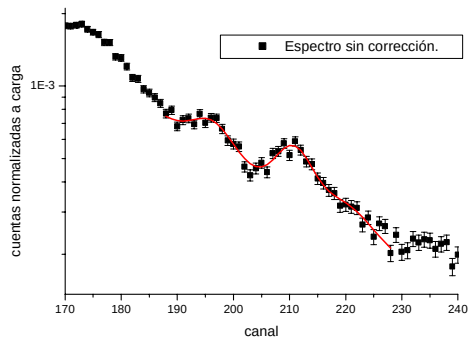


Concentración de cobre en la serie 214

214008

Con corrección de tiempo muerto			***Sin corrección*** Carga = 1337682		
Concentración Cu = (22.87 ± 3.51) ng/cm^2			Concentración Cu = (43.99 ± 5.7) ng/cm^2		
Ajuste:			Ajuste:		
χ^2 = 1.59943			χ^2 = 1.34048		
P1	0.693174177	± 0.181472591	P1	0.345947865	± 0.100159380
P2	-0.035341047	± 0.00134001528	P2	-0.032679524	± 0.00144972091
P3	0.00109492	± 1.6783037E-4	P3	0.001215982	± 1.58862197E-4
P4	196.078000	± 0	P4	196.078000	± 0
P5	6.36000000	± 0	P5	6.36000000	± 0
P6	0.00168114	± 1.66695991E-4	P6	0.001501523	± 1.44053269E-4
P7	210.696936	± 0.262419516	P7	210.691481	± 0.262084441
P8	5.75252423	± 0.510858815	P8	5.90037554	± 0.508646215
P9	9.8443693E-4	± 2.0108437E-4	P9	7.510613E-4	± 1.77013194E-4
P10	219.410000	± 0	P10	219.410000	± 0
P11	9.07000000	± 0	P11	9.07000000	± 0





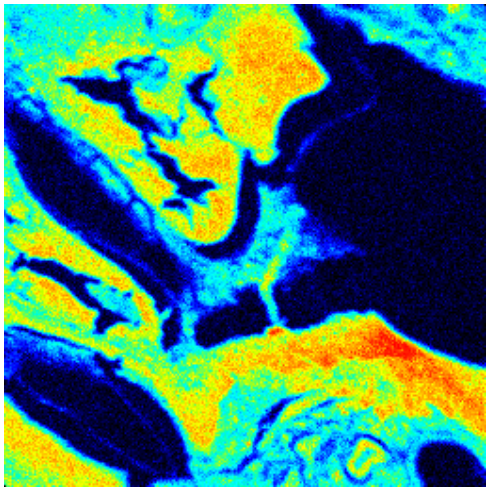
Con corrección de tiempo muerto y espesor de la muestra

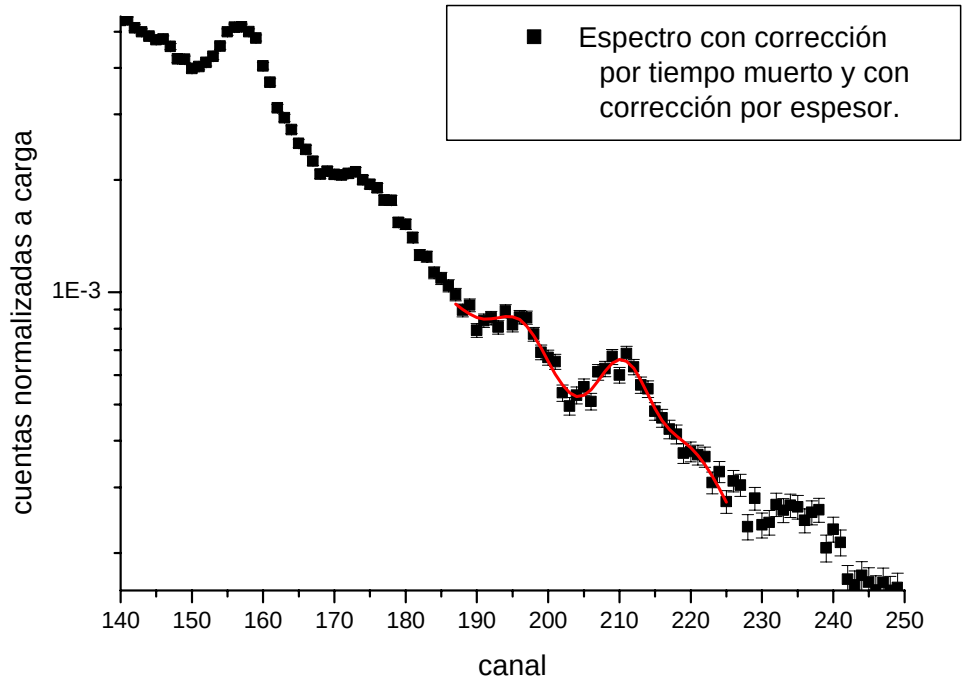
Concentración Cu = (31.01 ± 4.13) ng/cm^2

Ajuste:

χ^2 = 1.15878

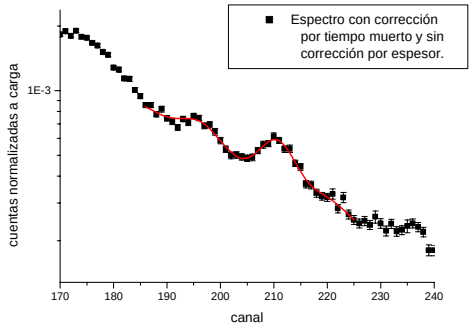
P1	1.11645825	± 0.505636110
P2	-0.037936781	± 0.00232659950
P3	0.00148449	± 1.97655717E-4
P4	196.078000	± 0
P5	6.36000000	± 0
P6	0.00207243	± 2.39116099E-4
P7	210.505364	± 0.263058384
P8	6.27952760	± 0.532872595
P9	0.00132367	± 2.6702974E-4
P10	219.410000	± 0
P11	9.07000000	± 0

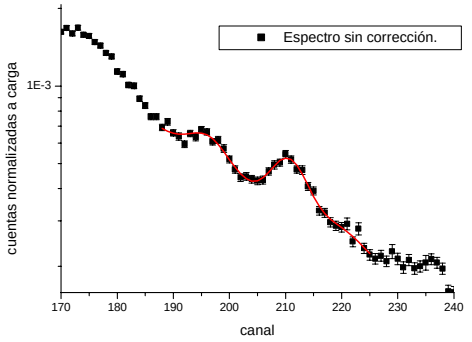




214007

Con corrección de tiempo muerto			*Sin corrección*		
			Carga = 3315412		
Concentración Cu = (20.47 ± 2.47) ng/cm^2			Concentración Cu = (35.09 ± 3.9) ng/cm^2		
Ajuste:			Ajuste:		
χ^2 = .3769			χ^2 = 1.34207		
P1	0.440762438	± 0.119486312	P1	0.299503701	± 0.088143731
P2	-0.033659349	± 0.00139554596	P2	-0.032382293	± 0.00149677217
P3	9.7998484E-4	± 1.18131894E-4	P3	9.70265E-4	± 1.08280427E-4
P4	196.078000	± 0	P4	196.078000	± 0
P5	6.36000000	± 0	P5	6.36000000	± 0
P6	0.00160762	± 1.36655242E-4	P6	0.00143504	± 1.19513366E-4
P7	210.561715	± 0.192219169	P7	210.563376	± 0.190980672
P8	5.92935550	± 0.386365484	P8	5.99239405	± 0.381013751
P9	5.722914E-4	± 1.63500261E-4	P9	4.6080285E-4	± 1.47852926E-4
P10	219.410000	± 0	P10	219.410000	± 0
P11	9.07000000	± 0	P11	9.07000000	± 0





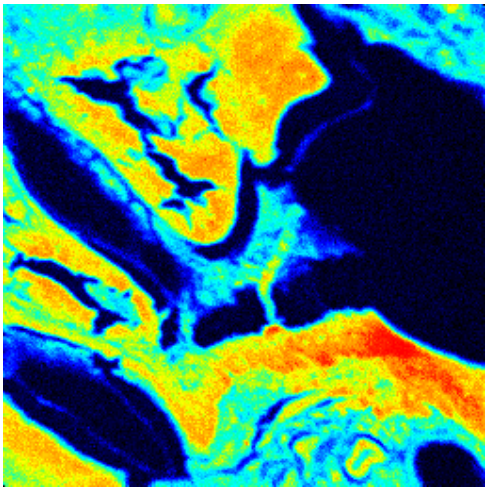
Con corrección de tiempo muerto y espesor de la muestra

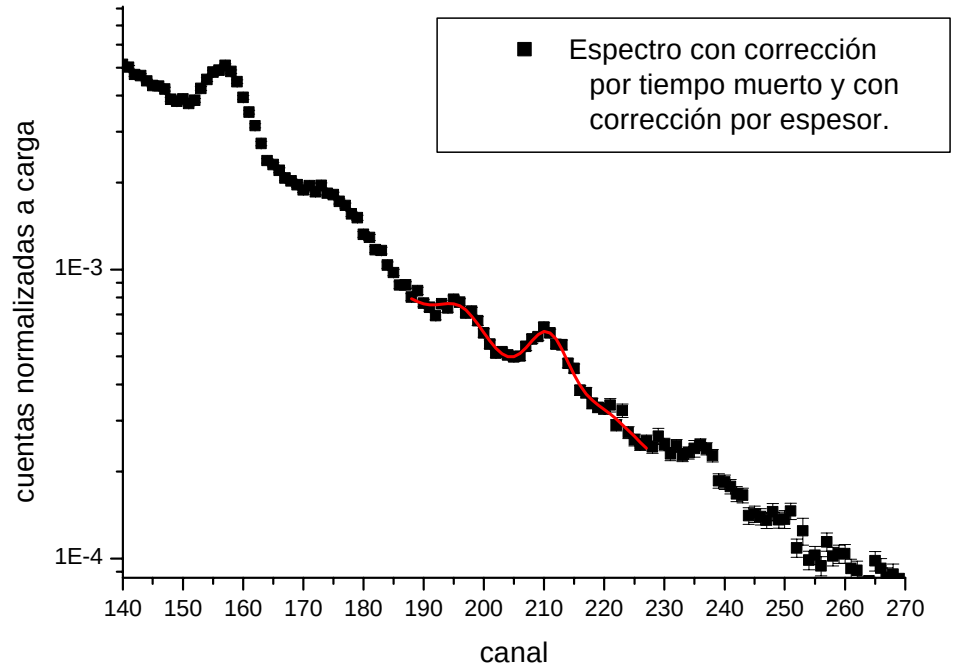
Concentración Cu = (22.9 ± 2.51) ng/cm^2

Ajuste:

χ^2 = 1.3178

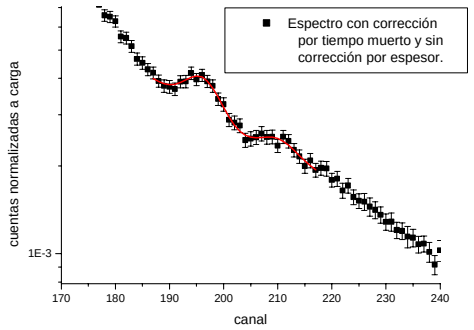
P1	0.290657449	± 0.063740731
P2	-0.03144239	± 0.00110189
P3	0.00109630	± 1.202888E-4
P4	196.077000	± 0
P5	6.36000000	± 0
P6	0.001598764	± 1.12372815E-4
P7	210.6139	± 0.185748880
P8	5.88862477	± 0.356568688
P9	4.43093E-4	± 1.42476766E-4
P10	219.410000	± 0
P11	9.07000000	± 0

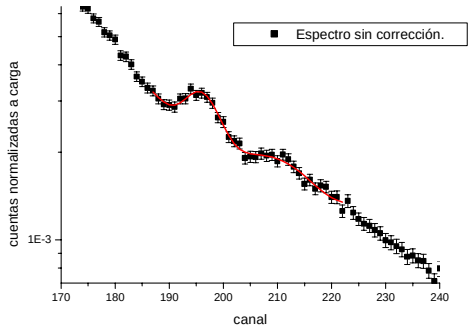




214011

Con corrección de tiempo muerto			*Sin corrección*		
			Carga = 1068569		
Concentración Cu = (164.7 ± 30.1) ng/cm^2			Concentración Cu = (335.3 ± 76.3) ng/cm^2		
Ajuste:			Ajuste:		
χ^2	= 0.33169		χ^2	= 0.54951	
P1	0.975042567	± 0.887443365	P1	0.437989557	± 0.453620828
P2	-0.0294237	± 0.0047391586	P2	-0.0255687	± 0.0046197233
P3	0.0078858	± 0.00144142819	P3	0.0092693	± 0.00211075695
P4	196.078000	± 0	P4	196.078000	± 0
P5	6.36000000	± 0	P5	6.36000000	± 0
P6	0.0038741851	± 0.0031972279	P6	-0.01609778	± 0.0148378397
P7	210.207972	± 1.07767223	P7	195.191915	± 2.59707764
P8	7.105532	± 3.30492547	P8	14.8810336	± 8.41463626
P9	0.00299673	± 0.00253838221	P9	-0.00204047	± 0.00203631696
P10	219.410000	± 0	P10	219.410000	± 0
P11	9.07000000	± 0	P11	9.07000000	± 0





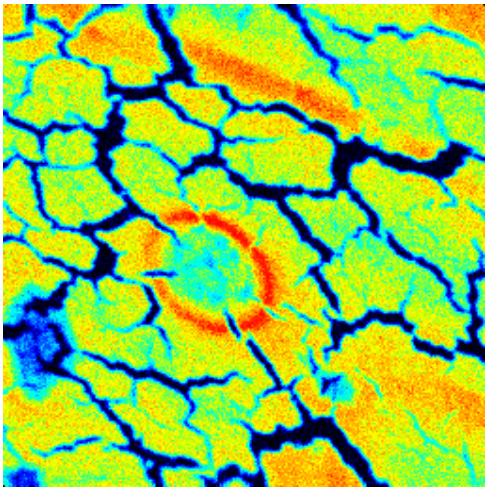
Con corrección de tiempo muerto y espesor de la muestra

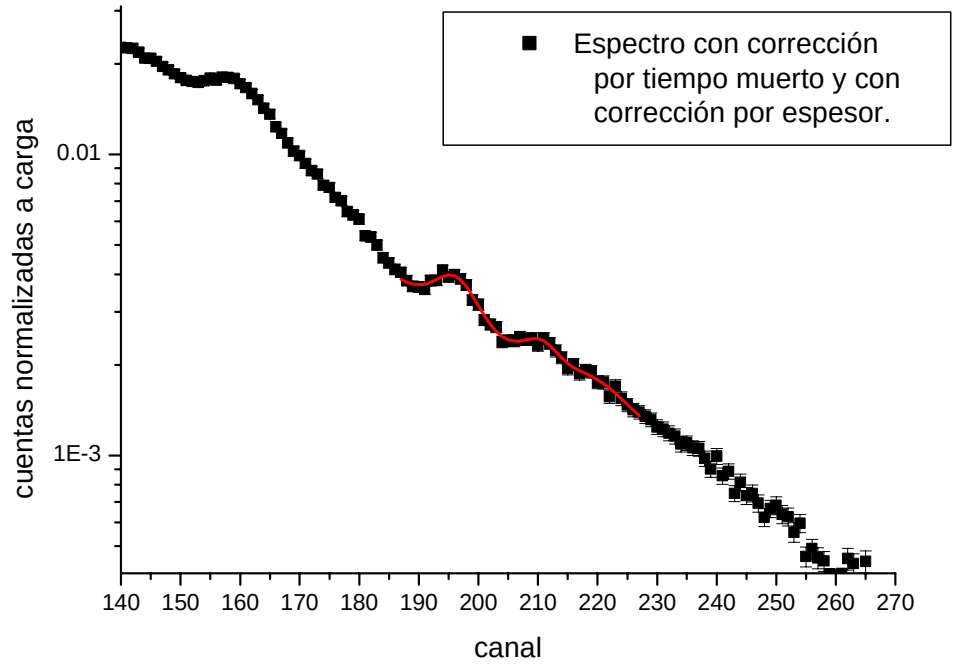
Concentración Cu = (157.5 ± 15.9) ng/cm^2

Ajuste:

χ^2 = 0.45198

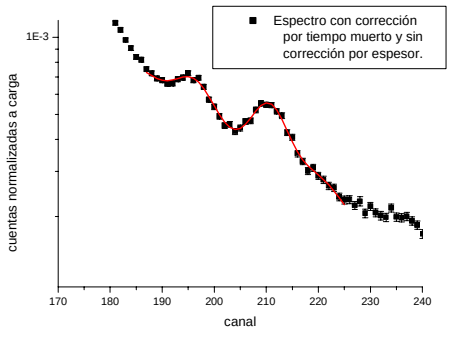
P1	0.596092062	± 0.143744511
P2	-0.0269863	± 0.00121065125
P3	0.0075382	± 7.58988266E-4
P4	196.078000	± 0
P5	6.36000000	± 0
P6	0.0024297	± 6.09552277E-4
P7	210.462563	± 0.585794754
P8	5.40211664	± 1.19624862
P9	0.00245012	± 8.41709899E-4
P10	219.410000	± 0
P11	9.07000000	± 0

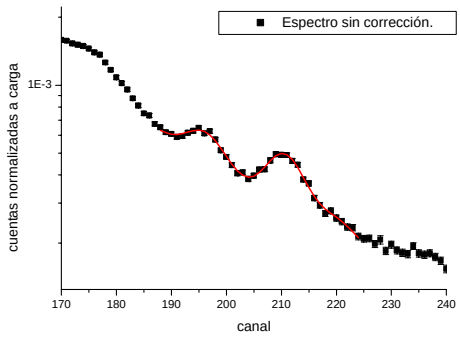




214006

Con corrección de tiempo muerto			***Sin corrección***		
			Carga = 6380379		
Concentración Cu = (26.7 ± 1.74) ng/cm^2			Concentración Cu = (43.41 ± 2.8) ng/cm^2		
Ajuste:			Ajuste:		
χ^2 = 0.97686			χ^2 = 0.93347		
P1	0.449169918	± 0.099795911	P1	0.399119232	± 0.103948762
P2	-0.034368975	± 0.00113951235	P2	-0.034371771	± 0.00133308705
P3	0.0012777	± 8.33747696E-5	P3	0.001199109	± 7.77549418E-5
P4	196.078000	± 0	P4	196.078000	± 0
P5	6.36000000	± 0	P5	6.36000000	± 0
P6	0.001737	± 9.68794516E-5	P6	0.00160102	± 9.67849366E-5
P7	210.512212	± 0.130397300	P7	210.516453	± 0.130833874
P8	6.22921441	± 0.258277194	P8	6.32898317	± 0.268388850
P9	6.32607E-4	± 1.13687908E-4	P9	5.713461E-4	± 1.0919836E-4
P10	219.410000	± 0	P10	219.410000	± 0
P11	9.07000000	± 0	P11	9.07000000	± 0





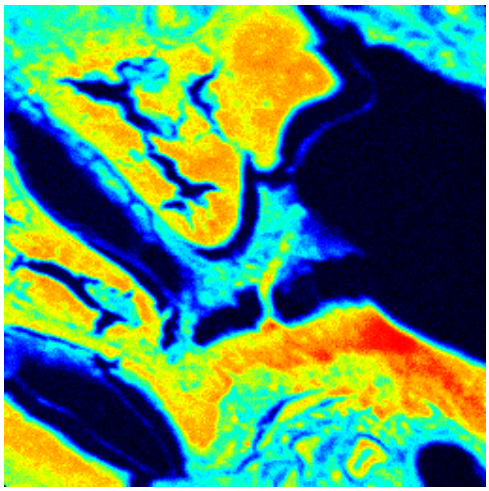
Con corrección de tiempo muerto y espesor de la muestra

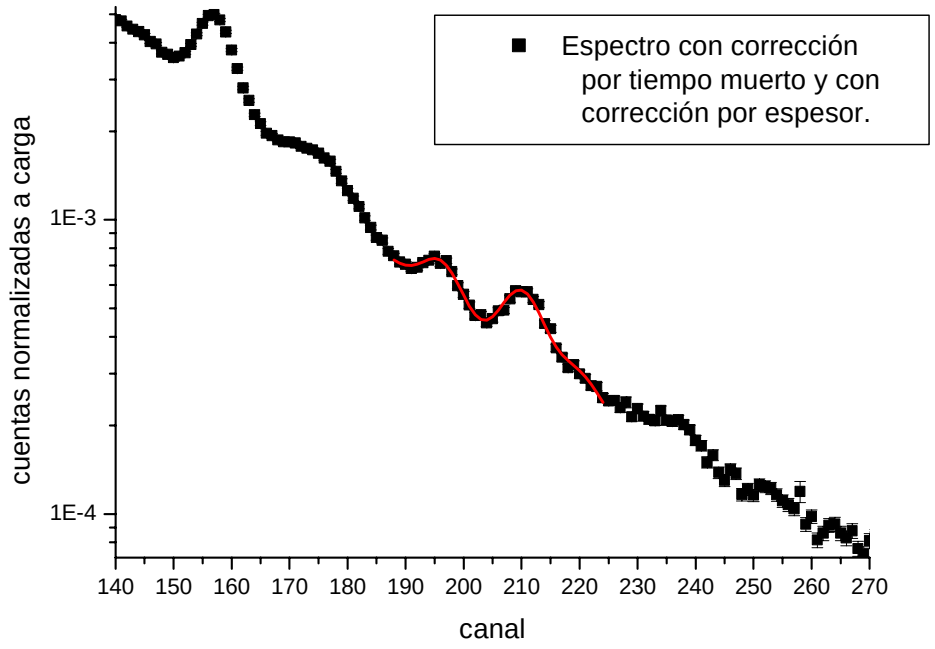
Concentración Cu = (32.35 ± 1.84) ng/cm^2

Ajuste:

χ^2 = 1.45482

P1	0.840161325	± 0.224158961
P2	-0.037548603	± 0.00136358303
P3	0.00154871	± 8.8058512E-5
P4	196.078000	± 0
P5	6.36000000	± 0
P6	0.00210987	± 1.17794764E-4
P7	210.000000	± 0
P8	6.71482994	± 0.247346231
P9	9.96058E-4	± 1.07164806E-4
P10	219.410000	± 0
P11	9.07000000	± 0





214009 (estándar de referencia)

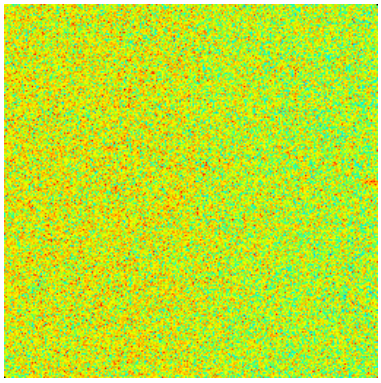
Con corrección de tiempo muerto			*Sin corrección*		
χ^2	= 1.45199		χ^2	= 2.79677	
P1	0.0042904821	± 5.69341281E-4	P1	0.00167035	± 1.27446819E-4
P2	0.002620076	± 6.24783482E-4	P2	0.0042571308	± 3.80965493E-4
P3	2.19707655	± 0.049927696	P3	1.26893828	± 0.0166349614
P4	196.078000	± 0	P4	196.078000	± 0
P5	6.36000000	± 0	P5	6.36000000	± 0
P6	0	± 0	P6	0.0177651697	± 0.00185198817
P7	210.000000	± 0	P7	210.000000	± 0
P8	8.00000000	± 0	P8	8.00000000	± 0
P9	0.395325804	± 0.0118222040	P9	0.217600188	± 0.0042393366
P10	219.410000	± 0	P10	219.410000	± 0
P11	9.07000000	± 0	P11	9.07000000	± 0

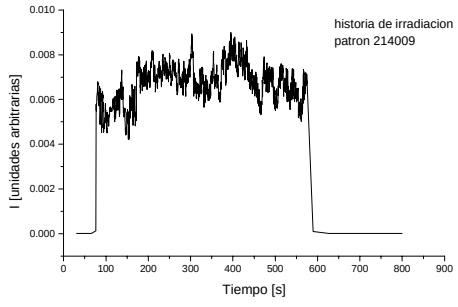
Carga = 335218 pulsos de 184 fC

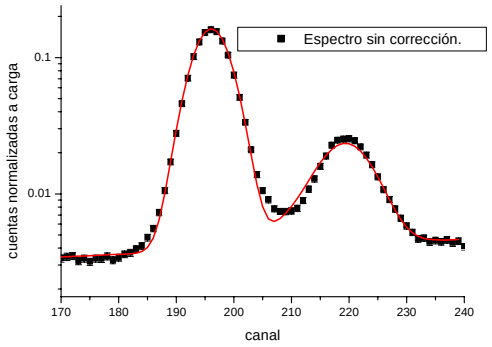
Área del pico de cobre sin normalizar a carga con corrección de tiempo muerto local = 2.197 x 335218 = 736474

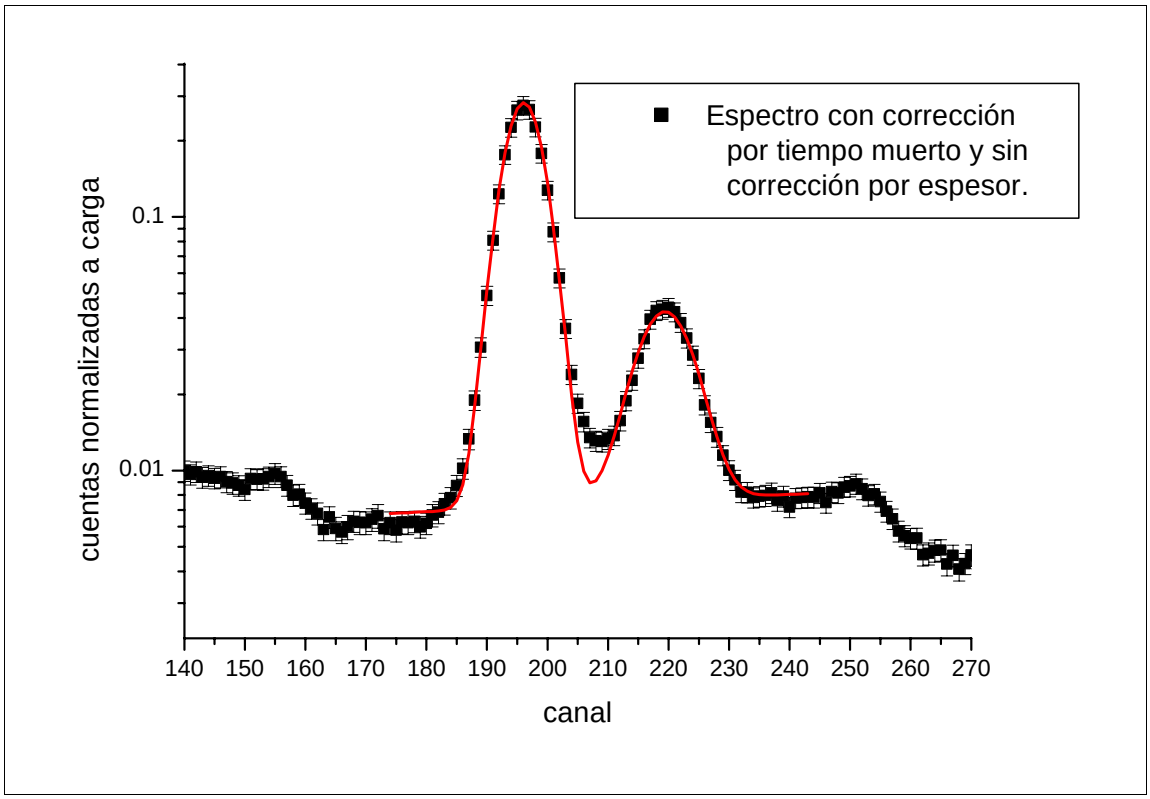
Factor de corrección de tiempo muerto global = 1.664 (50 x tiempo real / área pulser)

Área del pico de cobre sin normalizar a carga con corrección de tiempo muerto global = 375800 x 1.664 = 625331








Espectro con corrección por tiempo muerto y sin corrección por espesor.
cuentas normalizadas a carga
0.1
0.01
140 150 160 170 180 190 200 210 220 230 240 250 260 270
canal

		DTC local + espesor		DTC local	
		Valor [ng/cm^2]	Error [ng/cm^2]	Valor [ng/cm^2]	Error [ng/cm^2]
Tumor 8	214006	32.35	1.84	26.69	1.74
Tumor 8	214008	31.01	4.13	22.87	3.51
Tumor 8	214007	22.90	2.51	20.47	2.47
Tumor 8	214006 + 214007 + 214008			24.36	
Tumor 8	226011	9.88	0.65		
Tumor 8 [49]	225027	62.06	3.43		
Tumor 8	225018	23.39	0.85		
Tumor 8	226010	11.96	0.62		
Tumor 8	226016	13.23	0.74		
Tumor 8	225016	26.67	0.63		
Tumor 4	255019	1.42	0.33	1.35	0.23
Tumor 4	256047	2.44	0.35	2.29	0.26
Tumor 4	256039	3.36	0.53	3.57	0.52
Tumor 4	256046	4.05	0.42	3.78	0.30
Tumor 4	256038	3.90	0.74	2.91	0.48
Tumor 4	256035	2.91	0.47	2.40	0.37
Tumor 4	255023	7.23	5.07	2.98	0.45
Tumor 4	255020	2.43	1.01	1.24	0.20
Tumor 4	256045	4.09	0.32	3.75	0.24
Tumor 4	256048	2.25	0.16	2.13	0.11
T. Prec. 2	256057	3.98	0.33	3.63	0.23
Hígado 12	214011	157.48	15.86	164.74	30.11
Hígado 12	257013	102.09	1.78	94.38	0.88
Hígado 12	256054	6.62	0.28	6.25	0.24
Bolsa normal contralateral	257004	7.30	0.65	6.60	0.36
Bolsa normal contralateral	257003	6.49	1.19	7.60	0.19
Bolsa normal 1 [50]	255005	3.21	1.15	2.60	0.89
Bolsa normal 1	255008	0.77	0.39	1.04	0.41
Bolsa normal 1	255012	1.59	0.55	1.90	0.43
Bolsa normal 1	255013	2.85	0.32	2.53	0.15
Estándar de referencia	214009			45900.00	1043.06

Tabla 30: Resumen de las concentraciones de cobre medidas en las secciones previas.

[49] Zoom de 300 x 300 μm^2 sobre un punto de alta concentración de cobre.

[50] La muestra BN1 (Bolsa Normal 1) está tomada de un hámster que no fue inyectado con la droga.

Mapas cuantitativos de distribución de cobre.

En las páginas que siguen se presentan los mapas cuantitativos de la distribución de Cu en distintos cortes histológicos. La siguiente tabla resume los detalles de cada corte:

Experimento	Tiempo de irradiación [min.]	Muestra
225013	716	Bolsa normal 1
256045	301	Tumor 4
256048	716	Tumor 4
257013	109	Hígado 12
256057	150	Tejido precanceroso 2
257004	224	Bolsa normal contralateral

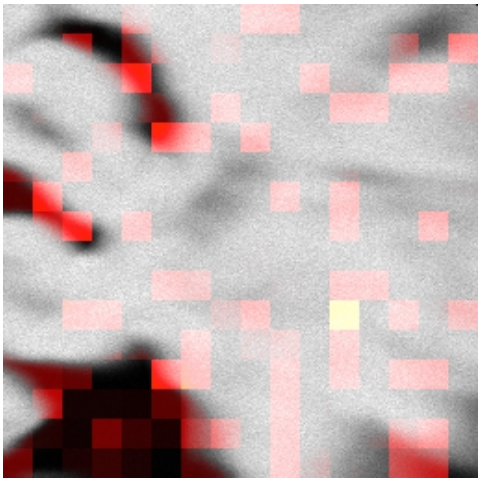
Tabla 31

Estos experimentos fueron realizados irradiando las muestras con ^{16}O a 50 MeV, en la configuración para PIXE, utilizando únicamente el detector de 30 mm^2.
Por cada experimento se presenta el mapa de cobre comprimido superpuesto al mapa cualitativo de densidad de la muestra (obtenido de evaluar el fondo de bremsstrahlung en cada píxel) sin comprimir, el espectro integral de PIXE, el resultado del ajuste sobre este espectro, y la matriz que contiene las cuentas en cada píxel del mapa de cobre. Para obtener la concentración de cobre que representa cada elemento de la matriz, se debe multiplicar el número de cuentas por el factor de escala del mapa[51], también indicado para cada experimento, al igual que los intervalos utilizados para integrar el fondo y el pico de cobre para obtener el mapa cuantitativo.

[51] El factor de escala del mapa es el valor por el que se debe multiplicar cada elemento de la matriz para pasar de número de cuentas a concentración de cobre. Por ejemplo, para determinar la concentración de cobre del punto coloreado en amarillo del mapa 225013 se debe multiplicar su valor (63.6 ± 20.4) por 197 pg/cm^2, lo que resulta una concentración de (12.53 ± 4.02) ng/cm^2.

255013

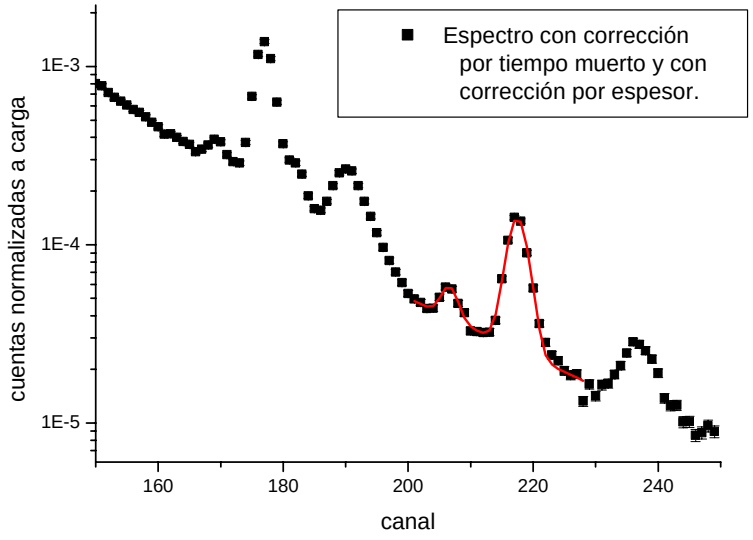
Concentración Cu = 2.85 ng/cm^2
Factor de escala del mapa = 197 pg/cm^2
Canales del pico = [205 ... 209]
Canales del fondo = [203 ... 204]
y [210 ... 212]
Tamaño del mapa = 1 x 1 mm^2
(16 x 16 píxeles)



Ajuste

χ^2 = 3.24474

P1	0.101314232	±0.0290517515
P2	-0.038056283	± 0.00131145645
P3	6.2112765E-5	± 6.9126385E-6
P4	206.616707	± 0.140770902
P5	2.55159521	± 0.301024284
P6	4.6554643E-4	± 9.2151913E-6
P7	217.484153	± 0.033224637
P8	3.23468861	± 0.063000867
P9	0	± 0
P10	224.000000	± 0
P11	558.200697	± 0



-1.6 (12.4)	45.9 (14.8)	2.2 (15.9)	23.6 (16.8)	20.1 (15.9)	22.4 (15.8)	23.0 (15.7)	1.3 (16.9)	10.9 (18.0)	21.5 (16.9)	31.2 (17.7)	-6.7 (14.4)	11.1 (14.9)	1.5 (13.4)	-3.0 (16.9)	-1.8 (13.1)
-9. (11					6.7 (14.4)	-16.1 (15.4)	33.1 (16.7)	14.2 (16.5)	15.5 (17.6)	26.1 (16.2)	-11.1 (16.5)	48.9 (18.0)	10.8 (16.4)	40.3 (15.9)	24.9 (15.8)
-14 (10					13.1 (14.0)	9.8 (12.2)	17.9 (16.6)	21.2 (17.1)	8.0 (15.9)	47.1 (18.5)	18.5 (16.3)	44.3 (20.8)	4.2 (17.8)	29.8 (16.9)	25.9 (13.9)
3. (17					0.9 (15.0)	-0.7 (13.3)	12.0 (16.4)	-2.9 (16.5)	32.6 (17.6)	21.3 (16.3)	19.2 (16.7)	26.5 (21.1)	10.6 (19.3)	17.2 (19.8)	11.8 (15.5)
20 (15					22.9 (17.1)	32.4 (15.2)	34.6 (19.6)	10.8 (17.6)	38.3 (17.9)	63.6 (20.4)	35.8 (19.9)	51.2 (18.7)	-32.4 (24.7)	-26.1 (24.0)	16.7 (20.3)
-15 (19					9.9 (18.5)	2.3 (19.7)	-9.0 (18.6)	-0.5 (18.3)	12.4 (15.6)	14.3 (17.7)	25.7 (19.9)	20.2 (20.4)	26.0 (22.8)	19.6 (20.5)	26.3 (23.5)
35 (17					10.6 (17.1)	32.3 (18.9)	15.4 (17.7)	-16.7 (19.6)	25.4 (17.5)	-0.9 (18.7)	30.5 (16.5)	56.3 (19.7)	46.0 (20.4)	50.4 (23.5)	38.0 (22.2)
37 (20.4)	(16.0)	(17.1)	(18.4)	(17.6)	18.3 (13.2)	-10.9 (17.9)	-13.6 (18.1)	26.1 (17.4)	10.4 (16.7)	32.0 (16.9)	28.9 (21.9)	19.5 (22.0)	2.8 (19.9)	5.1 (24.9)	7.4 (22.3)
8.4 (15.6)	29.4 (15.5)	8.0 (19.7)	47.6 (16.7)	6.8 (18.5)	-0.1 (13.8)	-7.5 (14.5)	18.1 (14.7)	24.5 (17.0)	-12.3 (18.9)	28.6 (18.0)	15.4 (19.5)	20.7 (18.4)	15.7 (21.6)	29.7 (18.2)	10.7 (16.1)
23.7 (16.8)	14.5 (14.7)	-1.8 (16.1)	7.8 (14.7)	40.9 (17.0)	11.5 (15.4)	17.4 (13.4)	0.4 (12.3)	20.4 (14.5)	31.0 (14.4)	10.3 (15.7)	53.0 (19.1)	56.1 (16.3)	17.5 (12.7)	22.5 (10.1)	10.6 (7.2)
-2.4 (15.3)	25.5 (11.3)	7.5 (11.9)	13.5 (9.1)	36.9 (10.9)	3.4 (14.1)	21.0 (14.8)	-3.4 (14.1)	1.6 (13.6)	39.8 (14.5)	-14.0 (14.3)	11.9 (15.7)	36.5 (15.6)	11.7 (5.9)	3.9 (6.6)	-0.3 (6.3)
29.4 (18.1)	16.3 (9.3)	36.3 (11.4)	13.9 (9.4)	5.7 (14.3)	9.7 (17.7)	-4.1 (14.9)	45.9 (14.6)	21.9 (13.0)	18.7 (15.3)	-2.4 (15.4)	11.5 (12.0)	-8.6 (10.3)	2.6 (5.2)	7.5 (5.7)	3.9 (5.6)
1.8 (14.7)	1.4 (6.3)	25.1 (13.2)	5.2 (12.3)	29.9 (13.4)	23.5 (15.7)	7.3 (13.3)	6.3 (13.6)	8.8 (12.6)	-3.8 (14.2)	35.1 (14.3)	20.7 (14.2)	-2.3 (9.5)	2.9 (5.3)	14.7 (6.4)	7.2 (3.7)
2.6 (12.5)	21.9 (15.3)	16.9 (11.9)	15.1 (14.0)	16.1 (14.2)	31.9 (13.2)	-0.5 (14.8)	36.0 (10.5)	3.7 (12.8)	4.8 (13.0)	58.1 (15.2)	5.3 (12.2)	12.5 (9.9)	2.9 (5.4)	2.4 (5.0)	4.0 (2.9)
5.8 (10.8)	8.4 (15.0)	-1.3 (22.2)	20.4 (11.4)	13.3 (12.3)	23.4 (14.8)	35.6 (10.4)	25.9 (10.8)	-8.8 (12.2)	1.6 (11.5)	21.6 (11.6)	6.9 (13.0)	15.0 (7.1)	23.7 (9.9)	4.8 (8.4)	-3.9 (4.8)
-19.1 (23.6)	9.0 (14.6)	34.7 (15.6)	-5.3 (11.1)	-6.4 (14.7)	16.5 (12.2)	10.3 (5.8)	1.6 (13.9)	17.2 (12.4)	1.8 (12.4)	12.1 (11.1)	19.4 (13.1)	15.0 (10.1)	-8.7 (19.9)	9.6 (13.6)	13.9 (18.1)

Tabla 32: 255013

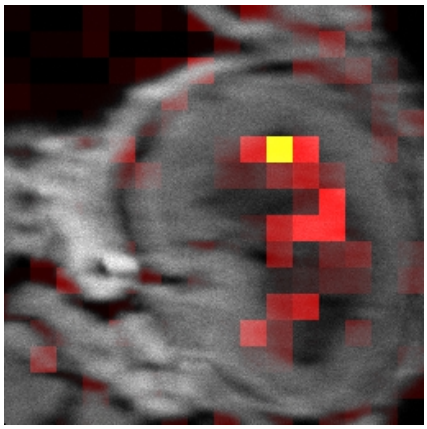
256045

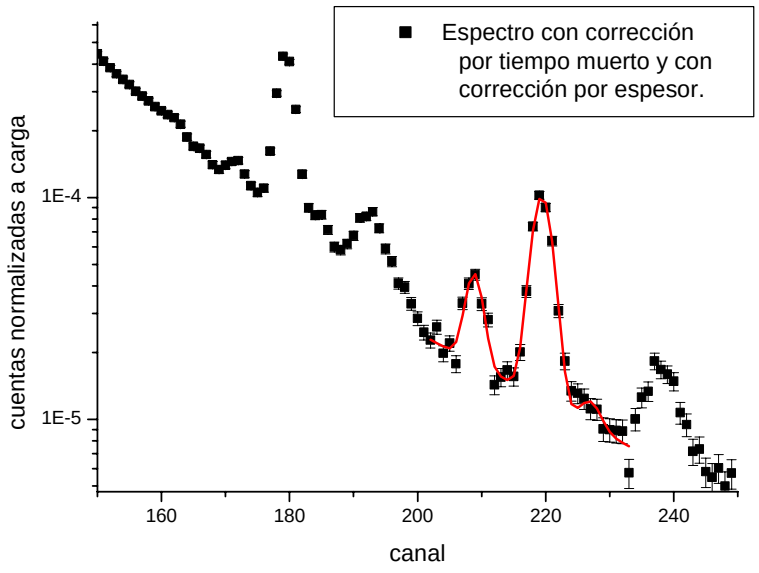
Concentración Cu = 4.1 ng/cm^2
Factor de escala del mapa = 963 pg/cm^2
Canales del pico = [207 ... 211]
Canales del fondo = [204 ... 205]
y [213 ... 215]
Tamaño del mapa = 1 x 1 mm^2
(16 x 16 píxeles)

Ajuste

χ^2 = 2.03074

P1	0.0312738904	± 0.0171783799
P2	-0.035745996	± 0.00253231339
P3	8.9212665E-5	± 6.90050238E-6
P4	208.818960	± 0.106394237
P5	2.57154211	± 0.213481265
P6	3.4075491E-4	± 9.0602472E-6
P7	219.409740	± 0.043158583
P8	3.04412024	± 0.080121989
P9	1.006863E-5	± 3.715438E-6
P10	227.000000	± 0
P11	3.00000000	± 0





-1.5 (1.5)	0.0 (1.1)	-0.1 (2.0)	1.2 (3.8)	9.3 (3.8)	0.2 (2.3)	3.0 (5.1)	-1.4 (4.9)	-4.2 (4.7)	7.8 (4.6)	8.7 (3.6)	1.6 (4.5)	-0.2 (4.1)	7.5 (4.0)	4.3 (3.2)	-0.3 (2.1)		
1.4 (1.4)	-1.3 (2.6)	6.0 (3.6)	8.2 (5.3)	7.6 (5.0)	9.3 (4.4)	6.1 (3.7)	-1.6 (5.0)	3.1 (3.0)	-0.1 (2.9)	-1.5 (4.5)	3.2 (2.2)	-3.1 (5.2)	-0.1 (3.0)	5.9 (4.8)	4.2 (3.9)		
10.1 (5.5)	3.2 (4.4)	10.3 (4.4)	6.0 (4.2)	-3.0 (2.1)	-3.6 (4.4)	3.6 (5.8)	2.8 (5.2)	4.5 (3.9)	10.6 (5.8)	7.4 (3.9)	1.0 (4.6)	8.9 (4.1)	2.8 (3.6)	4.3 (3.8)	7.3 (4.5)		
6.8 (5.4)	12.0 (5.9)	8.6 (4.7)	4.4 (4.0)	5.0 (4.6)	4.5 (4.1)	10.7 (5.5)	22.0 (6.2)	22.0 (5.7)	8.9 (3.6)	7.2 (3.2)	0.1 (2.9)	1.5 (3.3)	0.1 (3.0)	-3.0 (2.1)	6.0 (4.2)		
9.2 (6.2)	9.2 (5.8)	9.2 (4.3)	3.3 (4.4)	6.2 (5.3)	23.2 (7.4)	15.7 (5.2)	7.8 (4.7)	22.8 (6.6)	4.4 (4.5)	5.3 (5.0)	16.3 (4.9)	3.0 (3.7)	-2.9 (3.6)	2.4 (4.6)	-0.1 (3.1)		
9.2 (4.4)	1.1 (5.2)	0.1 (3.6)	-3.2 (5.0)	0.1 (3.2)	43.5 (8.7)	12.1 (6.5)	0.1 (4.3)	16.0 (5.8)	11.9 (4.2)	4.3 (3.5)	13.4 (6.5)	10.0 (5.3)	9.8 (5.0)	4.0 (5.1)	5.8 (4.2)		
10.3 (6.4)	-0.1 (3.0)	3.8 (4.0)	1.4 (4.9)	3.4 (4.4)	19.1 (6.7)	7.4 (3.9)	-2.8 (4.3)	5.9 (3.7)	-2.9 (4.0)	2.8 (5.1)	2.9 (3.0)	17.4 (6.2)	9.3 (5.5)	-1.5 (3.4)	4.7 (3.4)		
5.0 (4.3)	6.2 (3.9)	4.9 (6.4)	4.9 (6.0)	7.7 (4.8)	9.1 (4.8)	7.8 (4.1)	3.2 (2.2)	-1.5 (2.8)	6.1 (4.4)	2.1 (3.6)	-0.4 (5.6)	9.3 (5.9)	6.2 (5.9)	4.6 (2.7)	7.6 (4.0)		
7.8 (4.6)	1.4 (1.4)	14.8 (7.5)	6.2 (5.0)	3.0 (4.6)	1.3 (3.6)	-1.6 (5.9)	-5.2 (5.4)	3.3 (5.3)	7.8 (4.3)	8.0 (5.2)	7.3 (6.0)	-0.7 (5.5)	8.7 (6.6)	-0.6 (3.5)	-1.4 (4.1)		
1. (1.					6.7 (5.2)	-18.7 (6.5)	3.2 (3.9)	3.1 (5.4)	3.4 (6.2)	-5.7 (5.0)	-3.5 (5.6)	8.0 (5.0)	0.7 (4.8)	7.1 (5.9)	4.5 (4.9)		
3. (2.					3.2 (3.8)	11.3 (5.4)	8.1 (4.4)	1.7 (6.6)	3.3 (3.9)	7.7 (4.2)	1.1 (4.0)	4.5 (7.7)	-3.1 (5.3)	11.7 (5.4)	0.4 (4.8)		
1. (1.					14.0 (5.3)	8.2 (4.2)	1.6 (2.6)	0.3 (4.9)	8.5 (6.1)	8.5 (5.5)	3.3 (4.4)	11.5 (5.4)	5.0 (5.0)	-1.7 (5.0)	-0.1 (3.1)		
2. (3.					10.0 (4.7)	-7.7 (6.7)	-0.7 (4.8)	6.3 (5.2)	-1.5 (5.7)	2.7 (6.7)	1.8 (3.6)	-1.4 (5.9)	0.2 (3.8)	7.7 (4.1)	8.0 (5.0)		
-1. (1.					10.7 (5.9)	5.3 (6.0)	13.5 (6.8)	5.1 (7.6)	-4.6 (7.0)	11.2 (4.3)	4.4 (3.5)	8.8 (5.4)	1.4 (3.4)	2.8 (4.4)	3.2 (2.3)		
-1. (1.					-8.2 (6.7)	-0.4 (5.6)	5.0 (5.4)	0.0 (4.6)	6.4 (3.9)	4.5 (2.6)	-1.5 (3.4)	7.1 (3.9)	12.4 (4.8)	1.5 (2.6)	-1.7 (2.7)		
1.5 (1.5)	0.0 (1.1)	1.5 (1.5)	2.9 (2.0)	1.6 (3.4)	4.4 (2.5)	4.7 (5.9)	3.4 (5.0)	-3.3 (3.9)	-1.4 (4.0)	1.3 (2.6)	5.0 (2.9)	-1.9 (4.1)	1.7 (3.5)	3.5 (3.4)	-0.1 (3.9)		

Tabla 33: 256045

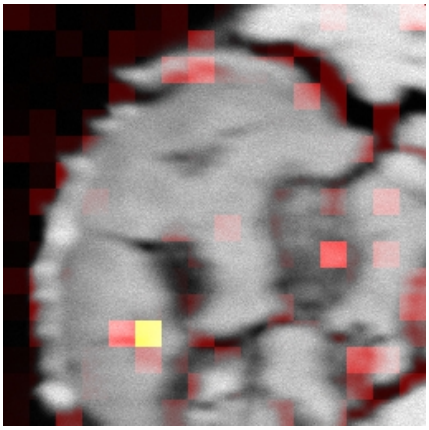
256048

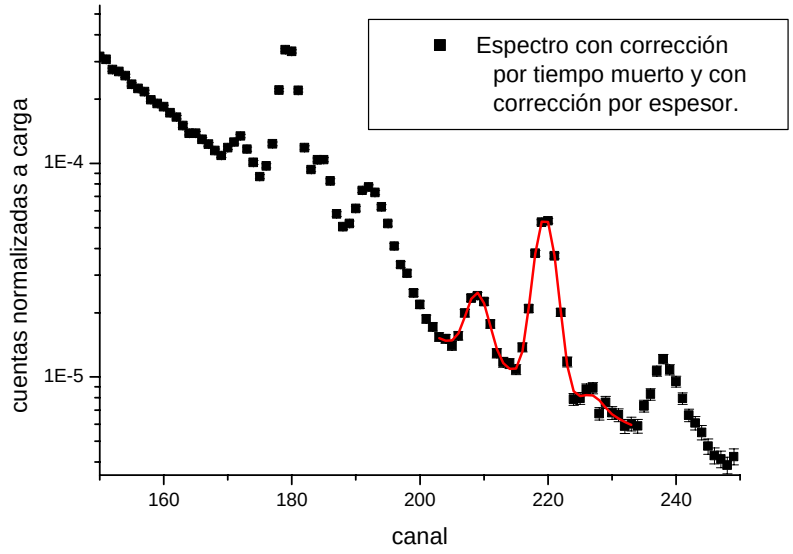
Concentración Cu = 2.25 ng/cm^2
Factor de escala del mapa = 192 pg/cm^2
Canales del pico = [206 ... 211]
Canales del fondo = [203 ... 205]
y [213 ... 215]
Tamaño del mapa = 1 x 1 mm^2
(16 x 16 píxeles)

Ajuste

χ^2 = 0.90626

P1	0.0082892531	± 0.00296936835
P2	-0.03104966	± 0.00162995590
P3	4.9100950E-5	± 3.4520506E-6
P4	208.965861	± 0.098425255
P5	3.19464347	± 0.220247633
P6	1.7581479E-4	± 3.4150182E-6
P7	219.507657	± 0.0309433654
P8	3.00117492	± 0.059440031
P9	3.7264915E-6	± 1.5673413E-6
P10	227.000000	± 0
P11	3.00000000	± 0





42.2 (18.5)	17.0 (15.0)	7.6 (15.3)	-4.0 (7.3)	0.3 (11.5)	26.8 (11.3)	26.8 (14.6)	-7.0 (12.8)	-10.2 (14.4)	-22.4 (13.0)	31.0 (13.4)	34.1 (11.7)	22.5 (12.3)	12.9 (10.9)	21.2 (11.3)	16.5 (14.0)
36.8 (15.1)	8.0 (15.0)	7.5 (14.8)	19.4 (11.9)	15.6 (7.7)	14.4 (8.8)	13.7 (12.1)	39.6 (13.0)	1.7 (12.3)	38.6 (13.9)	-1.2 (14.5)	24.2 (11.7)	16.3 (13.4)	37.9 (13.6)	9.9 (10.5)	17.8 (12.8)
0.8 (15.0)	22.3 (17.6)	28.2 (17.4)	-1.3 (12.1)	-9.1 (9.7)	28.8 (12.6)	5.5 (12.4)	6.8 (13.8)	2.4 (11.2)	19.9 (11.6)	19.2 (11.3)	23.7 (14.2)	12.8 (13.3)	36.8 (11.4)	25.3 (10.5)	14.6 (9.2)
41.1 (13.2)	23.5 (11.4)	17.1 (8.2)	17.5 (9.0)	18.8 (11.6)	30.8 (13.3)	12.2 (10.7)	26.1 (10.8)	15.5 (10.3)	42.7 (14.0)	13.2 (10.6)	7.1 (11.3)	15.5 (10.5)	-2.6 (8.0)	15.5 (11.9)	26.3 (10.0)
13.4 (15.5)	19.4 (11.9)	6.4 (7.3)	34.2 (13.5)	2.9 (14.5)	11.3 (14.4)	14.4 (10.1)	7.1 (9.9)	11.2 (11.0)	11.8 (11.8)	-7.4 (7.7)	-7.8 (8.1)	21.7 (11.2)	-5.2 (9.8)	10.9 (11.9)	11.9 (11.4)
6.3 (14.1)	11.3 (8.3)	25.2 (12.8)	15.9 (12.5)	26.6 (12.2)	15.2 (14.8)	11.4 (13.0)	18.7 (11.1)	19.0 (11.5)	17.7 (8.6)	-0.3 (11.1)	23.3 (10.8)	17.8 (11.1)	22.3 (11.0)	16.7 (12.9)	26.8 (13.5)
6.6 (13.3)	8.0 (10.4)	28.9 (16.0)	3.5 (14.3)	-9.0 (13.0)	-9.4 (13.1)	12.7 (12.1)	9.6 (12.3)	13.6 (12.2)	25.1 (12.1)	2.6 (12.3)	6.4 (9.3)	-0.8 (9.1)	6.6 (7.2)	9.4 (10.4)	14.6 (12.3)
6.3 (7.4)	7.0 (10.1)	27.7 (16.0)	-8.1 (12.8)	14.4 (11.1)	14.4 (10.3)	6.1 (11.6)	-10.3 (11.3)	36.6 (12.3)	17.5 (12.3)	18.9 (11.9)	-7.6 (11.9)	9.0 (11.0)	20.8 (11.1)	21.2 (12.2)	14.0 (10.9)
-11.2 (6.3)	24.7 (9.9)	38.4 (11.8)	11.4 (11.6)	-10.7 (12.0)	18.1	-1.7	3.0	25.4	14.8	-4.5 (10.6)	16.4 (10.3)	22.4 (9.8)	10.1 (6.9)	25.8 (10.4)	16.6 (11.6)
9.2 (5.9)	8.7 (7.1)	33.3 (10.1)	10.0 (10.3)	-2.5 (11.2)						7.9 (9.3)	12.2 (8.9)	2.8 (9.9)	18.6 (10.9)	3.8 (9.6)	21.5 (9.2)
5.4 (4.5)	7.7 (5.6)	2.1 (8.5)	5.5 (7.2)	5.9 (10.3)						6.8 (8.4)	26.4 (10.9)	85.7 (18.2)	35.7 (11.5)	12.1 (10.9)	-13.0 (11.2)
-6.4 (4.9)	8.6 (3.9)	9.1 (5.8)	13.1 (7.6)	8.3 (10.3)						13.9 (11.5)	1.1 (10.5)	54.9 (11.1)	-2.9 (9.1)	0.0 (9.5)	1.0 (9.6)
1.6 (4.1)	-0.9 (4.0)	3.5 (3.1)	-0.3 (4.2)	8.3 (7.8)						13.2 (9.3)	21.4 (11.6)	19.5 (10.5)	26.0 (8.2)	26.7 (10.3)	3.4 (9.5)
-0.2 (4.6)	4.3 (3.8)	0.6 (3.3)	1.1 (4.3)	-0.2 (4.3)						23.1 (10.7)	12.6 (9.5)	-1.1 (9.4)	0.2 (8.1)	17.9 (10.1)	20.4 (8.3)
6.0 (3.7)	-4.6 (2.6)	1.4 (3.5)	-3.2 (2.2)	5.6 (5.9)	(3.7)	(3.8)	(6.7)	(7.8)	(7.5)	22.2 (9.4)	21.2 (10.5)	14.1 (7.7)	5.0 (7.2)	6.0 (8.1)	-4.9 (5.1)
8.7 (4.8)	-0.0 (3.6)	0.2 (4.8)	1.2 (4.1)	1.9 (3.8)	7.9 (4.1)	-1.5 (3.9)	2.9 (4.3)	3.4 (4.7)	1.8 (4.0)	8.0 (4.1)	2.8 (3.6)	-6.0 (4.2)	2.8 (2.9)	4.2 (3.4)	4.7 (4.0)

Tabla 34: 256048

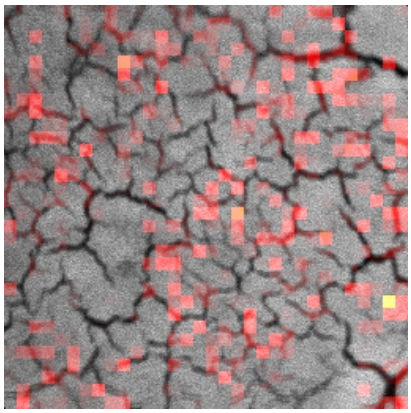
257013

Concentración Cu = 101.9 ng/cm^2
Factor de escala del mapa = 5.51 ng/cm^2
Canales del pico = [206 ... 213]
Canales del fondo = [200 ... 205]
y [214 ... 215]
Tamaño del mapa = 1 x 1 mm^2
(32 x 32 píxeles)

Ajuste

χ^2 = 0.88272

P1	0.145215382	± 0.090042807
P2	-0.038459612	± 0.00292099599
P3	0.0022241528	± 3.8742017E-5
P4	209.181807	± 0.0255665860
P5	3.01606806	± 0.046706105
P6	8.9870221E-4	± 2.3971618E-5
P7	219.749558	± 0.048343352
P8	2.97195975	± 0.076817081
P9	4.189859E-4	± 2.5391063E-5
P10	226.674659	± 0.126508535
P11	4.61129196	± 0.299066774



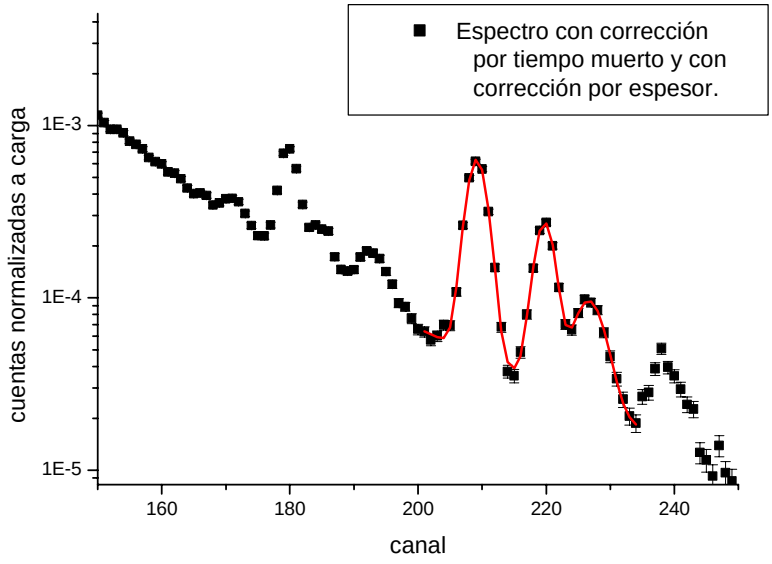


Tabla 35

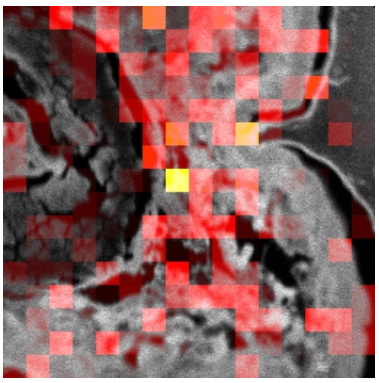
256057

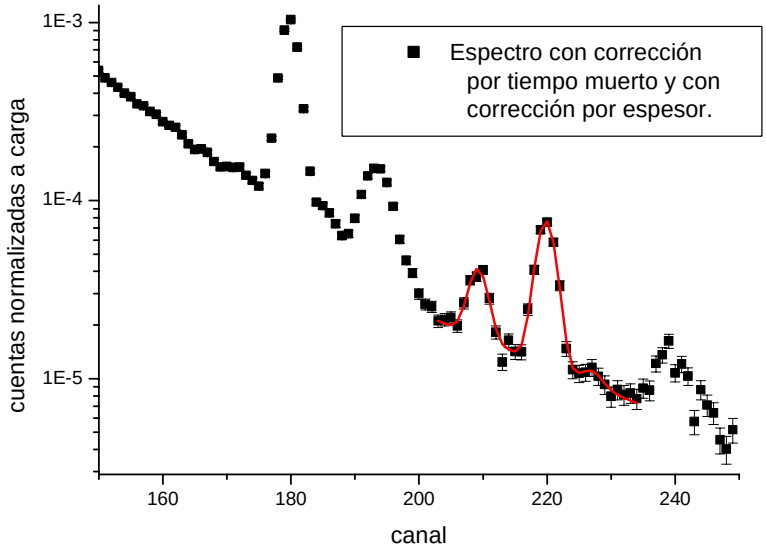
Concentración Cu = 4 ng/cm^2
Factor de escala del mapa = 893 pg/cm^2
Canales del pico = [207 ... 211]
Canales del fondo = [204 ... 205]
y [213 ... 215]
Tamaño del mapa = 1 x 1 mm^2
(16 x 16 píxeles)

Ajuste

χ^2 = 0.95584

P1	0.0222683355	± 0.0127234518
P2	-0.034304593	± 0.00260168645
P3	8.6781745E-5	± 7.226904E-6
P4	209.207071	± 0.116506938
P5	2.84507563	± 0.244438467
P6	2.3531551E-4	± 7.5337758E-6
P7	219.812091	± 0.050575069
P8	2.87408474	± 0.095888931
P9	6.8142334E-6	± 3.520271E-6
P10	227.000000	± 0
P11	3.00000000	± 0





-1.3 (3.4)	-0.3 (2.5)	2.2 (4.8)	-1.6 (4.0)	-0.3 (4.6)	3.7 (2.6)	-5.1 (3.8)	-1.9 (3.2)	2.2 (5.2)	3.4 (3.4)	0.0 (2.4)	-1.6 (3.7)	7.1 (5.5)	7.2 (5.1)	7.6 (5.8)	-7.0 (4.3)					
-1.8 (5.8)	3.8 (4.4)	-0.6 (6.8)	1.0 (4.0)	3.5 (2.5)	6.6 (4.4)	-1.7 (1.7)	-0.3 (3.5)	-1.8 (3.9)	-1.2 (6.7)	10.0 (6.2)	1.6 (5.9)	1.9 (6.0)	11.2 (4.6)	9.1 (4.7)	3.0 (7.0)					
-1.5 (5.1)	12.9 (4.9)	0.1 (4.5)	14.9 (6.3)	1.7 (2.9)	0.0 (2.5)	0.6 (5.2)	1.6 (6.4)	2.4 (6.2)	2.9 (6.0)	-0.5 (5.3)	-3.1 (6.1)	-0.1 (4.4)	12.4 (5.9)	-2.7 (5.7)	3.6 (6.4)					
5.7 (8.2)	10.8 (7.1)	-9.7 (6.7)	8.5 (6.4)	5.1 (5.6)	-0.8 (5.3)	0.2 (5.7)	7.7 (6.6)	2.5 (6.7)	7.2 (3.6)	0.1 (4.9)	-1.9 (3.2)	-2.8 (5.8)	-5.6 (4.8)	3.2 (6.5)	1.7 (7.1)					
12.0 (7.2)	11.4 (6.5)	-6.6 (5.6)	-3.4 (6.3)	10.6 (6.6)	5.6 (4.9)	3.1 (8.6)	3.9 (7.2)	6.0 (4.4)	8.4 (6.2)	-1.7 (1.7)	-4.6 (5.2)	4.3 (4.6)	10.3 (8.2)	6.8 (6.1)	-0.6 (6.5)					
8.9 (5.4)	5.7 (6.3)	9.3 (4.7)	13.7 (8.1)	1.8 (5.6)	20.9 (7.5)	4.5 (7.3)	17.1 (8.1)	11.3 (5.8)	3.3 (4.4)	0.6 (4.5)	6.9 (5.1)	13.1 (6.2)	11.1 (7.5)	6.7 (5.8)	10.3 (6.6)					
16.7 (7.8)	8.9 (4.0)	6.5 (5.4)	3.9 (7.2)	11.1 (6.8)	15.7 (7.6)	-2.0 (6.3)	9.3 (6.1)	-5.1 (5.2)	11.1 (5.2)	7.9 (5.4)	9.0 (4.0)	11.6 (6.1)	2.0 (4.9)	1.8 (5.0)	2.6 (6.8)					
12.4 (5.9)	11.8 (6.3)	5.0 (5.6)	7.1 (6.6)	12.7 (5.5)	5.4 (6.4)	7.4 (6.6)	16.5 (7.0)	11.2 (6.2)	11.8 (5.1)	3.5 (3.3)	3.0 (6.0)	12.5 (5.5)	-2.4 (6.2)	1.2 (5.4)	1.6 (4.7)					
3.6 (5.4)	9.1 (4.7)	13.2 (5.4)	8.4 (6.7)	8.7 (4.6)	17.4 (7.7)	7.0 (3.5)	23.0 (7.3)	4.7 (4.7)	9.5 (6.8)	1.7 (1.7)	11.7 (5.1)	9.6 (4.8)	4.0 (6.4)	5.1 (5.7)	-0.2 (4.3)					
17.4 (6.4)	3.1 (3.2)	7.0 (5.7)	6.7 (4.0)	10.5 (6.0)	8.8 (4.8)	13.5 (4.8)	1.4 (3.2)	-2.6 (3.4)	11.6 (7.2)	8.7 (4.8)	3.4	5.1	12.3	6.6	-3.2 (6.0)					
5.2 (3.9)	5.1 (4.4)	9.9 (4.8)	6.7 (4.1)	8.1 (3.6)	0.2 (2.5)	0.0 (3.2)	3.1 (3.2)	-1.5 (2.9)	1.3 (3.3)	-2.9 (4.1)					5.1 (4.4)					
9.5 (4.6)	11.6 (5.0)	-0.1 (2.4)	-1.5 (2.9)	1.6 (1.6)	1.3 (30.1)	-3.1 (5.3)	-0.0 (2.2)	2.4 (2.4)	1.6 (1.6)	-0.0 (4.0)					2.8 (4.3)					
5.4 (5.0)	4.7 (2.7)	4.6 (2.7)	4.8 (2.8)	-3.1 (2.2)	4.7 (2.7)	-0.1 (3.3)	1.7 (4.3)	3.3 (3.2)	3.1 (3.3)	4.8 (2.8)					6.9 (5.2)					
11.3 (4.3)	3.2 (2.3)	3.2 (2.3)	0.0 (2.3)	-1.9 (3.7)	1.5 (1.5)	3.5 (3.3)	1.5 (4.3)	-3.3 (2.3)	4.8 (2.8)	0.1 (4.0)					6.5 (6.0)					
3.0 (2.1)	-3.2 (2.3)	-2.9 (2.1)	1.0 (3.9)	4.7 (2.7)	3.1 (2.2)	1.8 (2.8)	0.0 (2.4)	-1.4 (3.5)	4.6 (3.7)	3.2 (3.3)					11.0 (6.9)					
3.3 (3.3)	-0.0 (2.3)	1.5 (2.7)	0.2 (2.2)	3.1 (4.1)	8.2 (4.3)	6.7 (4.5)	6.3 (4.0)	0.1 (2.4)	0.1 (4.0)	-3.0 (3.2)	4.6 (4.2)	3.6 (4.0)	3.3 (4.0)	4.6 (6.8)	6.3 (5.7)					

Tabla 36: 256057

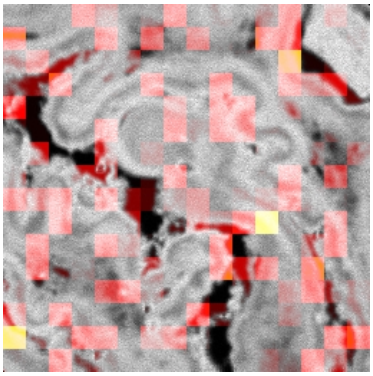
257004

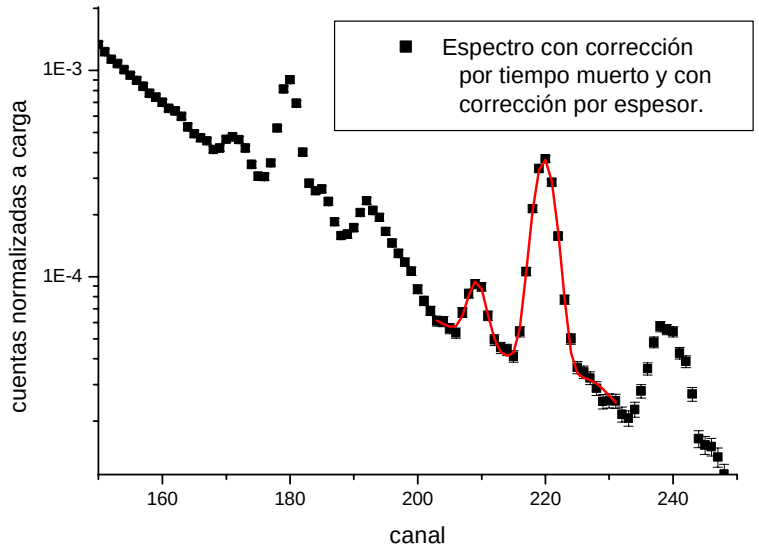
Concentración Cu = 7.3 ng/cm^2
Factor de escala del mapa = 700 pg/cm^2
Canales del pico = [207 ... 211]
Canales del fondo = [204 ... 205]
y [213 ... 215]
Tamaño del mapa = 1 x 1 mm^2
(16 x 16 píxeles)

Ajuste

χ^2 = 1.03052

P1	0.109444664	± 0.113308967
P2	-0.036891180	± 0.0048915262
P3	1.5902542E-4	± 1.4212248E-5
P4	209.237958	± 0.121671071
P5	2.72888910	± 0.245658543
P6	0.0013449052	± 2.7102731E-5
P7	219.827187	± 0.033358974
P8	3.17885541	± 0.057900513
P9	4.8967721E-5	± 3.7532393E-5
P10	227.000000	± 0
P11	6.23009191	± 3.12165111





-1.4 (9.8)	16.0 (10.9)	5.3 (13.0)	7.8 (13.2)	8.3 (11.8)	-6.2 (9.6)	14.7 (9.0)	4.6 (8.2)	-12.0 (9.0)	7.5 (9.0)	-5.7 (10.3)	3.1 (10.7)	15.0 (10.1)	14.0 (8.2)	26.8 (10.1)	7.3 (7.9)
19.1 (13.1)	8.8 (11.7)	7.2 (8.9)	18.6 (10.3)	9.5 (9.8)	10.1 (8.1)	4.7 (10.0)	17.6 (9.2)	8.9 (8.7)	20.1 (12.0)	30.8 (11.4)	3.9 (9.5)	13.2 (9.2)	5.2 (8.8)	20.7 (11.2)	15.7 (7.7)
4.7 (11.5)	-5.4 (10.1)	2.5 (6.2)	17.5 (8.9)	10.8 (12.9)	-3.6 (8.3)	12.5 (10.0)	-4.3 (10.3)	14.5 (11.9)	4.4 (10.1)	16.0 (11.8)	32.5 (10.5)	22.5 (13.0)	7.5 (11.2)	4.0 (10.0)	26.1 (10.0)
22.1 (10.5)	23.0 (11.2)	37.4 (11.9)	28.4 (11.9)	15.5 (12.1)	11.8 (12.9)	-10.3 (11.8)	27.7 (12.2)	30.7 (12.2)	13.2 (12.0)	11.7 (11.4)	-6.6 (8.7)	16.7 (10.2)	14.9 (12.3)	7.7 (8.7)	10.5 (7.6)
15.5 (8.5)	31.7 (12.9)	-8.4 (12.0)	0.3 (9.5)	-2.1 (11.5)	13.0 (12.1)	12.8 (12.7)	13.7 (10.1)	17.7 (11.8)	41.2 (12.8)	-2.4 (11.2)	19.8 (9.5)	8.9 (10.0)	-15.9 (9.9)	8.7 (6.4)	12.8 (8.6)
-5.3 (9.5)	4.4 (10.1)	9.2 (10.3)	-0.2 (11.9)	21.9 (11.4)	20.4 (11.9)	6.9 (11.9)	-11.5 (11.2)	15.6 (11.4)	22.5 (11.6)	-4.2 (7.5)	16.0 (7.2)	8.7 (9.7)	7.6 (10.9)	10.5 (10.1)	-1.4 (9.4)
15.0 (11.5)	11.3 (9.1)	-7.1 (10.6)	30.6 (12.9)	30.2 (14.6)	29.8 (9.8)	-9.9 (10.0)	11.6 (9.6)	0.7 (10.6)	16.0 (9.4)	25.5 (10.6)	30.6 (11.2)	-0.3 (4.3)	7.8 (6.4)	-6.5 (6.0)	-6.4 (7.9)
10.3 (11.2)	19.1 (12.6)	7.7 (9.9)	1.8 (13.5)	6.2 (10.8)	15.4 (10.9)	-11.9 (10.5)	-5.5 (14.9)	18.6 (10.2)	18.5 (11.8)	6.8 (11.3)	9.8 (11.0)	5.5 (12.4)	22.4 (10.9)	7.3 (10.8)	-3.9 (9.9)
23.7 (10.2)	-8.4 (10.7)	3.9 (12.3)	1.8 (10.9)	19.7 (12.9)	23.2 (13.2)	-9.1 (12.5)	26.2 (15.1)	16.1 (10.6)	7.5 (9.0)	8.0 (11.2)	3.6 (13.3)	9.5 (12.9)	-1.6 (12.5)	19.9 (10.5)	11.7 (11.9)
13.2 (9.6)	18.9 (10.8)	3.8 (10.0)	28.3	-5.5	12.8	16.6 (10.9)	5.2 (6.8)	6.5 (8.3)	-3.2 (5.5)	3.1 (9.9)	15.8 (10.6)	15.0 (10.3)	7.9 (11.6)	18.8 (9.0)	5.3 (9.6)
9.2 (9.8)	1.6 (9.8)	13 (10				10.5 (10.2)	0.8 (6.9)	10.8 (5.6)	14.4 (11.9)	17.2 (12.0)	-4.6 (9.2)	20.5 (10.8)	-5.1 (8.5)	6.3 (10.9)	-15.7 (9.4)
17.9 (11.4)	23.9 (11.8)	14 (12				17.7 (9.3)	14.8 (13.0)	26.2 (14.0)	4.0 (8.3)	28.1 (9.8)	3.8 (9.0)	18.0 (9.9)	3.0 (9.3)	20.3 (9.7)	13.3 (8.8)
28.0 (11.5)	6.5 (9.6)	13 (11				0.1 (2.7)	15.5 (11.8)	-0.5 (11.5)	-14.4 (10.8)	7.4 (8.7)	12.4 (11.4)	3.8 (7.6)	12.7 (10.9)	25.5 (11.8)	10.8 (10.4)
1.3 (8.9)	9.2 (8.9)	13 (6				-2.3 (7.4)	6.6 (10.6)	23.7 (10.3)	31.5 (12.2)	2.9 (9.6)	8.6 (9.4)	-6.7 (9.3)	27.5 (13.2)	13.5 (11.4)	28.9 (10.8)
8.9 (8.2)	1.8 (9.9)	19 (12				16.8 (9.3)	0.6 (10.5)	18.9 (10.2)	-4.3 (9.9)	27.1 (10.8)	20.1 (11.4)	5.4 (8.9)	3.4 (10.9)	12.6 (10.0)	1.3 (8.7)
-0.3 (10.7)	31.4 (10.3)	15.9 (9.9)	11.5 (8.6)	20.8 (9.5)	5.6 (8.3)	-3.1 (8.0)	15.1 (12.3)	20.7 (12.0)	3.2 (9.4)	3.4 (9.4)	10.4 (10.1)	14.0 (11.8)	19.3 (10.6)	40.2 (11.6)	11.9 (8.5)

Tabla 37: 257004

Mapa cuantitativo del tumor 8.

A continuación se presenta el mapa de distribución de cobre en la muestra de tumor 8. Se observa una gran inhomogeneidad en la distribución. Esto explica los valores medios relativamente bajos (de algunas decenas de ng/cm^2) que corresponden a áreas grandes (1x1 mm^2), y los valores puntuales muy altos que en algunos píxeles individuales alcanzan el µg/cm^2.

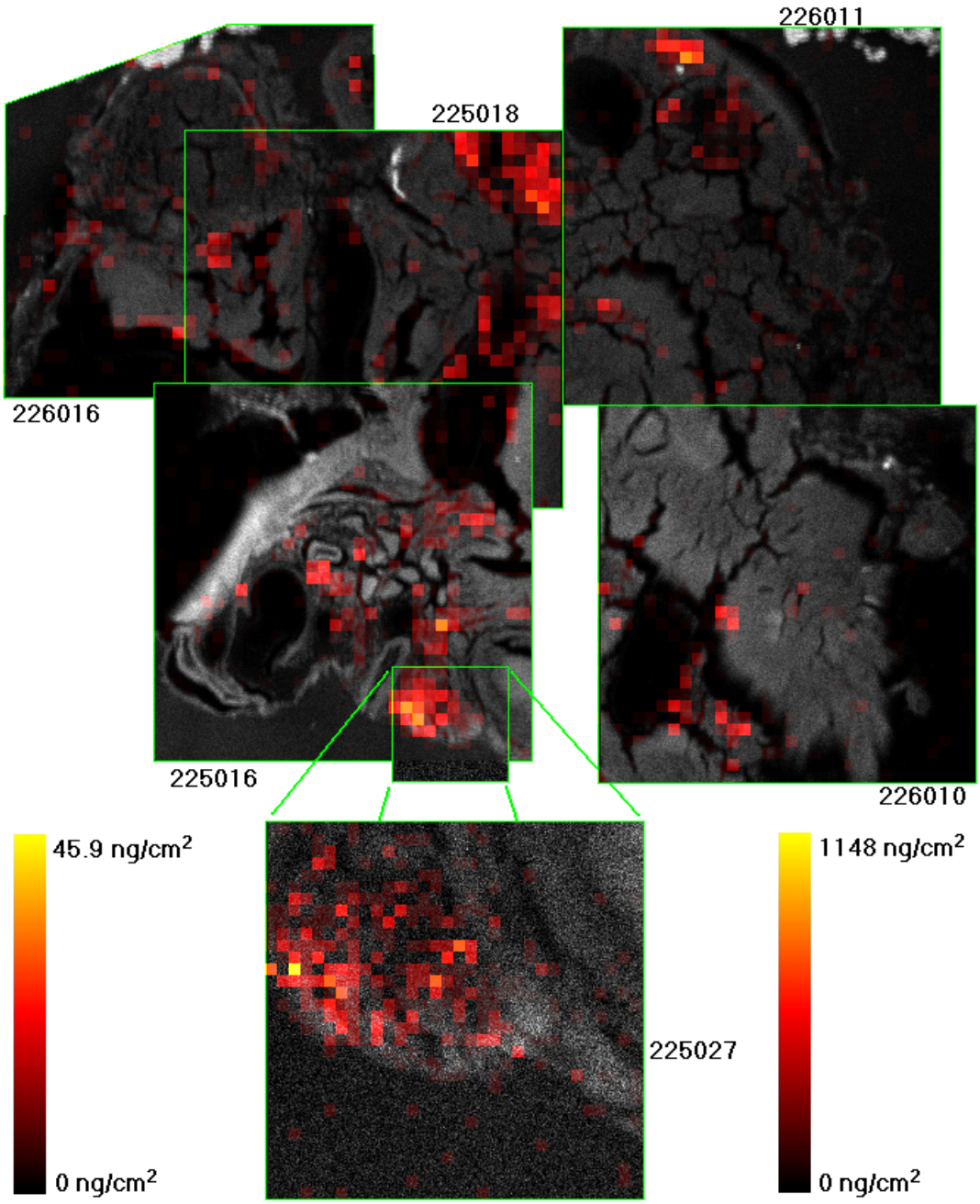


Ilustración 122: Mapa cuantitativo de la distribución de cobre en la muestra Tumor 8

Conclusiones.

Transmisión.

Para las condiciones estándar de PIXE (ver sección "Colimadores – operación por encima de 2 micrones – alta corriente") en este trabajo se presentan sólo dos valores. Una cota de 1 en 32700 para un haz de 1 μm^2 (ver Ecuación 29) y una estimación de 1 en 33000 para haces de 4 x 4 μm^2 (ver Ecuación 102).
Determinar experimentalmente un número de transmisión resultó ser extremadamente complicado (o impreciso) debido a que hay un gran número de factores incontrolables en lo que respecta al acelerador. Para verificar estos números es necesario conocer la brillancia del haz que llega al microhaz, valor que en la práctica sólo se conoce muy aproximadamente.
Sin embargo, a lo largo de un gran número de experimentos se observó que parecería que hay una cota máxima (valor al que se llegó en varias ocasiones pero nunca se superó) de aproximadamente 5 $fA/\mu m^2$, es decir, que por cada micrón cuadrado que aumenta el área de apertura del colimador objeto la corriente del microhaz aumenta 5fA. Este valor resultó ser muy insensible al valor de corriente que ingresa a la línea, ya que en el uso estándar del acelerador, aumentar la corriente significa aumentar la emitancia del haz, y una vez que la emitancia supera la aceptancia del microhaz, cualquier incremento posterior de la emitancia (corriente) no tiene sentido.
El valor mínimo de corriente para el cual se observó que se cumplía este valor de 5 $fA/\mu m^2$ es de 200 nA en la copa de Faraday de la línea. Esto da una transmisión de 1/1250 lo que en función de la Ecuación 102 indica que se ingresó al microhaz con un haz con una emitancia de $(2 \text{ mm mrad})^2$.
Pese a no poder dar un valor de transmisión concreto, considero un valor mucho más útil el parámetro acá presentado, ya que a la hora de planear un experimento se puede considerar que aparentemente la máxima corriente que se puede obtener con la configuración actual es de 5fA cada micrón cuadrado de apertura en el colimador objeto.
Además, según lo presentado en la sección "Teorema de Liouville" se observan los puntos sobre los que hay que trabajar para incrementar esta cota: El stripper y la brillancia de la fuente de iones. Queda implícito que en primera instancia se debe verificar que debido a problemas de alineación de los componentes del acelerador no se este removiendo del haz iones con componentes espaciales o angulares abarcadas por la aceptancia del microhaz.

En lo que respecta a los experimentos de STIM, resultó sumamente sencillo obtener corrientes muy estables de unos pocos cientos de iones por segundo. Esto abre las puertas a sistemas de evento simple.

Dispersión en energía del haz del acelerador.

Como lo reflejan la Ecuación 60 y la Ecuación 61 una pequeña variación en la energía del haz puede arruinar la resolución espacial del microhaz[52]. Sin embargo, al mismo tiempo, estas ecuaciones indican que ajustando apropiadamente los colimadores anti-scattering de pueden limitar las componentes angulares del haz, y por lo tanto, reducir la

[52] Para variaciones de energía más grandes, en la Ilustración 27 se presenta el resultado de una simulación que calcula el tamaño del haz sobre la muestra cuando la energía de los iones varían entre 0 y 50 MeV.

influencia del término de las matrices de transmisión que relacionan la divergencia de entrada del ión y la posición de salida.
Para una discusión más detallada de esta conclusión dirigirse a la sección “Variación del tamaño de foco con la energía”

Haz disperso.

De la simulación del haz disperso se pueden extraer dos conclusiones: primero, que en las condiciones utilizadas en este trabajo para PIXE se puede despreciar su efecto, segundo, que es necesario conocer más en detalle la rugosidad de las paredes de los colimadores para poder realizar este estudio en las condiciones utilizadas cuando se reduce el tamaño de la apertura objeto.

Vibraciones e interferencias electromagnéticas.

La medición en la que se determinó que el microhaz puede llegar a un tamaño de $1\mu m^2$ indicaría que en primera instancia estos factores no tienen una gran influencia en la línea, o que por lo menos, no impiden llegar a un haz de estas dimensiones.

Alineación y enfoque.

En función de todo lo evaluado en este trabajo, se concluyó que la razón más probable para la degradación del haz en algunas mediciones, como por ejemplo las mediciones presentada en la sección “Mediciones 214025, 214026, y 214027.” en donde se observó un haz mucho más grande que los 2 x 2 micrones teóricos para los que fue colocado el colimador objeto, es la precisión con la que se realiza el enfoque del microhaz y la alineación de la lente magnética de precisión.
En una ocasión se pidió a tres personas distintas que ajusten las corrientes de los cuadrupolos para formar una línea (procedimiento mucho más simple que formar un punto) con lo que se obtuvieron los siguientes resultados:

Persona	***1er cuadrupolo [A]***	***2do cuadrupolo [A]***	***3er cuadrupolo [A]***
A	6.27	8.81	14.38
B	6.23	8.85	14.25
C	6.34	8.83	14.51

Una simulación similar a la realizada para evaluar la influencia de la variación de la energía, pero evaluando la importancia de la variación de las corrientes de enfoque en el tamaño final del haz arrojó los siguientes coeficientes para una haz con una divergencia de 0.1 mrad:

$$dX/dI_1 = -0.35\ \mu m/mA$$
$$dY/dI_1 = 0.008\ \mu m/mA$$
$$dX/dI_2 = 0.063\ \mu m/mA$$
$$dY/dI_2 = 0.096\ \mu m/mA$$

donde I_1 es la corriente que circula por los dos primeros cuadrupolos, e I_2 la que circula por el último. Esto indica que utilizando este método no es posible determinar si se logró un enfoque óptimo.
Otra opción es realizar sucesivas mediciones del tamaño del haz utilizando una reja, y en base a esto ir ajustando las corrientes para obtener un buen enfoque. En la práctica el

tiempo requerido para juntar estadística suficiente es tan largo, que podría tardarse varias horas en realizar el enfoque.

Sistema de vacío.

El sistema de vacío demostró funcionar eficientemente. Es más, actualmente una de las bombas moleculares no funcionan por problemas técnicos, sin embargo compensando la capacidad de bombeo con las bombas iónicas cuando se llega a un régimen adecuado, y teniendo un retardo considerable (pero aceptable) en los tiempos de bombeo, el microhaz sigue operando. Esto demuestra la versatilidad del sistema, pero no evidencia redundancia en la selección de las bombas.

Durante la operación se observó que en ciertas ocasiones el nivel de vacío que hay en el punto de acople al acelerador se degrada (aparentemente debido a problemas en la ultima etapa de bombeo del acelerador) por lo que en algunos experimentos es necesario colocar la estación de bombeo próxima al acelerador compuesta por una bomba turbomolecular y su correspondiente bomba mecánica de apoyo, las que no fueron previstas en el diseño original.

Sistema de control.

El sistema de control del vacío demostró ser sumamente eficiente en varios aspectos. Gracias a la interfaz gráfica, prácticamente los usuarios no necesitaron instructivo para operar el sistema al 100% de su capacidad. Vale la pena comparar esto con lo que ocurre en otra de las líneas del acelerador (la utilizada para PIXE estándar), en la que sólo hay 3 bombas y 4 válvulas pero sin ningún sistema centralizado de control. Los usuarios de esta línea (que son los mismos del microhaz) necesitan un relativamente complejo instructivo para operarla y sin embargo ocurren equivocaciones muy frecuentemente. Hasta el momento no se registraron errores en el uso del sistema de vacío del microhaz.

Cabe hacer notar, que aunque en el diseño original existía un complejo sistema de enclavamiento para proteger al sistema contra operaciones erróneas, actualmente se encuentra deshabilitado. Esto se debe a que en la práctica los sensores de vacío presentan una tasa de fallas extremadamente alto, situación que se complica porque actualmente hay 11 cabezales instalados. El sistema de enclavamientos estaba compuesto por un sistema supervisor que continuamente controlaba que el sistema estuviese en una condición segura en función de las lecturas de los cabezales de vacío, y además auditaba todas las operaciones antes de realizarlas. Evidentemente si una de estas mediciones se vuelve errónea, el sistema supervisor actuará equivocadamente.

Es más, este problema se torna inmanejable, debido a que algunos de los cabezales al fallar reportan niveles de vacío buenos aunque la línea se encuentre a presiones extremadamente altas.

Instrumentación

El diseño original de la copa de Faraday era para tener una sensibilidad de 1 fA, sin embargo, se la terminó utilizando en 184 fC/pulso. Esto resultó ser muy cómodo, ya que se pueden despreciar los errores introducidos en la medición de carga en este régimen de trabajo. Por otro lado, la simulación de haz disperso evidencia que puede ser conveniente aumentar el tamaño de la copa para que colecte también el haz disperso, o por lo menos, blindar las zonas de la copa a las que estos iones le pueden pegar para que no se generen rayos X que interfieran con las mediciones de PIXE.

En lo que respecta a instrumentación, provista por Oxford Microbeams, aparece uno de los puntos flojos del microhaz: el tiempo muerto en el sistema de adquisición. Por el

diseño electrónico de este sistema, al interactuar con el sistema operativo Windows, se pueden generar tiempos muertos extremadamente grandes. Como agravante, el generador de barrido, que es controlado por software, se detiene durante estos tiempos muertos, por lo que en los experimentos en que se requiere una distribución muy precisa y controlada de la dosis, el sistema no es aplicable. La única solución concebible es reemplazar el hardware del sistema de adquisición por una electrónica que permita una adquisición eficiente de datos, y como no se dispone del código fuente del software, generar uno nuevo. Con algo relativamente sencillo y barato (y mucho trabajo), acorde con el avance de la electrónica hoy en día, se puede mejorar considerablemente el desempeño del microhaz.
La instrumentación para el guiado del haz resultó ser muy eficiente y sencilla.

Mediciones

La elección de este tipo de reja resultó ser incompatible con la medición del tamaño del haz. Disponer de una reja con bordes perfectamente lisos habría simplificado considerablemente esta tarea.
Por otro lado, el trabajo realizado para caracterizar la reja y al mismo tiempo determinar el tamaño del haz demuestra la potencia y las posibilidades de combinar las técnicas STIM y PIXE.
La correlación propuesta entre el fondo del espectro PIXE y la sección eficaz de producción resultó ser un método interesante para el análisis PIXE de muestras gruesas, aunque como se demostró en la sección “Estudio de la corrección por variación de la sección eficaz.” hay que evaluar cuidadosamente los datos para obtener una correlación apropiada.
También, como se presentó en la sección “Estudio de la ventaja de la corrección de tiempo local vs. global” es necesario corregir el tiempo muerto de este sistema de adquisición con un procedimiento más laborioso de lo que en general se acostumbra.

Determinación de cobre - mapas cuantitativos.

Comparando los espectros y los resultados de las series de experimentos 214 y 225 no resulta obvia la ventaja entre uno u otro detector de rayos X. El detector de 80mm^2 junta más estadística, pero es indispensable un ajuste laborioso para descontar el fondo de los picos, lo que se refleja en los intervalos de indeterminación obtenidos. Por otro lado, los espectros obtenidos con el detector de 30mm^2 tienen mucha más calidad, pero menos estadística.
Un factor que podría inclinar la balanza a favor del detector de 30mm^2 es que gracias a la electrónica de procesamiento que posee admite un counting rate mucho más elevado que el otro, pero esta ventaja no puede ser aprovechada debido a que el sistema de adquisición se saturaría frente a rates elevados.
En algunos casos, como por ejemplo en la medición 255023 se evidencian problemas asociados con el ajuste realizado para obtener el área del fotopico de cobre y el procesamiento numérico para corregir por el espesor de la muestra. Notar el incremento del error porcentual luego del procesamiento.
No obstante, el siguiente gráfico muestra que hay una notable correlación entre las distintas mediciones de los tejidos.

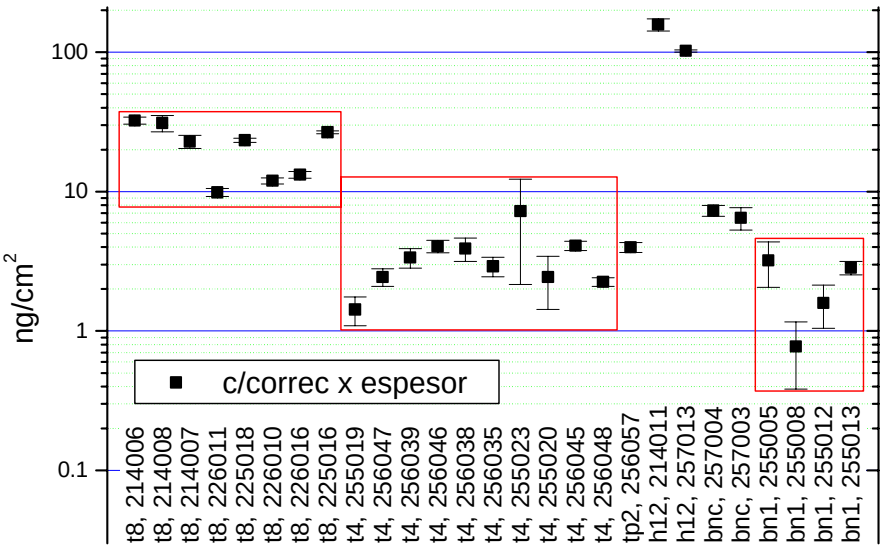


Ilustración 123: Correlación entre distintas mediciones de concentración de cobre. Todos estos valores fueron obtenidos realizando la corrección por tiempo muerto y por espesor de la muestra propuestos en este trabajo.

En lo que respecta a los mapas de cobre, observando las matrices presentadas en la sección “Mapas cuantitativos de distribución de cobre.” se puede apreciar que aunque los errores relativos de cada píxel del mapa de cobre son elevados, en los casos en que se ve una región con cobre, las áreas de los fotopicos claramente sobresalen del nivel de fondo.

Como se concluyó en la sección “Mapa cuantitativo del tumor 8.” en general en los mapas de distribución de cobre se observa una notable inhomogeneidad, lo que demuestra la relevancia del estudio realizado.

Cualquier otra técnica analítica que se utilice para determinar concentraciones de cobre sin tomar en cuenta la forma en que se distribuye a nivel tisular estaría promediando algunos puntos con alta concentración de cobre con muchos otros de baja concentración. Esto se observa claramente comparando el mapa de cobre en el tumor 8, con la concentración integral en el espectro del experimento 225016 (1x1 mm^2), y el valor de concentración integral en el experimento 225027 (un zoom de 300 x 300 μm^2 abarcando la región de alta concentración del experimento 225016).

Apéndices.

Descripción de los programas específicos que interactúan con los controladores.

if_fc

Busca en la base de datos la dirección del dispositivo en la red RS-485 y el flag de activación. Si encuentra esta información, envía por la RS-485 (/dev/ttyS0) el comando para la UCFC[53] que mueve el posicionador de la copa de Faraday y el detector de barrera de superficie de la cámara de irradiación.
Como respuesta genera un reporte en los archivos de bitácora.

Código fuente	**if_fc.c** **ublib.c**	
Dispositivo asociado	Unidad de control de la Faraday cup (UCFC)	

Campos en la base de datos

active	flag de activación del dispositivo
id	dirección 485

Línea de comando

if_fc dID **-f** || **-b** || **-l** || -pasos

-f	Envía a la UCFC el comando para colocar la Faraday cup Comando RS -485: "\033%02x%02x", 485ID, 85
-b	Envía a la UCFC el comando para colocar el detector de barrera de superficie. Comando RS -485: "\033%02x%02x", 485ID, 18
-l	Envía a la UCFC el comando para dejar una posición libre Comando RS -485: "\033%02x%02x", 485ID, 250
-pasos	Mueve el motor del posicionador pasos * 16 pasos desde la posición de reset. Comando RS-485: "\033%02x%02x", 485ID, pasos

Respuesta

fecha **X** || **E** || **I**

X	Dispositivo inactivo, o dirección 485 o flag de activación no encontrado de la base de datos
E	Time-out en la respuesta del dispositivo
I	Comando aceptado.

[53] UCFC: unidad de control de la copa de Faraday.

if_ión

Busca en la base de datos la dirección del dispositivo en la red RS-485 y el flag de activación. Si encuentra esta información, envía por la RS-485 (/dev/ttyS0) el comando para la controladora de bombas iónicas de Varian.
Como respuesta genera un reporte en los archivos de bitácora.

Código fuente	**if_ión.c** **ublib.c**	
Dispositivo asociado	IONVAC	documentación Varian

Campos en la base de datos

active	flag de activación del dispositivo
subad	bomba a controlar (cada Ionvac puede controlar 2 bombas)
id	dirección 485

Línea de comando

if_ión dID **-i**	
-i	Envía a la Ionvac el comando de solicitud de información Comando RS -485: `"%c04s%02d?%c", 0x80|485ID, CRC`

Respuesta

fecha **X** || **E** || {**I** estado}	
X	Dispositivo inactivo, o dirección 485 o flag de activación no encontrado de la base de datos
E	Time-out en la respuesta del dispositivo
I estado	Comando aceptado, en la cadena de caracteres estado devuelve la corriente de la bomba, la tensión, y la presión, o si hay algún problema con la bomba, el código de error.

if_mg

Busca en la base de datos la dirección del dispositivo en la red RS-485 y el flag de activación. Si encuentra esta información, envía por la RS-485 (/dev/ttyS0) el comando para la controladora de cabezales de vacío.
Como respuesta genera un reporte en los archivos de bitácora.

Código fuente	**if_mg.c** **ublib.c**	
Dispositivo asociado	MaxiGauge	documentación Varian

Campos en la base de datos

active	flag de activación del dispositivo
subad	cabezal a controlar (cada Maxigauge puede controlar hasta 6 cabezales)
id	dirección 485

Línea de comando

if_mg dID –**i** || -**o** || -**c**

-**c**	Envía al MaxiGauge el comando para apagar un cabezal. Comando RS-485: "\033%02dsen,%c,%c,%c,%c,%c,%c\015", 485ID, f1, f2, f3, f4, f5, f6 donde fN es '0' si no es el cabezal a controlar, y '1' para apagarlo.
-**o**	Envía al MaxiGauge el comando para encender un cabezal. Comando RS-485: "\033%02dsen,%c,%c,%c,%c,%c,%c\015", 485ID, f1, f2, f3, f4, f5, f6 donde fN es '0' si no es el cabezal a controlar, y '2' para encenderlo.
-**i**	Envía a la MaxiGauge el comando de solicitud de información Comando RS-485: "\033%02dpr%d\015", 485ID, subad

Respuesta

fecha **X** || **E** || **U** || **O** || **N** || {**I** estado}

X	Dispositivo inactivo, o dirección 485 o flag de activación no encontrado de la base de datos
E	Time-out en la respuesta del dispositivo, o error en el cabezal
U	Under-range.
O	Over-range.
N	Cabezal apagado.
I estado	Comando aceptado, en la cadena de caracteres estado devuelve la presión que mide el cabezal.

if_tcm

Busca en la base de datos la dirección del dispositivo en la red RS-485 y el flag de activación. Si encuentra esta información, envía por la RS-485 (/dev/ttyS0) el comando para la controladora de bomba turbomolecular de Pfeiffer.
Como respuesta genera un reporte en los archivos de bitácora.

Código fuente	**if_tcm.c** **ublib.c**	
Dispositivo asociado	TCM1601	documentación Pfeiffer

Campos en la base de datos

active	flag de activación del dispositivo
id	dirección 485

Línea de comando

if_tcm dID **–i** || **-o** || **-c**	
-c	Envía al TCM1601 el comando para apagar la bomba. Comando RS –485: ver código fuente y/o documentación de Pfeiffer.
-o	Envía al TCM1601 el comando para arrancar la bomba. Comando RS –485: ver código fuente. y/o documentación de Pfeiffer.
-i	Envía al TCM1601 el comando de solicitud de información Comando RS –485: ver código fuente y/o documentación de Pfeiffer.

Respuesta

fecha **X** || **E** || {**I** estado}	
X	Dispositivo inactivo, o dirección 485 o flag de activación no encontrado de la base de datos
E	Time-out en la respuesta del dispositivo, o error en el cabezal
I estado	Comando aceptado, en la cadena de caracteres estado devuelve la indicación de que si la bomba está encendida, la velocidad de rotación en Hz, y el código de error.

if_ucps

Busca en la base de datos la dirección del dispositivo en la red RS-485 y el flag de activación. Si encuentra esta información, envía por la RS-485 (/dev/ttyS0) el comando para la unidad de control de potencia.
Como respuesta genera un reporte en los archivos de bitácora.

Código fuente	**if_ucps.c** **ublib.c**	
Dispositivo asociado	Unidad de control de potencia (UCPS)	

Campos en la base de datos

active	flag de activación del dispositivo
subad	relay a controlar (la unidad de control de potencia tiene 7 relays)
id	dirección 485

Línea de comando

if_ucps dID –**i** || -**o** || -**c**	
-**c**	Envía a la unidad de control de potencia el comando para activar el relay subad. Comando RS -485: "\033%02xc%d", 485ID, subad – 1
-**o**	Envía a la unidad de control de potencia el comando para desactivar el relay subad. Comando RS -485: "\033%02xa%d", 485ID, subad – 1
-**i**	Envía a la unidad de control de potencia el comando de solicitud de información Comando RS -485: "\033%02xi0", 485ID

Respuesta

fecha **X** || **E** || {**I** estado}	
X	Dispositivo inactivo, o dirección 485 o flag de activación o subad no encontrado de la base de datos
E	Time-out en la respuesta del dispositivo
I estado	Comando aceptado, en la cadena de caracteres estado devuelve el estado de las dos entradas digitales del UCPS

if_ucvs

Busca en la base de datos la dirección del dispositivo en la red RS-485 y el flag de activación. Si encuentra esta información, envía por la RS-485 (/dev/ttyS0) el comando para la unidad de control de válvula.
Como respuesta genera un reporte en los archivos de bitácora.

Código fuente	**if_ucvs.c** **ublib.c**	
Dispositivo asociado	Unidad de control de válvula (UCVS)	

Campos en la base de datos

active	flag de activación del dispositivo
id	dirección 485

Línea de comando

if_ucvs dID **-i** || **-o** || **-c**

-c	Envía a la unidad de control de válvula el comando para cerrar la válvula. Comando RS -485: "\033%02xc", 485ID
-o	Envía a la unidad de control de válvula el comando para abrir la válvula. Comando RS -485: "\033%02xa", 485ID
-i	Envía a la unidad de control de válvula el comando de solicitud de información Comando RS -485: "\033%02xi", 485ID

Respuesta

fecha **X** || **E** || **A** || **C** || **I**

X	Dispositivo inactivo, o dirección 485 o flag de activación no encontrado de la base de datos
E	Time-out en la respuesta del dispositivo
A	Válvula abierta.
C	Válvula cerrada.
I	Válvula en posición intermedia.

Programas

Programa “cu.c”

Este programa utiliza las estructuras definidas en el header “lfm.h”.
Al inicio del programa se abre el archivo.lmf y se obtiene del header la longitud de cada bloque. Con esta información de reserva la memoria suficiente para alojar de a un bloque a la vez.

```
fd = open (FP, O_RDONLY);
read (fd, header, 7);
(fprintf (stderr, "FP: %d\n", fd));

dlen = ((unsigned short *) header)[2];
data = (struct data_struct *) malloc (dlen);

lseek (fd, sizeof (struct dataSTRUCT) + 8 * sizeof (struct ADCinfoSTRUCT),
       SEEK_CUR);
```

Luego se itera entre los distintos bloques del archivo, leyéndolos de a uno.

```
for (t = 0; l = (read (fd, data, dlen) >> 2);)
  {
```

Por cada bloque, se itera entre los eventos calculando el área del pulser utilizando la Ecuación 150 y la Ecuación 151.

```
    for (e = &(data->event), i = n = 0;
         (n < l - 5) && (e->e != 0xffff); n++, e++)
      C (e) == 1 && IS_PULSER (e) && ++i;
    if (!n)
      continue;
    k = ((float) (data->rt - t)) / 100000.0 * 50.0 / ((float) i);
```

Iterando nuevamente entre los eventos, se acomodan los datos para constituir el cubo map[x][y][canal] que contiene un espectro corregido por tiempo muerto por cada píxel.

```
    for (t = data->rt, e = &(data->event), n = 0;
         (n < l - 5) && (e->e != 0xffff); n++, e++)
      C (e) == 1 && IS_ROI (E (e))
        && (map[X (e)][Y (e)][E (e) - ROIMIN] += k);
  }

close (fd);
```

Acá termina el bucle que itera entre los distintos bloques. De forma similar, se abre el archivo que contiene la información de STIM y se extraen los datos.
En este caso se generan las matrices STIM[x][y], que contiene la sumatoria de las energías de los eventos por cada píxel, count[x][y], que contiene el número de eventos, y var[x][y], que contiene la suma cuadrática de los errores.

```
fd = open (FS, O_RDONLY);
(fprintf (stderr, "FS: %d\n", fd));
lseek (fd,
       7 + sizeof (struct dataSTRUCT) + 8 * sizeof (struct ADCinfoSTRUCT),
       SEEK_CUR);

for (t = 0; l = (read (fd, data, dlen) >> 2);)
  for (e = &(data->event), n = 0; (n < l - 5) && (e->e != 0xffff); n++, e++)
    C (e) == 0 && (E (e) < SMAX) && DX (e) > 0 && DY (e) > 0
      && DX (e) < 0x100 && DY (e) < 0x100
```

```
       && (stim[DX (e)][DY (e)] +=
           E (e), count[DX (e)][DY (e)]++, var[DX (e)][DY (e)] +=
           E (e) * E (e));

  close (fd);
```

Los macros DX y DY se encargan de la traslación para sincronizar ambos mapas (el de STIM y el de PIXE), y si se requiere una rotación de 90 grados, la opción de compilación ROT la habilita

```
#ifdef ROT
#define DY(q) (((q->x)+((OY)))>>(COMP))
#define DX(x) (((255-x->y)+(-(OX)))>>(COMP))
#else
#define DX(q) (((q->x)+(-(OX)))>>(COMP))
#define DY(x) (((x->y)+(OY))>>(COMP))
#endif
```

Luego el código entra en una zona en la que se realiza una compilación condicional en función del procesamiento deseado: el mapa de STIM, el mapa de PIXE, la correlación entre ambos, o el mapa de cobre. Cualquiera sea esta compilación, se itera entre todos los píxeles.

```
  for (y = 255; y + 1; y--)
    for (x = 0; x < 256; x++)
```

En caso de requerir el mapa de STIM o el mapa de PIXE simplemente se presentan los datos:

```
#ifdef SMAP
      fprintf (stdout, "%d%c", count[x][y] > 1 ?
               (int) (stim[x][y] / ((float) count[x][y])) - 700 : 0,
               x == 255 ? '\n' : '\t');
#elif defined PMAP
      {
       for (i = 0, k = 0; i < 200; i++)
         k += map[x][y][i];
       fprintf (stdout, "%d%c", (int) k, x == 255 ? '\n' : '\t');
      }
```

Si se requiere la correlación, el programa entrega por cada píxel el dato del área corregida por tiempo muerto y el centroide del espectro de STIM, con sus respectivos errores

```
#elif defined CORR
      {
       if (count[x][y] < 10)
         continue;
       for (i = 30, k = 0; i < 200; i++)
         k += map[x][y][i];
       (k > 1.0) && (fprintf
                    (stdout, "%g\t%g\t%g\t%g\n",
                     k / q * (0x100 >> COMP) * (0x100 >> COMP),
                     sqrt (k) / q * (0x100 >> COMP) * (0x100 >> COMP),
                     50.0 / S50 * stim[x][y] / F (count[x][y]),
                     50.0 / S50 *
                     sqrt ((var[x][y] -
                            SQ (stim[x][y]) / F (count[x][y])) /
                           (F (count[x][y]) - 1.0))));
      }
```

Notar que el macro S50 define el canal del espectro de STIM correspondiente a la energía de 50 MeV.

```
#define S50 777
```

Por último, si esta fue la opción de compilación, entrega el mapa de cobre realizando un procesamiento similar al que realiza el programa “pixe.c”, pero corrigiendo por espesor píxel a píxel tomando en cuenta la perdida en energía que se produjo en ese píxel.

```
#elif defined MAPCU
      {
       f = (count[x][y] > 1) ?
         stim[x][y] / ((float) count[x][y]) * 0.00409 - 2.40447 : -1.0;
       for (d = k = 0.0, BGR1; d += (map[x][y][i]), k -= map[x][y][i++]);
       for (BGR2; d += (map[x][y][i]), k -= map[x][y][i++]);
       for (PEAK; d += (map[x][y][i]), k += map[x][y][i++]);
       fprintf (stdout, "%2.1f+%2.1f %c", (k < -100000.0)
                || (f < 0.0) ? 0 : (float) (k / ((f + 0.885) / 2.0)),
                (float) (sqrt (d) / ((f + 0.885) / 2.0)),
                x == 255 ? '\n' : '\t');
      }
#endif
```

El código fuente completo de este programa se presenta a continuación:

```
#include <sys/types.h>
#include <sys/stat.h>
#include <fcntl.h>
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

#include "lmf.h"

#define COMP 1

#define ROIMIN 50
#define ROIMAX 250

#define C(x) (((x->e) >> 12) & 0x07)
#define E(x) (((x->e) & 0x0fff) >> 2)
#define X(q) ((q->x)>>(COMP))
#define Y(x) ((x->y)>>(COMP))

//#define SMAP 1
//#define PMAP 1
#define CORR 1
//#define MAPCU 1

float map[256][256][200];
float stim[256][256];
float var[256][256];
int count[256][256];
float esp[200];

int
main (int argc, char *argv[])
{
  int fd, dlen, n, l, i;
  struct data_struct *data;
  unsigned char header[6];
  struct event_struct *e;
  int t, x, y;
  float k, q, f, d;

/*
#define FS "/home/guest/listmode/260064.LMF"
#define S50 777
#define FP "/home/guest/listmode/257013.LMF"
#define OX -21
#define OY -82
#define ROT 1
#define BGR1 i=(214-ROIMIN);i<=(215-ROIMIN)
#define BGR2 i=(203-ROIMIN);i<=(205-ROIMIN)
#define PEAK i=(207-ROIMIN);i<=(211-ROIMIN)
```

```
// */

//*
#define FS "/home/guest/listmode/256059.LMF"
#define S50 800
#define FP "/home/guest/listmode/256057.LMF"
#define OX 0
#define OY 0
#define BGR1 i=(214-ROIMIN);i<=(215-ROIMIN)
#define BGR2 i=(203-ROIMIN);i<=(205-ROIMIN)
#define PEAK i=(207-ROIMIN);i<=(211-ROIMIN)
// */

/* NO USAR
#define FS "/home/guest/listmode/256033.LMF"
#define S50 801
#define FP "/home/guest/listmode/255013.LMF"
#define BGR1 i=(211-ROIMIN);i<=(212-ROIMIN)
#define BGR2 i=(202-ROIMIN);i<=(203-ROIMIN)
#define PEAK i=(205-ROIMIN);i<=(208-ROIMIN)
#define OX 6
#define OY 0
// */

/*
#define FS "/home/guest/listmode/256024.LMF"
#define S50 802
#define FP "/home/guest/listmode/256047.LMF"
#define BGR1 i=(212-ROIMIN);i<=(213-ROIMIN)
#define BGR2 i=(204-ROIMIN);i<=(205-ROIMIN)
#define PEAK i=(208-ROIMIN);i<=(211-ROIMIN)
#define OX -152
#define OY -107                      // */

/*
#define FS "/home/guest/listmode/256026.LMF"
#define S50 801
#define FP "/home/guest/listmode/255019.LMF"
#define BGR1 i=(212-ROIMIN);i<=(213-ROIMIN)
#define BGR2 i=(204-ROIMIN);i<=(205-ROIMIN)
#define PEAK i=(208-ROIMIN);i<=(211-ROIMIN)
#define OX -35
#define OY 75                // */




  fd = open (FP, O_RDONLY);
  read (fd, header, 7);
  (fprintf (stderr, "FP: %d\n", fd));

  dlen = ((unsigned short *) header)[2];
  data = (struct data_struct *) malloc (dlen);

  lseek (fd, sizeof (struct dataSTRUCT) + 8 * sizeof (struct ADCinfoSTRUCT),
         SEEK_CUR);

#define IS_PULSER(x) (E(x) < 900 && E(x) > 750)

  for (t = 0; l = (read (fd, data, dlen) >> 2);)
    {
      for (e = &(data->event), i = n = 0;
           (n < l - 5) && (e->e != 0xffff); n++, e++)
        C (e) == 1 && IS_PULSER (e) && ++i;
      if (!n)
        continue;
      k = ((float) (data->rt - t)) / 100000.0 * 50.0 / ((float) i);

#define IS_ROI(x) ((x) >= (ROIMIN) && (x) < (ROIMAX))

      for (t = data->rt, e = &(data->event), n = 0;
           (n < l - 5) && (e->e != 0xffff); n++, e++)
        C (e) == 1 && IS_ROI (E (e))
          && (map[X (e)][Y (e)][E (e) - ROIMIN] += k);
    }
  q = (float) (data->q);
```

```
  close (fd);

  fd = open (FS, O_RDONLY);
  (fprintf (stderr, "FS: %d\n", fd));
  lseek (fd,
         7 + sizeof (struct dataSTRUCT) + 8 * sizeof (struct ADCinfoSTRUCT),
         SEEK_CUR);

  for (t = 0; l = (read (fd, data, dlen) >> 2);)

#define SMAX (1700>>1)
#ifdef ROT
#define DY(q) (((q->x)+((OY)))>>(COMP))
#define DX(x) (((255-x->y)+(-(OX)))>>(COMP))
#else
#define DX(q) (((q->x)+(-(OX)))>>(COMP))
#define DY(x) (((x->y)+(OY))>>(COMP))
#endif
    for (e = &(data->event), n = 0; (n < l - 5) && (e->e != 0xffff); n++, e++)
      C (e) == 0 && (E (e) < SMAX) && DX (e) > 0 && DY (e) > 0
       && DX (e) < 0x100 && DY (e) < 0x100
       && (stim[DX (e)][DY (e)] +=
           E (e), count[DX (e)][DY (e)]++, var[DX (e)][DY (e)] +=
           E (e) * E (e));

  close (fd);

  for (y = 255; y + 1; y--)
    for (x = 0; x < 256; x++)
#ifdef SMAP
      fprintf (stdout, "%d%c", count[x][y] > 1 ?
               (int) (stim[x][y] / ((float) count[x][y])) - 700 : 0,
               x == 255 ? '\n' : '\t');
#elif defined PMAP
      {
       for (i = 0, k = 0; i < 200; i++)
         k += map[x][y][i];
       fprintf (stdout, "%d%c", (int) k, x == 255 ? '\n' : '\t');
      }
#elif defined CORR
#define SQ(x) ((x)*(x))
#define F(x) ((float)x)
      {
       if (count[x][y] < 10)
         continue;
       for (i = 30, k = 0; i < 200; i++)
         k += map[x][y][i];
       (k > 1.0) && (fprintf
                     (stdout, "%g\t%g\t%g\t%g\n",
                      k / q * (0x100 >> COMP) * (0x100 >> COMP),
                      sqrt (k) / q * (0x100 >> COMP) * (0x100 >> COMP),
                      50.0 / S50 * stim[x][y] / F (count[x][y]),
                      50.0 / S50 *
                      sqrt ((var[x][y] -
                             SQ (stim[x][y]) / F (count[x][y])) /
                            (F (count[x][y]) - 1.0))));
      }
#elif defined MAPCU
      {
       f = (count[x][y] > 1) ?
         stim[x][y] / ((float) count[x][y]) * 0.00409 - 2.40447 : -1.0;
       for (d = k = 0.0, BGR1; d += (map[x][y][i]), k -= map[x][y][i++]);
       for (BGR2; d += (map[x][y][i]), k -= map[x][y][i++]);
       for (PEAK; d += (map[x][y][i]), k += map[x][y][i++]);
       fprintf (stdout, "%2.1f+%2.1f %c", (k < -100000.0)
                || (f < 0.0) ? 0 : (float) (k / ((f + 0.885) / 2.0)),
                (float) (sqrt (d) / ((f + 0.885) / 2.0)),
                x == 255 ? '\n' : '\t');
      }
#endif

  return 0;
}
```

Programa “pixe.c”

Este programa utiliza las estructuras definidas en el header “lfm.h”.
Al inicio del programa se abre el archivo.lmf y se obtiene del header la longitud de cada bloque. Con esta información de reserva la memoria suficiente para alojar de a un bloque a la vez.

```
int
main (int argc, char *argv[])
{
  int fd, dlen, n, l, i;
  struct data_struct *data;
  unsigned char header[6];
  struct event_struct *e;
  int t, x, y;
  float k, q, f, d, df;

  fd = open (argv[1], O_RDONLY);
  read (fd, header, 7);
  (fprintf (stderr, "FP: %d\n", fd));

  dlen = ((unsigned short *) header)[2];
  data = (struct data_struct *) malloc (dlen);

  lseek (fd, sizeof (struct dataSTRUCT) + 8 * sizeof (struct ADCinfoSTRUCT),
         SEEK_CUR);
```

Luego se itera entre los distintos bloques del archivo, leyéndolos de a uno.

```
  for (t = 0; l = (read (fd, data, dlen) >> 2);)
    {
```

Por cada bloque, se itera entre los eventos calculando el área del pulser utilizando la Ecuación 150 y la Ecuación 151.

```
      for (e = &(data->event), i = n = 0;
           (n < l - 5) && (e->e != 0xffff); n++, e++)
        C (e) == ADC && IS_PULSER (e) && ++i;

      k = ((float) (data->rt - t)) / 100000.0 * 50.0 / ((float) i);
      d = SQ (k) * (1.0 + 4.0 / SQ ((float) i));
```

Iterando nuevamente entre los eventos, se acomodan los datos para constituir el cubo map[x][y][canal] que contiene un espectro corregido por tiempo muerto por cada píxel, el espectro integral corregido por tiempo muerto esp[canal], y las correspondientes estructuras de datos para contener los errores.

```
      for (t = data->rt, e = &(data->event), n = 0;
           (n < l - 5) && (e->e != 0xffff); n++, e++)
        C (e) == ADC && IS_ROI (E (e))
          && (map[X (e)][Y (e)][E (e) - ROIMIN] += k, esp[E (e) - ROIMIN] +=
              k, dmap[X (e)][Y (e)][E (e) - ROIMIN] +=
              d, desp[E (e) - ROIMIN] += d);
    }
```

Acá termina el bucle que itera entre los distintos bloques, y el programa entra en una zona de compilación condicional en función de la información que se desea obtener.
Si se quiere obtener una proyección total del espectro corregido por espesor y tiempo muerto

```
#ifdef PROJ
```

se calcula el área total del fondo y su error para obtener el factor de corrección por espesor:

```
  for (d = k = 0.0, AREA; d += desp[i], k += esp[i++]);
  f = 0.885 - 0.054 * k / q;  // (0,0.885) (2,0.777)
  df = (SQ (0.02 * k * f / q) + d * SQ (0.054 / q)) / SQ (f);
```

y entonces se imprime la información por pantalla.

```
  for ((fprintf (stderr, "%g\n", q)), i = 0; i < ((ROIMAX) - (ROIMIN)); i++)
    fprintf (stdout, "%d\t%g\t%g\n", i + ROIMIN, esp[i] / f / q,
             esp[i] / f * sqrt (desp[i] / SQ (esp[i]) + df) / q);
```

Por el contrario si se desea el mapa integral o el de distribución del cobre

```
#elif defined MAPCU || defined MAPINT
```

se itera entre cada uno de los puntos del mapa calculando el factor de corrección por cada uno de ellos:

```
  for (y = (0x100 >> COMP) - 1; y + 1; y--)
    for (x = 0; x < (0x100 >> COMP); x++)
      {
       for (d = k = 0.0, AREA; d += (map[x][y][i]), k += map[x][y][i++]);
       f = 0.885 - 0.054 * k / q * SQ (0x100 >> COMP);     // (0,0.885) (2,0.777)
       df = (SQ (0.02 * k * f / q) + d * SQ (0.054 / q)) / SQ (f);
```

y el área del pico (PEAK) descontando las dos áreas de fondo (BRG1 y BRG2):

```
       for (d = k = 0.0, BGR1; d += (dmap[x][y][i]), k -= map[x][y][i++]);
       for (BGR2; d += (dmap[x][y][i]), k -= map[x][y][i++]);
       for (PEAK; d += (dmap[x][y][i]), k += map[x][y][i++]);
```

para finalmente imprimir la información reemplazando por cero en el caso que el área sea negativa:

```
       fprintf (stdout, "%d %c", (k < 0.0)
                ? 0 : (int) ((float) (k / f/q*SQ(0x100 >> COMP)) * 1.0e6),
                x == (0x100 >> COMP) - 1 ? '\n' : '\t');
```

además, si como opción de compilación se requirió el mapa de cobre se imprime la información sin realizar este reemplazo:

```
#ifdef MAPCU
       fprintf (stderr, "%2.1f(%2.1f) %c",
                (float) (k / f), k == 0 ? (1.0 / f) :
                (float) (k / f * sqrt (d / SQ (k) + df)),
                x == (0x100 >> COMP) - 1 ? '\n' : '\t');
#endif
```

El código fuente completo de este programa se presenta a continuación:

```
#include <sys/types.h>
#include <sys/stat.h>
#include <fcntl.h>
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

#include "lmf.h"

#define DATASET 2002          // 2002 o 2003
```

```
#define COMP 3

#if DATASET==2003
#define ROIMIN 50
#define ROIMAX 250
#else
#define ROIMIN 50
#define ROIMAX 350
#endif

//#define PROJ 1
#define MAPCU 1
//#define MAPINT 1

#if DATASET==2003
#define BGR1 i=(214-ROIMIN);i<=(215-ROIMIN)
#define PEAK i=(203-ROIMIN);i<=(205-ROIMIN)
#define BGR2 i=(207-ROIMIN);i<=(211-ROIMIN)
#define AREA i=( 80-ROIMIN);i<=(250-ROIMIN)
#else
#define BGR1 i=(207-ROIMIN);i<=(210-ROIMIN)
#define PEAK i=(212-ROIMIN);i<=(219-ROIMIN)
#define BGR2 i=(221-ROIMIN);i<=(224-ROIMIN)
#define AREA i=( 56-ROIMIN);i<=(277-ROIMIN)
#endif

#ifdef MAPINT
#define COMP 0
#define PEAK i=(ROIMIN);i<(ROIMAX)
#define BGR1 0;0
#define BGR2 0;0
#endif

#define C(x) (((x->e) >> 12) & 0x07)
#if DATASET==2003
#define E(x) (((x->e) & 0x0fff) >> 2)
#else
#define E(x) (((x->e) & 0x0fff) >> 3)
#endif

#define X(q) ((q->x)>>(COMP))
#define Y(x) ((x->y)>>(COMP))

float map[256][256][ROIMAX - ROIMIN];       // 75 Mb
float esp[ROIMAX - ROIMIN];
float dmap[256][256][ROIMAX - ROIMIN];      // 75 Mb
float desp[ROIMAX - ROIMIN];

int
main (int argc, char *argv[])
{
  int fd, dlen, n, l, i;
  struct data_struct *data;
  unsigned char header[6];
  struct event_struct *e;
  int t, x, y;
  float k, q, f, d, df;

  fd = open (argv[1], O_RDONLY);
  read (fd, header, 7);
  (fprintf (stderr, "FP: %d\n", fd));

  dlen = ((unsigned short *) header)[2];
  data = (struct data_struct *) malloc (dlen);

  lseek (fd, sizeof (struct dataSTRUCT) + 8 * sizeof (struct ADCinfoSTRUCT),
         SEEK_CUR);

#define SQ(x) ((x)*(x))
#if DATASET==2003
#define IS_PULSER(x) (E(x) < 900 && E(x) > 750)
#define ADC 1
#else
#define IS_PULSER(x) (E(x) < 480 && E(x) > 380)
#define ADC 0
#endif
  for (t = 0; l = (read (fd, data, dlen) >> 2);)
```

```
    {
      for (e = &(data->event), i = n = 0;
           (n < l - 5) && (e->e != 0xffff); n++, e++)
        C (e) == ADC && IS_PULSER (e) && ++i;
      if (!n)
        continue;
      k = ((float) (data->rt - t)) / 100000.0 * 50.0 / ((float) i);
//      d = SQ (k) * (1.0 + 1.0 / ((float) i));
      d = SQ (k) * (1.0 + 4.0 / SQ ((float) i));

#define IS_ROI(x) ((x) >= (ROIMIN) && (x) < (ROIMAX))

      for (t = data->rt, e = &(data->event), n = 0;
           (n < l - 5) && (e->e != 0xffff); n++, e++)
        C (e) == ADC && IS_ROI (E (e))
          && (map[X (e)][Y (e)][E (e) - ROIMIN] += k, esp[E (e) - ROIMIN] +=
              k, dmap[X (e)][Y (e)][E (e) - ROIMIN] +=
              d, desp[E (e) - ROIMIN] += d);
    }
  q = (float) (data->q);

#ifdef PROJ
  for (d = k = 0.0, AREA; d += desp[i], k += esp[i++]);
  f = 0.885 - 0.054 * k / q;  // (0,0.885) (2,0.777)
  df = (SQ (0.02 * k * f / q) + d * SQ (0.054 / q)) / SQ (f);
  for ((fprintf (stderr, "%g\n", q)), i = 0; i < ((ROIMAX) - (ROIMIN)); i++)
    fprintf (stdout, "%d\t%g\t%g\n", i + ROIMIN, esp[i] / f / q,
             esp[i] / f * sqrt (desp[i] / SQ (esp[i]) + df) / q);
#elif defined MAPCU || defined MAPINT
//  for (y = 255; y + 1; y--)
//    for (x = 0; x < 256; x++)
  for (y = (0x100 >> COMP) - 1; y + 1; y--)
    for (x = 0; x < (0x100 >> COMP); x++)
      {
       for (d = k = 0.0, AREA; d += (map[x][y][i]), k += map[x][y][i++]);
       f = 0.885 - 0.054 * k / q * SQ (0x100 >> COMP);     // (0,0.885) (2,0.777)
       df = (SQ (0.02 * k * f / q) + d * SQ (0.054 / q)) / SQ (f);
       for (d = k = 0.0, BGR1; d += (dmap[x][y][i]), k -= map[x][y][i++]);
       for (BGR2; d += (dmap[x][y][i]), k -= map[x][y][i++]);
       for (PEAK; d += (dmap[x][y][i]), k += map[x][y][i++]);
       fprintf (stdout, "%d %c", (k < 0.0)
                ? 0 : (int) ((float) (k / f/q*SQ(0x100 >> COMP)) * 1.0e6),
                x == (0x100 >> COMP) - 1 ? '\n' : '\t');
#ifdef MAPCU
       fprintf (stderr, "%2.1f(%2.1f) %c",
                (float) (k / f), k == 0 ? (1.0 / f) :
                (float) (k / f * sqrt (d / SQ (k) + df)),
                x == (0x100 >> COMP) - 1 ? '\n' : '\t');
#endif
      }
#endif

  return 0;
}
```

Header “lmf.h”

Este header se presenta en la documentación del sistema de adquisición [4], donde se encuentra explicado. Sin embargo, se detectaron errores en el mismo, por lo que a continuación se encuentra la versión corregida.

```
// bytes 0 - 3:         Accumulated charge pulses at time of writing
  // bytes 4 - 7:         Total elapsed time (10uS ticks)
  // bytes 8 -11:         Total  system live time (10uS ticks)
  // bytes 12 - 15:               Live0 live time  (10uS ticks)
  // bytes 16 - 19:               Live1 live time (10uS ticks)
  // byte 20 + N*4:               X value for event N
  // byte 20 + N*4 + 1:   Y value for event N
  // byte 20 + N*4 + 2 ..
  //      20 + N*4 + 3    E value for event N
  //                      xxdddeee eeeeeeee   (LMF version 0)
  //                      XDddeeee eeeeeeee   (LMF version 1)
  //
  //                      where           ddd = ADC number (3 bits)
  //                                      eeeeeeeeeee (e)= energy value (11/12 bits)
  //                                      A value of  FFFF (hex) for the E data flags
the
  //                                      end of the data in a block.
  //

typedef short int16;
typedef float float32;
typedef unsigned int ulong32;

struct ADCinfoSTRUCT          // (Header version 4)
{
  int16 live;                 //  1 if  ADC is active 2
  float32 cal[3];             // cal constants e=c0+ch*c1 for a spectrum with c2 channels
12
  char det_name[9];           // Detector filename    9
  int16 sig;                  // Radiation type  *    2
  float32 geom[5];            // Geometry (area, dist, beamangle, tilt, tilt2)        20
  int16 vary[5];              // Whether varying      10
  float32 fw[3];              // Resolution params    12
  int16 filterable;           // Takes filters        2
  char filt_name[9];          // Filter filename      9
  int16 fz[5];                //    Z of filter capa i     **        10
  float32 ft[5];              // thickness of filter capa I  20
  float32 fh[5];              // area of hole in filter capa i  (mm2)        20
}
__attribute__ ((packed));     // Total size   128


struct smpSTRUC
{
  float32 t;                  // Thickness (um)       4
  float32 rho;                // Density (g/cm3)      4
  int16 z[10];                // Capa elements       20
  float32 f[10];              // Capa element atomic fraction        40
  unsigned char trace[102];   // Trace elements for shopping list     102
}
__attribute__ ((packed));     //  Total size  170


struct dataSTRUCT
{                             // size
  char week[4];                       // week number  4
  char run[4];                // run number   4
  char user[5];                       // User code    5
  char op[5];                 // Operator code        5
  char date[12];              // Date 12
  char time[6];                       // Time 6
  char caption[81];           // Caption      81
  struct smpSTRUC dummy[5];   // dummy sample capa structure for compatibility
5*170=850
  int16 target;                       // target number        2
  char mode;                  // Scan mode    1
```

```
  int16 size[2];              // Scan size (um)       4
  int16 pt[2];                // Point coordinates   (x,y)    4
  char PrevMap[7];            // Previos map run number       7
  float32 MeV;                // Beam energy  4
  int16 Z, A, QQ;             // Z, A, Q of particle  6
  ulong32 dt;                 // Elapsed time (sec)   4
  ulong32 Q[4];                       // Q pulses    ***      16
  float32 q_factor;           //  Q scaling factor    4
  float32 C_per_pulse;        //  Q Scaler sensitivity        4
  int16 QScaler[10];          // Dead-time scaler setup info  20
  ulong32 dScanArea;          // Total scan  area (pixels)    4
  float32 tgt[2];             //  Sample stage position (mm, deg)     8
  struct smpSTRUC sample[15]; // Sample capa structure       15*170=2550
}
__attribute__ ((packed));     //  Total size  3605

struct event_struct
{
  unsigned char x;            // X value for event N
  unsigned char y;            // Y value for event N
  unsigned short e;           // E value for event N
  //                  xxdddeee eeeeeeee   (LMF version 0)
  //                  XDddeeee eeeeeeee   (LMF version 1)
  //
  //                  where           ddd = ADC number (3 bits)
  //                                  eeeeeeeeeee (e)= energy value (11/12 bits)
  //                                  A value of  FFFF (hex) for the E data flags the
  //                                  end of the data in a block.
}
__attribute__ ((packed));

struct data_struct
{
  unsigned int q;             // Accumulated charge pulses at time of writing
  unsigned int rt;            // Total elapsed time (10uS ticks)
  unsigned int lt;            // Total  system live time (10uS ticks)
  unsigned int lt0;           // Live0 live time  (10uS ticks)
  unsigned int lt1;           // Live1 live time (10uS ticks)
  struct event_struct event;
}
__attribute__ ((packed));
```

UCVS

Descripción funcional

El núcleo del UCVS es el microcontrolador PIC16F84[54] de Microchip (U3), que se conecta a la línea RS-485 por medio del U1, un SN75176, un traductor de niveles TTL a RS-485.

El MCU controla el estado del U1 por medio de RB1, que puede estar en modo recepción o en modo transmisión.

Como el protocolo de comunicaciones utilizado sobre la red RS-485 es maestro-esclavo, el U1 está continuamente en modo receptor (alta impedancia) enviándole la señal de la línea serie al U3 vía RB0/INT, la entrada de interrupción. Al llegar un bit de start el MCU ejecuta su rutina de atención a la interrupción con la cual recibe un paquete, que inmediatamente verifica si está dirigido a él, comparando su dirección dentro de la red RS-485 contra la dirección de destino del paquete.

Si corresponde, el paquete es procesado, y se toma una de las siguientes acciones en función del comando del paquete:

- Comando ‘a’: Al detectar este comando, el MCU abre la válvula polarizando el transistor Q1 por medio de la salida RA1. Al mismo tiempo, conmuta la salida RB1 para pasar a modo transmisión y envía por la línea serie (desde la salida RB3, y pasando por U1) un carácter confirmando la acción.
- Comando ‘c’: el MCU cierra la válvula apagando el transistor Q1. Como el solenoide de la válvula es inductivo, D1 protege al transistor. Al mismo tiempo, envía por la línea serie un carácter confirmando la acción.
- Comando ‘i’: el MCU verifica el estado de la válvula leyendo los fines de carrera usando los pines RB4 y RB5. En función de esto envía por la línea serie el mensaje “a” (abierta), “c” (cerrada), o “i”(posición intermedia).

La conexión a la red 485 se realiza por el conector J9, por el que también llega la alimentación de 12 v para el circuito, la alimentación de 24 v para el relay (pines 9 y 10), y la masa.

[54] Hoja de datos: [27], Notas de aplicación relevantes [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26]

Circuito

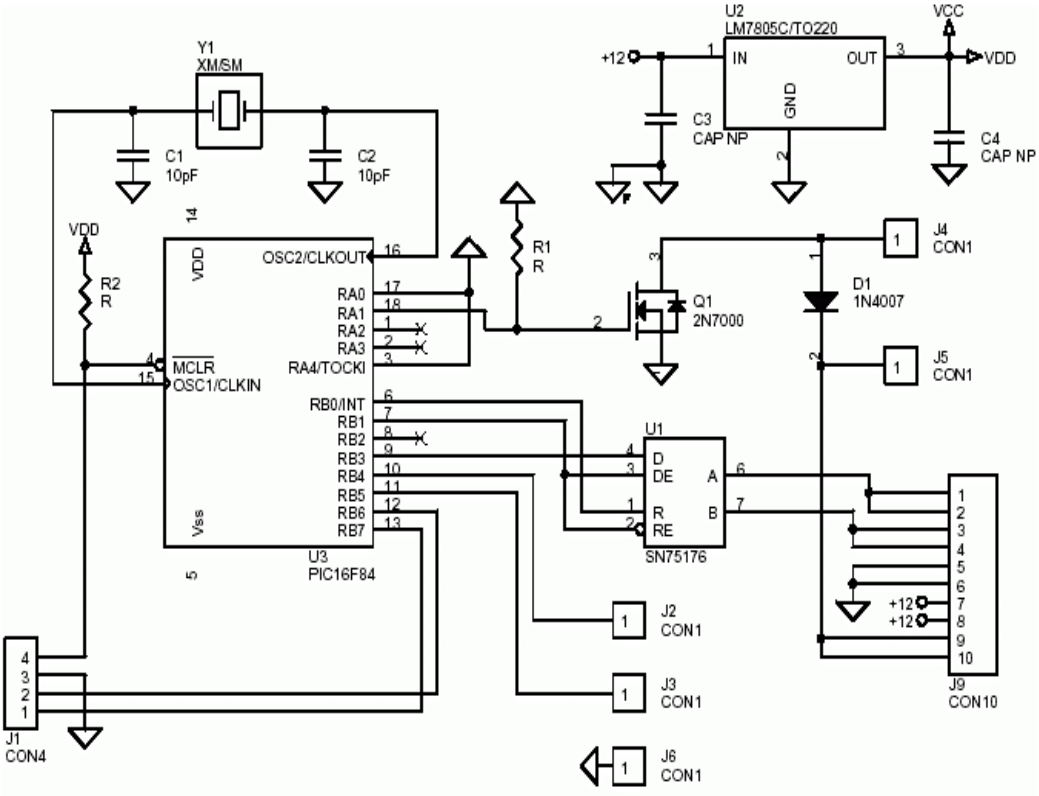


Ilustración 124: Circuito de un UCVS

En la siguiente tabla se indican los valores de los componentes no especificados en el circuito.

Componente	*Valor*	*Obs.*
R1,R2	3K9	
Y1	4 MHz	
C3,C4	100 nF	CERAMICO

Plaqueta

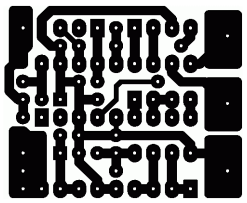


Ilustración 125: Circuito impreso de un UCVS

```
#INCLUDE <p16f84.inc>

          __CONFIG   _CP_OFF & _WDT_ON & _PWRTE_ON & _HS_OSC

;*************************************************************************
;*                                                                       *
;* CONSTANTES                                                            *
;*                                                                       *
;*************************************************************************

#define             TX_DELAY  d'29'
#define             BITSTOP             d'10'
#define             DELAY_RX_TX         d'200'    ; retardo entre la recepción
                                                  ; y la transmisión

;*************************************************************************
;*                                                                       *
;* VARIABLES                                                             *
;*                                                                       *
;*************************************************************************

usart_reg           EQU       h'0c'
usart_cont          EQU       h'0d'     ; contador del # de bits
usart_temp          EQU       h'0e'
W_TEMP              EQU       h'0f'
STATUS_TEMP         EQU       h'10'
rxcont              EQU       h'11'     ; contador de bits a recibir
rtxdly              EQU       h'12'     ; retardo para rx y tx
rxbyte              EQU       h'13'     ; byte a recibir
flags               EQU       h'14'     ; flags para varias cosas
                                        ; flags,1: buffer de recepción evaluado
rxid                EQU       h'15'     ; ID# del mensaje
rxbuff              EQU       h'20'     ; posición inicial del buffer

;*************************************************************************
;*                                                                       *
;* INICIO                                                                *
;*                                                                       *
;*************************************************************************
;
          org     0
          goto    start
idsub:
          retlw     h'14'               ; ID#
          org       4
          goto      isr

;*************************************************************************
;*                                                                       *
;* MAIN LOOP                                                             *
;*                                                                       *
;*************************************************************************
start:
          bcf       STATUS, RP0         ; banco 0
          clrf      PORTA
          clrf      PORTB
          bsf       STATUS, RP0         ; banco 1
          movlw     b'00000000'
          movwf     TRISA
          movlw     b'11111111'
          movwf     TRISB

; rutina para pasar el preescaler del TMR0 al WDT
;
          bcf       STATUS, RP0         ; banco 0
          clrf      TMR0
          bsf       STATUS, RP0         ; banco 1
          clrwdt
          movlw     b'00001111'         ; Pull-up enabled
                                        ; Interrupt on falling edge
          movwf     OPTION_REG
          bcf       STATUS, RP0         ; banco 0, NUNCA MAS se pasa al banco 1

; habilita la interrupción por el flanco de bajada del pin RB0
;
          movlw     b'10010000'
          movwf     INTCON
loop:
          btfss     PORTB, 5            ; testea el boton de test
          call      status              ; manda el status
          btfss     PORTB, 3            ; boton de open
          bsf       PORTA, 0

; el boton de close es obsoleto, conviene apretar el reset, sin
; embargo se impletemta para compatibilidad con el hard viejo

          btfss     PORTB, 4            ; boton de close
          goto      0
          clrwdt
          goto      loop

;*************************************************************************
;*                                                                       *
;* STATUS                                                                *
;*                                                                       *
;*************************************************************************
```

```
;
; manda el status por el puerto serie
;
; variables: usart_reg, usart_cont, usart_temp
; llama a la rutina: txd_in
;
status:
          bcf       INTCON, INTE        ; deshabilita la recepcion
          bsf       PORTA, 2            ; pone la linea de TX en 1
          bsf       PORTA, 3            ; habilita la transmision
          movlw     DELAY_RX_TX         ; espera un tiempo antes de transmitir
          movwf     usart_cont
          clrwdt
          clrf      usart_temp
          decfsz    usart_temp, f
          goto      $-1
          decfsz    usart_cont, f
          goto      $-5

          call      idsub               ; manda el MSB del ID
          movwf     usart_reg
          swapf     usart_reg, w
          andlw     h'0f'
          addlw     '0'
          movwf     usart_reg
          movlw     '9'+1
          subwf     usart_reg, w
          movlw     'A'-'9'-1
          btfsc     STATUS,C
          addwf     usart_reg, f
          call      txd_in

          call      idsub               ; manda el LSB del ID
          andlw     h'0f'
          addlw     '0'
          movwf     usart_reg
          movlw     '9'+1
          subwf     usart_reg, w
          movlw     'A'-'9'-1
          btfsc     STATUS,C
          addwf     usart_reg, f
          call      txd_in

          movlw     'a'                 ; manda el estado del switch
          btfss     PORTB, 1
          goto      stat_0
          movlw     'c'
          btfss     PORTB, 2
          goto      stat_0
          movlw     'i'
stat_0:
          movwf     usart_reg
          call      txd_in

          movlw     d'13'               ; manda [cr]
          movwf     usart_reg
          call      txd_in

          movlw     d'10'               ; manda [lf]
          movwf     usart_reg
          call      txd_in

          bcf       PORTA, 3            ; habilita la recepcion
          bcf       INTCON, INTF
          bsf       INTCON, INTE

          return

;*****************************************************************************
;
; Transmite en forma serie el dato que esta en ´usart_reg´
;
; variables: usart_reg, usart_cont, usart_temp
;
txd_in:
          movlw     BITSTOP
          movwf     usart_cont          ; cantidad de bits a transmitir
          bcf       STATUS, C           ; start bit = 0
          goto      txd_1
txd_0:
          bsf       STATUS, C
          rrf       usart_reg, f
txd_1:
          btfsc     STATUS, C           ; 0{1,2}        1{1}
          call      put1                ;               1{2,3}
          btfss     STATUS, C           ; 0{3}          1{9,10}
          call      put0                ; 0{4,5}
                                        ; 0{11}         1{11}
          clrwdt
          movlw     TX_DELAY
          movwf     usart_temp
          decfsz    usart_temp, f
          goto      $-1

          decfsz    usart_cont, f       ; !
          goto      txd_0               ; !
          return
put0:
          bcf     PORTA, 2              ; 0{6}
          nop                           ; 0{7}
          nop                           ; 0{8}
          return                        ; 0{9,10}
```

```
put1:
         nop                           ;              1{4}
         nop                           ;              1{5}
         bsf     PORTA,2               ;              1{6}
         return                        ;              1{7,8}
;
;*****************************************************************************
;*                                                                           *
;* ISR                                                                       *
;*                                                                           *
;*****************************************************************************
;
isr:
         MOVWF     W_TEMP              ; Copy W to TEMP register,
         SWAPF     STATUS, W           ; Swap status to be saved into W
         MOVWF     STATUS_TEMP         ; Save status to STATUS_TEMP register

         btfsc     PORTB, 0
         goto      rx10                ; no hace nada más
;
; >>>>>>>>> Recibe un byte <<<<<<<<<<
;
         movlw     d'9'
         movwf     rxcont              ; bits a recibir
         movlw     d'5'                ; retardo inicial
         goto      rx03                ; salta al punto de entrada

;..............................
;
rx01:
         movlw     d'6'                ;
         movwf     rtxdly              ;
rx02:                                  ;
         bsf       PORTA, 1            ; prende el led
         bcf       PORTA, 1            ; apaga el led
         btfsc     PORTB,0             ;
         addlw     h'ff'               ; le resta 1 a W
         decfsz    rtxdly, f           ;
         goto      rx02                ;

         sublw     d'3'                ; en C queda el bit leido
         rrf       rxbyte, f           ; C ingresa por la izq.

         decfsz    rxcont, f           ; ¿se leyeron 9 bits?
         goto      rx0i                ;
         goto      rx05                ;
;
; 1 + 1 +
; 2 * 6 +
; 2 * 6 +
; 2 * 1 + 1 * 5 +              decfsz salta 1 vez y 5 sigue de largo
; 2 * 5 +                      goto se ejecuta 5 veces
; 1 + 1 +
; 2                            sólo se considera cuando decfsz salta
; = 2 + 12 + 12 + 7 + 10 + 2 + 2
; = 47
;..............................
;
; el siguiente retardo debe demorar 104.17 - 47
;
; 9600 baud = 104.1667 uS
;
rx0i:
         movlw     d'17'               ; n
rx03:
         movwf     rtxdly              ; punto de entrada para el bit de start
         decfsz    rtxdly, f
         goto      $-1                 ; uno para atras
         nop                           ; uno para atras
         nop                           ; uno para atras
         goto      rx01                ; otro bit
;
; 1 + 1 +
; 2 * 1 + 1 * (n - 1) +                 decfsz sigue de largo n-1 veces
; 2 * (n - 1) +                         goto se ejecuta n-1 veces
; 2
; = 2 + 2 + 3 * (n - 1) + 2 = 6 + 3 * n - 3
; = 3 + 3 * n -> n = 18
;..............................

rx05:
;
; en C está el bit de start, y en rxbyte el dato recibido
;
         btfsc     STATUS, C           ; verifica el bit de start
         goto      rx10                ; no era un 1
         movf      rxbyte, w
         sublw     d'27'               ; se fija si el byte recibido es ESC
         btfss     STATUS, Z
         goto      rx06
;
; limpia el buffer
;
         bcf       flags, 1            ; indica que el buffer no fue evaluado
         movlw     rxbuff
         movwf     FSR                 ; pone el puntero a rxbuff
         goto      rx10                ; no hace nada más

rx06:
;
; si el byte recibido no es ESC
;
```

```
          btfsc     flags, 1            ; testea el flag
          goto      rx10                ; el buffer ya fue evaluado
                                        ; no hace nada más
          movf      rxbyte, w
          movwf     INDF                ; guarda el byte recibido en [FSR]
          incf      FSR, f              ; incrementa el puntero

          movf      FSR, w
          sublw     h'23'               ; se fija si entraron 3 caracteres
          btfss     STATUS, Z           ; si no entraron 3 caracteres ...
          goto      rx10                ; no hace nada más
;
; >>>>>>>>> evalua el buffer <<<<<<<<<
;
          bsf       flags, 1            ; indica que el buffer fue evaluado
;
; estructura del buffer:
;
;         [20] MSB del address
;         [21] LSB del address
;         [22] comando
;         [23] sub address (sólo para el control de potencia)
;

;
; Chequea el ID# del mensaje
;
          movf      rxbuff, w
          sublw     '9'+1
          movlw     '0'
          btfss     STATUS,C
          addlw     'A'-'9'-1+h'20'
          subwf     rxbuff, w
          movwf     rxid
          swapf     rxid, f
          movf      rxbuff + 1, w
          sublw     '9'+1
          movlw     '0'
          btfss     STATUS,C
          addlw     'A'-'9'-1+h'20'
          subwf     rxbuff + 1, w
          addwf     rxid, f
          call      idsub               ; obtiene el ID#
          subwf     rxid, w
          btfss     STATUS, Z           ; si el id del mensaje no corresponde
          goto      rx10                ; no hace nada más
;
; testea si el comando es 'c', de ser asi, cierra la valvula;
;
          movlw     'c'
          subwf     rxbuff + 2, w
          btfss     STATUS, Z
          goto      test_a
          call      status
          goto      0                   ; resetea para que se cierre la valvula
;
; testea si el comando es 'a', de ser así, abre la válvula
;
test_a:
          movlw     'a'
          subwf     rxbuff + 2, w
          btfss     STATUS, Z
          goto      test_i
          call      status
          bsf       PORTA, 0
          goto      rx10                ; no hace nada más
;
; testea si el comando es 'i', de NO ser asi, retorna
;
test_i:
          movlw     'i'
          subwf     rxbuff + 2, w
          btfsc     STATUS, Z
          call      status              ; manda el mensaje de status
;
;.............................
;
rx10:     bcf       INTCON, INTF
          SWAPF     STATUS_TEMP, W      ; Swap nibbles in STATUS_TEMP register
                                        ; and place result into W
          MOVWF     STATUS              ; Move W into STATUS register
                                        ; (sets bank to original state)
          SWAPF     W_TEMP, F           ; Swap nibbles in W_TEMP
                                        ; and place result in W_TEMP
          SWAPF     W_TEMP, W           ; Swap nibbles in W_TEMP
                                        ; and place result into W

          retfie

          END
```

Bibliografía.

[1] Stanley Humphries, Jr, University of New Mexico. Charged Particle Acceleration, John Wiley and Sons, 1986.
[2] Stanley Humphries, Jr, University of New Mexico. Charged Particle Beams. (Electronic Document)
[3] Martin Berz, Introductory Beam Physics, (Electronic Document).
[4] OMDAQ operation manual. Provisto por el fabricante.
[5] Numerical recipes in C: The art of scientific computation. 15.5 Nonlinear Models.
[6] 'The GNU C Library Reference Manual', Edition 0.10, last updated 2001-07-06, for Version 2.2.x of the GNU C Library.
[7] Brian Fox, Chet Ramey. 'bash - GNU Bourne-Again SHell' man page.2001 November 13
[8] Albert Septier (editor), Focusing of Charged Particles, Academic Press Inc, 1967.
[9] Java homepage at Sun. http://sun.java.com
[10] gawk - pattern scanning and processing language. http://www.gnu.org/software/gawk.html
[11] PIC18F84 datasheet. http://www.microchip.com
[12] Paul R. Gray, Robert G. Meyer, Analysis and design of analog integrated circuits.
[13] PIC16C54A EMI Results, Microchip application note AN577, 08/26/1997, Mark Palmer
[14] BASIC PIC16/17 OSCILLATOR DESIGN GUIDE, Microchip application note Fact 1, 08/26/1997, Dan Mathews
[15] How to Implement ICSP Using PIC16F8X FLASH MCUs, Microchip application note TB016, 02/15/2000, Rodger Richey
[16] RS-232 Autobaud for the PIC16C5X Devices, Microchip application note AN712, 04/01/1999, Thomas Schmidt
[17] In-Circuit Serial Programming of Calibration Parameters Using a PICmicro® Microcontroller, Microchip application note AN656, 11/22/1999, John Day
[18] Engineering Assistant Using PIC16F84A,Microchip application note AN689, 04/14/1999, Voja Antonic
[19] Power-up Trouble Shooting, Microchip application note AN607, 08/26/1997, Mark Palmer
[20] Serial Port Routines Without Using the RTCC, Microchip application note AN593, 08/26/1997, Stan D'Souza
[21] Improving the Susceptibility of an Application to ESD, Microchip application note AN595, 08/26/1997, David Wilkie
[22] Power-Up Considerations, Microchip application note AN522, 08/26/1997, Sumit Mitra
[23] Software Implementation of Asynchronous Serial I/O, Microchip application note AN555, 08/26/1997, Amar Palacherla, Scott Fink
[24] Implementing a Table Read, Microchip application note AN556, 08/26/1997, Stan D'Souza
[25] Software Interrupt Techniques,Microchip application note AN514, 08/26/1997

[26] A PC-Based Development Programmer for the PIC16C84,Microchip application note AN589, 08/26/1997, Robert Spur
[27] PIC16CR84/F84/CR83/F83 Datasheet, PIC16F84 Rev. A Silicon Errata
[28] TCM 1601 Magnetic Bearing Controller, Operating instructions, Pfeiffer Vacuum
[29] TCW 002 Cooling water monitor, Operating instructions, Pfeiffer Vacuum
[30] TZK 400 / TZK 2000 Recycled Water Cooling Unit, Operating instructions, Pfeiffer Vacuum
[31] TMH 400M / TMU 400M Turbomolecular Drag Pumps With Magnetic Bearings, Operating instructions, Pfeiffer Vacuum
[32] Pfeiffer Protocol, Operating instructions, Pfeiffer Vacuum
[33] MultiVac controller Instruction Manual, Varian vacuum products.
[34] RS 232-422 Computer Interface card Instruction Manual, Varian vacuum products.
[35] TPG 256 A Vacuum measurement and control unit for Compact Gauges, Communication protocol, BG 803 188 BE (9907) Balzers Instruments
[36] TPG 256 A Vacuum measurement and control unit for Compact Gauges, Operating manual BG 803 186 BE (9907) Balzers Instruments.
[37] Principles and applications of high energy ión microbeams, F.Watt, G.W.Grime, 1987 – Adam Hilger.
[38] http://www.diccionarios.com © 2000-2003 Spes Editorial, S.L.
[39] Particle-induced X-ray emission spectrometry (PIXE), S.Johansson, J.Campbell, K.Malmqvist. 1995 – John Wiley & Sons, Inc.
[40] R.M. Sealock, A.P. Mazzolini, G.J.F. Legge. The use of He microbeams for light element X-ray analysis of biological tissue. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 218, 217-220 (1983).
[41] J.C. Overley, R.C. Conolly, G.E. Sieger, J.D. MacDonald, H.W. Lefevre. Energy loss radiography with scanning MeV ión microprobe. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 218, 43-46 (1983).
[42] H.A. Bethe, Ann. Physik, 5, 325 (1930).
[43] F. Bloch, Ann. Physik, 16, 285, (1933).
[44] http://www.uni-leipzig.de/~nfp/Research/Methods/Ión_Beam_Analysis/STIM/stim.html#fund
[45] Geoff Grime (IBC, Surrey), Basic beam optics. An outline for accelerator users: Common beam optical components, NEW TRENDS IN IÓN BEAM PHYSICS AND APPLICATIONS: A ROAD TO NANOTECHNOLOGIES 15 - 19 September 2003, Residencia La Cristalera, Miraflores de la Sierra (Madrid, Spain) - http://www.uam.es/otroscentros/cmam/cristalera/cristalera.html
[46] The GIMP, http://www.gimp.org
[47] ISICS: A program for calculating K-, L- and M- shell cross sections from ECPSSR theory using a personal computer. Zhiqiang Liu, Sam J Cipolla, Computer Physics Communications 97 (1996) 315-330
[48] Determination of Atmospheric Lead Pollution from Automotive Origin. A.Caridi, A.J.Kreiner, J.Davidson, M.Davidson, M.E.Debray, D.Hojman y D.Santos, Atmospheric Environment 23 (1989) 2855.
[49] Manual de los colimadores, provisto por el fabricante.
[50] Table of Radioative Isotopes, Edgardo Browne, Richard B. Firestone. 1986 / John Wiley & Sons, Inc.

[51] Link ISIS Operator's Guide, Documentación sobre el detector Link provista por Oxford Instruments.
[52] Comunicación privada con el Dr. Oscar Capurro, Depto de Física, CNEA.
[53] Miura,M., Micca P.L., Fisher C.R., Gordon J.C., Heinrichs J.C., and Slatkin D.N., 1998. Evaluation of carborane-containing porphyrins as tumor targeting agents for boron neutron capture therapy, Br. J.Radiol.71, 773-781.
[54] Coderre, J.A. and Morris, G.M., 1999. The Radiation Biology of Boron Neutron Capture Therapy, Radiat. Res. 151, 1-18.
[55] The stopping and range of ions in solids. J.F.Ziegler, J.P.Biersack. Pergamon Press, New York (1985).