

06. 58. 07

REPUBLICA ARGENTINA

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

Departamento de Física

DOSIMETRIA DE NEUTRONES TERMICOS EN CONEXION CON IRRADIACIONES
DE SEMILLAS

por

C. Paganini, W. Scheuer, R. Othaz y E. Aisenberg

Buenos Aires

Noviembre 1958

DOSIMETRIA DE NEUTRONES TERMICOS EN CONEXION CON IRRADIACIONES
DE SEMILLAS

por

C. Paganini, W. Scheuer, R. Othaz y E. Aisenberg

Laboratorio de Alta Tensión
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
(Noviembre 1958)

RESUMEN

Desde hace algún tiempo el acelerador Cockcroft-Walton de la CNEA se utiliza para la irradiación de semillas. Estas son dispuestas rodeando el blanco del acelerador y el conjunto es alojado en el centro de un bloque de parafina.

El presente informe se refiere fundamentalmente a la determinación de la dosis media de neutrones térmicos suministrada a semillas alojadas en una cavidad cúbica de 20 cm de arista, realizada en el interior de un bloque de aproximadamente 0,7 m³. La densidad media de flujo, determinada por activación de hojuelas de Mn, resultó ser de $(1,1 \pm 0,2) \times 10^5$ n/cm²s, por μ A de deuterones de 1 MV incidente sobre un blanco grueso de Li. Para una cavidad de 15 cm de arista se obtuvo el valor $(2,2 \pm 0,5) \times 10^5$ n/cm²s por μ A, lo cual, con las corrientes de blanco utilizadas, equivale a $\sim 10^7$ n/cm²s. En ambas cavidades la densidad de flujo térmico es homogénea dentro del $\pm 20\%$.

Las dosis de neutrones térmicos suministradas fueron obtenidas a partir de las indicaciones de una cámara de ionización para radiación gamma, previamente calibrada en función de la densidad media del flujo térmico existente en la cavidad.

Para la dosis total suministrada (neutrones térmicos, neutrones rápidos y radiación gamma) se estima una cota inferior aproximada.

Introducción

En el mes de noviembre de 1957, personal de la División Investigaciones Agropecuarias (Departamento de Medicina y Biología), solicitó una irradiación de semillas con neutrones térmicos en el acelerador en cascadas; se solicitaba que fuese medida la dosis de neutrones térmicos y, de ser posible, se deseaba conocer además la cantidad de neutrones no térmicos y de radiación γ presente simultáneamente. La irradiación fué realizada con un precario bloque de parafina moderador de los neutrones rápidos emergentes del blanco de Li (bombardeado con deu-

terones de 1 MV), formado en realidad por una cantidad de panes que, debido al mucho uso, no adosaban en buena forma. También el control del flujo neutrónico se realizó en forma imprecisa porque la medición absoluta de la densidad de flujo de neutrones térmicos se realizó en condiciones no idénticas a las que existían durante la irradiación de las semillas. Las intensidades de radiación γ y de neutrones supratérmicos no se controlaron en absoluto.

Las semillas fueron irradiadas en varios grupos que se distinguían por la cantidad de horas en que eran sometidas al flujo neutrónico, es decir: por la dosis que habían recibido. Luego fueron sembradas y, al cabo de cierto tiempo, se notaron evidentes diferencias en su progreso según el grupo al cual pertenecieran. En base a estos efectos el personal de la División Investigaciones Agropecuarias decidió repetir la irradiación, a comienzos de junio de 1958, sometiendo tres grupos de semillas a dosis diversas, fijadas a partir de la experiencia adquirida en la primera irradiación.

Lamentablemente razones de fuerza mayor impidieron que un nuevo bloque moderador de parafina quedase instalado antes del 12 de junio, lo cual, dada la urgencia en finalizar la irradiación a fin de poder sembrar durante la tercera semana de junio, impidió ajustar en la forma deseada todos los detalles. No obstante, estimamos oportuno confeccionar el presente informe a fin de servir de guía para futuros perfeccionamientos. En el nos ocupamos fundamentalmente de la dosis de neutrones térmicos y sólo establecemos un grosero límite inferior para la dosis total absorbida por las semillas. Como finalmente éste resultó ser ~ 5 veces la dosis térmica, es impropio hablar de "una irradiación con neutrones térmicos".

Disposición y datos generales de la experiencia:

Las semillas a irradiar eran de 4 tipos distintos agrupadas en 3 grupos de 5 kg cada uno, a los cuales había que suministrar respectivamente dosis de neutrones térmicos de 1, 2 y 4, en unidades convencionales deducidas por el personal de la División Investigaciones Agropecuarias a partir de la experiencia del año anterior.

La densidad media de las semillas era aproximadamente $0,65 \text{ g/cm}^3$ y se solicitó que, dentro de un grupo, el flujo térmico sobre las diversas semillas no variara en más de $\pm 20\%$ respecto de su valor medio.

La disposición del blanco de Li a usar está ilustrada en la figura I; el blanco centrado en una cavidad cúbica situada en la parte central del bloque de parafina. Lógicamente, cuanto más grande ésta, para una densidad dada de flujo térmico dentro de la cavidad, tanto menor el tiempo de irradiación para lograr una dosis dada sobre el total de los 15 kg de semillas. Debe tenerse presente empero que, al aumentar las dimensiones de la cavidad, disminuirá la homogeneidad del flujo dentro del ella; esto evidentemente establece un límite al tamaño de la cavidad utilizable. Una cavidad de 20 cm de arista, considerando el lugar ocu

pado por el tubo acelerador y el blanco, daría cabida justamente a un grupo por vez de los tres en que están divididas las semillas. Si en tal cavidad se cumpliera la condición del 20%, se puede estimar a partir de la experiencia adquirida en noviembre de 1957, que la dosis 1 implicaría un tiempo de irradiación de a proximadamente 5 a 10 horas (sin que durante ese lapso fuera preciso intercambiar la ubicación de las semillas dentro del hueco).

Las figuras IIa y IIb ilustran en planta y en corte la ubicación del bloque de parafina dentro del recinto de blanco: también se señala la ubicación de los monitores de radiación gamma y de neutrones.

Las dimensiones del bloque de parafina se discuten en el apéndice I.

— o —

Las mediciones y cálculos a efectuar son, por tanto:

I) Determinación de la homogeneidad de la densidad de flujo de neutrones térmicos en cavidades cúbicas de diverso tamaño, realizadas dentro de un bloque de parafina, aproximadamente cúbico, y centradas alrededor del blanco del acelerador en cascadas.

II) Determinación del valor absoluto de la densidad media de flujo de neutrones térmicos por microcoulomb de deuterones de energía dada incidentes sobre el Li, en las cavidades mencionadas.

III) Determinación de la densidad de flujo de neutrones de energía mayor que la térmica existente simultáneamente con el flujo térmico. Teniendo en cuenta que del blanco emergen neutrones de hasta 15 MeV este flujo no-térmico puede no ser despreciable.

IV) Determinación de la intensidad de radiación gamma simultánea al flujo térmico.

V) Calibrado de algún tipo de monitor, en función de la dosis térmica suministrada por unidad de tiempo a las semillas sometidas al flujo promedio dentro de la cavidad.

VI) Cálculo de las lecturas en el monitor que corresponden respectivamente a las dosis 1, 2 y 4 solicitadas.

Se decidió estudiar las características del flujo neutrónico en dos cavidades cúbicas de respectivamente 15 y 20 cm de arista, mediante el método de activación de chapitas de manganeso, descrito en numerosas publicaciones.

Para el estudio de la homogeneidad del flujo térmico dentro de las cavidades se optó por realizar el conteo de la actividad beta de las chapitas con un contador GM de ventana, no calibrado en eficiencia.

Para la determinación absoluta de la densidad del flujo térmico se decidió

usar un equipo de conteaje beta absoluto, disponible en la División de Radioquímica, cuya eficiencia total, ϵ , era de $0,140 \pm 5\%$.

Como monitores del flujo neutrónico se instalaron una cámara de ionización acoplada a un medidor de ionización Baldwin (Ionex Mark 3) y un contador de F_3B enriquecido al 96 % en B^{10} acoplado a un escalímetro conectado a un integrador de pulsos con registrador gráfico.

Además se registraron la alta tensión y la corriente neta de iones incidentes sobre el blanco (electrones secundarios suprimidos y haz colimado).

La constancia de los equipos monitores fué controlada durante la experiencia con una fuente de Po-Be. Este control se continuó durante la irradiación de semillas; empero durante el segundo día comenzó a fallar el registro del conteaje del contador de F_3B , y se suprimió este monitor. La constancia de los equipos de conteaje beta se controló con fuentes de Co y U.

En el cuadro I se dan las propiedades de interés del Mn y en el cuadro II se indican las condiciones de operación del equipo de alta tensión durante las irradiaciones correspondientes a la determinación del flujo de neutrones en cada una de las cavidades.

CUADRO I: CONSTANTES DEL MANGANESO

$$\text{Átomos de Mn por mg de peso} = 1,096 \times 10^{19}$$

$$\sigma \text{ activación Mn 55 para } v=v_0/1,128 = (11,88 \pm 0,30) \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$E_{\beta_1} = 2,86 \text{ Mev, } 60\%; E_{\beta_2} = 1,05 \text{ Mev, } 25\%; E_{\beta_3} = 0,75 \text{ Mev, } 15\%.$$

$$\overline{E_{\beta}} = 2,091 \text{ Mev}$$

$$\lambda = 0,004477 \text{ l/min}$$

CUADRO II: CONDICIONES DE OPERACION DEL ACELERADOR Y TIEMPOS DE IRRADIACION (t_i)
Y DE CORTE (t_c)

Fecha	Cavidad (Arista)	Alta Tensión	i_{bl}	t_i	t_c	λt_i	$1/(1-e^{-\lambda t_i})$
-	(cm)	(MV)	(μA)	(min)	(h) (min)	-	-
13-6-58	15	1	32 ± 1	17,16	13 53,67	0,07682	13,51
"	20	1	38 ± 1	32,75	16 40,67	0,1466	7,337
19-6-58	20	1	30 ± 1	30,00	11 46,00	0,1343	7,957
"	20	1	20 ± 1	30,00	12 41,00	0,1343	7,957

Distribución de la densidad de flujo Φ en las cavidades y determinación absoluta de la densidad media de flujo.

Las figuras IIIa y IIIb indican la ubicación de las chapitas de ^{113}In dentro de las cavidades de 15 y 20 cm de arista. Los números enteros indicados dentro de círculos corresponden a la numeración convencional de las posiciones de las chapitas usadas para determinar la distribución de la densidad de flujo.

En las posiciones indicadas por números semienteros se irradiaron sucesivamente chapitas desnudas y rodeadas con Cd, en presencia de chapitas testigo, en la posición 4, para normalizar el flujo. La finalidad era determinar qué porcentaje de la actividad inducida en las chapitas de ^{113}In correspondía a neutrones con energía superior a la de corte del Cd. Evidentemente de la relación entre las actividades a saturación de la chapita envuelta en Cd y de la chapita desnuda, si se calculan las actividades por mg de peso de las chapitas, se obtiene, para cada posición, tal porcentaje. Lo denominaremos "factor espectro", f. A partir de los valores obtenidos se confeccionó el cuadro III, en el cual se ha estimado qué porcentaje hay que descontar a las actividades de las diversas chapitas, según su posición dentro de las cavidades.

CUADRO III: INFLUENCIA DEL FACTOR ESPECTRO SOBRE LA ACTIVIDAD DE CADA CHAPITA
SEGUN SU POSICION.

Cavidad de 20 cm de arista		Cavidad de 15 cm de arista	
Posición	f	Posición	f
-	%	-	%
1	10	1	10
2	5	2	5
3	3	12	5
5	3	13	5
6	3	15	10
9	3	16	10
10	3	restantes	3
13	5		
14	5		
16	5		
17	10		
restantes	0		

El cuadro IV resume los resultados obtenidos para la distribución de la densidad de flujo en las cavidades. En la columna III se dan las cuentas, C, medidas por minuto en las chapitas de Mn, corregidas por fondo y factor espectro y referidas al tiempo de corte y a peso unitario. Estos valores, a partir de los cuales se obtiene la distribución relativa del flujo de neutrones térmicos en la co-lumna IV, están afectados de un error de $\sim 6\%$, compuesto por: $\sim 2\%$ proveniente de la estadística del contajaje, $\sim 0,4\%$ de la determinación del peso de las chapitas, $\sim 1\%$ introducido al referir las actividades al tiempo de corte y $\sim 2,5\%$ de la aplicación del factor espectro.

- 7 -

CUADRO IV: MEDICIONES RELATIVAS

I	II	III	IV
Chapa	Posición	$\frac{(C-fondo)}{peso} \times (1-f/100) \cdot \lambda(t-t_c)$	$\frac{III}{III_{m\acute{a}ximo}}$
Nº	Nº	cuentas/minuto.mg	-

CAVIDAD DE 15 cm DE ARISTA

Fecha: 13-6-58		Corriente media de blanco = 32 μA	
4	1	276	0,43
6	2	499	0,78
5	3	640	1,00
7	4	543	0,85
8	5	565	0,88
9	6	500	0,78
10	7	405	0,63
11	8	366	0,57
12	8½	448	0,70
13	9	475	0,74
14	10	515	0,80
19	11	522	0,82
18	12	520	0,81
17	13	474	0,74
15	14	405	0,63
21	15	313	0,49
22	16	306	0,48

CAVIDAD DE 20 cm DE ARISTA

Fecha: 13-6-58		Corriente media de blanco = 38 μA	
36	1	510	0,50
37	2	871	0,85
39	3	1020	1,00
27	4	717	0,70
28	5	849	0,83
29	6	786	0,77
30	7	603	0,59
32	8	494	0,48
33	9	526	0,52
34	10	591	0,58
35	11	448	0,44
26	12	836	0,82
23	13	817	0,80
24	14	703	0,69
25	15	635	0,62
41	16	565	0,55
40	17	576	0,57
Fecha: 19-6-58		Corriente media de blanco = 30 μA	
1	1	274	
2	3	513	
3	5½	445	
Fecha: 19-6-58		Corriente media de blanco = 20 μA	
10	1	182	
11	3	312	
12	5½	274	

El cuadro V consigna los resultados obtenidos para la medición absoluta de la densidad de flujo en las cavidades. El error en la columna III es de $\sim 14\%$, y en la columna IV de $\sim 17\%$, provenientes de : errores recién mencionados (6%) ; δ ($2,5\%$); número, N, de átomos de Mn por mg ($\sim 0,1\%$); ϵ (5%) y medida de la corriente de blanco ($\sim 3\%$). Téngase presente que los valores de las dos últimas columnas valen para deuterones de 1 Mev.

CUADRO V: MEDICIONES ABSOLUTAS

I	II	III	IV
Chapa	Posición	$\frac{(C-fondo)(1-f/100) e^{\lambda(t-t_c)}}{\text{Peso} \times \delta \text{ act.} \times N (1-e^{-\lambda t_i})} = \Phi$	$\frac{\text{III}}{i_{\text{blanco}}} = \Phi$
Nº	Nº	$10^8 \text{ n/cm}^2 \text{ min}$	$10^5 \text{ n/} \mu \text{ Coul cm}^2$

CAVIDAD DE 15 cm DE ARISTA

Fecha: 13-6-58		Corriente media de blanco = $32 \mu A$	
5	3	5,36	2,78
9	6	4,23	2,22

CAVIDAD DE 20 cm DE ARISTA

Fecha: 13-6-58		Corriente media de blanco = $38 \mu A$	
37	2	3,91	1,70
Fecha: 19-6-58		Corriente media de blanco = $30 \mu A$	
1	1	1,25	0,70
2	3	2,53	1,40
3	5 1/2	2,20	1,23
Fecha: 19-6-58		Corriente media de blanco = $20 \mu A$	
10	1	0,88	0,735
11	3	1,51	1,25
12	5 1/2	1,38	1,15

En el cuadro VI se consignan varios controles de consistencia del método. De la discusión de errores anteriormente hecha se puede concluir que los valores de las columnas II y III debieran coincidir dentro del 6%, lo cual se cumple en todos los casos.

CUADRO VI: CONTROLES DE CONSISTENCIA

I	II	III
Nº de las chapitas a relacionar	Cociente entre los valores relativos (columna III cuadro IV) llevados a saturación	Cociente entre los valores absolutos (columna III cuadro V)
5/9	1,28	1,25
5/37	1,35	1,37
37/2	1,57	1,55
37/11	2,62	2,60
1/2	0,53	0,50
1/3	0,62	0,57
10/11	0,58	0,59
10/12	0,66	0,64
1/10	1,51	1,43
2/11	1,65	1,68
3/12	1,63	1,61

Los 3 últimos cocientes de las columnas II y III relacionan irradiaciones de 30 min de duración cada una, en las cuales el cociente entre las corrientes de blanco era:

$$\frac{i_{bl} (1,2,3)}{i_{bl} (10,11,12)} = 1,50 \pm 7 \%$$

por lo tanto, estos 3 últimos cocientes (relacionan chapitas colocadas en igual posición y están afectados de un error de $\pm 6 \%$) debieran coincidir con este valor dentro del $\pm 7\%$, lo cual se cumple.

En la columna IV del cuadro IV se ha tabulado el cociente entre los valores de la columna III (proporcionales a la densidad de flujo) y el valor máximo de dicha columna. Estos valores se han representado en las figuras IIIa y IIIb dentro de rectángulos. De la figura IIIa se infiere que, si no se ocupan las zonas muy próximas a las aristas, la cavidad de 20 cm de arista cumple con la condición de homogeneidad establecida en la página 2 ; lo mismo vale para la cavidad de 15 cm de arista. De las mismas figuras se ha estimado que, en estas condiciones, la densidad media de flujo es $0,75\% \pm 5 \%$ de la densidad máxima para la cavidad de 20 cm de arista y $0,78 \pm 5\%$ para la cavidad de 15 cm de arista.

Para obtener ahora el valor absoluto de la densidad media de flujo por μ A de corriente de blanco hemos definido, para cada posición, el factor F_i , como el cociente entre la densidad media de flujo referida a la densidad máxima y el valor indicado en la columna IV cuadro IV para esa posición. El producto de los valores dados en la columna IV del cuadro V por el F_i correspondiente da el valor absoluto de la densidad media de flujo, el cual está tabulado para las diversas posiciones en la columna VII del cuadro VII. El error en F_i es de 5%; del error de 17% asignado a los valores de la columna IV del cuadro V, 10,6% proviene de errores sistemáticos (ξ, σ , N° de átomos de Mn por mg, i_{bl}). Por tanto los valores de la columna VII debieran coincidir dentro del $\sim 12\%$; lo cual se cumple, excepto para la chapita N° 37. Ya que los controles del cuadro VI no mostraron nada anormal para esta chapita, atribuimos la gran discrepancia a un error en el registro de la corriente de blanco. En la columna VIII se ha indicado el promedio de los valores de la columna VII (excluida la chapita N° 37) y su error. Ya que los errores de origen puramente estadístico en los valores de $\Phi_i \times F_i$ (cuentas corregidas por fondo y peso de las chapitas) son pequeños en comparación con los de origen sistemático y de cálculo ($e^{\lambda t_i}/1-e^{-\lambda t_i}$, $1-f/100$ y F_i), el mencionado error se ha tomado directamente como la suma de los errores en los factores del producto $\Phi_i \times F_i$ (22%).

El producto de la densidad media de flujo por el volumen de la cavidad da 7,4 para la de 15 cm de arista y 8,5 para la de 20 cm de arista. Esto indica la conveniencia de utilizar para la irradiación de las semillas la mayor de las cavidades (máxime si se tiene en cuenta el hecho de que el volumen ocupado por el blanco y el tubo acelerador es proporcionalmente menor para esta cavidad y la pérdida de tiempo que implica el reemplazo de las semillas en la cavidad).

Se han realizado hasta ahora los puntos I) y II) mencionados al comienzo de la página 3. Para satisfacer el punto V) interesa conocer el voltaje C_B acumulado en el monitor gamma por unidad de dosis media, en n/cm^2 , para cada cavidad:

$$C_B = \frac{V_B \text{ [Volts]}}{t_i \text{ [min]} \times \Phi \text{ [n/cm}^2\text{.min]} \times F_i}$$

donde V_B es el voltaje acumulado en el monitor de radiación gamma durante el tiempo de irradiación t_i .

Siendo el error en $V_B < 1\%$ mientras que el de t_i es despreciable, los valores tabulados en la columna XII debieran coincidir dentro del $\sim 13\%$; lo cual se cumple. En la columna XIII se consigna el valor medio de C_B y su error, obtenido en la misma forma que el de Φ (19%).

Los 3 últimos cocientes del cuadro VI, columnas II y III (afectados de un error del 6%) debieran coincidir con el cociente entre los voltajes V_B acumulados en el monitor de radiación gamma (cuadro VII columna XI) en esas mismas irradiaciones:

$$\frac{V_B (1,2,3)}{V_B (10,11,12)} = \frac{0,704 \text{ Volt}}{0,476 \text{ Volt}} = 1,48 \pm 2 \%$$

dentro del $\pm 6\%$, lo cual se cumple y demuestra que C_D no es función de la densidad de flujo (Ver también apéndices II y III).

Acotación inferior de la dosis total absorbida por las semillas:

Se intentó realizar una estimación grosera del límite inferior de la dosis media total (neutrones térmicos y de energía superior, y radiaciones X y gamma) absorbida por las semillas en la cavidad de 20 cm de arista. Para ello se dispusieron cámaras de ionización Victoreen, tipo dedal, en varios puntos de la cavidad, según ilustra la figura IV; las coordenadas corresponden aproximadamente al centro del volumen sensible de la cámara. Estas cámaras están diseñadas para dosimetría de radiación X y las utilizadas (modelos 70-5, 131, 154 y 365 de respectivamente 25, 100, 250 y 250 r de alcance) tienen una precisión de $\pm 2\%$ del valor de deflexión total en el rango de 30 a 400 kev; para energías superiores la precisión es menor, pues las paredes son demasiado delgadas para que se establezca totalmente el equilibrio electrónico en ellas. En la figura IV se han identificado las cámaras indicando su alcance en el lugar de su ubicación; las dos cámaras modelo 131 se han distinguido mediante las letras "A" y "B"; la cámara 250 r-(ny) es una cámara con ventana de nylon, para bajas energías.

El volumen sensible de las cámaras está lleno de aire y sus paredes son de material aire-equivalente (baquelita). Siendo las paredes hidrogénicas, son sensibles, en principio, a neutrones y, hasta hace algunos años, era común su uso para dosificación de neutrones. Una indicación de un roentgen (en las cámaras de 25 ó 100 r) equivale a unos 2 rad para neutrones de energía superior al Mev y, probablemente, a una cantidad mayor de rad para neutrones de energía menor (1). Como para esta estimación se puede suponer que para radiación gamma 1 roentgen equivale a 1 rad, cualesquiera sean las contribuciones individuales de los neutrones o de la radiación gamma a LAS INDICACIONES NUMERICAS DE LAS CAMARAS, estas CONSTITUYEN UNA COTA INFERIOR PARA LA DOSIS TOTAL ABSORBIDA EN AIRE, expresada en rad. (Se supuso que las cámaras de 250 r poseen para la dosificación de neutrones propiedades idénticas a las de las cámaras de 25 y 100 r).

Dada una dosis en tejido (en rad), los efectos biológicos causados por ella se miden por la dosis-EBR, que se obtiene multiplicando la dosis por la EBR (eficiencia biológica relativa) para el efecto bajo consideración de la radiación que ha provocado dicha dosis; la unidad de medida es el rem. Radiación X de 200 kev posee por definición $EBR = 1$; en estudios de efectos letales con radiación gamma de Co o de Ra se toma para estas radiaciones EBR entre 0.6 y 0.8 (1). Aquí supondremos que toda la radiación gamma presente en la cavidad posee $EBR = 1$, para cualquier efecto en tejidos. Para neutrones de cualquier energía la EBR es mayor que la unidad (varía entre 2 y 10), (1).

Supondremos ahora que la dosis total absorbida en aire es no mayor que la que se absorbería en tejido humano o semillas situadas en el mismo lugar. Entonces LAS INDICACIONES NUMERICAS DE LAS CAMARAS CONSTITUYEN UNA COTA INFERIOR PARA LA DOSIS-EBR TOTAL ABSORBIDA EN LAS SEMILLAS, y el cociente entre esta cota y la dosis -EBR real absorbida es menor aún que el cociente entre la antes establecida cota inferior para la dosis en aire y la dosis real absorbida en aire.

CUADRO VII: CALCULO DE LA DENSIDAD MEDIA ABSOLUTA DE FLUJO Y CALIBRACION DEL MONITOR DE RADIACION GAMMA EN FUNCION DE LA DOSIS (EN n/cm^2).

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
Fecha	Cavidad	Chapa	Posic.	Φ	F_i	ΦF_i	$\overline{\Phi}$	t_i	Φ'	V_B	C_B	$\overline{C_B}$
—	Arista (cm)	Nº	Nº	$(n/cm^2 \mu\text{Coul}) \times 10^5$	—	$(n/cm^2 \mu\text{Coul}) \times 10^5$	$(n/cm^2 \mu\text{Coul}) \times 10^5$	(min)	$(n/cm^2 \text{ min}) \times 10^8$	(Volts)	$(\text{Volt}/n/cm^2) \times 10^{-10}$	$(\text{Volt}/n/cm^2) \times 10^{-10}$
13-6-58	15	5	3	2,78	0,78	2,17	2.19±0.48	17,16	5,34	0,710	0,99	0,985±0,19
"	"	9	6	2,22	1,00	2,22		"	4,23	"	0,98	
"	20	37	2	1,70	0,88	1,50	1.06±0,23	32,75	3,91	1,483	1,32	1.25±0,24
19-6-58	"	1	1	0,70	1,50	1,05		30,00	1,25	0,704	1,25	
"	"	2	3	1,40	0,75	1,05		"	2,53	"	1,24	
"	"	3	5½	1,23	0,94	1,16		"	2,20	"	1,13	
"	"	10	1	0,735	1,50	1,10		"	0,88	0,476	1,20	
"	"	11	3	1,25	0,75	0,94		"	1,51	"	1,40	
"	"	12	5½	1,15	0,94	1,08		"	1,38	"	1,22	

En el cuadro VIII se reproducen los resultados de tres irradiaciones diferentes, en las cuales el voltaje acumulado en el monitor gamma fue respectivamente 0.9, 0.7 y 3.16 V. En la columna IX se da el valor medio de la dosis total mínima en la cavidad calculada a partir de los valores de la columna VIII y de la figura IV. Este valor debe ser comparado con los ~ 8 rem de neutrones térmicos absorbidos en las semillas por volt acumulado en el monitor gamma (ver sección siguiente).

CUADRO VIII: DOSIS TOTAL MINIMA

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Cámara	Lectura Monitor $\gamma = 0,9$ V		Lectura Monitor $\gamma = 0,7$ V		Lectura Monitor $\gamma = 3,16$ V		Dosis EBR total mínima	Dosis EBR total mínima media, para Monitor $\gamma = 1$ V
—	Medido	Reducido a monitor $\gamma = IV$	Medido	Reducido a monitor $\gamma = 1$ V	Medido	Reducido a monitor $\gamma = 1$ V	$\frac{III + V + VII}{3}$	
-	r	r	r	r	r	r	rem	rem
25r	9,1	10,1	6,5	9,3	fuera esc.	—	9,7	45 ± 10
100rB	11,0	12,2	8,3	11,9	36,0	11,4	11,8	
100rA	13,0	14,5	10,5	15,0	46,0	14,6	14,7	
250r	155	172	135	193	fuera esc.	—	183	
250r(ny)	38,0	42,2	27,0	38,6	104	32,9	37,9	

Evidentemente no se puede hablar de una "irradiación de semillas con neutrones térmicos". Además resulta claro que la inhomogeneidad de la dosis total en la cavidad de 20 cm de arista es seguramente mayor al ± 20 %.

Comparando los valores de la columna VIII con las distancias de las cámaras al blanco supuesto puntual (indicadas en la figura IV), se observa que aquellos varían aproximadamente como la inversa del cuadrado de éstas (figura V). Los neutrones térmicos existentes en la cavidad provienen de la parafina que rodea a ésta; la radiación gamma presente en la cavidad puede provenir del Cd que rodea al bloque de parafina, de ésta o del mismo blanco; los neutrones rápidos emergen todos del blanco. El hecho de que se cumpla aproximadamente la ley de la inversa del cuadrado de la distancia podría indicar que gran porcentaje de la ionización en las cámaras es debido a radiación emergente del blanco y que, por tanto, el grosero límite inferior establecido no lo es para la dosis-EBR total, sino para la generada por los neutrones rápidos y la radiación gamma solamente. El límite inferior total estaría dado por aquél más la dosis -EBR de neutrones térmicos, según fuera determinada mediante las chapitas de Mn.

Respecto del límite superior de la dosis-EBR total nada concreto se puede estimar pues para los neutrones con energía inferior al MeV se desconoce la re

lación entre las indicaciones de las cámaras y la dosis debida a ellos.

Irradiación de semillas

A partir de la medición absoluta realizada en noviembre de 1957 mencionada en la página 1, estimamos que la densidad media de flujo térmico a que estaban sometidas las semillas en aquella ocasión era de $(4 \times 10^8 \pm 20\% \text{ a } -40\%) \text{ n/cm}^2 \cdot \text{min.}$ Con este dato las dosis 1, 2 y 4 en unidades convencionales solicitadas por la División Investigaciones Agropecuarias equivalen a los valores tabulados en la columna I del Cuadro IX y las indicaciones correspondientes en el monitor gamma resultan 13,5, 27 y 54 volts respectivamente.

Para que estos valores posean algún sentido, la relación de las intensidades de radiación gamma, neutrones térmicos y neutrones rápidos en el nuevo bloque de parafina debe ser semejante a la que existía en el defectuoso bloque usado en 1957, pues hemos visto en la sección anterior que las dosis debidas a las dos primeras radiaciones no son en manera alguna despreciables frente a la de neutrones térmicos.

Debido a que el cálculo definitivo de la constante $\overline{C_{B20}}$ se concluyó ya iniciada la irradiación de las semillas, las dosis realmente suministradas (columna II) no concuerdan exactamente con las tabuladas en la columna I ni guardan la relación 1:2:4. Los valores en rem se calcularon suponiendo que la EBR de los neutrones térmicos en las semillas es idéntica a la establecida para tejidos humanos, a partir de la expresión:

$$\text{Dosis} \simeq 10^{-9} \frac{\text{rem}}{\text{n/cm}^2} \times \delta$$

donde δ es la dosis expresada en n/cm^2 .

El error en la columna II proviene del error de $\overline{C_{B20}}$ y del error de lectura de V_B ; los valores de la columna I tienen el error asignado a la estimación de la densidad de flujo.

CUADRO IX: DOSIS DE NEUTRONES TERMICOS SUMINISTRADAS

I		II	
Dosis media de neutrones térmicos solicitada		Dosis media de neutrones térmicos suministrada. (inhomogeneidad máxima de la dosis respecto de la dosis media: $\pm 20\%$)	
Unidades convencionales	$(n/cm^2) \times 10^{11}$	$(n/cm^2) \times 10^{11}$	rem
1	$1,08^{+0,22}_{-0,43}$	$1,25 \pm 0,26$	125
2	$2,16^{+0,43}_{-0,86}$	$2,50 \pm 0,52$	250
4	$4,32^{+0,86}_{-1,63}$	$4,68 \pm 0,98$	468

Ajuste de la experiencia

a) Mediante cámaras de ionización de paredes no hidrogénicas (teflón o grafito) llenas de CO_2 , será posible realizar una mejor determinación de la dosis gamma (1).

b) La dosis de neutrones rápidos podrá estimarse con detectores de umbral (2;3), contadores proporcionales (4,5) o tipo Hornyak (6).

c) Se monitoró en forma bastante indirecta: la cámara de ionización registra radiación gamma generada por los neutrones en el bloque de parafina, en el Cd que lo rodea, en las paredes del recinto de blanco y en los artefactos contenidos en él; además registra radiación X y gamma generada en el blanco y en diversas partes del tubo acelerador por el haz de proyectiles y los electrones secundarios. Más apropiado es monitorar el flujo neutrónico con detectores de baja sensibilidad para rayos gamma (p. ej. un contador de F_3B , como estaba planeado); también se puede considerar la posibilidad de colocar un detector de neutrones de baja sensibilidad directamente en la cavidad, entre las semillas.

d) Dada la geometría de la figura I, y teniendo en cuenta que el haz incide sobre el blanco en una superficie de aproximadamente 1 cm^2 , es de preveer que cavidades esféricas o cilíndricas presentarán una distribución de flujo térmico

más homogénea que la de las cavidades cúbicas estudiadas. En estas mismas se puede lograr una mejora en la homogeneidad térmica rodeando en la mejor forma posible con parafina el extremo del tubo acelerador que penetra en el bloque.

e) Finalmente, se pueden disminuir las dosis gamma y de neutrones rápidos en relación a la dosis térmica alejando la cavidad del blanco y rodeándola con Pb. Seguramente esto producirá una disminución en el valor absoluto de la dosis térmica por microcoulomb.

APENDICE I : VOLUMEN DEL BLOQUE DE PARAFINA

A fin de determinar las dimensiones óptimas del nuevo bloque de parafina se realizaron mediciones relativas de la densidad de flujo en una cavidad de unos 500 cm^3 , practicada en bloques aproximadamente cúbicos de varias dimensiones, fabricados con los defectuosos panes existentes. La figura VI resume los resultados promediados de varias experiencias. En base a ella, se decidió dar al nuevo bloque un volumen de aproximadamente $0,7 \text{ m}^3$.

Posteriormente se adosaron al nuevo bloque los panes sueltos, llevando el volumen total a aproximadamente $1,1 \text{ m}^3$; mediciones relativas de la densidad de flujo térmico no mostraron aumento apreciable para ésta en el mayor volumen.

APENDICE II: ACTIVIDAD INDUCIDA EN EL TUBO ACELERADOR

Las irradiaciones realizadas para la determinación de la constante C_B fueron breves en comparación con las de las semillas. Por tanto, para que sea lícito utilizar C_B en la evaluación de las dosis suministradas, es preciso que ninguna actividad apreciable de período largo en comparación a la duración de las irradiaciones de calibración sea inducida en el tubo acelerador (blanco incluido).

Se irradió un blanco de Li con deuterones durante 3 horas con una corriente de blanco similar a las utilizadas durante la determinación de C_B y la irradiación de las semillas. Una vez cortado el haz, se comprobó que la tensión V_B acumulada por minuto en el monitor gamma inmediatamente tras el corte era $< 3 \times 10^{-3}$ veces la media acumulada por minuto durante las irradiaciones mencionadas. Con un cristal de centelleo se siguió el decaimiento de la actividad inducida y se comprobó que provenía fundamentalmente del N^{13} (10 minutos) producido a partir del C depositado sobre el blanco y las paredes del tubo.

APENDICE III: RADIACION X Y GAMMA GENERADA EN EL TUBO ACELERADOR

En la página 11 se ha afirmado indirectamente que C_B no es función de la alta tensión en el acelerador ni de su corriente de blanco, lo cual es sumamente conveniente, pues hace innecesario mantener constantes dichos parámetros a lo

largo de las extensas irradiaciones de semillas. Sin embargo es menester considerar que la ionización en el monitor gamma es provocada por: I) neutrones ~~emer~~genes del blanco -producto de las reacciones Li(d,n) y d(d,n) si bien, a las energías utilizadas, el rendimiento de la segunda es despreciable frente al de la primera- los que actúan por: la) acción directa sobre el monitor; lb) generación de radiación gamma secundaria; II) radiación generada a lo largo del tubo acelerador compuesta por: 2a) radiación neutrónica (reacción d(d,n)); 2b) radiaciones X y gamma. Seguramente todas estas causas varían linealmente con la corriente de blanco, pero, en principio, solamente si 2b) depende de la alta tensión en la misma forma que la), lb) y 2a) será C_B independiente de ésta.

Para un rápido control se bombardeó un blanco de acero inoxidable con deuterones. En la zona de 1,00 a 1,15 MV -que fué la normalmente utilizada durante la irradiación de las semillas- se vió que la variación de la contribución de 2a) más 2b) con la alta tensión es aproximadamente similar a la variación del ~~ren~~dimimiento de la reacción Li(d,n) con ella (7). Además, la contribución por minuto de 2b) más 2a) a las indicaciones del monitor gamma, es en dicha zona, 5% del voltaje acumulado por minuto en él durante la irradiación de semillas; esto hace que alguna divergencia en la forma en que la), lb), 2a) y 2b) dependen de la alta tensión sea de poca importancia.

Agradecimientos:

A la Lic. Sara Abecasis, de la División Radioquímica, se agradece la autorización para utilizar el equipo de contaje beta absoluto puesto a punto por ella. Al Lic. G. Ricabarra del Departamento de Reactores, se agradece el suministro de las hojuelas de Mn.

BIBLIOGRAFIA

- (1) "Protection against neutron radiation up to 30 MeV"; N.B.S. Handbook 63 (1957).
- (2) B.L. Cohen, Phys. Rev. 81, 184, (1951).
- (3) B.L. Cohen, Rev. Sci. Instr. 27, 153, (1956).
- (4) G.S. Hurst, Brit. J. Radiol. 27, 353, (1954).
- (5) G.S. Hurst et al., Rev. Sci. Instr. 22, 981, (1951).
- (6) J.S. Handloser y W.A. Higinbotham, Rev. Sci. Instr. 25, 98, (1954).
- (7) E. Amaldi et al., Phys. Rev. 27, 896, (1937).

UBICACION DEL BLANCO DEL ACELERADOR

Fig. Ia:

CORTE $\overline{AB}$
DE FIG. IIa:
ESC: 1,5:10

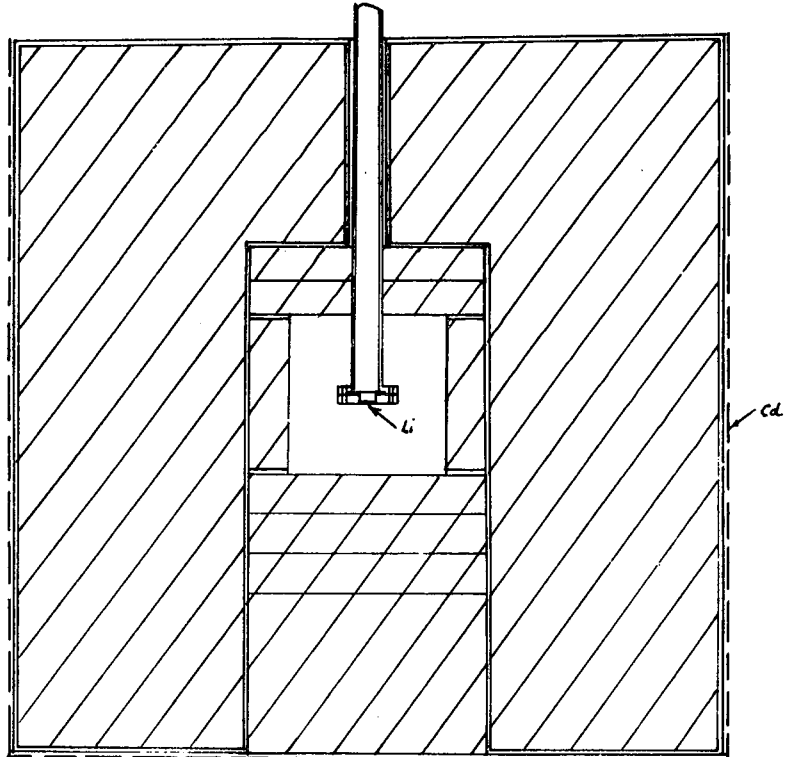


Fig. Ib:

CORTE $\overline{CD}$
DE FIG. IIa:
ESC: 1,5:10

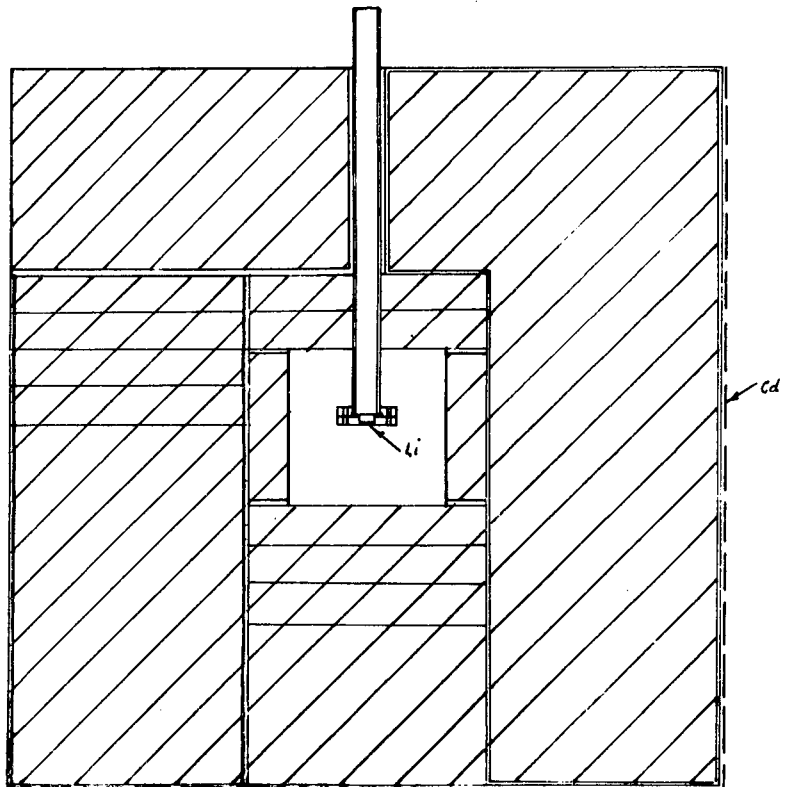


FIG. IIa : UBICACION EN PLANTA DEL BLOQUE DE PARAFINA DENTRO DEL RECINTO Y UBICACION DE LOS MONITORES DE RADIACION GAMMA Y NEUTRONES.

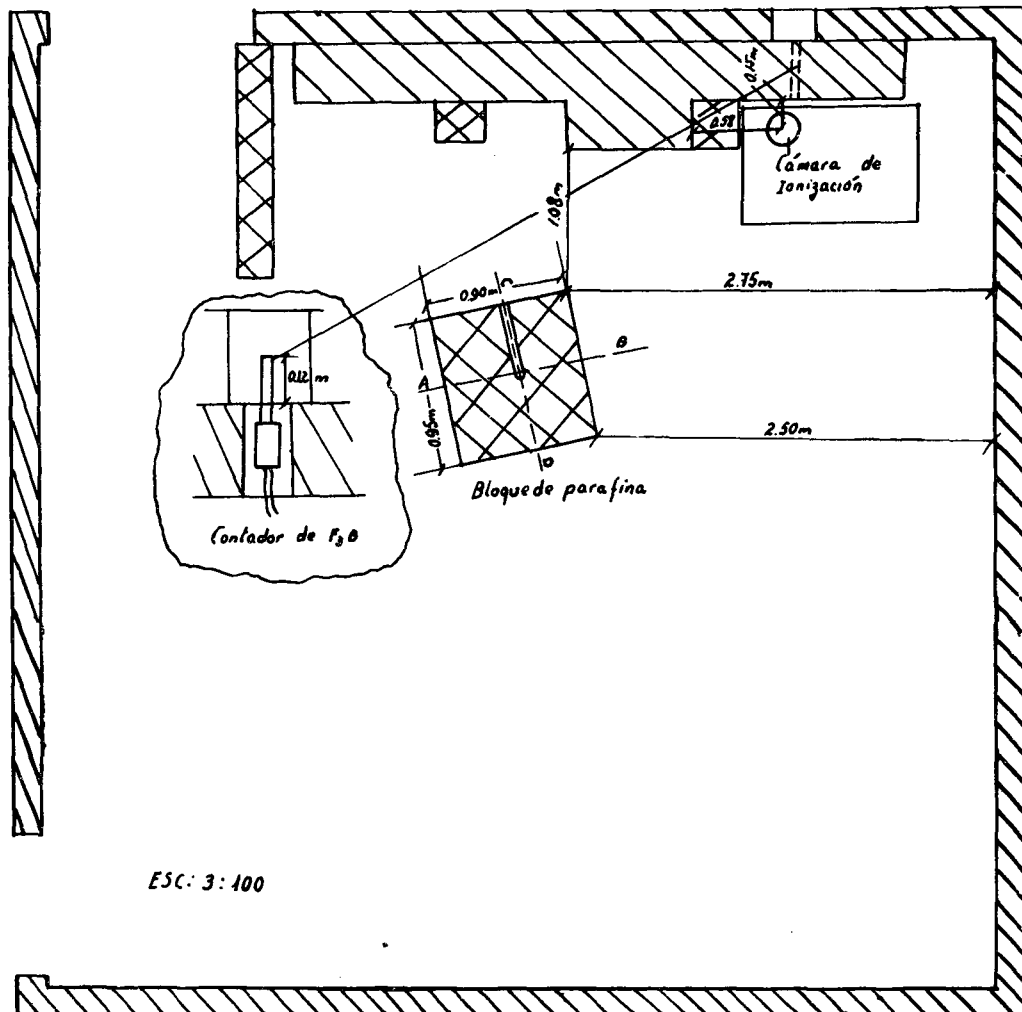


FIG. IIb:
IDEM FIG. IIa: EN CORTE

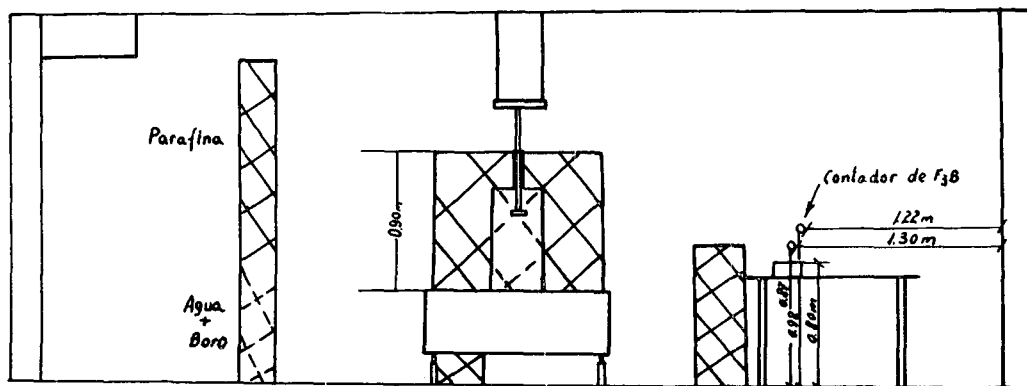


FIG. III a: UBICACION DE LAS CHAPITAS DE Mn EN LA CAVIDAD DE 20 x 20 x 20 cm

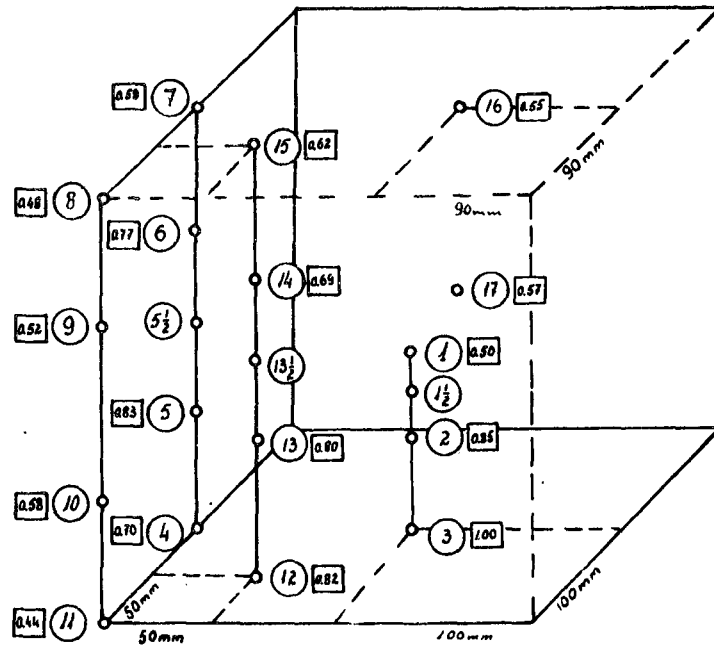


FIG. III b: UBICACION DE LAS CHAPITAS DE Mn EN LA CAVIDAD DE 15 x 15 x 15 cm

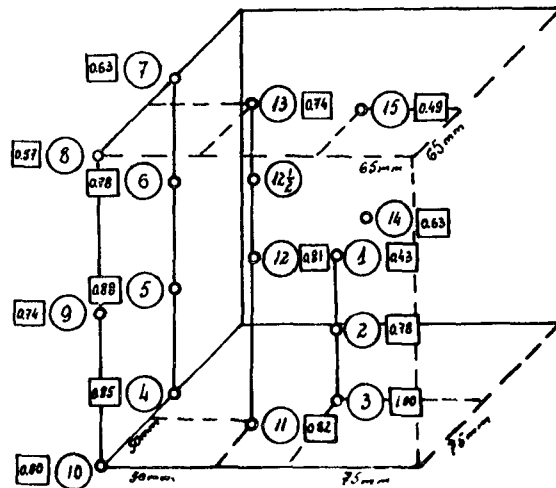


FIG. IV: UBICACION DE LAS CAMARAS DE IONIZACION EN LA CAVIDAD DE 20cm DE ARISTA.

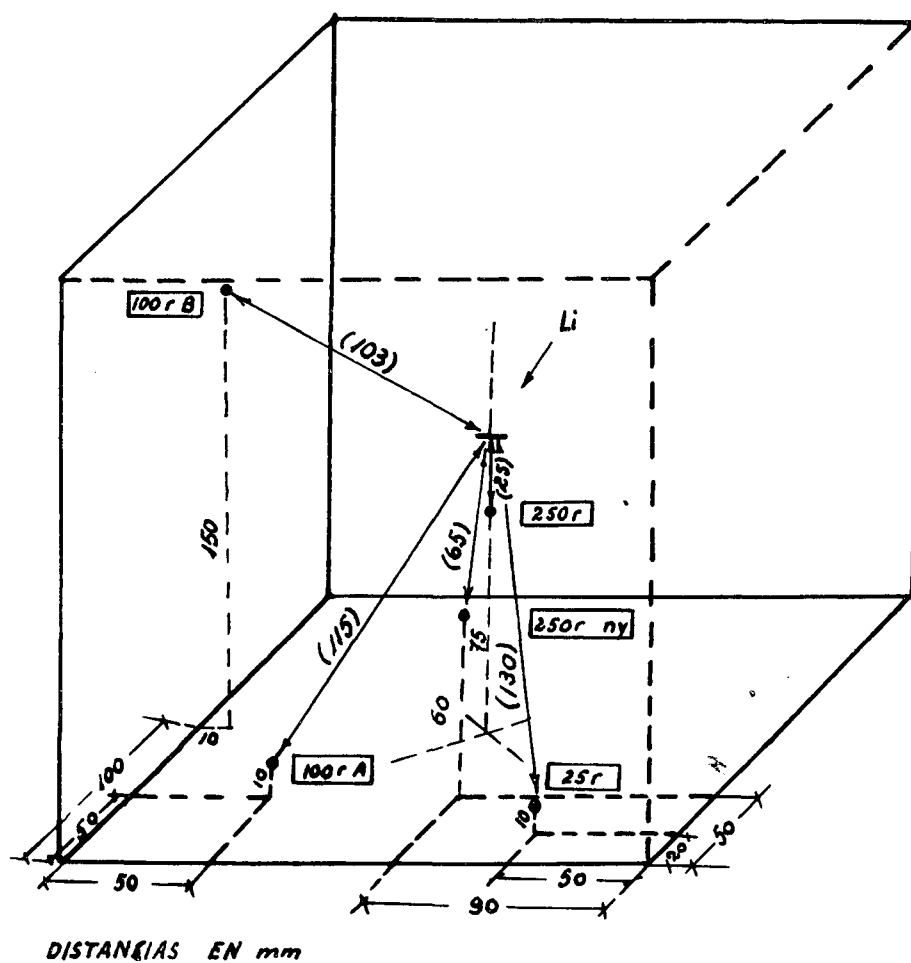


FIG. V : DOSIS-EBR EN FUNCION DEL CUADRADO DE LA DISTANCIA AL BLANCO

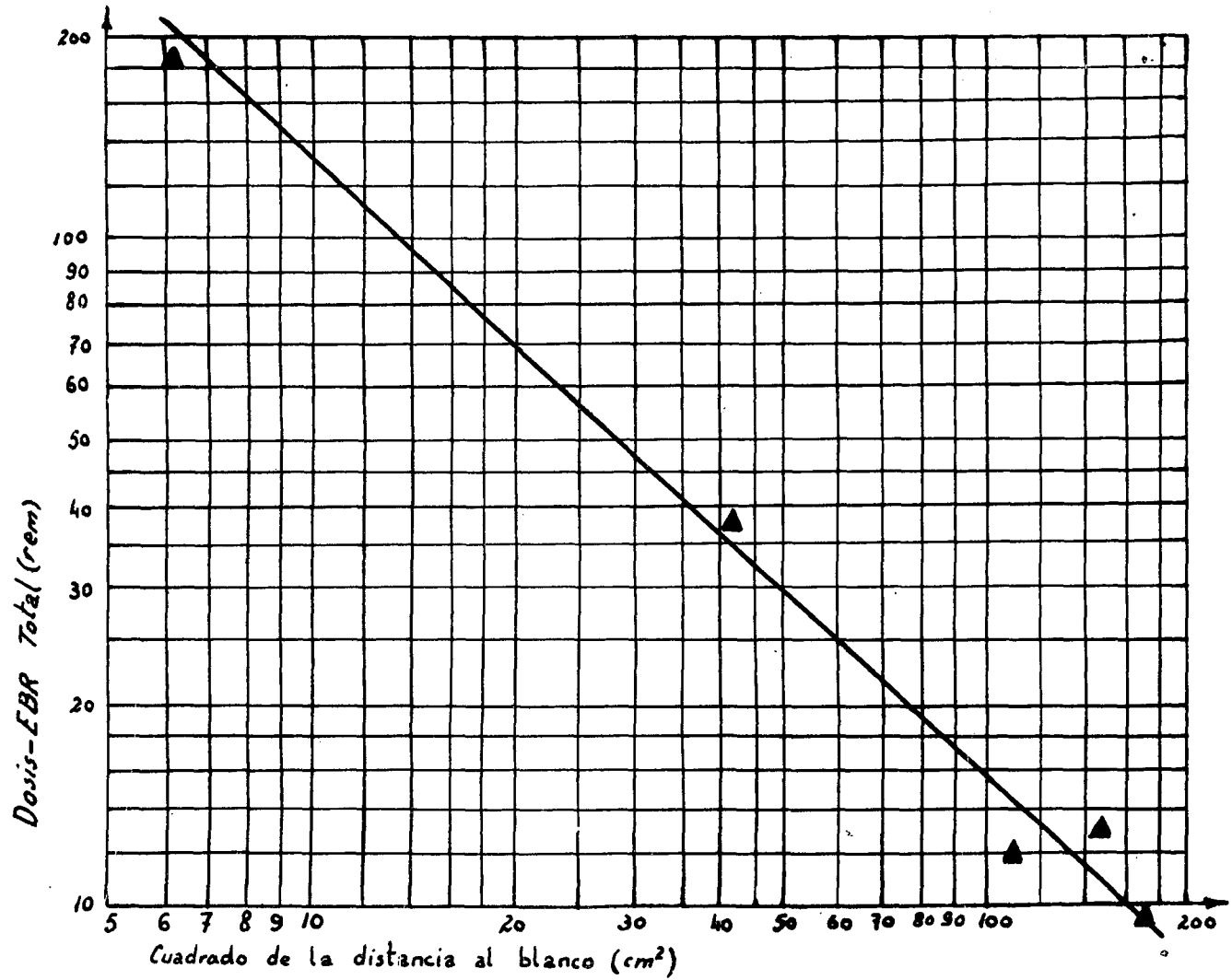


FIG. VI: DENSIDAD DE FLUJO EN FUNCION DEL VOLUMEN DEL BLOQUE MODERADOR.

