

ASPECTOS EXPERIMENTALES DE UN MEDIDOR GAMMA DE DENSIDAD SUPERFICIAL DE SUELOS (MGDS)

S. Benites^{1,2} y R. Santivañez³

**(1) FINES-GID, 3 PROIN-GID, Centro Nuclear RACSO de
Huarangal
Apartado 1687, Lima - Perú.**

**(2) Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería
Apartado 31.139, Lima - Perú.**



RESUMEN

Se ha obtenido resultados experimentales usando un prototipo de medidor de densidad superficial de suelos, el cual ha sido construido utilizando una fuente gamma de Cs-137, de 20 mCi, de geometría cilíndrica, de diámetro 11,5 mm por altura 15,5 mm, y un detector de tipo NaI(Tl), de 1 x 1,5 pulg. que es parte de un medidor de centelleo Saphymo. La resolución del instrumento es: 0,18 g/cm³, en el intervalo de 1,40 a 2,30 g/cm³. La curva de calibración se obtiene graficando el cociente de la tasa de cuentas para gap igual a 40,5 mm y la tasa de cuentas para gap igual a 0 en función de la densidad, considerando una distancia desde el centro de la fuente al centro del detector igual a 19,5 cm.

La tasa de exposición medida a 50 cm alrededor del medidor (con el blindaje de plomo en posición de trabajo) es menor que 0,14 mr/h. Las dimensiones del instrumento (fuente detector con blindaje) son 42 x 16 cm² x 20 cm de altura; el peso del blindaje es 17,5 kg. El conteo se hizo mediante un escaler modelo 402 Eurocard, de 6 dígitos, conectado a la salida de pulsos del Saphymo. En todas las mediciones el tiempo de conteo fue de 100 s.

INTRODUCCION

Se trata de diseñar y construir un prototipo de un medidor gamma de densidad de suelos (MGDS). Un MGDS consiste de una fuente de radiación gamma de buen poder de penetración (comúnmente Cs-137), rodeada de un adecuado blindaje de plomo, un detector de radiación gamma -situado a corta distancia de la fuente- y la unidad electrónica de medición que puede ser un medidor de tasa de cuentas o un contador de pulsos /3, 4/. El funcionamiento del mencionado equipo se basa en la irradiación del suelo y la subsiguiente medición de la radiación retrodispersada por el terreno, la cual es función de su densidad /3/. La relación entre la radiación medida y la densidad da lugar a curvas de calibración /1, 2, 4/ a partir de las cuales se determina la densidad del suelo.

En la sección dos de este informe reportamos el proceso experimental que se siguió para determinar las condiciones geométricas óptimas del medidor, así como una curva de calibración para la medición aproximada de la densidad de suelos en el rango de 1,4 a 2,3 g/cm³.

El uso de esta curva de calibración está restringida por la resolución de $0,18 \text{ g/cm}^3$ que hemos determinado para el instrumento, la misma que es susceptible de mejorar en la medida que se emplee un mayor número de muestras.

En la sección tres se expresan las conclusiones y recomendaciones que consideramos convenientes para mejorar las curvas de calibración.

PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL MGDS

El MGDS cuenta con los siguientes elementos:

- a) una fuente gamma de Cs-137, con una actividad nominal de 20 mCi y dimensiones de 11,5 mm de diámetro por altura de 15,5 mm,
- b) un medidor de centelleo, marca Saphymo, con cristal detector de NaI(Tl), alimentado con baterías (4,5 VDC) y provisto de un medidor de tasa de cuentas (en c/s) con cuatro escalas (15000, 5000, 1500, 150 c/s).

La eficiencia del medidor es expresada en términos de los siguientes parámetros:

- a) intensidad de flujo de irradiación sobre las muestras (suelos), la cual dependió de la altura de la fuente (h_f), con respecto a la superficie del suelo, y del diámetro del orificio (colimador) practicado en el blindaje de plomo, que permite la salida de un delgado haz de fotones hacia el suelo a la energía 662 keV;
- b) distancia fuente-detector, que es la separación entre los ejes verticales de la fuente y el detector;
- c) gap de aire (G), que es la altura del detector con respecto al suelo;
y
- d) espesor del blindaje de plomo entre la fuente y el detector.

EL BLINDAJE DE PLOMO

La evaluación del blindaje requiere tener en consideración los siguientes aspectos:

- a) la radiación directa sobre el detector debe ser lo más baja posible;
- b) la dosis en el entorno de la fuente debe estar en los niveles adecuados;
- c) el blindaje no debe ser excesivamente grande porque obligaría a alejar demasiado al detector de la fuente, además de los problemas que ocasionaría el peso.

Considerando un espesor de plomo de 5 cm en torno a la fuente, y una actividad 20 mCi, la tasa de exposición en la superficie del blindaje será de 4,7 mr/h; y a una distancia de 30 cm de la superficie del blindaje, de 0,1 mr/h.

Estos valores permiten el uso del medidor sin llegar a los límites de exposición durante una jornada normal de trabajo. La comprobación experimental dió una tasa de exposición menor que 0,14 mr/h a 50 cm alrededor del medidor, en condiciones de trabajo.

A fin de atenuar en 0,1 aproximadamente el flujo que llega al detector fuera de su cara inferior, rodeamos al detector con un blindaje de plomo en forma de anillo de espesor 2 cm y altura 5 cm. El peso de este blindaje (2,76 kg) permite además maniobrar con él, desplazamiento horizontal y verticalmente, con comodidad.

Finalmente, consideramos un espesor adicional de plomo de 5 cm entre la fuente y el detector para minimizar el fondo debido a la radiación no proveniente del suelo (fig. 1). A fin de evaluar la radiación de fondo, usamos el MGDS para irradiar un suelo de plomo de espesor 10 cm. Situando la fuente a 15,5 cm del detector, medimos un fondo de 35 c/s.

POSICION DE LA FUENTE

Luego de una serie de ensayos se optó por posicionar la fuente horizontalmente, a una altura de 25 mm, sobre un conducto vertical de

salida del haz de diámetro 1/16 pulg. Con esta configuración de la fuente, la tasa de conteo alcanzó niveles adecuados.

DISTANCIA DETECTOR FUENTE Y EL GAP DE AIRE

Para determinar los valores óptimos de d y G , se procedió a efectuar una serie de mediciones sobre muestras preparadas para este fin. Las muestras fueron escogidas de tres lugares diferentes:

- a) muestra C1 con características de cascajo y abundante piedra;
- b) similares a la muestra a) con mayor contenido de arcilla C2.0, C2.15, C2.30, C2.45, donde los números 0, 15, 30 y 45 indican grados de compactación creciente;
- c) arena de río, muestra A1.

Las muestras C2 fueron preparadas con diferentes grados de compactación, distribuyéndose un número dado de golpes (con un apisonador manual) por cada capa de 10 cm y humedeciéndola convenientemente; al estar preparadas, las muestras ocuparon un volumen de $\approx 60 \times 80 \text{ cm}^2 \times 30 \text{ cm}$ de espesor. La muestra A1 fue preparada sin compactar, solo depositándola en una caja de madera, sin humedecerla y ocupando un volumen similar al de la muestra C2.0.

Cada una de estas muestras fue irradiada colocando sobre ellas, en la parte central, el medidor. Luego de efectuar las mediciones del caso, se procedió a determinar sus respectivas densidades.

La densidad de las muestras se determinó por el método de pesar cierta cantidad de muestra y calculándose su volumen por la cantidad de arena fina, de densidad conocida, empleada para ocupar el espacio dejado por la muestra extraída. Los resultados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Resumen de datos para el cálculo de la densidad de las muestras usadas.

Muestra	Peso-muestra (g)	Peso-arena (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)
A1	666 ± 8		419 ± 1 ***	1,59 ± 0,002
C1	1869 ± 1 **	1214 ± 10*	861 ± 13	2,17 ± 0,03
C2.0	1170 ± 1 **	1135 ± 10*	805 ± 13	1,45 ± 0,02
C2.15	1104 ± 1 **	854 ± 10*	571 ± 11	1,93 ± 0,04
C2.30	1706 ± 1 **	1241 ± 10*	880 ± 13	1,94 ± 0,03
C2.45	1656 ± 1 **	1182 ± 10*	838 ± 13	1,98 ± 0,03

* Se considera un error de ± 10 g, por las imperfecciones en la extracción de los volúmenes de muestras, así como en el rellenado de estos vacíos.

** Si bien las pesadas se han llevado a cabo con una balanza electrónica de 0,01 g de precisión, estamos considerando un error de ± 1 g por cuanto la mayor incertidumbre en el proceso de extracción se da en el volumen vacío que va quedando en el suelo.

*** En este caso asumimos este error porque el volumen de la muestra A1 lo obtenemos directamente a partir del volumen interno del recipiente, cuya incertidumbre, en el peor de los casos, consideramos no es mayor de ± 1 cm³.

Los demás valores de error se han obtenido aplicando propagación de errores.

Para la medición de la tasa de cuentas se usó un contador Eurocard, conectado a la salida de pulsos del Saphymo, procediéndose a efectuar mediciones de las cuentas en periodos de 100 s, con lo cual los valores de tasa alcanzaron un error del orden del ± 0,6% (98,8% de confiabilidad).

Se han llevado a cabo una serie de mediciones de las tasas de cuentas sobre las muestras ya conocidas, previo a la medición de sus densidades, variándose tanto la distancia fuente-detector como el gap de aire. Estos datos se representan en las figs. 2-8.

INTERPRETACION DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

De las muestras C2, sólo consideramos las C2.0 y C2.15 dado que las C2.30 y C2.45 dan señales muy similares a las de la muestra C2.15; esto se explica por los valores de sus densidades, las cuales no se diferencian entre sí más allá de $0,05 \text{ g/cm}^3$.

En la fig. 2 se representa la relación entre tasa de cuentas, en c/s, versus distancia fuente-detector para las muestras C2.0, A1, C2.15 y C1, respectivamente. Los resultados experimentales están en acuerdo razonable con curvas teóricas calculadas por otros autores (ecuación (5.8) de la referencia /3/). El modelo teórico de la ref. /3/ puede ser mejorado para reproducir las relaciones entre tasa de cuentas, distancia fuente-detector y gap de aire encontradas experimentalmente.

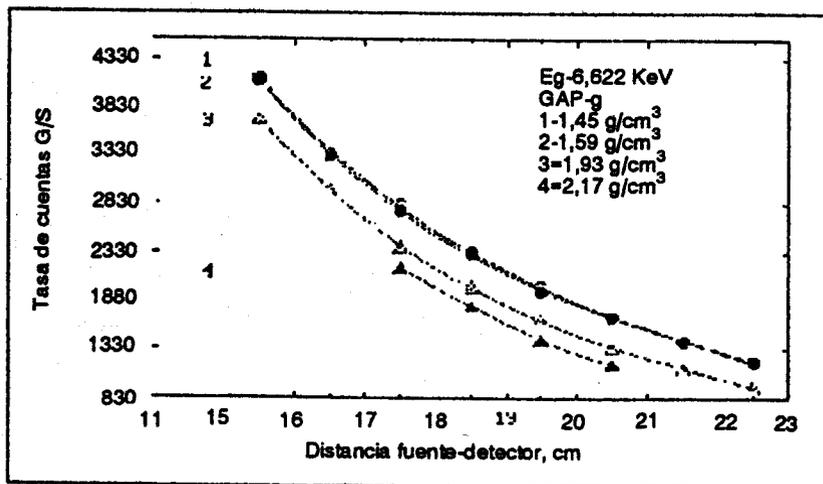


Fig. 2. Curvas de tasa de cuentas versus distancia fuente-detector para varias densidades.

Las figuras 3, 4 y 5 muestran la relación entre razón de cuentas y gap de aire, para las muestras consideradas. Para cada muestra se evaluó el cociente de la tasa a un gap determinado G entre la tasa a un gap cero. El resultado, como puede apreciarse, son curvas que tienen un máximo de tasa para un cierto gap. Si bien los máximos no se producen, para cada distancia fuente-detector, a un mismo gap de aire, existe bastante semejanza entre ellos; así por ejemplo, para una distancia de 18,5 cm (fig. 3), el máximo está en $G \approx 35$ mm; para 19,5 cm (fig. 4), en $G = 40$ mm; y para 20,5 cm (fig. 5), en $G = 45$ mm.

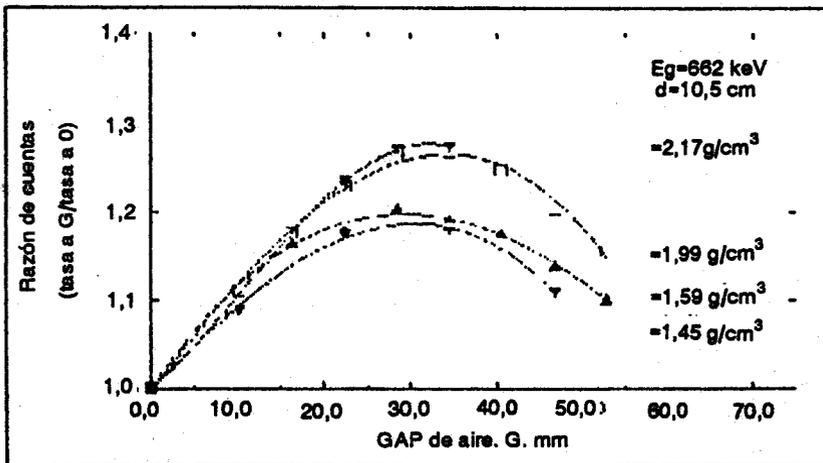


Fig. 3. Relación entre razón de cuentas y el gap de aire para varias densidades.

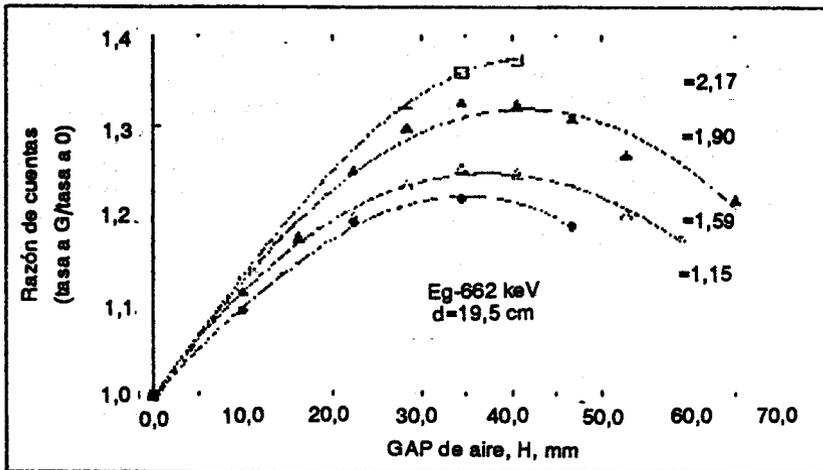


Fig. 4. Relación entre razón de cuentas y el gap de aire para varias densidades.

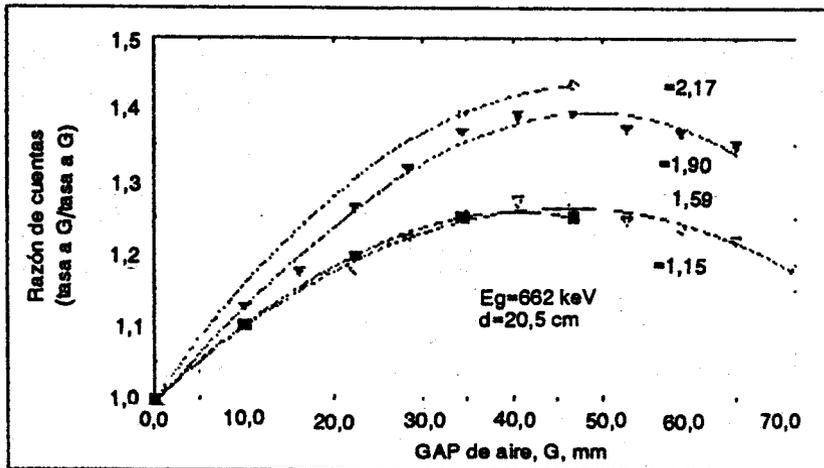


Fig. 5. Relación entre razón de cuentas y el gap de aire para varias densidades.

Observando los datos experimentales se nota que existe una relación lineal entre gap de aire y distancia fuente-detector con respecto a los máximos de tasas de cuentas. Los gaps óptimos para las diferentes distancias fuente-detector 17,5; 18,5; 19,5 y 20,5 son 28,4; 34,4; 40,5 y 46,8, respectivamente.

En la fig. 6 se muestra la gráfica de la razón de tasa al gap óptimo y tasa a gap cero versus densidad. De las cuatro curvas mostradas se considera la más adecuada aquella que es más lineal a fin de estar de acuerdo con el resultado reportado en /1/ (fig. 17). En consecuencia, los parámetros geométricos más adecuados para nuestro medidor son:

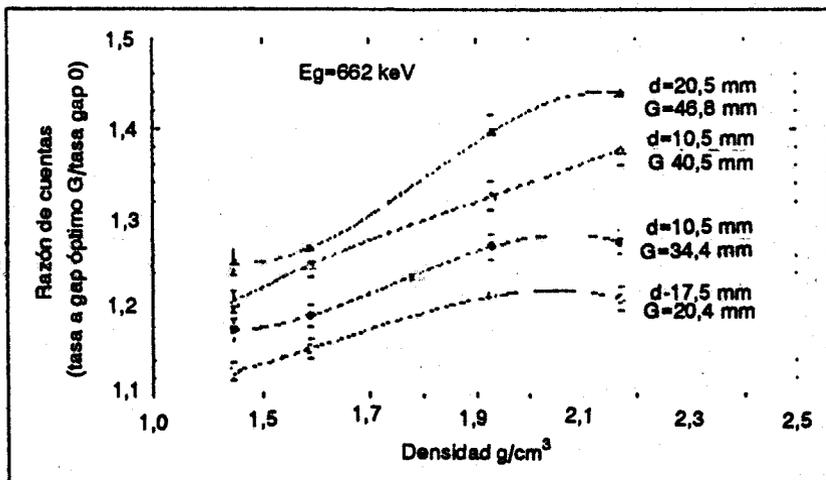


Fig. 6. Relación entre razón de cuentas y densidad para varias distancias fuente-detector.

distancia fuente-detector = 19,5 cm
gap de aire = 40,5 mm

Las barras de error mostradas en las curvas de la fig. 6 son del orden del $\pm 1\%$, y han sido obtenidas mediante propagación de errores de la razón $n(G)/n(0)$, en donde $n(G)$ es la tasa a gap óptimo, y $n(0)$ es la tasa a gap cero.

La fig. 7 muestra únicamente la relación anterior para distancia fuente-detector = 19,5 cm y gap = 40,5 mm. se ha utilizado regresión lineal de primer orden para obtener una correlación sencilla entre la razón de tasas y la densidad. Los coeficientes de la regresión son: $a_0 = 0,87154$, $a_1 = 0,23443 \text{ cm}^3/\text{g}$, con una confiabilidad del 99,85 %. Considerando un error máximo de $\pm 0,02$ en la razón $n(G=40,5 \text{ mm})/n(G=0)$, se obtiene una resolución = $0,18 \text{ g/cm}^3$.

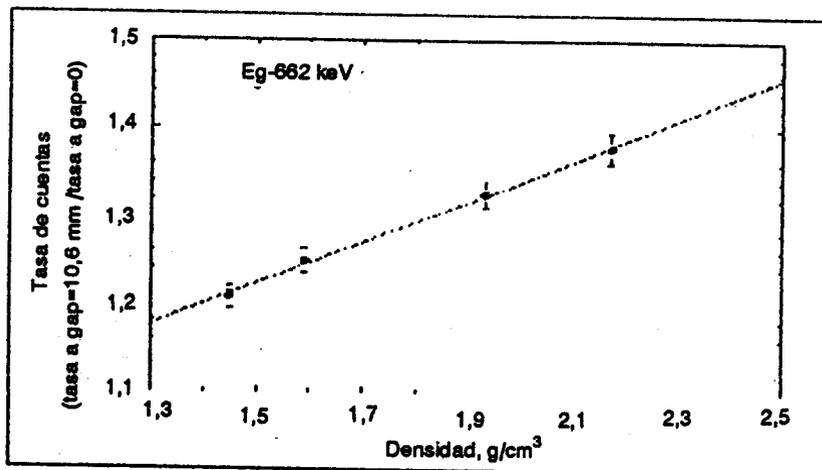


Fig. 7. Relación entre razón de cuentas y densidad para distancia fuente-detector=19,5 cm y gap de aire=40,5 mm.

En la fig. 8 se muestra la relación entre tasa de cuentas versus densidad para las condiciones geométricas óptimas. En este caso también se ha utilizado regresión lineal de primer orden, lo cual da una recta de coeficientes $a_0 = 3106,4 \text{ c/s}$ y $a_1 = -797,43 \text{ (c/s)/(g/cm}^3\text{)}$, con una confiabilidad del 99,4 %. Asimismo, puede apreciarse en la fig. 8 la curva de sensibilidad relativa $S_r = (\delta n/n)/(\delta o/o)$, donde $\delta n/n$ es el cambio relativo en la tasa de cuentas y $\delta o/o$ es el cambio relativo en la densidad.

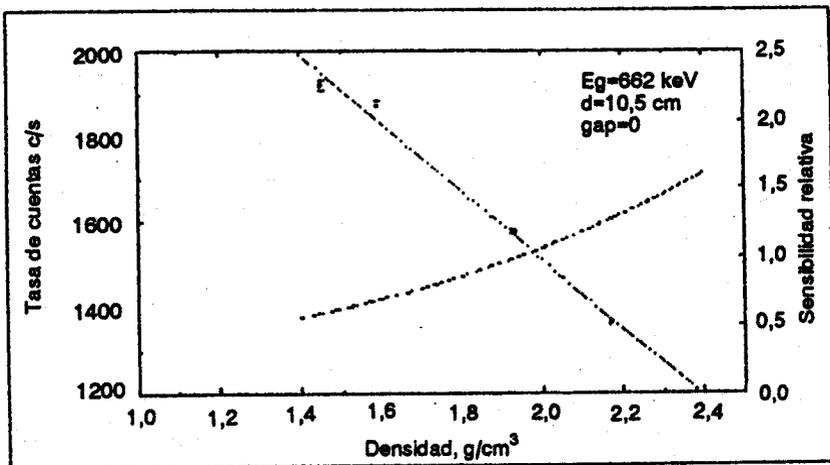


Fig. 8. Relación entre tasa de cuentas y densidad. Curva de sensibilidad relativa.

CONCLUSIONES

Se ha construido un medidor gamma de densidad de suelos con geometría que considera mediciones de tasa de cuentas para dos gaps de aire, según sugiere en la ref. /1/.

Los valores óptimos de distancia fuente-detector y gap de nuestro medidor son muy cercanos a los de otros medidores /1, 2/.

La recta de la fig. 7 resulta ser la curva de calibración de nuestro medidor, usando la técnica del gap de aire.

La fig. 8 es la forma típica de representar la curva de calibración de un medidor de densidad, es decir, la relación entre tasa de cuentas versus densidad, para un número relativamente grande de muestras de diferentes composiciones químicas, densidades y contenidos de humedad, como puede apreciarse en /2/. Sin embargo, en nuestro caso no se han dado estas condiciones por lo que no recomendamos usar esta curva dado el número reducido de muestras empleadas.

La resolución de $0,18 \text{ g/cm}^3$ que se ha obtenido para el instrumento, y el error de $\pm 0,09 \text{ g/cm}^3$ para cada valor de densidad obtenida a partir de la curva de calibración, no representa el mejor resultado; sin embargo debemos resaltar que esto es debido fundamentalmente al escaso número de muestras que hemos utilizado. Consideramos que con una cantidad adecuada de muestras de diversa composición así como un mejor procedimiento de compactación de las mismas, se podrán disponer de muestras suficientes para obtener mejores curvas de calibración.

Los resultados obtenidos de blindaje, distancia fuente-detector y gap de aire óptimos pueden ser usados para diseñar un MGDS que pueden ser usado para dar servicio rutinario, siempre que se considere en el diseño a la fuente de Cs-137 de 20 mCi y al medidor de centelleo Saphymo. En este caso deberá obtenerse la curva de calibración utilizando un conjunto adecuado de muestras.

AGRADECIMIENTOS

Debo expresar mi agradecimiento a todas las personas que con su colaboración hicieron posible la ejecución del presente trabajo experimental; en especial a los Drs. Aurelio Arbildo y Modesto Montoya por mostrarse dispuestos en todo momento a discutir el problema y buscar soluciones, al Ing. Humberto Huapaya por el asesoramiento en la selección y preparación de las muestras, al Sr. Pardo de Servicios Generales por su buena voluntad en la construcción del porta-blindaje, y a los amigos de la Planta de Producción de Radioisótopos por su destreza en el acondicionamiento del blindaje de la fuente.

BIBLIOGRAFIA

- [1] W.F. Heinz and C.A. Engelbrecht, Comparison of Monte Carlo calculations of the parameters governing the response of the nuclear soil density gauge with experimentally obtained values; Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics, Proceedings of a Symposium, Warsaw, 18-22 October 1965, Vol. II, OIEA, 1966.

- [2] **Commercial Portable Gauges for Radiometric Determination of the Density and Moisture Content of Building Materials, A Comparative Study, Technical Reports Series No. 130, OIEA, Vienna, 1971.**
- [3] **G.E. Maggio, Diseño de Instrumentos Nucleares para Uso Industrial, Informe, Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, 1988.**
- [4] **E. Obando, J.E. Torres y N.J. Moreno, Medición de Densidad y Humedad de Suelos empleando Técnicas Radiactivas y su aplicación en las Obras Civiles, Nucleares 2(3), Ene.-Jun., 1987, IAN.**
- [5] **A. Garrido, Consideraciones generales para la medición de suelos por retrodispersión gamma, Informe, G.I.D.-PROIN, IPEN, Junio 1990.**

