



XA04N0957

**CALCULO DE DOSIS ABSORBIDA PARA CONTAMINACION EN PIEL IMPARTIDA POR RADIACION BETA MEDIANTE EL CODIGO VARSKIN MODIFICADO PARA 122 ISOTOPOS DE INTERES PARA MEDICINA NUCLEAR, PLANTAS NUCLEARES E INVESTIGACION**

JOSÉ TRINIDAD ALVAREZ ROMERO

Depto. de Metrología.

ININ.

Apartado Postal 116-006 , C.P. 01141.

**1. RESUMEN.**

En este trabajo se presenta la implementación de una modificación del código VARSKIN para cálculo de dosis absorbida por contaminación en piel impartida por campos de radiación externos generados por emisores Beta [ 1,1987 ; 2, 1987 ].

Los datos de entrada fundamentales del código estan en una base de datos denominada BETADAT, la cual contiene : nombre del isótopo, energía promedio, distancia 90-porcentil, y valores de la función de distribución de dosis escalada. Esta base contempla 122 isotopos de interés en medicina nuclear, plantas nucleares e investigación; a diferencia de los 75 que originalmente contempla para medicina nuclear e investigación.

La modificación consiste en la inclusión de 47 isótopos de interés para Plantas Nucleares para la evaluación de dosis en piel generada por "partículas calientes". El criterio para adicionar estos isótopos es el parámetro de correlación F y la energía promedio de la(s) partícula(s) Beta, con relación a los 75 isótopos del código original [ 2, 1987 ].

La metodología del cálculo de la dosis del código VARSKIN se basa en la interpolación , ( e integración de las geometrías de interés : fuentes puntuales o planas ), de las funciones de distribución de dosis escaladas en agua para fuentes puntuales Beta y electrones, tabuladas por Berger [ 3, 1971 ].

El cálculo de estas funciones de distribución de dosis se basan a su vez en la teoría de la dispersión múltiple para electrones desarrollada por Spencer [ 4, 1955 ; 5 , 1959 ].

Los datos necesarios para la ejecución del código son : isótopo(s), profundidad de la dosis, actividad(es) del(os) isótopo(s), tipo de geometría ( puntual o plana ), radio de la fuente, y tiempo de integración de l(os) isótopo(s); pudiendo ejecutar combinaciones de hasta cinco radionucleidos.

Este programa se implemento en Fortran 5, para el sistema Cyber 980 del centro de computo del ININ, mediante el programa fuente

FFSKIN y el ejecutable en lenguaje binario BFFSKIN ; siendo el tiempo máximo de ejecución de 5 minutos.

Finalmente se presenta una breve discusión de los resultados para su interpretación y uso con fines de protección radiológica (aseguramiento de dosis en relación a los efectos biológicos considerados).

## 2. INTRODUCCION .

Una de las labores del Laboratorio Secundario de calibración dosimétrica es la asesoría en la evaluación y cálculo de dosis impartida por fuentes de radiación externa.

En particular en la Sala de Calibración Alfa-Beta se han venido desarrollando técnicas y procedimientos que contemplan el aseguramiento de la calidad de los servicios brindados, fundamentalmente : calibración radiológica de medidores de radiación cargada para la evaluación de superficies contaminadas [ 6, 1990 ], construcción de curvas de extrapolación para la dosimetría de haces de radiación beta externos de energías altas, calibración radiológica de aplicadores oftalmológicos, evaluación de contaminación superficial para emisores Alfa y/o Beta ; de acuerdo con las normas internacionales o normas nacionales que la comunidad científica internacional reconoce como recomendables, respectivamente para las técnicas y servicios mencionados.

Sin embargo observamos que pese a los logros, existen lagunas que es necesario ir cubriendo para poder brindar un servicio adecuado a los usuarios de radiaciones ionizantes en sus diferentes campos de aplicación ya sea de investigación, médico o industrial.

Concretamente se vislumbraba la necesidad de contar con una metodología confiable y aprobada por la comunidad científica de la dosimetría, para poder calcular dosis absorbida en piel generada por contaminación externa de emisores Beta, ya que por un lado se brinda el servicio de calibración radiológica de medidores de radiación empleados en el monitoreo de superficies contaminadas y por el otro se cuenta con un procedimiento para la evaluación de la contaminación superficial .

En el primer caso el parámetro más importante que se le da al usuario es la eficiencia absoluta de su instrumento para diferentes emisores Beta y en el segundo, podemos relacionar la respuesta del instrumento dada en unidades de cuentas o eventos en un determinado intervalo de tiempo con la actividad superficial de la fuente de contaminación mediante el uso del concepto de eficiencia de la fuente [ 7 , 1987 ].

Por lo cual cabe la pregunta: ¿Qué dosis absorbida en piel imparte la fuente de contaminación, conocida su actividad superficial?

Determinada la dosis absorbida podemos remitirnos a las recomendaciones nacionales o internacionales para limitación de dosis a través de sus diferentes conceptos y definiciones como lo son : niveles de acción, registro o contaminación o aseguramiento de dosis para evaluar los efectos no estocásticos o estocásticos producidos por la fuente de contaminación.

Una vez presentado este contexto pasaremos a realizar algunas consideraciones sobre la fisiología de la piel para precisar las recomendaciones de limitación de dosis para este tejido.

### 3. FISILOGIA DE LA PIEL.

La piel es uno de los tejidos más grandes del cuerpo, por peso hace cerca del 16 % del peso total del cuerpo, esta tiene muchas funciones diferentes, sirve de cubierta protectora del cuerpo para prevenir la desecación, excreta varias sustancias, recibe la estimulación del ambiente externo, y toma parte en la termoregulación y balance de agua del organismo.

#### 3.1 Tejidos de la piel.

La piel consiste principalmente de dos tipos de tejido la epidermis o epitelio superficial y el tejido conectivo subyacente llamado dermis. La epidermis consiste de un número de capas de células que difieren en su estructura y función , la capa más inferior de células del epidermis ( usualmente de una sola célula de espesor ) es la capa germinal o capa Basal, la cual se encuentra entre la más radiosensitivas del cuerpo humano, ya que ahí se realiza el proceso de mitosis para la renovación y reconstrucción de la epidermis.

Los valores publicados para el espesor de la epidermis varían desde 18 hasta 1377  $\mu\text{m}$  dependiendo de la parte del cuerpo y el sexo del individuo. En el ICRP 23 ( 1975 ), el cuerpo es dividido en tres regiones, cada una con diferente espesor medio de la epidermis : tronco del cuerpo con 40  $\mu\text{m}$ , las extremidades ( piernas, brazos, cuello ) con 80  $\mu\text{m}$  y las palmas de las manos y plantas de los pies con 400  $\mu\text{m}$ . Sin embargo, las recomendaciones del ICRP 26 ( 1984 ) toman como una profundidad representativa de la células germinales, es decir un espesor promedio del epidermis en el rango de 50 a 100  $\mu\text{m}$ , ( 5 - 10  $\text{mg. cm}^2$  ), con un valor recomendable en 70  $\mu\text{m}$ , ( 7  $\text{mg.cm}^2$  ).

Estudios más reciente realizados por el Comité científico No. 80 sobre Radiobiología de la piel [ 8 , 1986 ], aconseja cambiar esta recomendación de 70  $\mu\text{m}$  por la de 40  $\mu\text{m}$  . Aunque éste es aún un tema polémico.

Las capas más externas de la epidermis son continuamente exfoliadas de la superficie de la piel y son reemplazadas por las células que surgen de la capa de células basales. Las células

producidas por la células basales son desplazadas hacia niveles más altos por la generación de nuevas células abajo de ellas. Como las células se mueven hacia la superficie de la piel, ellas acumulan queratina en su citoplasma hasta que éste remplaza todas las actividades metabólicas del citoplasma, entonces la célula muere y su núcleo y organelos desaparecen. Este proceso descrito se denomina citomorfosis de las células malpighianas, el cual toma de 10 a 30 días, con un promedio de 17.7 días.

La epidermis también contiene vellos y folículos del vello, cada folículo se extiende más allá de la profundidad normal de las células germinales hasta llegar a la dermis. Una capa de células germinales que es continua con el resto de la epidermis rodea al folículo y se extiende abajo de la dermis. Si la capa germinal más externa ha sido dañada, las células germinales que rodean al folículo son usadas para reparar el área dañada.

La dermis no contiene capa de células germinales que continuamente la reemplazan, lo cual hace que ésta sea menos sensitiva a las radiaciones ionizantes, sin embargo se ha sugerido que el daño a la dermis es responsable del fenómeno de "segunda onda" y ulceración, sin embargo esto aún no es claro ya que radiación ultravioleta y beta de baja energía pueden producir ulceración, sin embargo estas radiaciones depositan una energía pequeña en la dermis.

### 3.2 Respuesta de la piel a la radiación.

La piel muestra ambos efectos los estocásticos y no estocásticos a la radiación ionizante. Los efectos no estocásticos resultan en un daño a la piel pero no en la inducción de cancer y la magnitud de la respuesta puede ser predicha basados en el conocimiento de la dosis y el área expuesta. Los cambios estocásticos son probabilísticos, y finalmente conducen a la inducción del cancer

Cuatro niveles de daño han sido identificados para los cambios no estocásticos en la piel: eritema, descamación seca, descamación húmeda, y ulceración.

La respuesta no estocástica de la piel a la radiación ionizante depende de la cantidad de daño a la capa basal. El grado de la respuesta es influenciado por la dosis, la energía, el tipo de radiación y el tamaño de la región irradiada. El nivel de daño parece estar vinculado con la posibilidad de la capa de células basales para reparar el área afectada. El proceso de reparación es afectado por el tamaño del área de la piel irradiada y está relacionado con la capacidad de las células basales a regenerarse. La reparación de un área de piel irradiada involucra la proliferación de células basales sobrevivientes dentro del campo de irradiación y la proliferación de células basales no expuestas en el perímetro del sitio irradiado.

Para una cantidad dada de radiación, cuando el tamaño de campo *decrece*, la contribución a la recuperación de las células sobrevivientes de la periferia del área dañada llegará a ser importante. Si el campo es suficientemente pequeño, las células del epitelio germinal dentro del campo podrán totalmente ser aniquiladas y el nivel de daño será inexistente o bajo, debido a que será reparado por la proliferación de células basales en los contornos del campo.

Hay un radio crítico  $R_c$ , en el cual la células basales de la periferia no pueden reparar y cubrir las células basales antes que la células dañadas sean desalojadas. Este radio crítico puede ser calculado del tamaño de la célula y de la tasa de reproducción de las mismas y se ha encontrado a ser del orden de 0.43 cm, con un área crítica aproximadamente de 0.5 a 1.0  $\text{cm}^2$ , este valor ha sido verificado experimentalmente [ 1, 1987 ].

#### 4. CONSIDERACIONES TEORICAS.

##### 4.1 Teoría de Spencer.

Como se mencionó en el resumen, los cálculos de la dosis absorbida en el código VARSKIN se basán en las Tablas de distribución de dosis absorbida alrededor de fuentes puntuales de electrones y partículas Beta en agua desarrolladas por Berger para el Comité de dosis de radiación interna médica [ 3 , 1971 ].

Estas tablas a su vez tienen su origen en la teoría de dispersión múltiple para electrones elaborada por Spencer [ 4, 1955 ] y las respectivas tabulaciones de funciones de distribución de dosis alrededor de fuentes planas y puntuales en carbón, realizadas por Spencer [ 5, 1959 ]. Las funciones de distribución para fuentes de partículas Beta son calculadas como promedios pesados de las funciones de distribución de Spencer para diferentes energías de la fuente, el factor de peso es proporcional al espectro de la partícula Beta de interés.

Esta teoría consiste en resolver la ecuación de transporte de Boltzmann para determinar la penetración y difusión de electrones en un medio, considerando las deflecciones angulares debido a las dispersiones elásticas por interacción coulombiana con el núcleo y las pérdidas de energía debido a la dispersión inelástica por la interacción coulombiana con los electrones atómicos. Las deflecciones angulares son calculadas de acuerdo a la sección transversal de dispersión de Mott y las pérdidas de energía son tratadas con el uso de la teoría de poder de frenado de Bethe en la aproximación de frenado continuo ( continuous slowing down -approximation, c.s.d.a) la cual supone que la pérdida de energía del electrón se considera ser una función única de la longitud de la trayectoria viajada. Como información final diremos que la ecuación de difusión se resuelve mediante el método de los momentos, que consiste en desarrollar la función de interés en polinomios de Legendre y expresar dicha ecuación de difusión en

un sistema de ecuaciones que estan en términos de las relaciones de recurrencia que existen para las derivadas consecutivas de estos polinomios. Esta metodología es diferente de otras que resuelven la ecuación de difusión con el método de Monte Carlo [ 9, 1986 ].

La aplicabilidad de esta metodología se limita a medios que son homogéneos y sin fronteras ( infinitos ). Las principales aproximaciones del método son el despreciar las fluctuaciones en las pérdidas de energía del electrón ( straggling ) el desprecio de la radiación de frenado ( bremsstrahlung ), y el desprecio del transporte de energía cinética por electrones secundarios.

A continuación se dará un conjunto de definiciones y conceptos que son de suma importancia en la dosimetría Beta, cuyo conocimiento nos permitirá entender la información de la funciones de distribución de dosis presentadas por Spencer y Berger, que son empleadas en el Código VARSKIN y otros códigos de cálculo.

#### 4.2 Conceptos y definiciones usadas por Berger en el No. 7 del MIRD [ 3, 1971 ].

4.2.1 Fracción Absorbida Específica para fuentes monoenergéticas. Sea  $R(x, E_0)$  la rapidez de dosis absorbida a una distancia  $x$  de una fuente puntual isotrópica que emite electrones de energía  $E_0$ , de acuerdo con [ 3, 1971 ], la rapidez de dosis absorbida se expresa como

$$R(x, E_0) = A n K E_0 \phi(x, E_0) \quad ( 1 )$$

en la cual  $\phi(x, E_0)$  es la fracción absorbida específica para una fuente isotrópica, es decir, la fracción de la energía emitida que es absorbida a una distancia  $x$  por unidad de masa del medio, las otras cantidades de ( 1 ) tienen el siguiente significado:

$R(x, E_0)$  : rapidez de dosis absorbida para el medio considerado, rad/s

$\phi(x, E_0)$  : la fracción absorbida específica,  $g^{-1}$

$x$  : es la distancia del punto considerado a la fuente, cm

$E_0$  : es la energía inicial de las partículas emitidas, Mev

$A$  : es la actividad de la fuente,  $Bq s^{-1}$

$n$  : es el número de electrones de energía  $E_0$  emitidos por desintegración

$k = 1.6 \times 10^{-8} g \text{ rad/MeV}$ .

La cantidad  $4\pi x^2 \rho \phi(x, E_0) dx$  es la fracción de la energía emitida que es absorbida en un cascarón esférico de radio  $x$  y espesor  $dx$  en un medio con una densidad  $\rho$  ( $g \text{ cm}^{-3}$ ). Toda la energía emitida debe ser absorbida en alguna parte del medio, suponiendo que las pérdidas de radiación en las fronteras del medio son despreciables, con lo que se obtiene la condición de normalización:

$$4\pi r^2 \int_0^m x' \psi(x, E_0) dx = 1 \quad (2)$$

**4.2.2 Distribución de la disipación de la energía.**  $J(u, E_0)$ : es la distribución de la energía disipada por los electrones primarios más que la energía absorbida en el medio,  $J(u, E_0)$  es tabulada por Spencer, [ 5, 1959 ], siendo esta proporcional a la energía disipada por los electrones en capas esféricas de radio  $u$  alrededor de la fuente, cuya fórmula es:

$$J(u, E_0) = 4\pi x^2 \rho \Phi(x, E_0) ( E_0/L(E_0) ) \quad (3)$$

donde :

$L(E_0) = \langle dE/dx \rangle$ , es la energía promedio perdida por un electrón por unidad de longitud, suponiendo a la partícula con una energía inicial  $E_0$ .

$u = x/r(E_0)$ , es la distancia desde la fuente expresada como una fracción del rango inicial  $r(E_0)$ .  $L(E_0)$  está en unidades de MeV  $cm^{-1}$  y  $r(E_0)$  en unidades de cm.

El rango es calculado bajo la aproximación c.s.d.a y es expresado por la fórmula:

$$r(E_0) = \int_0^{E_0} ( dE/L(E) ) \quad (4)$$

La introducción del factor  $E_0/L(E_0)$  en la ecuación ( 3 ), junto con el uso de la variable  $u$  para el escalamiento de distancias tienen como finalidad dejar implícita la dependencia de  $J(x, E_0)$  en la variable  $E_0$ .

**4.2.3 Fracción absorbida específica para una fuente de partículas Beta:** Sea  $S(E_0)dE_0$  la fracción de las partículas emitidas por la fuente que tienen energías iniciales entre  $E_0$  y  $E_0 + dE_0$ . La rapidez de dosis absorbida  $R(x)$  de tal fuente se obtiene multiplicando la ecuación (1) por el espectro de la fuente  $S(E_0)$  e integrando sobre todas las energías del espectro, de aquí :

$$R_b(x) = A n_b k \int_0^{E_{max}} E_0 S(E_0) \Phi(x, E_0) dE_0 \quad (5)$$

donde  $E_{max}$  es la energía máxima del espectro y  $n$  es el número de partículas Beta emitidas por desintegración. Expresando ( 5 ) de la misma forma que ( 1 ), tenemos :

$$R_\beta(x) = A n_\beta k E_{av} \Phi_\beta(x) \quad (6)$$

la energía promedio de espectro Beta está dada por:

$$E_{av} = \int_0^{E_{max}} E_0 S(E_0) dE_0 \quad (7)$$

y finalmente la fracción absorbida específica para la fuente de partículas Beta, es calculada por la fórmula :

$$\Phi_b(x) = \int_0^{E_{max}} (E_0 / E_{av}) S(E_0) \Phi(x, E_0) dE_0 \quad (8)$$

Puede ocurrir que el espectro de las partículas Beta sea complejo y consista de varias fuentes elementales con diferentes energías máximas y formas espectrales. La fuente también puede consistir de una mezcla de varios radionucleidos, por ejemplo, combinaciones padre-hijo, con diferente espectro. Las distribuciones de dosis absorbida para tales fuentes con espectro complejo puede ser obtenida usando las relaciones :

$$n_2 = \sum_i n_2^{(i)}$$

$$E_{av} = \sum_i (n_b^{(i)} / n_b) E_{av} \quad (9)$$

$$\Phi_\beta(x) = \sum_i (n_\beta^{(i)} / n_\beta) \Phi_\beta^{(i)}(x)$$

Donde el índice i, se refiere a la i-ésima componente elemental de la fuente.

#### 4.2.4 Distancias porcentiles

Sea  $\phi(x)$  la fracción absorbida, lo cual significa en el presente contexto la fracción de la energía emitida que es absorbida en una esfera de radio x alrededor de una fuente puntual. Para el propósito de tabulación es conveniente considerar un conjunto de radios  $x_p$  correspondiente a un conjunto de fracciones absorbidas,

$$\phi(x) = p/100, \quad p = 5, 10, 15, \dots, 95 \quad (10)$$

Estos radios  $x_p$  serán denominados distancias porcentiles, definidas por la ecuación :

$$\phi(x) = 4\pi\rho \int_0^{x_p} x^2 \Phi(x, E_0) dx = p/100 \quad (10a)$$

para una fuente monoenergética y :

$$\Phi_b(x) = 4\pi\rho \int_0^{x_p} x^2 \Phi_\beta(x, E_0) dx = p/100 \quad (10b)$$

para una fuente de partículas Beta, en particular la distancia  $x_{90}$  es un parámetro útil que indica la distancia desde la fuente dentro de la cual el 90% de la energía emitida es absorbida.



**4.2.5 Relación entre distribuciones de dosis absorbida en medios diferentes.** Cuando la misma fuente de electrones o fuente de partículas Beta es colocada en dos medios con números atómicos ligeramente diferentes, las distribuciones de dosis absorbida resultantes tienen una forma muy similar. Esta similitud ha sido la base para el proceso de escalamiento que a menudo ha sido usado para convertir las distribuciones medidas en aire a fin de hacerlas aplicables a medios equivalentes a tejido. Los índices 1 y 2 indican los dos medios, su relación de escalamiento toma la forma :

$$\Phi^{(2)}(x, E_0) = (a_{21})^3 (\rho_2/\rho_1)^2 \Phi^{(1)}(y, E_0) \quad (11a)$$

para fuentes, monoenergéticas y:

$$\Phi_{\beta}(x) = (a_{21})^3 (\rho_2/\rho_1)^2 \Phi_{\beta}(y) \quad (11b)$$

para fuentes de partículas Beta donde :

$$y = a_{21}(\rho_2/\rho_1) x \quad (11c)$$

La cantidad  $a_{21}$  es denominada el factor de atenuación relativo. Este factor es una constante del material, independiente de la energía de las partículas o de la distancia a la fuente, siempre y cuando los números atómicos promedio de los materiales sean lo suficientemente cercanos. Cuando los medios difieren únicamente en su densidad, el factor de atenuación relativo es la unidad, y la ley de escalamiento es exacta. El factor  $(a_{21})^3 (\rho_2/\rho_1)^2$  del lado derecho de las ecuaciones (11a) y (11b) ha sido introducido para satisfacer la condición de normalización de la ecuación (2) para la fracción absorbida específica.

Se observa de las ecuaciones (11a) y (11b) que el factor de escalamiento  $a_{12}$  necesario para expresar la fracción absorbida específica en el medio 1 en términos del medio 2 es simplemente el recíproco de  $a_{21}$ . Además los factores de escalamiento los cuales relacionan las fracciones absorbidas específicas en tres medios diferentes no son independientes unos de otros y satisfacen la relación :

$$a_{21} = (a_{23} / a_{13}) \quad (12)$$

Es posible expresar la fracción absorbida específica como una función de la distancia a la fuente en unidades de masa, colocando  $\Phi(x) = \Phi(x_m)$  donde  $x_m = \rho x$ . Con este cambio de variables la ecuación (11) será:

$$\Phi^{(2)}(x_m) = (a_{21})^3 (\rho_2/\rho_1)^2 \Phi^{(1)}(a_{21}x_m) \quad (13)$$

**4.2.6 Distribución de dosis absorbida escalada:** Esta función se denotará por el símbolo F, es una cantidad adimensional la cual

es una función de la razón  $\xi = ( x/x_{90} )$ , es decir, la distancia desde la fuente al punto de interés como una fracción de la distancia 90-porcentil. La relación de la distribución de la dosis absorbida a la fracción absorbida específica es :

$$F(\xi, E_0) = 4\pi\rho x^2 \Phi(x, E_0) \left( dx/d\xi \right) = 4\pi\rho x^2 x_{90} \Phi(x, E_0) \quad ( 14a )$$

para una fuente monoenergética y

$$F_{\beta}(\xi) = 4\pi\rho x^2 \Phi_{\beta}(x) \left( dx/d\xi \right) = 4\pi\rho x^2 x_{90} \Phi_{\beta}(x) \quad ( 14b )$$

para una fuente de partículas Beta.

Si  $F^{(1)}(\xi, E_0)$  y  $F^{(2)}(\xi, E_0)$  son las funciones de distribución de dosis alrededor de la misma fuente monoenergética en dos medios diferentes, de la ley de escalamiento dada por la ecuación ( 11 ) se puede deducir::

$$F^{(1)}(\xi, E_0) = F^{(2)}(\xi, E_0) \quad ( 15a )$$

Análogamente para una fuente de partículas Beta :

$$F_{\beta}^{(1)}(\xi) = F_{\beta}^{(2)}(\xi) \quad ( 15b )$$

La dependencia funcional de las distribución de dosis en  $\xi$  es por lo tanto independiente de la composición de la densidad del medio bajo las cuales se aplica la ley de escalamiento.

## 5. METODOLOGIA DEL CODIGO VARSKIN.

### 5.1 Introducción.

El código Varskin calcula la dosis absorbida en las células basales de la piel suponiendo una fuente de contaminación con geometría puntual o plana ( circular ) en la superficie de la piel, de tal forma que la energía impartida por la radiación se deposita en las células de la piel inferiores a su superficie, pudiendo seleccionar la profundidad de la dosis a voluntad. Ver figura 1.

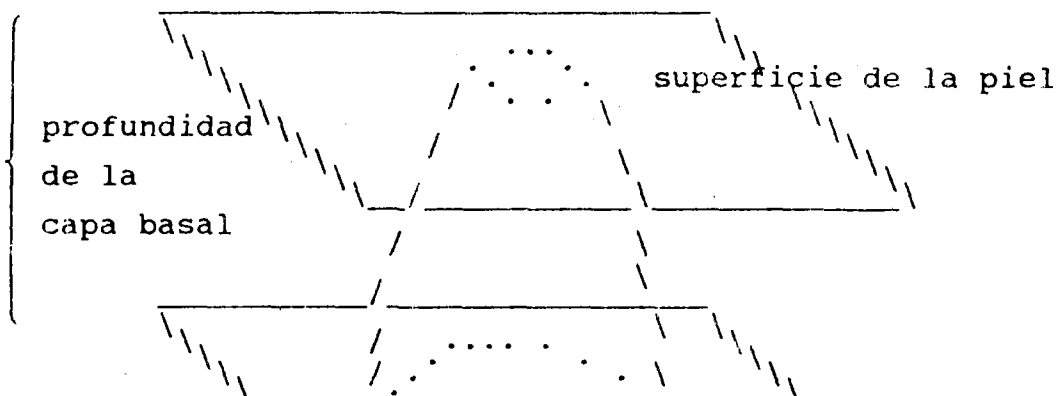




Fig 1a. Modelo de fuente plana circular .

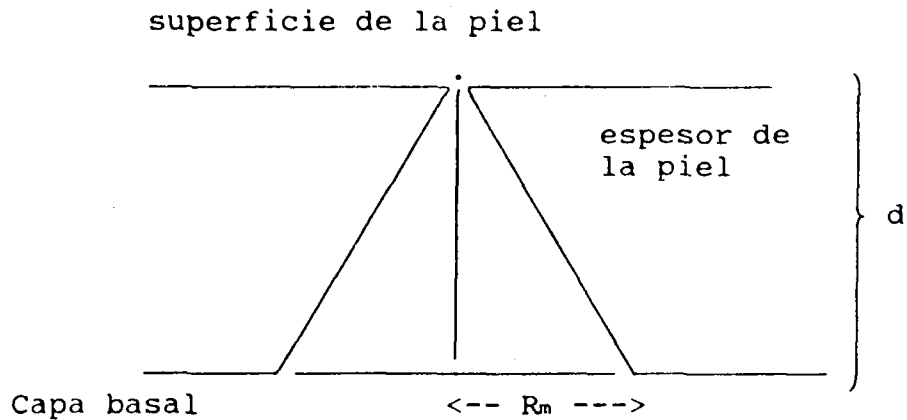


Fig. 1b Modelo de fuente puntual.

El cálculo de dosis absorbida se puede hacer simultáneamente hasta para una combinación de cinco nucleidos de los 122 del Anexo A, especificando la actividad de cada isótopo en unidades de micro-Curie por centímetro cuadrado o en Becquerelios además es necesario dar el tiempo de irradiación en segundos.

## 5.2 Fuentes puntuales.

El rango efectivo de los rayos Beta que atraviesan la piel puede ser tomado 1.8 veces la distancia X90, (noventa porcientil), cada nucleido genera un espectro de rayos Beta que penetra la piel a una distancia característica, ( figura 1b ). Este rango acoplado con el espesor de la piel determina el área de las células basales expuestas desde la fuente puntual. Donde  $R_m$  es el radio del disco de células basales expuestas y está dado por la siguiente expresión :

$$R_m = ( ( X90 \times 1.8 )^2 - d^2 )^{1/2} \quad ( 16 )$$

donde:

X90: es la distancia noventa porcientil.

d: espesor de la epidermis.

La dosis recibida en cada punto en el área de integración ( el área expuesta) es función del espectro de energía de los rayos Beta, la distancia radial  $R_m$  y el espesor  $d$ . Berger, [ 3, 1971 ], determina la distribución de energía absorbida alrededor de fuentes puntuales en agua, las cuales son escaladas a piel humana en el código VARSKIN. De tal manera que la dosis en el punto de interés  $X$ , está dada por la siguiente relación :

$$\text{dosis} ( X ) = A n k E_{ave} F_{\beta} ( X/X90 ) / ( 4 \pi \rho X^2 X90 ) \quad ( 17 )$$

donde:

A: actividad de la fuente.

n: número de rayos Beta emitidos por desintegración.

k: constante de conversión.

$E_{ave}$ : energía promedio emitida por los rayos Beta.

$F_{\beta}$ : función de distribución de dosis escalada a piel humana en unidades relativas a la distancia noventa percentil.

$\rho$ : densidad de la piel.

X: distancia de la fuente al punto de interés.

X90: distancia noventa percentil.

La dosis absorbida en la capa de células basales es calculada por VARSKIN para 26 puntos sobre dicha capa a una distancia  $R_m$  del eje de la fuente puntual, posteriormente se integran los datos sobre el área de la piel expuesta para determinar la dosis promedio. Estudios experimentales en piel de cerdo sugieren que en áreas de 1 cm<sup>2</sup> y mayores dosis del orden de 25 Gy o más resultarán en ulceración, la eritema se iniciará a dosis más bajas del orden de 3 a 6 Gy.

### 5.3 Fuentes Planas Circulares.

La dosis debida a una fuente con geometría de disco en cada punto del tejido basal se encuentra sumando la dosis en cada punto debida a la parte del disco que se encuentra en el rango de la fuente, (suponiendo la fuente homogénea). Ya que el rango de las Betas es limitado, las células bajo el centro de la fuente verán una dosis que equivale a la de una fuente plana infinita.

El área de la células basales expuesta es igual a la de un disco con un radio igual a la del rango de la fuente mas el radio de la fuente . La dosis en éstas células se calcula integrando la dosis debida a cada punto de la fuente plana.

Ejemplo de ejecución el Código VARSKIN se muestran en el Anexo B de este trabajo.

## 6. METODO PARA ADICIONAR NUCLEIDOS A LA BASE DE DATOS BETADAT.

### 6.1 Consideraciones Generales.

Originalmente el código VARSKIN contempla 75 isótopos de interés para la medicina nuclear, ya que parte de las funciones de distribución de dosis tabuladas por Berger para el MIRD, [3, 1971]. Sin embargo, la necesidad de calcular la dosis impartida por "partículas calientes" en las plantas nucleares condujo al grupo de Dosimetría de Union Electric Co, de St. Louis Mo. U.S, [2, 1987], a realizar una modificación de la base de datos original de tal manera que partiendo de dicha base inicial pudiera obtenerse información para 47 isótopos de interés en la industria nuclear e investigación. La incertidumbre lograda en los cálculos en relación a otros códigos de cálculo va desde el 1% hasta el 2.4%, (con un máximo de 16.4% para el Cl-36) para fuentes puntuales y del 3.4% hasta un 25.8 % para fuentes planas [2, 1987].

### 6.2 Agrupamiento de los Isótopos por Correlación.

El problema fundamental para el cálculo de dosis absorbida para los radionucleidos adicionales a los dados en el número 7 del MIRD, es determinar su función de distribución de dosis ( F ) escalada la que no es disponible actualmente, sin embargo puede determinarse correlacionando las características espectrales de estos isótopos con lo originalmente contemplados, con este objeto se clasifican los 47 isótopos a adicionarse en alguno de los tres grupos que fueron divididos los 75 radionucleidos originales :

Grupo I .- Emisores de positrones cuyos valores de  $F_b$  varían de forma única, como una función monótona creciente hasta un valor máximo a partir del cual se comporta como una función monótona decreciente.

Grupo II.- Emisores Beta con espectro simple, que emiten generalmente una Beta por desintegración o aquellos en la cual una Beta se lleva al menos el 95 % de la energía de la desintegración.

Grupo III.- Emisores Beta con espectro complejo, los cuales no caen en ninguno de los grupos anteriores, por ejemplo los emisores de positrones y Betas negativas.

### 6.3 Factor de Correlación.

Además de considerar la forma espectral que toma en cuenta la energía máxima de la desintegración es necesario tomar en cuenta en forma mas cuantitativa tal forma espectral, ésto se realiza mediante un parámetro denominado factor de correlación el cuales obtenido de la expresión de F:

$$F_b \propto [ E_0/E_{ave} ] [ 1/A n ( 2.1339 ) E_{ave} ] \quad ( 18 )$$

donde:

$E_0$  : energía máxima de la desintegración.

$An(2.1339) E_{ave}$  : Constante de dosis en equilibrio, ( $\Delta$ ).

De tal manera que el factor de correlación toma la forma :

$$F = ( E'_{max}/E_{ave} ) ( Co / \Delta ) \quad ( 19 )$$

donde:

$$E'_{max} = \sum_{i=1}^N ( n_i/n_b ) E_{oi} \quad ( 20 )$$

N: número de Betas por desintegración.

$n_i$ : intensidad de la i-ésima Beta.

$n$ : intensidad total de la Betas.

$E_{oi}$ : energía máxima de la i-ésima Beta.

$$Co = 1 + S/2 \quad ( 21 )$$

donde:

$$S = \sqrt{ 1 - ( z/137 )^2 } - 1 \quad ( 22 )$$

z: número atómico .

## 7. INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS .

Como puede observarse de los resultados presentados en el Anexo B, se presenta la dosis absorbida para una profundidad escogida en la cual se supone se encuentra el tejido Basal, A su vez se obtiene la dosis absorbida promediada para un área de 1.00 cm<sup>2</sup> y la dosis absorbida promedio para el área irradiada de acuerdo con el alcance de las partículas Beta. Posteriormente se presenta la distribución de dosis para la profundidad escogida, esta distribución de dosis se tabula en 26 puntos tomando como centro la fuente puntual o el centro de la fuente plana.

Cómo interpretar los resultados obtenidos por cualquier metodología de cálculo para radiación beta en contaminación de piel es un tema polémico, sin embargo siempre debemos considerar los siguientes factores :

- i. nucleidos presentes en la contaminación
- ii. el área blanco, tanto la irradiada como la usada en el cálculo
- iii. profundidad de las células basales
- iv. función de distribución de dosis

Considerando los dos tipos de efectos biológicos posibles se espera que los efectos estocásticos impliquen efectos probabilísticos a largo término sin un umbral en el que se manifiesten, un efecto no estocástico es un efecto biológico que tiene un umbral tal que haya un daño directo a células localizadas. Si se consideran los efectos no estocásticos entonces la dosis en el tejido realmente irradiado es importante, pero si los efectos estocásticos son la base del aseguramiento de dosis entonces la selección del área irradiada y la profundidad de las células basales son críticas.

En general el que tipo de efecto biológico debe considerarse importante en el aseguramiento de dosis, pero en el caso de considerar el tipo estocástico es recomendable tomar la dosis promediada en una área de  $1.0 \text{ cm}^2$ , pero si el tipo de efecto enfatizado es el no estocástico la dosis promediada en el tejido realmente irradiado es una aproximación recomendable.

## 8. REFERENCIAS.

- 1.- R.J. Traub, et al : NUREG-CR-4418, 1987.
- 2.- M.C. Willians ., Rad. Prot. Managt., 4, No.6, pp 25-34, 1987
- 3.- M.J. Berger, NM-MIRD, J. Nuc. Med., Supp. NO.5, Vol.12, 1987
- 4.- Spencer LV., Phys. Rev., 98, pp. 1597-1615, 1955.
- 5.- Spencer L.V., NBS-Monograph NO.1, 1959.
- 6.- Alvarez R. J.T, CMRI-LPSCD-5, ININ-Gerencia de Seguridad, Salazar, Edo. de Méx. Diciembre de 1990.
- 7.- ISO-10843, 1987.
- 8.- Roesch W.C., Rad. Prot. Dos. 14, (2), 91-93, 1986.
- 9.- Rohloff F., Rad. Prot. Dos., 14, (2), 161-168, 1986.

**ANEXO A :**

**Lista de Radionucleidos de la Base de Datos BETADAT.**

|        |         |          |        |         |            |        |
|--------|---------|----------|--------|---------|------------|--------|
| H-3    | C-11    | N-13     | C-14   | O-15    | F-18       | Na-22  |
| Na-24  | Mg-28   | Al-28    | P-32   | P-33    | S-35       | Cl-36  |
| Cl-38  | K-40    | Ar-41    | K-42   | K-43    | Ca-45Ca-47 |        |
| Sc-47  | Ca-49   | Sc-49    | CR-51  | Mn-52   | Mn-52m     | Fe-52  |
| Mn-54  | Co-56   | Mn-56    | Co-57  | Co-58   | Fe-59      | Co-60  |
| Cu-62  | Zn-62   | Ni-63    | Cu-64  | Zn-65   | Ga-68      | Se-73  |
| As-74  | As-76   | Kr-79    | Rb-81  | Br-82   | Rb-82      | Rb-84  |
| Kr-85  | Rb-86   | Y-87     | Kr-88  | Rb-88   | Y-88       | Sr-89  |
| Sr-90  | Y-90    | Sr-91    | Y-91   | Sr-92   | Y-92       | Zr-95  |
| Nb-95  | Zr-97   | Nb-97    | Mo-99  | Tc-99   | RU-103     | Ru-10  |
| 6      |         |          |        |         |            |        |
| Rh-106 | Ag-110m | Ag-111   | In-113 | Sn-113  | Cd-115m    | In-115 |
| m      |         |          |        |         |            |        |
| Sn-123 | Sb-124  | I-124    | Sb-125 | I-126   | I-129      | I-131  |
| Te-132 | I-132   | I-133    | Xe-133 | Cs-134  | I-134      | I-135  |
| Xe-135 | Cs-137  | Ba-140   | La-140 | Ce-141  | Ce-143     | Pr-14  |
| 3      |         |          |        |         |            |        |
| Ce-144 | Pr-144  | Pm-147   | Pm-148 | Pm-148m | Eu-154     | Eu-15  |
| 5      |         |          |        |         |            |        |
| Eu-156 | W-188   | Ir-192   | Au-198 | Hg-203  | Tl-204     | Tl-20  |
| 8      |         |          |        |         |            |        |
| PB-210 | Bi-210  | Pb-212   | Bi-212 | Pb-214  | Bi-214     | Ra-22  |
| 8      |         |          |        |         |            |        |
| Ac-228 | Th-234  | Pa-234m. |        |         |            |        |



1

PROGRAM VARSKIN

MC01

POINT SOURCE ON SKIN SURFACE.  
SKIN THICKNESS = .00700 CM.

SOURCE

|                                |                |          |          |          |
|--------------------------------|----------------|----------|----------|----------|
|                                | RADIONUCLIDE : | SR-90    | Y-90     | KH-106   |
| AVERAGE BETA ENERGY (MEV) :    |                | .190     | .935     | 1.411    |
| X-90 DISTANCE (CM) :           |                | .0787    | .5170    | .7920    |
| SRCE STRENGTH ( MICRCCI*SEC) : |                | 1.00E+03 | 1.00E+03 | 5.00E+02 |

ALL CELL DAMAGE OCCURS IN AN AREA WITH RADIUS = 1.426 CM

BETA DOSE AVERAGED OVER AN AREA OF SKIN  
AT THE BASAL LAYER:

| RADIUS<br>(CM) | AREA<br>(CM <sup>2</sup> ) | BETA<br>DOSE<br>(REM) |
|----------------|----------------------------|-----------------------|
| .5642          | 1.0000                     | 5.73                  |
| 1.4256         | 6.3846                     | .914                  |

1

CALCULATED BETA DOSES AT POINTS  
ON THE SKIN BASAL LAYER:

| HORIZONTAL<br>DISTANCE<br>(CM) | BETA<br>DOSE<br>(REM) |
|--------------------------------|-----------------------|
| .0000                          | 6700.                 |
| .0023                          | 5990.                 |
| .0091                          | 2310.                 |
| .0205                          | 596.                  |
| .0365                          | 184.                  |
| .0570                          | 66.6                  |
| .0821                          | 27.3                  |
| .1118                          | 12.6                  |
| .1400                          | 6.71                  |
| .1848                          | 4.06                  |
| .2201                          | 2.54                  |
| .2760                          | 1.61                  |
| .3205                          | 1.04                  |
| .3855                          | .675                  |

|        |      |
|--------|------|
| .4471  | .429 |
| .5132  | .265 |
| .5839  | .158 |
| .6542  | .092 |
| .7390  | .048 |
| .8234  | .025 |
| .9124  | .013 |
| 1.0059 | .007 |
| 1.1040 | .003 |
| 1.2066 | .001 |
| 1.3138 | .000 |
| 1.4256 | .000 |

PROGRAM VARSKIN

MU01

DISC SOURCE WITH RADIUS = .20000 CM.

SKIN THICKNESS

SOURCE

-----  
 RADIONUCLIDE : RU-106 RH-106  
 AVERAGE BETA ENERGY (MEV) : .010 1.411  
 X-90 DISTANCE (CM) : .0008 .7920  
 SRCE STRENGTH, MICROCI/CM^2 : 3.98E+01 3.98E+01

IRRADIATION TIME = 100. SEC.

ALL CELL DAMAGE OCCURS IN AN AREA WITH RADIUS = 1.626 CM

FOR RU-106 AND A SKIN THICKNESS OF .0040 CM.  
 THE BETAS ARE TOO WEAK TO PRODUCE ANY DOSE AT THE BASAL LAYER.

BETA DOSE AVERAGED OVER AN AREA OF SKIN  
 AT THE BASAL LAYER:

-----

| RADIUS<br>(CM) | AREA<br>(CM^2) | BETA<br>DOSE<br>(REM) |
|----------------|----------------|-----------------------|
| -----          | -----          | -----                 |
| .5642          | 1.0000         | 1.46                  |
| 1.6256         | 8.3018         | .186                  |
| 1.7841         | 9.9997         | .154                  |

CALCULATED BETA DOSES AT POINTS  
 ON THE SKIN BASAL LAYER:

-----  
 HORIZONTAL BETA

| DISTANCE<br>(CM)<br>----- | UNSE<br>(REM)<br>----- |
|---------------------------|------------------------|
| .0000                     | 9.49                   |
| .0160                     | 9.48                   |
| .0319                     | 9.44                   |
| .0611                     | 9.34                   |
| .0875                     | 9.00                   |
| .1111                     | 9.01                   |
| .1319                     | 8.78                   |
| .1500                     | 8.33                   |
| .1653                     | 7.87                   |
| .1778                     | 7.59                   |
| .1875                     | 6.72                   |
| .1944                     | 6.08                   |
| .1986                     | 5.10                   |
| .2000                     | 4.70                   |
| .2099                     | 2.80                   |
| .2346                     | 1.42                   |
| .2891                     | .755                   |
| .3584                     | .409                   |
| .4475                     | .220                   |
| .5564                     | .114                   |
| .6851                     | .055                   |
| .8336                     | .024                   |
| 1.0019                    | .008                   |
| 1.1900                    | .002                   |
| 1.3979                    | .000                   |
| 1.6256                    | .000                   |

