

UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

**Radiación natural en aire y suelos
de las islas Canarias occidentales**

Autor: Fernández de Aldecoa, José Carlos

Director: José Hernández Armas

Departamento de Medicina Física y Farmacología

ÍNDICE

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

I.1.- FUENTES NATURALES Y ARTIFICIALES DE RADIACIÓN

I.1.1.- INTRODUCCIÓN	2
I.1.2.- FUENTES NATURALES DE RADIACIÓN	3
I.1.3.- USO MÉDICO DE RADIACIONES IONIZANTES	13
I.1.3.1.- Uso médico con fines diagnósticos	13
I.1.3.1.1.- Radiodiagnóstico	14
I.1.3.1.2.- Medicina Nuclear	15
I.1.3.1.3.- Conclusiones	17
I.1.3.2.- Uso médico con fines terapéuticos	17
I.1.3.3.- Resumen	18
I.1.4.- USO BÉLICO DE RADIACIONES IONIZANTES	19
I.1.5.- PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EN CENTRALES NUCLEARES	23
I.1.6.- EXPOSICIONES DEL PÚBLICO POR GRANDES ACCIDENTES NUCLEARES	26
I.1.6.1.- Armamento nuclear	26
I.1.6.2.- Centrales nucleares	27
I.1.7.- EXPOSICIONES OCUPACIONALES	33

I.2.- RADIACIÓN CÓSMICA

I.2.1.- RAYOS CÓSMICOS	40
I.2.1.1.- Rayos cósmicos primarios	41
I.2.1.2.- Rayos cósmicos secundarios	42
I.2.2.- DOSIS ABSORBIDA DEBIDA A LOS RAYOS CÓSMICOS	47
I.2.2.1.- Componente de los rayos cósmicos directamente ionizante	47
I.2.2.2.- Componente de los rayos cósmicos correspondiente a neutrones	51
I.2.3.- DOSIS EFECTIVA DEBIDA A LOS RAYOS CÓSMICOS	52
I.2.4.- IRRADIACIÓN INTERNA DEBIDA A LOS RAYOS CÓSMICOS	66

I.3.- RADIACIÓN TERRESTRE

I.3.1.- INTRODUCCIÓN	68
I.3.2.- COMPONENTE EXTERNA DE LA RADIACIÓN TERRESTRE	71
I.3.2.1.- Exposición externa <i>outdoors</i>	72
I.3.2.2.- Exposición externa <i>indoors</i>	75
I.3.3.- COMPONENTE INTERNA DE LA RADIACIÓN TERRESTRE	79
I.3.4.- DOSIS DEBIDA A LA RADIACIÓN TERRESTRE	81
I.3.4.1.- Exposición externa	81
I.3.4.2.- Exposición interna	83

I.4.- OBJETIVOS

84

II. MATERIAL Y MÉTODO

II.1.- INSTRUMENTACIÓN Y MATERIALES UTILIZADOS

II.1.1.- INTRODUCCIÓN	86
II.1.2.- MATERIALES Y EQUIPAMIENTO UTILIZADOS	87
II.1.2.1.- Mapas	89
II.1.2.2.- Libretas de campo	89
II.1.2.3.- Herramienta de campo	93
II.1.2.4.- Otros utensilios para trabajo de campo	93
II.1.2.5.- Barómetro-altímetro	93
II.1.2.6.- Termómetro-higrómetro	94
II.1.2.7.- Equipo detector Geiger-Müller	95
II.1.2.8.- Cámara de ionización de alta presión	96
II.1.2.9.- Estufas	97
II.1.2.10.- Molino de rodillos	97
II.1.2.11.- Tamizadoras	98
II.1.2.12.- Material diverso para preparación y almacenaje de muestras	98
II.1.2.13.- Balanza	99
II.1.2.14.- Recipientes para análisis de muestras de suelo en detector de germanio	100
II.1.2.15.- Detectores de germanio intrínseco	100
II.1.2.16.- Equipos electrónicos asociados	101
II.1.2.17.- Analizador multicanal	101
II.1.2.18.- Ordenador personal e impresora	102
II.1.2.19.- Programas informáticos	102

II.2.- MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS DE REALIZACIÓN DE MEDIDAS

II.2.1.- INTRODUCCIÓN	103
II.2.2.- DOSIS EN AIRE DEBIDA A LA RADIACIÓN GAMMA NATURAL	
II.2.2.1.- Procedimiento general de medida	103
II.2.2.2.- Determinación del “fondo” de los equipos de medida de radiación gamma en aire	110
II.2.2.3.- Primera campaña en la isla de Tenerife	111
II.2.2.4.- Segunda campaña en la isla de Tenerife	116
II.2.2.5.- Medidas en las islas occidentales	117
II.2.2.5.1.- Isla de La Palma	118
II.2.2.5.2.- Isla de La Gomera	119
II.2.2.5.3.- Isla de El Hierro	120
II.2.2.6.- Medidas en continuo con la HPIC RSS-112 durante largos periodos de tiempo	121
II.2.2.7.- Determinaciones realizadas en la campaña de medida de concentraciones de cesio en suelos	121
II.2.3.- CONCENTRACIÓN DE RADIONÚCLIDOS EMISORES GAMMA EN SUELOS	
II.2.3.1.- Procedimiento general de medida	122
II.2.3.2.- Medidas en la isla de Tenerife	125
II.2.3.3.- Medidas en as islas occidentales	125
II.2.4.- CONCENTRACIÓN DE ¹³⁴ Cs Y ¹³⁷ Cs EN SUELOS	126
II.2.5.- INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE LA MUESTRA EN LA EFICIENCIA DEL DETECTOR DE GERMANIO	129

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

III.1.- INTRODUCCIÓN	132
----------------------	-----

III.2.- TASA DE DOSIS GAMMA EN AIRE

III.2.1.- INTRODUCCIÓN	134
III.2.2.- TASA DE DOSIS ABSORBIDA EN AIRE DEBIDA A LA RADIACIÓN CÓSMICA. VARIACIÓN CON ALTITUD	134
III.2.3.- DETERMINACIÓN DEL VALOR DE RADIACIÓN DE FONDO DE LOS EQUIPOS	141
III.2.4.- PRIMERA CAMPAÑA DE MEDIDAS EN LA ISLA DE TENERIFE	142

III.2.5.- MEDIDAS EN LAS ISLAS MENORES OCCIDENTALES	151
III.2.5.1.- Radiación ambiental gamma en aire en la isla de La Palma	152
III.2.5.2.- Radiación ambiental gamma en aire en la isla de La Gomera	158
III.2.5.3.- Radiación ambiental gamma en aire en la isla de El Hierro	162
III.2.6.- SEGUNDA CAMPAÑA DE MEDIDAS EN LA ISLA DE TENERIFE	166
III.2.7.- MEDIDAS EN CONTINUO CON LA HPIC RSS-112 DURANTE LARGOS PERIODOS DE TIEMPO	171

III.3.- CONCENTRACIÓN DE RADIONÚCLIDOS EMISORES GAMMA EN SUELOS

III.3.1.- INTRODUCCIÓN	174
III.3.2.- MEDIDAS EN LA ISLA DE TENERIFE	174
III.3.3.- MEDIDAS EN LAS TRES ISLAS OCCIDENTALES DE MENOR SUPERFICIE	188
III.3.4.- COMPARATIVO DE LA PRESENCIA DE RADIONÚCLIDOS EMISORES GAMMA EN LOS SUELOS DE LAS ISLAS CANARIAS OCCIDENTALES	201

III.4.- PRESENCIA DE ^{134}Cs Y ^{137}Cs EN LOS SUELOS DE LA ISLA DE TENERIFE

III.4.1.- INTRODUCCIÓN	203
III.4.2.- VARIACIÓN CON LA PROFUNDIDAD DE LA CONCENTRACIÓN DE ^{134}Cs Y ^{137}Cs EN LOS SUELOS DE LA ISLA DE TENERIFE	204

III.5.- TASA DE DOSIS ABSORBIDA EN AIRE Y COMPOSICIÓN GEOLÓGICA DEL SUELO

III.5.1.- INTRODUCCIÓN	216
III.5.2.- RELACIÓN ENTRE LA TASA DE DOSIS ABSORBIDA EN AIRE POR RADIACIÓN GAMMA AMBIENTAL Y LA COMPOSICIÓN GEOLÓGICA DEL SUELO	217

III.6.- RELACIÓN ENTRE LAS CONCENTRACIONES DE RADIOEMISORES GAMMA EN EL SUELO Y LA TASA DE DOSIS GAMMA AMBIENTAL EN AIRE	
III.6.1.- GENERALIDADES	226
III.6.2.- LAS DIFERENTES RELACIONES UTILIZADAS	228
III.6.3.- CÁLCULO DE LA TASA DE DOSIS EQUIVALENTE A PARTIR DE LAS MEDIDAS DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS RADIONÚCLIDOS EN LOS SUELOS DE LAS ISLAS CANARIAS OCCIDENTALES	236
III.6.4.- COMPARACIÓN DE RESULTADOS AL UTILIZAR LOS DIFERENTES <i>DRF</i> ANALIZADOS	241
III.7.- ANÁLISIS DE LA POSIBLE INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE LA MUESTRA EN LA EFICIENCIA DEL DETECTOR DE GERMANIO	
III.7.1.- INTRODUCCIÓN	250
III.7.2.- DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA EFICIENCIA POR LA DENSIDAD	251
III.8.- ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS DE LAS MEDIDAS OBTENIDAS CON LOS DETECTORES <i>MC-71</i> Y <i>RSS-112</i>	
III.8.1.- INTRODUCCIÓN	260
III.8.2.- COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL DETECTOR GEIGER-MULLER <i>MC-71</i> Y DE LA CÁMARA DE IONIZACIÓN DE ALTA PRESIÓN <i>RSS-112</i>	261
III.8.3.- COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS MEDIDAS CON AMBOS EQUIPOS	262
III.9.- TASA DE DOSIS EFECTIVA A LA POBLACIÓN EN LOS PUNTOS DE MEDIDA	268
IV. CONCLUSIONES	278

V. BIBLIOGRAFÍA 283

VI. ANEXOS

ANEXO I	
Localización de los cuadrados fijados en la isla de Tenerife (5x5 km ²)	A-2
ANEXO I-A	
Coordenadas en proyección UTM de los cuadrados de la isla de Tenerife	A-3
ANEXO II	
Localización de los cuadrados fijados en la isla de La Palma (10x10 km ²)	A-6
ANEXO II-A	
Coordenadas en proyección UTM de los cuadrados de la isla de La Palma	A-7
ANEXO III	
Localización de los cuadrados fijados en la isla de La Gomera (10x10 km ²)	A-8
ANEXO III-A	
Coordenadas en proyección UTM de los cuadrados de la isla de La Gomera	A-9
ANEXO IV	
Localización de los cuadrados fijados en la isla de El Hierro (7x10 km ²)	A-10
ANEXO IV-A	
Coordenadas en proyección UTM de los cuadrados de la isla de El Hierro	A-11
ANEXO V	
Certificado de calibración del medidor Geiger-Müller, modelo MC-71	A-12
ANEXO VI	
Medidas de tasa de dosis en aire en los puntos donde se recogieron muestras para el estudio de la presencia de cesio y su difusión en el suelo	A-13

ANEXO VII

MAGNITUDES Y UNIDADES PARA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA PERSONAL Y AMBIENTAL.

A-VII.1.- INTRODUCCIÓN	A-14
A-VII.2.- CONSIDERACIONES GENERALES	A-15
A-VII.3.- MAGNITUDES RADIOMÉTRICAS	A-16
A-VII.3.1.- Fluencia	A-16
A-VII.4.- MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS	A-16
A-VII.4.1.- Dosis absorbida	A-16
A-VII.4.2.- Transferencia lineal de energía	A-17
A-VII.4.3.- Energía lineal	A-17
A-VII.4.4.- Distribución de dosis absorbida en transferencia Lineal de energía	A-18
A-VII.5.- MAGNITUDES DOSIS-EQUIVALENTE	
A-VII.5.1.- Factor de calidad Q y relación Q-L	A-18
A-VII.5.2.- Dosis equivalente	A-20
A-VII.6.- VALORES MEDIOS DE MAGNITUDES Y DEL FACTOR DE CALIDAD	A-20
A-VII.6.1.- Dosis media absorbida en un órgano (Dosis órgano)	A-20
A-VII.6.2.- Factor de calidad medio (Factor de calidad órgano)	A-21
A-VII.6.3.- Dosis equivalente media en un órgano (Dosis órgano equivalente)	A-22
A-VII.7.- MAGNITUDES LIMITANTES (ESTABLECIDAS POR ICRP)	A-23
A-VII.7.1.- Dosis equivalente efectiva	A-23
A-VII.7.2.- Factor de ponderación de la radiación	A-23
A-VII.7.3.- Dosis equivalente en un órgano (Dosis equivalente órgano)	A-24
A-VII.7.4.- Dosis efectiva	A-25
A-VII.8.- MAGNITUDES OPERACIONALES PARA IRRADIACIÓN DESDE FUENTES EXTERNAS	A-26
A-VII.8.1.- Monitorización de área	A-27
A-VII.8.1.1.- Dosis equivalente ambiental	A-27
A-VII.8.1.2.- Dosis equivalente direccional	A-28
A-VII.8.2.- Monitorización individual	A-29
A-VII.8.2.1.- Dosis equivalente personal	A-29
A-VII.8.3.- Notas sobre ICRU, 1993	A-30

I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

I.1.- FUENTES NATURALES Y ARTIFICIALES DE RADIACIÓN

I.1.1.- INTRODUCCIÓN

La radiación ionizante presente en el medio ambiente de la Tierra tiene diversos orígenes. Una gran parte de esta radiación a la que está expuesta la humanidad es debida a causas naturales, produciéndose el resto como resultado de la actividad del hombre.

Entre las fuentes que tienen un origen no natural, se incluyen las que son consecuencia del uso médico de las radiaciones ionizantes (equipos para Radiodiagnóstico, aparatos de Radioterapia, isótopos radiactivos utilizados en Medicina Nuclear), en la investigación con fines industriales o sanitarios (generación de isótopos radiactivos, aceleradores de partículas), en la industria (centrales nucleares, sistemas motrices por energía nuclear) o con fines bélicos (explosiones nucleares, pruebas de dispositivos atómicos).

La utilización de todos estos aparatos y nuevos radionúclidos creados por el hombre, ocasionan un aumento de las dosis de radiación (energía depositada por unidad de masa) recibidas tanto por cada individuo como por la humanidad en su conjunto, respecto de las debidas a causas naturales. Las dosis procedentes de fuentes artificiales de radiación son mucho más variables que las de origen natural, aunque, por el contrario, son más fácil y eficazmente controlables que éstas.

Los efectos de la radiación ionizante sobre los seres humanos se suelen clasificar en dos grandes grupos: los determinísticos y los estocásticos. Los primeros son de tipo somático, es decir, experimentados por el cuerpo del individuo irradiado, mientras que los estocásticos pueden ser somáticos (por ejemplo, cáncer inducido por radiación) o hereditarios (puestos de manifiesto en generaciones futuras). Es característico de los primeros la existencia de un valor de dosis umbral para que ocurran, mientras que para los segundos no se puede fijar un umbral mínimo por debajo del cual se pueda asegurar que no produce daño alguno.

La estimación de las dosis de radiación recibidas por la humanidad procedentes de fuentes naturales tiene una especial relevancia dado que la radiación natural constituye el componente más importante de la dosis efectiva colectiva recibida por la población mundial.

I.1.2.- FUENTES NATURALES DE RADIACIÓN

La radiación ionizante de origen natural contribuye a la dosis efectiva a la población a través de la incorporación de radionucleidos al organismo mediante la ingestión y la respiración (radiación interna) o por la acción de partículas o fotones que proceden del exterior del cuerpo humano y que llegan a él (radiación externa). Esta última tiene su origen tanto en las emisiones de ciertos elementos radiactivos presentes en la corteza terrestre, los materiales de construcción y el aire (radionúclidos primordiales y cosmogénicos), como en los fotones y partículas procedentes del espacio intergaláctico o emitidos por el sol que llegan a la tierra directamente (rayos cósmicos primarios) o formando otras partículas tras la interacción de aquéllas con los núcleos atómicos de los componentes de la atmósfera (rayos cósmicos secundarios).

Algunos de los contribuyentes al total de la exposición procedente del fondo de radiación natural son bastante constantes en el espacio y en el tiempo, siendo prácticamente independientes de la actividad humana. Esto es así, por ejemplo, para las dosis debidas a la ingestión de ^{40}K , elemento controlado homeostáticamente, o para las debidas a la inhalación e ingestión de radionúclidos cosmogénicos, los cuales están distribuidos de forma relativamente homogénea sobre toda la superficie del globo terráqueo.

Otras contribuciones dependen fuertemente de las actividades y prácticas del hombre y son, por lo tanto, ampliamente variables. Ejemplo de ello podrían ser las dosis procedentes de la inhalación de radón dentro de las viviendas, cuya concentración depende, además del suelo en el que se ha edificado, del tipo de edificio, de sus materiales de construcción o de sus sistemas de ventilación, calefacción y acondicionamiento de aire.

Entre ambos tipos extremos existen casos intermedios como puede ser la dosis externa recibida a partir de los rayos cósmicos cuyo valor se puede predecir en cada sitio con bastante exactitud.

De igual manera ocurre con las dosis correspondientes a la inhalación e ingestión de núclidos de larga vida de las series del ^{238}U y ^{232}Th , que producen una contribución muy pequeña a la dosis debida a fuentes naturales y son relativamente constantes en el espacio, o las dosis originadas por las fuentes terrestres de irradiación externa, cuya acción se modifica significativamente por la actividad humana, ya que puede variar significativamente según el mayor o menor tiempo que la población se encuentre dentro de edificios.

La contribución a la dosis efectiva (dosis ponderada en todo el cuerpo), debido a la existencia de estas emisiones radiactivas de origen natural, se evaluó, según el *Informe del Comité Científico de las Naciones Unidas para Investigaciones sobre*

Energía Atómica del año 1.988 (UNSCEAR-88)^[1], en unos 2,4 mSv de media por persona y año a nivel mundial (**Tabla 1.1**).

Se estimó que 1,62 mSv/año tenían su origen en la irradiación interna, 0,41 mSv/año provenían de la emisión de los radionúclidos primordiales presentes en la corteza terrestre y los 0,36 mSv/año restantes eran de procedencia cósmica. Estos rayos cósmicos tienen un componente ionizante, cuyo peso en la dosis efectiva se estimó en 0,3 mSv/año, y otro de origen neutrónico cuya contribución es de solamente 0,055 mSv/año^[1].

Tabla 1.1.- Contribución media a nivel mundial de los distintos componentes de la radiación de origen natural a la dosis efectiva anual (mSv/año), según UNSCEAR-88.

IRRADIACIÓN INTERNA			1.616 mSv/año
Radionúclidos cosmogénicos:		15	
Radionúclidos primordiales:		1.601	
	⁴⁰ K	180	
	⁸⁷ Rb	6	
	Serie ²³⁸ U ¹	1.239	
	Serie ²³² Th ²	176	
IRRADIACIÓN EXTERNA			765 mSv/año
Origen terrestre:		410	
	⁴⁰ K	150	
	Serie ²³⁸ U	100	
	Serie ²³² Th	160	
Origen cósmico:		355	
	Comp. ionizante	300	
	Neutrones	55	
TOTAL:			2.381 mSv/año

¹ Serie del U238: U238 - U234; Th230; Ra226; Rn222 - Po214; Pb210 - Po210.

² Serie Th232: Th232; Ra228 - Ra224; Rn220 - Tl208.

Es interesante resaltar las diferencias que se observan en estos valores respecto a los estimados en el Informe de 1.982 (*UNSCEAR-82*^[2]) y que radican fundamentalmente en^[1]:

a) La nueva evaluación de la exposición externa debida a la radiación cósmica que ha producido un incremento en la estimación de la dosis efectiva anual de unos 55 μSv (20 y 35 $\mu\text{Sv/año}$ más elevada para las componentes ionizante y neutrónica, respectivamente), al tener en cuenta la distribución geográfica de la población mundial, tanto en función de la altitud como del efecto de apantallamiento de los materiales de construcción.

b) Se ha considerado que habría que aumentar en 60 mSv/año la tasa de dosis efectiva debida a las fuentes terrestres de radiación, para exposición externa, como resultado de un mejor conocimiento de las dosis gamma en el interior de edificaciones (*indoor*) absorbidas en aire.

c) Aunque las estimaciones de las dosis efectivas anuales debidas a exposición interna por ciertos radionúclidos primordiales se consideran algo menores que antes (series del ^{238}U y del ^{210}Pb y descendientes del ^{220}Rn), los valores estimados para los productos de vida corta del ^{222}Rn han aumentado en alrededor de unos 300 μSv en base a los nuevos estudios realizados en un gran número de naciones. Esto lleva consigo un aumento global, para la irradiación interna debida a los radionúclidos primordiales, de 275 μSv por año.

El efecto neto de todas estas correcciones repercute en un incremento aproximado de un 20% respecto de las primeras estimaciones de Naciones Unidas, para la dosis efectiva anual estimada procedente de todas las fuentes de radiación natural, pasando de los 2 mSv/año del *Informe UNSCEAR-82*^[2] a los 2,4 mSv/año que refleja el correspondiente a 1988^[1].

En el último *Informe del Comité Científico de las Naciones Unidas para Investigaciones sobre Energía Atómica del año 1.993 (UNSCEAR-93)*^[3], se sigue manteniendo el valor de 2,4 mSv como media de la dosis efectiva anual recibida por la población mundial adulta por la exposición a las fuentes naturales de radiación. Tampoco la distribución en sus distintos contribuyentes difiere mucho de la que se presentaba en *UNSCEAR-88*^[1] (**Tabla 1.1**), aunque ahora se le quiere dar una especial relevancia, especificándola de manera separada, a la componente de la irradiación interna procedente del radón y sus productos de desintegración^[4], como se puede comprobar en la **Tabla 1.2** siguiente, extraída del citado Informe del año 1.993^[3].

Este valor típico de la dosis efectiva anual de 2,4 mSv procedente de fuentes naturales de radiación, lleva a considerar una dosis colectiva anual para los 5.300 millones de habitantes del Planeta de alrededor de 13×10^6 Sv-persona .

Tabla 1.2.- Dosis efectiva anual media, en adultos, procedente de fuentes naturales de radiación ionizante (mSv/año), según UNSCEAR-93.

EXPOSICIÓN INTERNA			1.520 mSv/año
Radionúclidos cosmogénicos:		15	
Radiac. terrestre (excluido radón):		230	
	⁴⁰ K	170	
	Series ²³⁸ U y ²³² Th	60	
Radón y sus productos desintegr.:		1.275	
	Inhalación ²²² Rn	1.200	
	Inhalación ²²⁰ Rn	70	
	Ingestión ²²² Rn	5	
EXPOSICIÓN EXTERNA			840 mSv/año
Radiación terrestre:		460	
Radiación cósmica:		380	
	Compon. Ionizante	300	
	Neutrones	80	
TOTAL:			2.360 mSv/año

Las desviaciones que se producen sobre este valor medio total de 2,4 mSv/año (que se ha calculado para poblaciones que vivan en zonas con un fondo natural medio, en regiones de la Tierra correspondientes a formas de vida habituales en latitudes templadas), se deben principalmente a los cambios de la exposición debida a fuentes terrestres (irradiación externa) y a las variaciones en la inhalación (irradiación interna) de los productos de desintegración de vida corta de isótopos del radón.

La exposición externa varía, alrededor del valor medio, de unos lugares a otros del Planeta en un 50%, pudiendo oscilar los valores de la interna hasta 2,5 veces por encima o por debajo del promedio. Para ambos tipos de exposición, el rango de medidas efectuadas en diferentes puntos de la Tierra abarca un rango que va desde 100 veces mayor a 100 veces menor que los valores medios. Esta dispersión de datos pone de manifiesto la conveniencia de realizar medidas de la dosis debida a la radiación natural en los distintos lugares donde se desarrolla la actividad humana^[5].

Como muestra de ello se presentan en la **Tabla 1.3**, extraída de **UNSCEAR-93**^[3], los valores medios que se alcanzan en amplias zonas donde se obtienen mediciones de exposiciones anormalmente elevadas para cada uno de los componentes

de la radiación natural, comparándolos con los presentados anteriormente como normales en la mayoría de las regiones del Planeta.

La radiación cósmica depende fundamentalmente de la altitud sobre el nivel del mar y en menor medida de la latitud: las dosis anuales recibidas por poblaciones que habitan zonas geográficas muy elevadas pueden llegar a ser 5 veces superiores a la media establecida para todo el mundo.

La componente de la dosis debida a la radiación gamma terrestre varía en función de la composición geológica del terreno, pudiendo superarse en algunos lugares unas 10 veces la media. Incluso se producen valores hasta 100 veces mayores que los normales para pequeñas comunidades que viven en zonas cercanas a ciertos yacimientos minerales.

En cuanto a la exposición debida al radón y sus descendientes se pueden producir típicamente variaciones en torno a 10 veces la media, de acuerdo con la geología del lugar, el tipo de construcción y condiciones de la vivienda o los hábitos de sus habitantes.

Tabla 1.3.- Valores comparativos de la dosis efectiva anual media, procedente de fuentes naturales, en zonas de fondo normal y elevado (mSv/año).

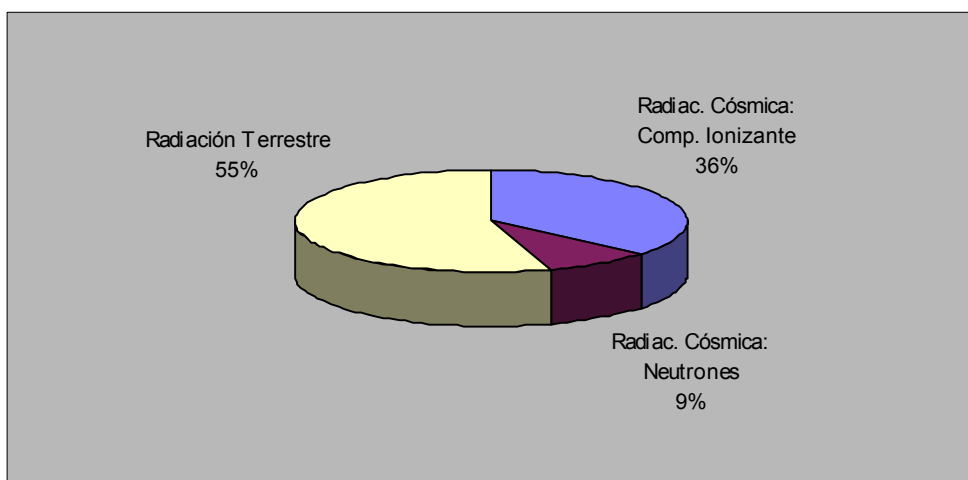
COMPONENTE	DOSIS EFECTIVA ANUAL (mSv/año)	
	En áreas de fondo normal	En áreas con altos niveles de exposición ³
Rayos cósmicos	380	2.000
Radionúclidos cosmogénicos	15	15
Radiación terrestre:		
Exposición externa	460	4.300
Expos. interna (excepto Rn)	230	600
Exp. interna desde Rn e hijos:		
Inhalación de ²²² Rn	1.200	10.000
Inhalación de ²²⁰ Rn	70	100
Ingestión de ²²² Rn	5	100
TOTAL	2.400	-----

³ Los valores elevados son representativos de amplias regiones de la Tierra. Otros valores mucho más altos también ocurren localmente.

Volviendo al análisis de los valores considerados "*habituales*" o "*estándar*" (fondo natural medio normal) y atendiendo únicamente a la radiactividad natural debida a fuentes externas (cósmica y terrestre), se puede concluir, de acuerdo con la **Tabla 1.2** anterior, que la componente ionizante de la radiación cósmica representa el 36% del total de la dosis efectiva media anual de esta radiación externa, siendo la contribución de la terrestre procedente de los radionúclidos primordiales del 55% y la correspondiente a los neutrones cósmicos del 9% (**Figura I.1**)

Figura I.1.- Distribución porcentual de la dosis efectiva debida a los componentes de la radiación natural de origen externo.

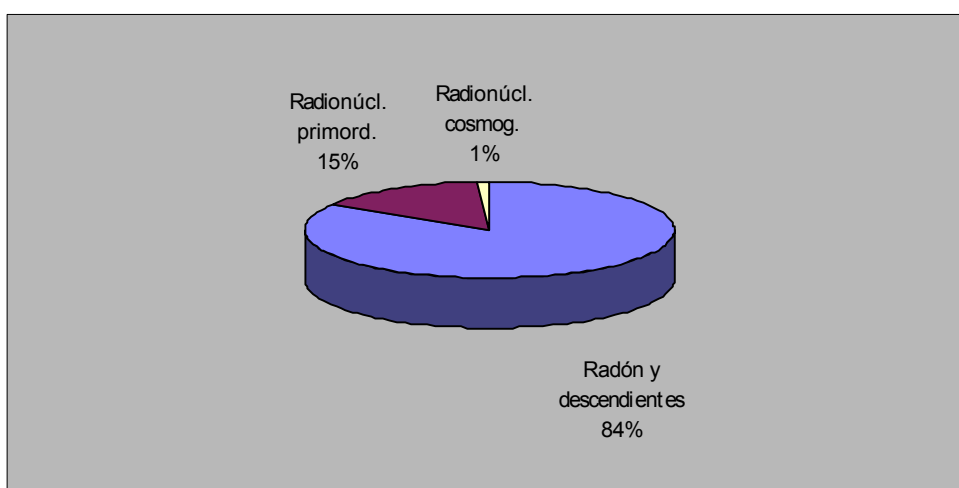
Radiación Cósmica: Componente Ionizante	36%
Radiación Cósmica: Componente Neutrónica	9%
Radiación Terrestre	55%



La distribución porcentual de la exposición interna media anual debida a fuentes naturales de radiación, atendiendo a esta misma **Tabla 1.2**, sería: 84% para el radón y sus descendientes, 15% para el resto de los radionúclidos primordiales y un 1% para los cosmogénicos. En la **Figura I.2** se realiza una representación esquemática de estos datos.

Figura I.2.- Distribución porcentual de la dosis efectiva debida a los componentes de la radiación natural de origen interno.

Radón y descendientes	84 %
Radionúclidos primordiales (excepto Rn)	15 %
Radionúclidos cosmogénicos	1 %



En la **Tabla 1.4** aparecen los distintos porcentajes^[6] de contribución a la dosis dados en los diferentes informes *UNSCEAR-82*^[2] y *UNSCEAR-88*^[1], constatándose que, si bien se produce un incremento en los valores absolutos de los distintos componentes, su distribución relativa permanece prácticamente constante, situación que se mantiene en *UNSCEAR-93*^[3], con la excepción de la aportación debida al radón y sus hijos.

En todos los casos, se puede observar que los radionúclidos de las series del ^{238}U y del ^{232}Th , incluyendo el importante aporte del radón y sus descendientes, mantienen un peso relativo cercano al 70% sobre el total de la dosis efectiva anual, correspondiente a fuentes naturales de radiación, recibida como media por la población mundial adulta.

Tabla 1.4.- Distribución porcentual media de los componentes del fondo natural.

FUENTE DE RADIACIÓN	UNSCEAR-82 (2 mSv/año) %	UNSCEAR-88 (2,4 mSv/año) %	UNSCEAR-93 (2,4 mSv/año) %
Radiación cósmica ionizante	14	13	13
Radiación cósmica neutrónica	1	2	3
Radionúclidos cosmogénicos	1	1	1
⁴⁰ K	15	14	15
Series ²³⁸ U	52	56	
Series ²³² Th	17	14	
Series ²³⁸ U y ²³² Th (excepto Rn)			15
²²² Rn y descendientes			54
TOTAL	100	100	100

Todos los valores que se refieren a la irradiación externa, se han evaluado estimando que la mayoría de la población vive en cotas próximas al nivel del mar y basados en considerar el tiempo promedio de permanencia de las personas fuera de los edificios en torno al 80% del total, lo que significa tomar un valor del factor de ocupación *outdoor* igual a 0,8^[2].

Las estimaciones sobre la dosis efectiva anual *per cápita* procedente de fuentes naturales, en áreas cuyo fondo radiactivo se ha considerado estándar o normal, han variado a lo largo de los años como se puede ver en la **Tabla 1.5**, que presenta la evolución de los valores dados por **UNSCEAR** en sus sucesivos informes. Los datos correspondientes a los de 1.962, 1.972 y 1.977, se recalcularon^[7] teniendo en cuenta los factores de ponderación recomendados por la **ICRP-1977**^[8].

Tabla 1.5.- Dosis efectiva anual total per cápita (mSv/año), desde 1.962 a 1.993, según los sucesivos informes UNSCEAR.

FUENTE DE RADIACIÓN	DOSIS EFECTIVA ANUAL (mSv/año)					
	1962	1972	1977	1982	1988	1993
IRRADIACIÓN EXTERNA						
Radiación cósmica	500	284	284	301	355	380
Radiación terrestre	500	440	320	350	410	460
TOTAL Irrad. Externa	1.000	724	604	651	765	840
IRRADIACIÓN INTERNA						
Radionúclidos cosmogénicos (⁷ Be, ¹⁴ C)	8	7	8	15	15	15
Radionúclidos primordiales (⁴⁰ K, ⁸⁷ Rb, Serie ²³⁸ U, Serie ²³² Th)	249	338	1.210	1.326	1.601	1.505
TOTAL Irrad. Interna	257	345	1.218	1.341	1.616	1.520
TOTAL	1.257	1.069	1.822	1.992	2.381	2.360

Como se observa en la tabla anterior, los valores totales de dosis efectiva anual correspondientes a 1.988 o 1.993 están por encima del doble de los estimados para 1.972, ya actualizados con la introducción de los factores de ponderación propuestos en *ICRP-1977*^[8], lo cual es imprescindible hacerlo para llevar a cabo la comparación.

Debe notarse que el valor total medio anual de la dosis procedente de la radiación de fondo natural que aparece en el informe de 1.977^[9] es de 100 mrad (1 mSv) mientras que el valor recalculado alcanza 1,82 mSv. La diferencia es debida a la mejora en la precisión de los métodos de medida y a la valoración de los distintos sumandos a considerar.

Volviendo a la radiación cósmica, hay que tener en cuenta que, aunque la proporción en la dosis efectiva debida a este tipo de radiación al nivel del mar es relativamente baja (15% del total), para las personas que viven en grandes altitudes o los pasajeros y las tripulaciones de los aviones la contribución cósmica es mucho más elevada debido a que el componente cósmico aumenta apreciablemente con la altura.

Así, una persona que habite en una localidad situada a 2.000 m sobre el nivel del mar recibirá varias veces más dosis de radiación que la que viva en la costa. Entre altitudes de 4.000 m donde se sitúan las más elevadas aldeas Sherpas en las faldas del Everest y los 12 km de altura que alcanzan los aviones en vuelos intercontinentales, puede haber diferencias en la exposición a la radiación cósmica 25 veces superior^[10].

Se ha estimado que la dosis efectiva colectiva a la población mundial debida a los vuelos comerciales en 1984 ascendía hasta valores comprendidos entre 3.500 y 4.500 Sv-persona. A partir de datos y cálculos más recientes, se establece un valor de unos 10.000 Sv-persona por año como dosis colectiva efectiva para el total de vuelos comerciales realizados durante 1989^[3].

Evidentemente, estas fuentes de exposición no representan, consideradas de forma global, una aportación significativa a la exposición a la radiación natural de toda la población. No obstante las dosis individuales recibidas por determinados grupos de personas, como por ejemplo las tripulaciones aéreas, no pueden considerarse despreciables.

I.1.3.- USO MÉDICO DE RADIACIONES IONIZANTES

El uso de las radiaciones ionizantes con fines médicos, ampliamente difundido en todo el mundo, ha contribuido de forma notable a la mejora de la salud de la población, tanto como medio de diagnóstico como en su faceta terapéutica. Es totalmente habitual, para la mayoría de las personas que viven en países industrializados, haber estado sometidas a algún examen médico mediante RX a lo largo de su vida.

Hay que tener en cuenta, sin embargo, de cara a la evaluación de sus beneficios y riesgos para la colectividad, que en estas naciones más desarrolladas solamente vive la cuarta parte de la población mundial. En otros muchos países, tanto el número de equipos de RX para diagnóstico como de exámenes médicos realizados o de facultativos existentes, es muy limitado, por lo que el *Comité Científico de las Naciones Unidas para Investigaciones sobre Energía Atómica* ha evaluado las exposiciones a las radiaciones por el uso médico en cuatro grupos, de acuerdo con el nivel de los cuidados de salud con que cuentan cada una de las regiones del mundo, en función del número de médicos versus población, desde el nivel I para países industrializados al nivel IV para los menos desarrollados. En naciones de nivel I habría al menos un médico por cada 1.000 habitantes, los de nivel II dispondrían de un facultativo por cada 1.000 a 3.000 habitantes, los de nivel III uno por cada 3.000-10.000 habitantes y los de nivel IV que contarían con una densidad asistencial de más de 10.000 habitantes por cada médico^[1].

I.1.3.1.- USO MÉDICO CON FINES DIAGNÓSTICOS

Las dos formas en las que se ponen en juego dosis a la población por la utilización de radiaciones ionizantes con fines de diagnóstico médico, tienen su origen en la exposición a haces de RX de energías comprendidas en el rango que va desde unos 30 keV a 150 keV (Radiodiagnóstico) y en la administración de radiofármacos, habitualmente emisores gamma, con distintos valores de energías (Medicina Nuclear).

Está aceptado por toda la comunidad científica que el uso médico de las radiaciones ionizantes debe cumplir que el resultado de su aplicación, en cada caso y en un análisis costo-beneficio, asegure que el beneficio siempre sea positivo y el máximo posible^[11].

En la **Tabla 1.6**, extraída del *Informe UNSCEAR-93*^[3], se presentan los valores correspondientes al año 1.990 de la población que vive en las diferentes categorías de países atendiendo a su nivel sanitario^[12], así como la frecuencia anual de exámenes médicos mediante Rayos X, por cada 1.000 habitantes.

Tabla 1.6.- Población asignada a los diferentes niveles de cuidados de salud en los distintos países del mundo y frecuencia anual de exámenes médicos por RX (año 1.990).

NIVEL SANITARIO	POBLACIÓN (millones de habitantes)	Nº EXÁMENES/AÑO POR RX (por cada 1.000 habitantes)
I	1.350	890
II	2.630	120
III	850	70
IV	460	9

I.1.3.1.1.- Radiodiagnóstico

En el mismo Informe de las Naciones Unidas (*UNSCEAR-93*³¹) se referencian datos relativos a las dosis equivalentes efectivas anuales en promedio por niveles sanitarios debidas a exámenes de radiodiagnóstico, reflejando valores por estudio, dosis medias *per cápita* y dosis colectivas para países de cada uno de los distintos niveles de cuidados de salud (Ver **Tabla 1.7**).

Tabla 1.7.- Dosis media efectiva equivalente, por estudio y *per cápita*, y dosis equivalente efectiva colectiva anual, debida a exámenes médicos mediante RX en el período 1.985-1.990.

NIVEL SANITARIO	DOSIS EQUIVALENTE EFECTIVA		
	POR EXAMEN (mSv)	PER CÁPITA ANUAL (mSv)	COLECTIVA ANUAL (Sv-persona)
I	1,05	0,93	1.262.000
II	0,90	0,11	292.000
III y IV	0,67	0,043	56.000
MEDIA MUNDIAL	1,0	0,30	1.610.000

Se ha estimado que las dosis individuales por exámenes médicos mediante RX van disminuyendo progresivamente, con excepción de los diagnósticos por tomografía computarizada para los que, a medida que aumenta su uso, se está produciendo también un incremento en las dosis por examen^[13]. Los valores de dosis correspondientes a los distintos tipos de estudios radiológicos son muy variables, contribuyendo por tanto en muy diferente medida a la dosis efectiva anual a la población.

En los últimos años se han producido avances técnicos que, en principio, pueden llegar a reducir considerablemente las dosis de radiación recibidas por los pacientes examinados por Rayos X. A pesar de ello, diversos estudios practicados en Suecia y Estados Unidos^[10] han revelado que no han resultado disminuciones significativas de las dosis a partir de su empleo.

Sin embargo, también existen casos en los que se demuestran disminuciones importantes de las dosis, gracias tanto a la mejora tecnológica de los aparatos como a la metodología de trabajo usada. En otros, se ha aumentado considerablemente la eficacia diagnóstica con pequeños incrementos de las dosis. El objetivo debe ser, en todo caso, mantener los niveles de exposición tan bajos como sea posible, suficientes para alcanzar un beneficio diagnóstico.

El rango actual de los valores de dosis efectiva a la población debida a las prácticas médicas utilizando RX, varía desde los 0,05 mSv correspondientes a un estudio de extremidades a los 6,8 mSv para un examen angiográfico o a los 7,2 mSv que se estiman en un estudio del tracto inferior gastrointestinal.

La principal causa de incertidumbre en el establecimiento de estos valores se encuentra en el uso de la fluoroscopia, técnica de la que resultan dosis mucho más elevadas, en función de los intervalos de utilización, con una prevalencia sobre los procesos radiográficos incierta y variable con el tiempo^[14].

I.1.3.1.2.- Medicina Nuclear

En lo que se refiere al uso diagnóstico de radiofármacos se ha constatado que su aplicación se ha estabilizado en los países de nivel sanitario I, considerándose que probablemente se está incrementando en los de niveles II a IV. La disminución progresiva de las dosis vienen dadas por los significativos avances de la tecnología, por el seguimiento de las indicaciones de protección al paciente dictadas por los diferentes organismos internacionales^[15], así como por la utilización de radioisótopos de corta vida media.

En la **Tabla 1.8**, construida a partir de datos referenciados en el **Informe UNSCEAR-93**^[3], se indican los valores anuales de las dosis efectivas *per cápita* y colectivas debidas a exámenes en Medicina Nuclear, en los distintos grupos de países del mundo. También se dan, con fines comparativos, los valores de las dosis *per cápita* que se estimaban en **UNSCEAR-88**^[1].

Tabla 1.8.- Dosis anuales efectivas *per cápita* y colectiva medias estimadas, debidas a exámenes diagnósticos en Medicina Nuclear.

PAISES CON NIVEL DE SALUD	DOSIS EFECTIVA ANUAL PER CÁPITA (mSv)		DOSIS EFECTIVA ANUAL COLECTIVA (Sv-persona)
	1993	(1988)	1993
I	0,09	(0,05)	127.000
II	0,008	(0,004)	20.000
III	0,008	(0,001)	6.000
IV	0,008	(0,0005)	4.000
TOTAL:	-	-	160.000
MEDIA:	0,03	-	-

Se presentan, en la **Tabla 1.9**, los valores medios de la frecuencia de exámenes diagnósticos utilizando radiofármacos llevados a cabo en los distintos países del mundo en diferentes periodos de tiempo³¹.

Tabla 1.9.- Número total anual de estudios de Medicina Nuclear por cada 1.000 habitantes.

PAISES CON NIVEL DE SALUD	N° ESTUDIOS / 1.000 HABITANTES		
	1970-1979	1980-1984	1985-1990
I	11,0	6,9	6,0
II	0,9	0,1	0,5
III	0,25	0,25	0,30
IV	-	0,014	0,10

El desarrollo de las técnicas de Tomografía por Emisión de Positrones (PET) y la proliferación de la Tomografía Computarizada por Emisión de Fotón Unico (SPECT) están contribuyendo, al incremento del número de estudios esperados por habitante en los países más avanzados, lo que de alguna manera puede compensar negativamente la disminución de las dosis colectivas producida como consecuencia de la utilización de radiofármacos con menos impacto radiológico.

I.1.3.1.3.- Conclusiones: Uso médico con fines diagnósticos

Considerando todos los medios de diagnóstico médico que utilizan las radiaciones ionizantes, se ha llegado a estimar que la dosis efectiva anual correspondiente a su uso alcanza 1,1 mSv para los países de nivel sanitario I, siendo 0,3 mSv el valor que se acepta para la media de la población en todo el mundo. Según esto la dosis colectiva efectiva por el uso de radiaciones con fines diagnósticos se puede evaluar en unos $1,8 \cdot 10^6$ Sv-persona/año^[3].

La tendencia esperada de que se produzca un aumento de la exposición a la población debido al supuesto incremento del uso de las radiaciones ionizantes con fines de diagnóstico médico a medida que los países de bajo nivel de cuidados de salud vayan alcanzando grados de desarrollo suficientes, también está teniendo su contrapartida en la disminución de las dosis que están teniendo lugar por el progresivo decrecimiento de los valores individuales por examen y por la sustitución de estos estudios por otras técnicas alternativas, sobre todo mediante el análisis de imágenes obtenidas a través de la resonancia magnética y de los ultrasonidos.

I.1.3.2.- USO MÉDICO CON FINES TERAPÉUTICOS

Aunque las dosis a los pacientes sometidos a tratamientos de radioterapia (teleterapia o braquiterapia) son muy superiores a las que se manejan en cualquier otro tipo de examen diagnóstico con radiaciones ionizantes, su repercusión a nivel colectivo no es tan importante debido a que el número de pacientes implicados es muy inferior.

El número de tratamientos realizados utilizando radiofármacos se estiman en 0,1 por 1.000 habitantes en países de nivel sanitario I, con un 99% de los tratamientos usando ^{131}I ^[16].

Se considera que en países de nivel I, el número de tratamientos con teleterapia y braquiterapia es de 2,4 por cada 1.000 habitantes, mientras que las frecuencias para los de niveles II, III y IV, se evalúan en un 25%, 4% y 2%, respectivamente, de aquel valor^[1]. El número total de procesos llevados a cabo anualmente en todo el mundo se estima en unos 4,9 millones^[3].

Se ha evaluado una dosis colectiva efectiva anual debida a los tratamientos terapéuticos mediante radiaciones ionizantes en torno a los $1,5 \cdot 10^6$ Sv-persona.

Un resumen de todos los datos disponibles sobre las dosis efectivas colectivas anuales estimadas^[1], así como del número de tratamientos llevados a cabo, tanto por cada 1.000 habitantes como totales^[3], se presentan en la **Tabla 1.10**.

Tabla 1.10.- Dosis estimadas a la población mundial debida a tratamientos de terapia con radiaciones.

PAISES CON NIVEL DE SALUD	N° ANUAL DE PROCESOS POR 1.000 HABITANTES ^[1]		N° TOTAL DE PROCESOS (Teleter. Y Braq.) (millones) ^[3]	DOSIS EFECTIVA COLECTIVA (Teleter. y Braq.) (Sv-persona) ^[3]
	Teleterapia y Braquiterapia	Fuentes no encapsuladas		
I	2,4	0,4	3,2	980.000
II	0,6	0,1	1,6	480.000
III	0,1	0,016	0,085	26.000
IV	0,05	0,008	0,023	7.000
TOTAL:	-	-	4,9	1.500.000
MEDIA:	0,9	-	-	-

I.1.3.3.- RESUMEN: USO MÉDICO DE RADIACIONES

Considerando el valor de $1,5 \times 10^6$ Sv-persona para tratamientos médicos con radiaciones y teniendo en cuenta que la dosis efectiva colectiva originada por la aplicación de técnicas de Radiodiagnóstico o Medicina Nuclear en todo el mundo se elevaba a $1,8 \times 10^6$ Sv-persona, las dosis colectivas derivadas del uso médico de las radiaciones ionizantes, tanto en su faceta diagnóstica como terapéutica, alcanza un valor global de unos $3,3 \times 10^6$ Sv-persona por año.

Esta cifra, lleva a afirmar que la utilización médica de las radiaciones ionizantes es la causa más importante de exposición a fuentes de origen no natural derivada de prácticas humanas, representando aproximadamente la cuarta parte de la dosis colectiva anual a la población mundial debida a fuentes naturales de radiación.

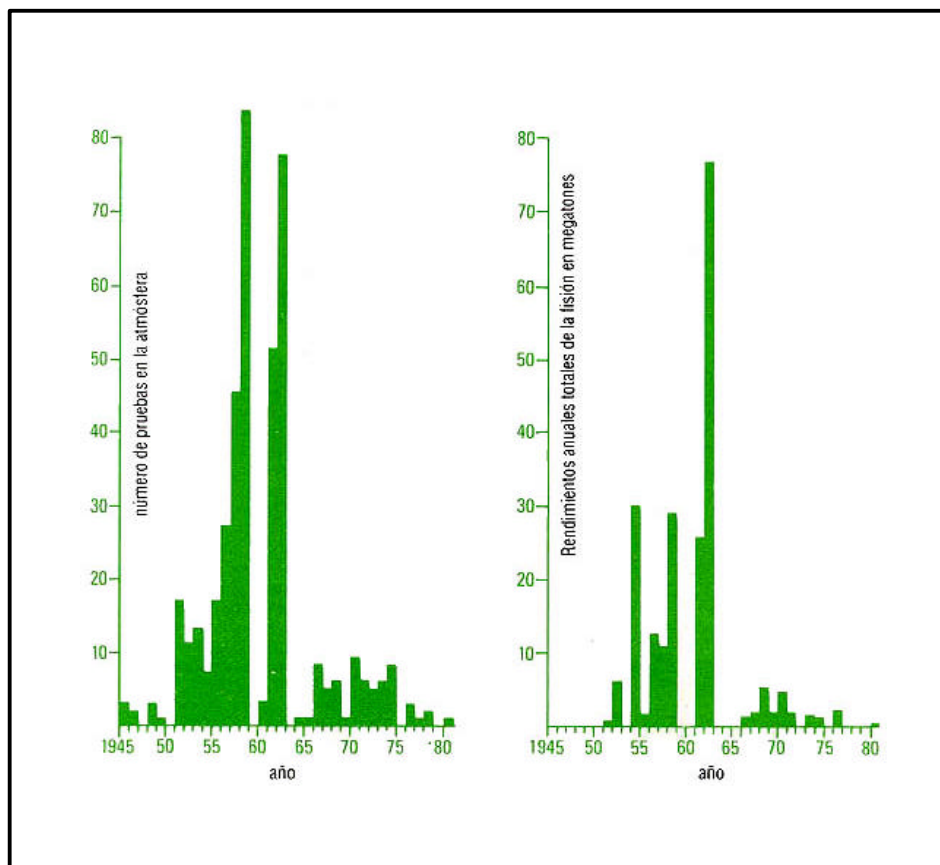
La exposición de la humanidad debida al uso médico de las radiaciones puede esperarse que se incremente en la medida en que los diferentes países vayan alcanzado niveles de desarrollo económico y social superiores, con el consiguiente avance en su nivel sanitario. Se considera que este incremento no será tan importante como pudiera creerse inicialmente ya que estará compensado por la utilización de prácticas cada vez menos agresivas, desde el punto de vista de la protección radiológica, y de otras técnicas alternativas de diagnóstico, inocuas para el organismo humano.

I.1.4.- USO BÉLICO DE RADIACIONES IONIZANTES

Una de los sumandos del total de la exposición por fuentes artificiales a la que está sometida la humanidad proviene del “*fall out*” debido al conjunto de explosiones nucleares llevadas a cabo en la atmósfera, sobre todo en diversos lugares del hemisferio norte, entre 1.945 y 1.980. En total se han certificado unos 520 ensayos nucleares con un conjunto de productos de fusión y fisión equivalentes a unos 545 megatonnes^[3].

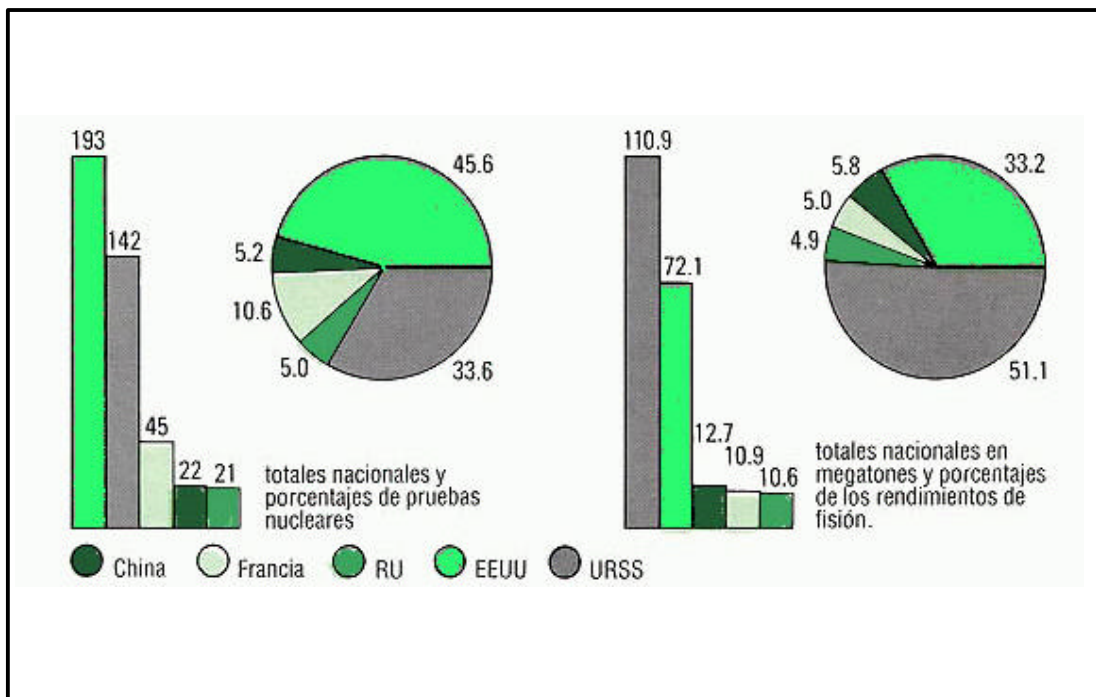
En la **Figura I.3**, se muestran, de manera esquemática, el número de pruebas nucleares realizadas, así como los rendimientos anuales totales de la fisión, en cada uno de los años que van desde 1.945 a 1.980^[10]. Se puede comprobar que los períodos en que proliferaron con mayor intensidad estas pruebas fueron los comprendidos entre 1.952-1.958 (fundamentalmente por los Estados Unidos, la Unión Soviética y Gran Bretaña) y 1.961-1.962 (dominando la URSS y EE.UU.), correspondiendo a este último período los ingenios nucleares de mayor potencia y, por tanto, la emisión de más altas concentraciones de radionúclidos artificiales en la atmósfera.

Figura I.3.- Pruebas Nucleares en la atmósfera: Número de pruebas y rendimientos anuales totales, en el período 1.945-1.980.



La estimación de la contribución de cada uno de los países implicados en estas pruebas nucleares en la atmósfera, se presentan en la **Figura I.4**, tanto en valores absolutos como porcentuales^[10].

Figura I.4.- Contribución de los distintos países a las pruebas nucleares en la atmósfera llevadas a cabo entre 1.945 y 1.980. Número de ensayos y rendimientos totales anuales.



Desde la firma en Moscú, en 1.963, del *Tratado para la Eliminación de Pruebas de Armas Nucleares en la Atmósfera, en el Espacio Exterior y Bajo el Agua* (Tratado parcial de no proliferación de pruebas nucleares), la mayoría de los ensayos se han realizado en emplazamientos subterráneos, con la excepción de Francia y China que siguieron hasta 1.980, si bien con frecuencias decrecientes, realizando pruebas menores en la atmósfera.

Aunque el total de productos liberados en las explosiones subterráneas llevadas a cabo desde la firma del Tratado ha sido del orden de 90 megatones, su incidencia en la dosis colectiva comprometida es, como cabría esperar, proporcionalmente mucho menor, excepto para localizaciones muy concretas, por lo que las pruebas realizadas con anterioridad en la atmósfera se mantienen como la principal fuente de exposición a los seres humanos debida a los ensayos de armas nucleares.

Algunos de los productos radiactivos originados por los ensayos nucleares en la atmósfera se depositan en las proximidades del lugar de la explosión, permaneciendo otros en la troposfera (capas bajas de la atmósfera), siendo transportados por el viento alrededor del mundo para caer finalmente en distintos lugares en un período de tiempo que puede ser de aproximadamente un mes. No obstante, la mayor parte de los productos radiactivos emitidos en las pruebas nucleares llegan a la estratosfera (entre 10 y 50 km de altitud), donde permanecen largo tiempo para ir descendiendo lentamente y esparciéndose, durante meses, por toda la superficie terrestre.

Aunque el número de isótopos radiactivos presentes en la atmósfera como resultado de las explosiones de estos ingenios atómicos es muy amplio (varios centenares), solamente unos cuantos tienen significación a la hora de evaluar la incidencia en la exposición de la humanidad a este tipo de radiación artificial. Se estima que tan sólo cuatro de estos radionucleidos contribuyen en más del uno por ciento a la dosis comprometida efectiva colectiva a la población mundial, y que son, en orden decreciente: ^{14}C , ^{137}Cs , ^{95}Zr y ^{90}Sr .

El compromiso de dosis efectiva colectiva originada por las pruebas de este armamento alcanza alrededor de 3×10^7 Sv-persona, de la que $3,6 \times 10^6$ Sv-persona ha sido suministrada hasta 1.980^[10], 7×10^6 será entregada hasta el año 2.200 y el resto a lo largo de los próximos 10.000 años, debido a la larga vida media del ^{14}C ^[31]. Las dosis comprometidas debidas al ^{95}Zr , con 64 días de período de semidesintegración, y del ^{137}Cs y ^{90}Sr , con períodos de 30 años, no son significativas a esos largos plazos.

En otros términos, se podría decir que la media de dosis efectiva total a la población durante los años que restan hasta el 2.200 sería en total de 1,4 mSv, alcanzando los 3,7 mSv la dosis efectiva comprometida en los próximos 10.000 años. La aparente divergencia entre estos datos, donde la fracción de la dosis comprometida entregada hasta el 2.200 (1,4 mSv) representa el 38 % del total mientras que la correspondiente a la dosis colectiva (7×10^6 Sv-persona) solamente es el 23 %, se debe a suponer que los 3.200 millones de habitantes existentes en las épocas en que se realizaron los más importantes programas de ensayos nucleares, aumentarán hasta una cifra constante de 10.000 millones de personas para la mayor parte de los próximos 10.000 años.

Como se puede comprobar, a los efectos de evaluar la importancia de esta fuente de exposición, estos valores de dosis efectiva "*a largo plazo*" se mantienen en el mismo orden de magnitud que el total de la dosis efectiva estimada *per cápita* debida a fuentes naturales de radiación durante un solo año.

Tampoco hay que dejar de considerar la contribución a la dosis a la población que representa las operaciones necesarias para la obtención de los materiales utilizados en la fabricación de este tipo de armamento.

El proceso comienza con la extracción y molido del uranio, que luego es enriquecido en alto grado para servir de componente a los ingenios nucleares o ligeramente para su uso en reactores para la producción de plutonio y tritio.

Aunque los datos sobre estos procesos no son fácilmente asequibles, se han evaluado por comparación con los que se llevan a cabo para la producción de energía mediante combustible nuclear, estimándose valores de dosis colectiva locales y regionales de unos 1.000 Sv-persona y globales de entre 10^4 y 10^5 Sv-persona, lo que en todo caso representa una pequeña parte del total originado por el conjunto del programa del ensayo nuclear^[3].

No obstante, también se han producido valores anormalmente altos en determinados lugares o instalaciones muy concretas. En las cercanías de la planta de producción de plutonio ubicada en Hanford (Washington, USA) se realizaron estudios que sugieren unas dosis en tiroides que pueden alcanzar los 10 Gy en alguna época de los años 40. La descarga de residuos radiactivos, en los comienzos de la década de los 50, de la planta militar soviética de procesado de combustible cerca de Kyshtym, en los montes Urales, dio como resultado una dosis efectiva acumulada de alrededor de 1 Sv en algunas localidades ribereñas alejadas hasta 30 km del lugar.

I.1.5.- PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EN CENTRALES NUCLEARES

La producción de energía eléctrica a partir de combustible nuclear es la más controvertida de las fuentes artificiales de radiación a pesar de que, en funcionamiento normal de estas instalaciones nucleares, su contribución a la exposición de la población a la radiación es muy reducida.

Desde los años 50, en que empezaron a desarrollarse estos sistemas, se ha venido incrementando continuamente la producción de energía eléctrica a partir de combustibles nucleares, si bien, en la actualidad, su importancia relativa es menor que lo que fue hace años, considerando el conjunto de todos los medios productores de electricidad.

A finales de 1.984 había en el mundo un total de 345 plantas nucleares productoras de energía eléctrica, ubicadas en 26 países diferentes. Con una capacidad de producción total de 220 GW, generaban el 13% del total de la energía mundial^[10]. Esta capacidad se había doblado en poco más de 5 años.

La producción de energía eléctrica a partir de la fisión atómica siguió desarrollándose progresivamente de tal manera que al término de 1.987 ya existían 417 unidades en 26 países que generaban un total de 298 GW, lo que suponía el 16% de la potencia eléctrica generada total^[17].

En 1.989 la producción en centrales nucleares alcanzó los 212 Gigawatios-año (GWa) lo que representó el 17% del total de la energía obtenida a partir de todas las fuentes en ese año. Hasta 1.990 se estima que la energía eléctrica total generada en reactores atómicos fue de unos 2.000 GWa^[3].

En los sucesivos *Informes UNSCEAR* se ha tratado de establecer el compromiso de dosis colectiva para la obtención de 1 GWa de energía eléctrica a partir de combustibles nucleares, incluyendo todas las contribuciones del proceso, desde la minería y procesado del mineral, a la fabricación de los combustibles, las operaciones en el reactor nuclear, el reprocesado, el transporte, la eliminación de los residuos, etc.

Los valores de las dosis colectivas comprometidas por unidad de energía generada se han ido estimando con ayuda de los modelos medioambientales desarrollados por el *Comité Científico de las Naciones Unidas para Investigaciones sobre Energía Atómica* en sus distintos *Informes*. En la **Tabla 1.11** siguiente se especifican las contribuciones de los distintos pasos del proceso de producción de energía eléctrica por fisión nuclear, así como los valores totales que se estiman para 1.993 (*UNSCEAR-93*^[3]) tanto en su componente local y regional como globalmente considerados.

Tabla 1.11.- Dosis colectiva normalizada para el público debida a la producción de energía nuclear.

FUENTE	DOSIS COLECTIVA EFECTIVA POR UNIDAD DE ENERGÍA GENERADA [Sv-persona (Gwa) ⁻¹]
<i>Componente Local y Regional</i>	
Extracción y procesado del mineral	1,5
Fabricación del combustible	0,003
Operación del reactor	1,3
Reprocesado	0,25
Transporte	0,1
TOTAL (redondeado)	3,0
<i>Componente Global (incluyendo residuos sólidos)</i>	
Minería (cedidos sobre 10.000 años)	150,0
Eliminación residuos operaciones reactor	0,5
Radionúclidos globalmente dispersados desde reprocesados y desechos de residuos sólidos	50,0
TOTAL (redondeado)	200

Los anteriores datos disponibles, procedentes del *Informe UNSCEAR-82*^[2], arrojan un más alto valor que alcanzaba los 5,7 Sv-persona [GWa]⁻¹ para el total de las operaciones del ciclo del combustible (contribución local y regional): 0,54 para la minería y procesado del mineral, 0,002 para la fabricación del combustible, 4,16 en las operaciones en el reactor, 1,0 para el reprocesado del combustible y 0,003 en el transporte.

En relación a la contaminación ambiental provocada por los reactores nucleares utilizados en la generación de energía eléctrica, se estima que el 90% de la dosis a corto plazo es suministrada durante el año en el que se produce la liberación de los materiales radiactivos, mientras que en los primeros 5 años se suministra el 98% del total comprometido. La práctica totalidad de la dosis se recibe por la población local y regional, o por personas que vivan en un entorno de la central no más allá de unos pocos cientos de kilómetros.

Distinto es el caso en la emisión de algunos radionúclidos de larga vida que también se producen en ciertas fases del ciclo del combustible. Se considera que estos radionúclidos suministran a la población mundial dosis medias anuales muy similares a las que la radiación a corto plazo suministra a los habitantes locales y regionales, pero durante un período de tiempo mucho más largo: el 90% de la dosis se reparte entre mil y cien millones de años después de la descarga^[10].

El total de la dosis colectiva comprometida proveniente de emisión de efluentes de los ciclos de combustible nuclear hasta finales de 1.989 se estimó ligeramente superior a los 10.000 Sv-persona. El compromiso de dosis colectiva por los radionúclidos dispersados globalmente y por los desechos de residuos sólidos es incierta, ya que depende de futuras prácticas de eliminación de residuos y de la evolución de la población mundial durante los próximos 10.000 años. Usando la de 200 Sv-persona (GWh)⁻¹ mostrada en la **Tabla 1.11** anterior, se estima que para el total de la energía nuclear generada, 2.000 GWh, se ha comprometido una dosis colectiva efectiva de 400.000 Sv-persona.

Si la tasa de generación y los valores normalizados de la **Tabla 1.11** se consideran representativos del período de 50 años centrados en el presente, la dosis colectiva efectiva en esos 50 años debida a la generación de electricidad mediante energía nuclear, sería de alrededor de 2×10^6 Sv-persona.

La dosis individuales relacionadas con la producción de energía nuclear son muy variables, aún para personas que habitan en zonas próximas a centrales similares. Para las principales tipos de plantas productoras, la dosis efectiva anual para los miembros del público en general más altamente expuestos, pueden variar en el rango de 1 a 20 μ Sv^[3].

I.1.6.- EXPOSICIONES DEL PÚBLICO POR GRANDES ACCIDENTES NUCLEARES

A lo largo de la historia de la utilización de la energía nuclear, se han producido una gran diversidad de accidentes, de forma similar a los que se producen en cualquier otra actividad humana.

Aquí sólo se mencionarán los que han podido generar exposiciones importantes al público en general, no haciendo referencia a aquellos otros que han afectado a personal profesionalmente expuesto o a pacientes sometidos a dosis excesivas por errores humanos o malfunción de algún equipo en sus procesos de diagnóstico o tratamiento terapéutico mediante radiaciones ionizantes.

I.1.6.1.- ARMAMENTO NUCLEAR

En el proceso de producción y transporte de armamento nuclear han ocurrido varios accidentes.

En lo que se refiere al transporte de bombas atómicas cabe destacar el accidente producido en Palomares (España) en el año 1.966 con la ignición parcial del material fisiónable de dos bombas y la pérdida de otras dos sin estallar (recuperadas posteriormente intactas), procedentes de un avión militar de los Estados Unidos que estaba siendo abastecido en vuelo. Se produjo una contaminación de Plutonio (^{239}Pu y ^{240}Pu) en una superficie de $2,26 \text{ km}^2$, que repercutió de manera inapreciable en el incremento de la dosis colectiva en la región. La mayor dosis local medida como resultado de este accidente fue de alrededor de 200 mSv.

También se han producido otros accidentes relacionados con el transporte de armamento nuclear sobre tierra, así como la pérdida de bombas en el mar, pero que no han ocasionado efectos apreciables en el incremento de la dosis a la población.

Los dos más importantes accidentes originados en factorías productoras de armamento atómico, tuvieron lugar en Kyshtym en el sur de los Montes Urales (antigua Unión Soviética), en septiembre de 1.957, y en Windscale (Sellafield, Reino Unido) al mes siguiente del mismo año.

El accidente de Kyshtym se originó por una explosión química producida por un fallo del sistema de refrigeración de los tanques de almacenamiento de los residuos de los productos de fisión de alta actividad. Se produjeron, principalmente, emisiones de cerio y praseodimio ($^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$: 66%), circonio y niobio ($^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$: 25%), estroncio e ytrio ($^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$: 5%) y rutenio y rodio ($^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$: 4%)^[3], que originaron dosis

debidas a su depósito en el suelo y por la inclusión del estroncio en la cadena alimentaria.

Las dosis colectiva se calculó repartiéndola equitativamente entre las población que fue evacuada del área de alta contaminación (alrededor de 10.000 personas) y aquella que permaneció en las zonas menos contaminadas (en torno a las 260.000 personas). La dosis colectiva total a lo largo de 30 años fue estimada en unos 2.500 Sv-persona. Las exposiciones individuales más altas correspondieron a las aproximadamente 1.150 personas que fueron evacuadas de la zona afectada a los pocos días del accidente, para las que se estiman dosis efectivas de 500 mSv.

En la factoría de Windscale (Reino Unido) se produjo un incendio en el núcleo de grafito y uranio natural de un reactor nuclear refrigerado por aire utilizado para la fabricación de plutonio con fines militares. Los materiales liberados fueron fundamentalmente isótopos de xenón, yodo, cesio y polonio. La más importante ruta de incorporación a la población de estos radionúclidos fue la inhalación y la ingestión de leche, sobre todo el ^{131}I y el ^{210}Po . La dosis efectiva colectiva en toda Europa debido a esta causa, incluida Gran Bretaña, fue de unos 2.000 Sv-persona. Las dosis individuales más intensas detectadas fueron de unos 100 mGy que se incorporaron en tiroides de niños que vivían en zonas próximas a la factoría.

I.1.6.2.- CENTRALES NUCLEARES

También ha habido varios importantes accidentes en centrales nucleares productoras de energía eléctrica. Sin duda los dos más destacables son los que se produjeron en Three Mile Island (USA) y en Chernobyl (URSS).

En el accidente de marzo de 1.979 del reactor nuclear de la central de Three Mile Island se produjeron grandes daños en su núcleo que dieron origen a productos de fisión que sin embargo fueron retenidos en su mayor parte dentro del sistema contenedor. La dosis efectiva colectiva total no superó, gracias a ello, los 40 Sv-persona, siendo la más alta dosis individual estimada menor de 1 mSv.

La explosión del reactor nuclear de la central de Chernobyl, que se produjo en abril de 1.986, ha sido el más grave accidente de este tipo ocasionado hasta la fecha y sus consecuencias han sido profusamente estudiadas a lo largo de los últimos años, siendo aún motivo de análisis y estudio, convocándose reuniones internacionales sobre el tema muchos años después.

La liberación de radionúclidos a la atmósfera produjo importantes distribuciones de dosis efectivas en todo el hemisferio norte, sobre todo en la Unión Soviética y en Europa.

Se considera que este accidente ha producido algún tipo de efectos sobre unos 7 millones de personas (de ellas, 3 millones de niños) sólo en Ucrania, Bielorrusia y Rusia y que ha sido la causa directa de 11.000 casos de cáncer de tiroides.

La dosis colectiva efectiva comprometida se estima que se elevó hasta los 600.000 Sv-persona, siendo los valores aceptados para las dosis efectivas individuales muy variables, estimándose que los correspondientes a los pequeños grupos de personas evacuados de las proximidades de la central pudieron alcanzar los 0,5 Sv.

Por otro lado, las dosis efectivas medias anuales medidas en las zonas bajo estricto control que rodean a las áreas evacuadas, van decayendo desde los 40 mSv medidos en 1.987 a valores menores de 10 mSv correspondientes a cada uno de los años siguientes a 1.989. Una revisión internacional de la situación en las zonas que rodean la región evacuada tras el accidente, llevada a cabo en 1.990, corrobora los valores de dosis estimados.

I.1.7.- EXPOSICIONES OCUPACIONALES

Existen ciertos tipos de trabajos que llevan consigo un riesgo de exposición a la radiación, ya sea porque directamente se trabaja con sustancias radiactivas o porque durante la actividad laboral el trabajador se ve sometido a la acción de fuentes de radiación naturales o artificiales. La primera persona expuesta durante su trabajo, Marie Curie, murió de una enfermedad de la sangre que probablemente fue causada por sobreexposición a la radiación, estimándose que al menos 336 de los primeros trabajadores en este campo murieron debido a las dosis recibidas^[10].

En la actualidad, la mayor parte de los trabajadores expuestos a radiaciones disponen de sistemas de monitorización ambiental o individual que posibilitan el conocimiento de las exposiciones ocupacionales recibidas y el control necesario para conocer si su trabajo se desarrolla dentro de los límites de dosis permitidos por las legislaciones nacionales y recomendados por los organismos internacionales.

Esta monitorización se lleva a cabo, en una inmensa mayoría de las veces, atendiendo únicamente a exposiciones externas, ya que éstas son las más importantes fuentes de irradiación durante el desarrollo de la mayoría de las actividades laborales. Las internas son poco significativas, si no tenemos en cuenta aquellas debidas al radón que naturalmente está presente en cualquier lugar de trabajo.

No es posible conocer de forma directa la dosis efectiva para los trabajadores profesionalmente expuestos. En la mayor parte de las medidas de exposiciones externas, las dosis efectivas se estiman a partir de los datos obtenidos en pequeños dispositivos personales de monitorización: "*dosímetros*". Las posibles dosis desde fuentes internas de radiación, se evalúan a partir de un cierto número de medidas, como pueden ser la cantidad de material radiactivo excretado o retenido en el cuerpo o la concentración de sustancias radiactivas presentes en el aire de los lugares de trabajo.

Existen grandes variaciones entre las dosis anuales registradas para distintas ocupaciones e incluso entre los datos procedentes de distintos países referidos a unos mismos tipos de trabajo.

Se ha podido establecer, de forma global y con datos promediados para todo el mundo, las dosis efectivas para ciertos trabajadores monitorizados individualmente, así como las dosis efectivas colectivas para los distintos tipos de ocupaciones con riesgo de exposición a las radiaciones. Los datos correspondientes al quinquenio 1.985-1.989 se resumen en el *Informe UNSCEAR-93*^[3] y se presentan aquí a continuación en la **Tabla 1.12**.

Tabla 1.12.- Exposición ocupacional mundial anual media para trabajadores monitorizados: 1.985-1.989.

CATEGORÍA OCUPACIONAL	DOSIS EFECTIVA COLECTIVA ANUAL (Sv-persona)	DOSIS EFECTIVA MEDIA ANUAL POR TRABAJADOR (mSv)
<i>Ciclo del combustible nuclear</i>		
Extracción del mineral	1.200	4,4
Molienda del mineral	120	6,3
Enriquecimiento	0,4	0,08
Fabricación del combustible	22	0,8
Operaciones en el reactor	1.100	2,5
Reprocesado	36	3,0
Investigación	100	0,8
TOTAL (redondeado)	2.500	2,9
<i>Otras ocupaciones</i>		
Aplicaciones industriales	510	0,9
Actividades en defensa	250	0,7
Aplicaciones médicas	1.000	0,5
TOTAL (redondeado)	1.800	0,6
<i>Todas las ocupaciones</i>		
TOTAL GLOBAL (redondeado)	4.300	1,1

En las dosis efectivas colectivas anuales indicadas en la **Tabla 1.12** anterior, no se incluyen las correspondientes a fuentes naturales de radiación, dado que los trabajadores sometidos a ese tipo de exposiciones normalmente no están monitorizados (por ejemplo, minería distinta de la de extracción del uranio o tripulaciones aéreas de vuelos comerciales).

La dosis efectiva anual típica para las tripulaciones aéreas alcanza los 2 ó 3 mSv, con valores mucho más altos en vuelos supersónicos.

En las industrias extractivas de minerales, las dosis efectivas anuales están en el rango de 1 a 2 mSv en minas de carbón y de 1 a 10 mSv en otras minas. Naturalmente, las explotaciones subterráneas someten a las personas que trabajan en ellas a dosis superiores a las recibidas por quienes realizan los mismos trabajos en minas a cielo abierto.

Con todo, la dosis anual colectiva a los trabajadores procedente de fuentes naturales se estima en alrededor de 8.600 Sv-persona, con un contribuyente importante procedente del subsuelo que no tiene su origen en la minería del uranio sino en la del carbón (alrededor de la mitad del total con esa procedencia). Este valor hay que considerarlo, sin embargo, con bastantes reservas dado que los datos sobre trabajadores monitorizados en estos tipos de actividades son muy escasos.

Las dosis ocupacionales estimadas últimamente y que corresponden a la reciente publicación *UNSCEAR-93*^[31], de la que se ha extraído la **Tabla 1.12**, son algo diferentes de las anteriormente referidas. Esto se debe principalmente a las más amplias y mejoradas bases de datos disponibles y a las más detalladas y precisas medidas realizadas.

El cambio más sustancial se refiere a las dosis estimadas para el personal profesionalmente expuesto en aplicaciones médicas con radiaciones ionizantes. Esto es debido a que se estaban produciendo sobreestimaciones de las dosis efectivas obtenidas a partir de los datos procedentes de los dosímetros personales que se colocan en la superficie del cuerpo, debido a efectos de apantallamiento, sobre todo cuando se prenden en los delantales plomados de protección. Las evaluaciones actuales de las dosis colectivas debidas al uso médico de las radiaciones son más bajas en un factor de 5 que las primitivas, estimándose que aún podrían reducirse a la mitad sin riesgo de cometer un excesivo error.

En la industria nuclear no ha variado sustancialmente los valores medios considerados de dosis colectiva anual a lo largo de los últimos 15 años, a pesar de haberse incrementado la energía eléctrica generada durante este período tres veces y haberse duplicado el número de trabajadores en esta rama de la industria. Se debe a que la dosis efectiva colectiva por unidad de energía eléctrica producida ha disminuido en un 50 % y la dosis media individual en un 30 %.

Aunque las dosis individuales medias para los trabajadores de la minería en operaciones de extracción y molienda del mineral, han aumentado de forma apreciable, se han reducido los valores correspondientes a los operarios de los reactores nucleares, como consecuencia de la mejora de las prácticas de operación y de la modificación de las plantas a partir de los años 80.

Las diversas ocupaciones dentro de la explotación de los reactores nucleares suministran a los trabajadores dosis diferentes. Las tareas de mantenimiento, tanto en las revisiones preventivas y rutinarias como en las reparaciones imprevistas u operaciones especiales, origina la mayor parte de la dosis colectiva. Se dispone de datos en este sentido que estiman que aproximadamente el 70% de las dosis recibidas por todos los trabajadores profesionalmente expuestos en los reactores de Estados Unidos corresponden a los operarios que realizan tales tareas^[10].

En general y de forma globalmente considerada, los trabajadores de todo tipo de industrias reciben en la actualidad dosis inferiores a hace unos años, pudiendo llegar a valores próximos a la mitad de los estimados con anterioridad.

En la industria de defensa, también se ha mejorado en la protección a las personas expuestas, habiendo disminuido las dosis efectivas, tanto individuales como colectivas, fundamentalmente debido a la mejora en las operaciones y el mantenimiento de los buques de propulsión nuclear.

El número de accidentes importantes por sobreexposición a las radiaciones, en el que se hayan visto afectados trabajadores de las propias instalaciones es, comparativamente, muy pequeño.

El más grave de ellos fue, con diferencia, el de la central nuclear de Chernobyl que produjo la muerte a 31 personas y dosis suficientemente elevadas a otros 200 trabajadores como para que fueran la causa clínica de efectos determinísticos graves.

La contribución a la dosis colectiva a los trabajadores de instalaciones radiactivas debida a los pequeños accidentes producidos durante el desarrollo de sus actividades es insignificante en el total de la dosis colectiva ocupacional.

Hay que hacer mención especial a la dosis colectiva correspondiente a los tareas llevadas a cabo para la realización del contenedor del reactor nuclear dañado en la central de Chernobyl, actividad en la que se vieron involucrados 247.000 trabajadores y que produjo dosis individuales por exposición externa de unos 0,12 Sv de media, unos 10 mSv por exposición interna y una dosis efectiva colectiva de 30.000 Sv-persona^[3]. El efecto de esta operación especial no se ha incluido en las dosis colectivas ocupacionales debidas a accidentes, a pesar de ser consecuencia directa de uno de ellos.

I.1.8.- RESUMEN: FUENTES NATURALES Y ARTIFICIALES DE RADIACIÓN

Como resumen, se muestran en la **Tabla 1.13** las dosis efectivas colectivas típicas correspondientes al período de 50 años, a partir de 1.945, debidas a todas las fuentes de exposición significativas así como a otros sucesos individuales¹³¹.

Tabla 1.13.- Dosis colectiva comprometida para la población mundial para un período de 50 años, debidas a prácticas continuas o a acontecimientos particulares, desde 1.945 a 1.992.

FUENTE	BASE DE ESTIMACIÓN	DOSIS COLECTIVA EFECTIVA (millones de Sv-persona)	
Fuentes naturales	Tasa corriente para 50 años	650	
Exposiciones médicas	Tasa corriente para 50 años	165	
Diagnóstico		90	
Tratamiento		75	
Bombas atómicas atmosféricas	Práctica completa	30	
Centrales nucleares		2,4	
	Práctica total hasta la fecha	0,4	
	Tasa corriente para 50 años	2	
Accidentes graves	Sucesos hasta la fecha	0,6	
Exposiciones ocupacionales	Tasa corriente para 50 años	0,6	
Usos médicos		0,05	
Energía nuclear		0,12	
Usos industriales		0,03	
Actividades bélicas		0,01	
Minería no-uranio		0,4	
TOTAL (redondeado)		850	

Como se concluye del análisis de los datos expuestos más arriba en la **Tabla 1.13**, en términos de dosis efectiva colectiva a la población mundial, la mayor contribución, con una gran diferencia respecto a las demás, proviene de las fuentes naturales de radiación. La humanidad está expuesta, de forma prioritaria, a los rayos cósmicos y a la radiación procedente de los radionúclidos naturales presentes en el suelo (potasio, uranio, radio, torio, radón, etc.), en el agua, en los alimentos y en el propio cuerpo.

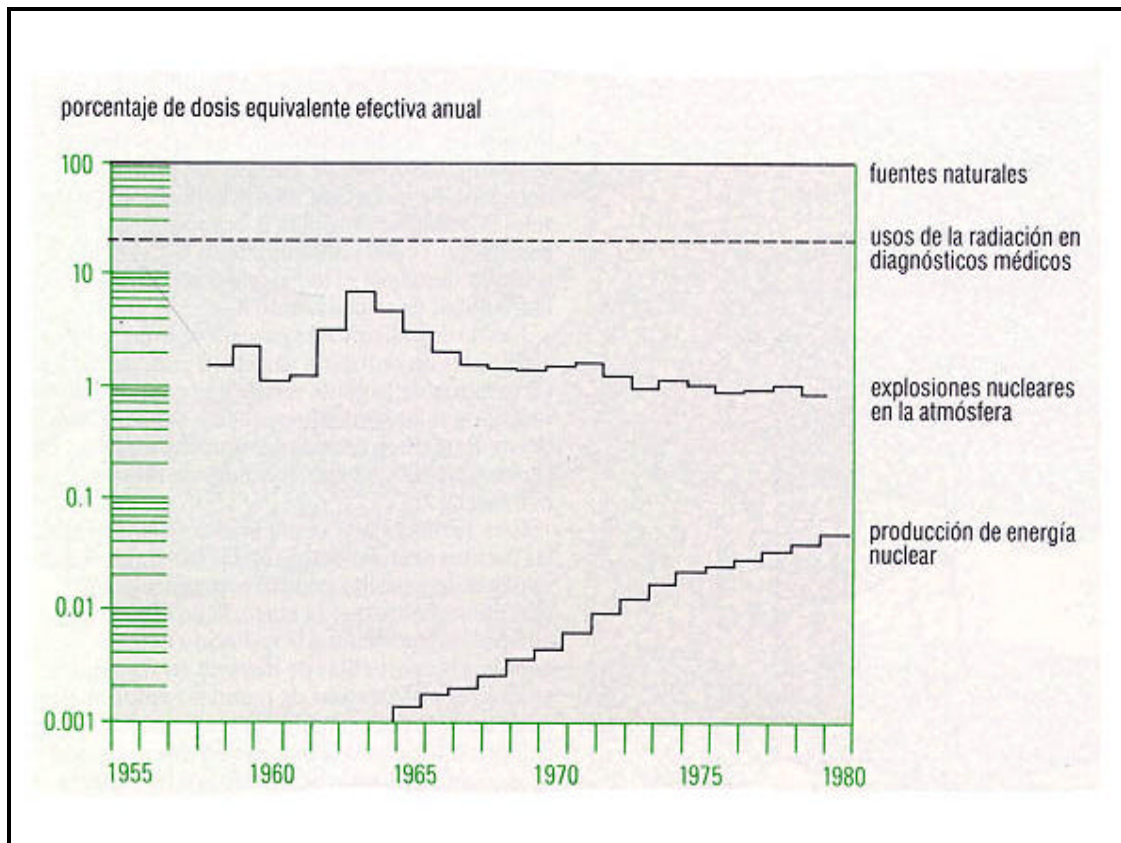
A continuación se encuentra la contribución a la dosis colectiva procedente del uso médico de las radiaciones ionizantes, tanto en los exámenes diagnósticos por RX o mediante suministro de radiofármacos como por los tratamientos terapéuticos a los que se ven sometidos ciertos pacientes.

Las explosiones de artefactos nucleares llevadas a cabo en la atmósfera también han incrementado de forma considerable la dosis colectiva a la humanidad, si bien no se han producido nuevas pruebas de este tipo desde 1.980.

En mucha menor medida ha contribuido, en términos de incremento de la dosis efectiva colectiva, la producción de energía eléctrica en centrales nucleares, los accidentes que hayan dado lugar a sobreexposiciones del público en general a los efectos de las radiaciones o las exposiciones ocupacionales correspondientes a trabajos llevados a cabo en instalaciones radiactivas (médicas, industriales, de generación de energía eléctrica, etc.).

La **Figura 1.5** es ilustrativa del valor relativo y de la evolución temporal estimada, en el período que va desde 1.945 a 1.980, de las distintas fuentes de radiación, en términos de porcentaje de dosis efectiva anual, comparativamente con la natural, considerando el valor de ésta constante e igual al 100%^[10].

Figura I.5.- Tendencia de las principales fuentes de radiación. Porcentaje de dosis efectiva anual en el período 1.945-1.980.

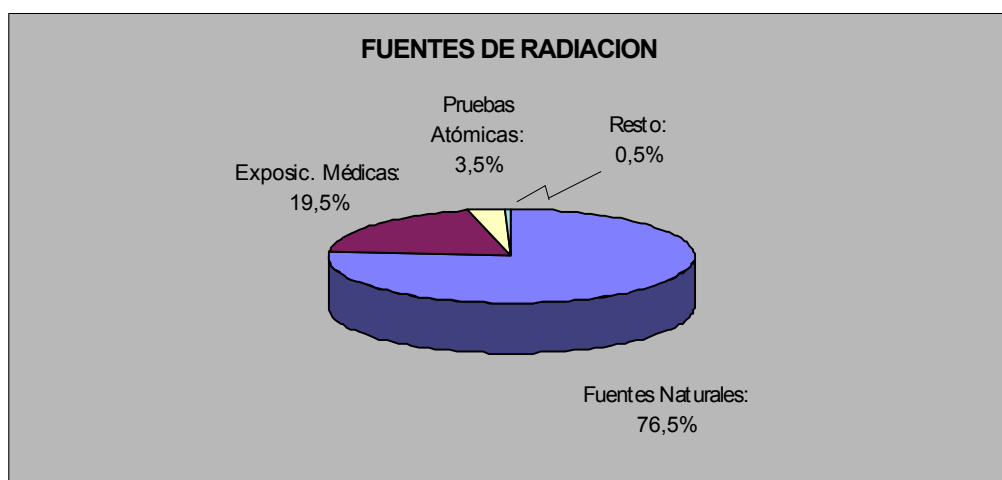


La distribución porcentual de las distintas contribuciones a la dosis efectiva colectiva a la población^[3] debidas a las diferentes fuentes de radiación, se indican en la **Tabla 1.14** y se representan en la **Figura I.6**.

Tabla 1.14.- Distribución porcentual de los distintos componentes que contribuyen a la dosis efectiva colectiva a la población mundial.

FUENTE	DOSIS EFECTIVA COLECTIVA (%)
Fuentes naturales	76,5
Exposiciones médicas	19,5
Bombas atómicas atmosféricas	3,5
Centrales nucleares	0,3
Accidentes (no ocupacionales)	0,1
Exposiciones ocupacionales	0,1
TOTAL	100

Figura I.6.- Distribución porcentual de los distintos componentes que contribuyen a la dosis efectiva colectiva a la población mundial.



En cuanto a las dosis efectivas individuales, hay que señalar la dificultad que existe para realizar estimaciones precisas de ellas, por lo que únicamente es posible realizar ciertas aproximaciones para algunas de las fuentes anteriormente indicadas.

La dosis efectiva anual media para fuentes naturales, como ya se ha comentado repetidamente, se estima actualmente en unos 2,4 mSv para personas adultas con valores que pueden llegar, en lugares con niveles de radiación natural especialmente elevados, hasta 10 ó 20 mSv.

Los procesos médicos llevados a cabo en países desarrollados contribuyen entre 1 y 2 mSv a las dosis efectivas como media por persona y año.

Aunque en la actualidad la mayoría de los radionúclidos de vida corta producidos por esta causa hayan ya decaído, las dosis efectivas debidas a las pruebas de artefactos nucleares explotados en la atmósfera, estimadas para los años 70, fueron en valor medio de unos 5 μ Sv por año^[9]. Las dosis efectivas anuales en las épocas de mayor intensidad de estas pruebas pudieron alcanzar probablemente valores entre 100 y 200 μ Sv en el hemisferio norte.

La población más altamente expuesta que vive en las cercanías de las instalaciones nucleares de producción de energía eléctrica puede verse sometida a dosis efectivas anuales en el rango de 1 a 200 μ Sv. Finalmente, las dosis efectivas ocupacionales para trabajadores monitorizados de instalaciones radiactivas se encuentran habitualmente en el rango entre 1 y 10 mSv anuales.

Las estimaciones sobre las exposiciones a la radiación de la población mundial y los riesgos que ellas conllevan, indican que las radiaciones ionizantes son un factor carcinogénico débil. Alrededor del 4 % de las muertes producidas por cáncer pueden tener su origen en la exposición a radiaciones, si bien la mayor parte de ellas son de origen natural, por lo que son de muy difícil control por el hombre. La creencia de que todos los cánceres mortales producidos en los últimos años en las ciudades de Hiroshima y Nagasaki se deben a las secuelas de las explosiones nucleares allí producidas al final de la Segunda Guerra Mundial, se ha demostrado equivocada al haberse concluido, tras amplios estudios de toda la población fuertemente expuesta a las radiaciones con motivo de esos acontecimientos, que solamente 350 cánceres mortales de los 3.350 ocurridos tuvieron su origen en los efectos de las bombas atómicas de 1.945^[3].

Para poder hacerse una idea más correcta sobre la importancia relativa que pueden tener las fuentes artificiales, consecuencia de la actividad del hombre, respecto de las naturales, de ocurrencia inevitable y difícilmente soslayables, basta comparar el peso que para la dosis efectiva colectiva tienen unas y otras, tal como se refleja en las **Tabla 1.13** y **Tabla 1.14** anteriores.

Otra forma de relacionar ambos tipos de fuentes de exposición a la radiación se presenta en la **Tabla 1.15**, del *Informe UNSCEAR-93*^[3], que compara las dosis correspondientes a la exposición a las distintas fuentes artificiales en períodos de tiempo equivalentes de exposición a fuentes naturales.

Tabla 1.15.- Exposición a fuentes originadas por la actividad del hombre, expresadas en períodos equivalentes de exposición a las fuentes naturales de radiación.

FUENTE	BASE DE COMPARACIÓN	PERIODO EQUIVALENTE DE EXPOSICIÓN A FUENTES NATURALES
Exposiciones médicas	Un año	90 días
Pruebas bombas atómicas	Todas las pruebas	2,3 años
Centrales nucleares	Todas hasta la fecha	10 días
Centrales nucleares	Un año de actividad	1 día
Accidentes graves	Sucedidos hasta la fecha	20 días
Exposic. ocupacionales medias	Un año de actividad laboral	8 horas

En esta **Tabla 1.15** se puede comprobar que la dosis correspondiente en media a un año completo de práctica médica con radiaciones es equivalente únicamente a unos 90 días de exposición natural.

Hay que apuntar, no obstante, que estas estimaciones genéricas promediadas pueden llevar a errores cuando se pierde de vista su significación ilustrativa, dado que las dosis efectivas debidas a exámenes o tratamientos médicos son nulas para muchísimos individuos que no necesitan de estas prácticas durante años, hasta valores muy altos para personas sometidas a largos e intensos tratamientos mediante radioterapia.

Es significativo comprobar en la **Tabla** anterior que la dosis anual, en promedio, debida a la producción de energía eléctrica en centrales nucleares es equivalente a la debida a un solo día de exposición a la radiación natural, o que el total de las exposiciones ocupacionales a lo largo de un año producen los mismos efectos, globalmente consideradas, que 8 horas de exposición a las fuentes naturales.

Para este último caso hay que tener en cuenta el pequeño porcentaje de personas, respecto al total de la población mundial, que trabajan con posibilidad de ser expuestos a radiaciones durante su jornada laboral.

Considerando únicamente el grupo de trabajadores expuestos, se puede decir que las dosis que reciben procedentes de fuentes existentes en sus lugares de trabajo alcanzan valores similares a las de origen natural. Hay otro pequeño grupo de trabajadores, especialmente expuestos a radiaciones, cuya exposición ocupacional puede alcanzar unas cinco veces la debida a fuentes naturales.

La dosis colectiva comprometida durante 10.000 años debida a las prácticas con explosivos nucleares realizadas hasta el momento en la atmósfera, equivaldría a unos 2,3 años de exposición natural. Hay que volver a remarcar que no se tendrían los mismos resultados si se comparara el efecto producido por estas pruebas atómicas en un año concreto de gran actividad en este tipo de experiencias.

Exclusivamente ha existido un accidente en el uso civil de la energía nuclear, el de la central de Chernobyl, que ha ocasionado dosis efectivas al público superiores a las originadas por las fuentes naturales de radiación. Sin embargo, globalmente considerado, a nivel de dosis colectiva mundial, los efectos de este accidente equivaldrían a unos 20 días de exposición a la radiación natural.

Todo lo anteriormente expuesto permite concluir que los riesgos asociados al uso de las radiaciones ionizantes, aunque existentes, son siempre menores que los que gran parte de la sociedad intuye, y en todo caso muy inferiores a los derivados de la inevitable exposición a la radiación natural, continuamente presente a lo largo de todas nuestras vidas.

I.2.- RADIACIÓN CÓSMICA

I.2.1.- RAYOS CÓSMICOS

Las radiaciones en el espacio se pueden clasificar, atendiendo a su origen, en: partículas *atrapadas*, radiación cósmica *galáctica* y partículas de radiación *solar*^{[18][19]}.

Las partículas atrapadas consisten principalmente en electrones y protones que se mantienen en órbitas alrededor de la Tierra por efecto del campo magnético de la misma. La radiación cósmica galáctica está constituida fundamentalmente por protones con algo de helio e iones más pesados. La radiación solar mantiene unas características muy similares a la anterior.

Los protones y electrones atrapados se encuentran en dos zonas o cinturones de radiación, dispuestos a ambos lados de una franja o zona vacía situada a 2,8 veces el radio de la tierra por el ecuador, con intensidades y energías más intensas en el cinturón más externo. Presentan variaciones temporales en intensidad apreciables: las energías de los electrones alcanzan varios MeV, siendo las de los protones unos pocos cientos de MeV. El efecto de estas partículas no alcanzan especial relevancia en cuanto a su contribución a las dosis a la población que habita la Tierra^[3], si bien sí ha de tenerse en cuenta sobre las tripulaciones de los vehículos espaciales en bajas órbitas, especialmente por efecto de los protones.

Los rayos cósmicos galácticos tienen su origen fuera del sistema solar, permaneciendo en nuestra galaxia tiempos medios de 200 millones de años, ya que están contenidos por el campo magnético del espacio interestelar. Las energías de la mayoría de las partículas de origen cósmico que los constituyen se encuentran entre 10^2 y 10^5 MeV, aunque pueden alcanzar valores mucho más elevados. De los iones más pesados, llamados partículas HZE (alto número atómico y alta energía), que son componentes del flujo de rayos cósmicos, el hierro es el más significativo en su contribución a la exposición a la radiación cósmica dada su relativa abundancia y su alto número atómico^[20].

Las partículas de radiación solar proceden, como su nombre indica, del sol el cual emite continuamente partículas de baja energía, generándose la mayor parte de las más energéticas durante sus perturbaciones magnéticas. En el período activo del ciclo solar que es de 11 años, se producen importantes emisiones de partículas asociadas a deflagraciones, con energías comprendidas entre 1 y 100 MeV e incluso, en algunos casos, se llegan a superar valores de hasta 1 GeV. La emisión de partículas solares

alcanza un máximo durante el incremento de la actividad solar disminuyendo en los períodos de calma del sol. Debido a que los rayos cósmicos galácticos de menor energía son reflejados hacia fuera del sistema solar, la densidad de flujo de la radiación cósmica se vuelve más baja durante las fases de máxima actividad solar y viceversa (**Figura I.10**).

Aunque la tasa de fluencia de partículas solares supera durante varios años la tasa de fluencia de las partículas galácticas, las partículas solares contribuyen de forma menos significativa a la exposición a la radiación en la atmósfera que las constituyentes de la radiación cósmica debido a que la mayoría de las primeras no tienen energía suficiente para penetrar en el campo magnético terrestre.

Otro tipo de clasificación para la radiación cósmica es la que resulta de considerarla compuesta por rayos cósmicos primarios y secundarios. Se consideran rayos cósmicos primarios a las radiaciones de alta energía que penetran en la atmósfera terrestre procedentes del espacio exterior, ya sean de origen galáctico o solar. Cuando se produce la interacción entre estos rayos primarios y los núcleos atómicos de la atmósfera, se originan una serie de partículas secundarias, además de cierta radiación electromagnética, que constituyen los rayos cósmicos secundarios.

I.2.1.1.- RAYOS CÓSMICOS PRIMARIOS

La mayoría de los rayos cósmicos primarios se originan fuera del sistema solar y se conocen como rayos cósmicos galácticos. Otros, cuya contribución a la dosis colectiva es mucho menor, tienen su origen en las eventuales erupciones del sol.

El proceso de formación de los rayos cósmicos primarios de origen galáctico se atribuye a los violentos procesos que tienen lugar en las estrellas (fulguraciones estelares, explosiones de supernovas, aceleración de pulsares, explosiones de núcleos galácticos, etc)^[20]. Están formados fundamentalmente por protones de alta energía que penetran en el sistema solar procedentes del espacio interestelar, acompañados de iones de ^4He y, en proporciones mucho menores, partículas más pesadas, así como electrones, fotones y neutrinos. Se considera^[21] que la radiación cósmica galáctica está constituida por un 98% de bariones (87% protones, 12% partículas alfa y 1% otros iones más pesados) y un 2% de electrones. Otros autores referencian porcentajes similares sobre los distintos componentes de los rayos cósmicos (Paretzke y Heinrich^[22]: 85% protones, 12,5% partículas alfa, 1,5% núcleos más pesados y 1% electrones; O'Brien y otros^[23]: 95% protones, 3,5% alfa y 1,5% núcleos más pesados; Bouville y Lowder^[24]: 90% protones y 10% partículas alfa y núcleos pesados).

La densidad del flujo primario de procedencia cósmica se ve afectada por la acción del campo magnético terrestre, que es capaz de modificar las trayectorias de estas partículas, por efecto de fuerzas de Lorentz, provocando que las de más baja

energía se muevan según direcciones de complicadas formas, no llegando, en muchos casos, a poder atravesar la atmósfera terrestre. Este apantallamiento geomagnético de la Tierra es más efectivo en las regiones ecuatoriales, donde las partículas inciden perpendicularmente a las líneas de fuerza del campo magnético, que en los polos, donde aquéllas se mueven paralelamente a las líneas de campo. Por tanto la densidad del flujo primario de rayos cósmicos depende de la latitud geomagnética, de tal manera que es mayor la cantidad de protones de baja energía en las capas superiores de la atmósfera, en los polos que en el ecuador^[22].

Hay que considerar también la variación temporal que se produce de la tasa de fluencia de protones galácticos de baja energía en las capas altas de la atmósfera, de acuerdo con los ciclos solares (11 años). Es mínima durante las épocas de gran actividad solar y máxima en los períodos en que ésta disminuye. Esto es debido a la atenuación del campo magnético que produce el *viento solar*, constituido fundamentalmente por hidrógeno ionizado con un número igual de electrones, además de otra serie de partículas y núcleos pesados^[25].

Durante las erupciones solares se produce una gran cantidad de emisiones de partículas cargadas, principalmente protones y partículas alfa, con energías de hasta varios GeV, además de rayos X y UV, todos los cuales constituyen los rayos cósmicos solares primarios. En los períodos de alta actividad se producen varias decenas de fulguraciones solares diarias, observándose variaciones en la ionosfera y en el campo magnético terrestre, debidos al viento solar y a las radiaciones X y UV, en períodos de baja actividad.

No obstante, dado que cuando estos rayos cósmicos solares alcanzan la Tierra suelen presentar energías relativamente bajas, su contribución a la dosis de radiación en la superficie terrestre no es demasiado importante.

I.2.1.2.- RAYOS CÓSMICOS SECUNDARIOS

Los rayos cósmicos secundarios se producen cuando las partículas que constituyen los rayos cósmicos primarios más energéticos, penetran en la atmósfera, perdiendo la mayor parte de su energía al interaccionar con los núcleos de los átomos presentes en el aire (nitrógeno, oxígeno y argón), dando lugar a la formación de neutrones, protones, muones, piones y kaones mediante reacciones conocidas como de *espalación*. También se originan una gran variedad de productos de reacción en forma de núcleos cosmogénicos, tales como ^3H , ^7Be y ^{22}Na (los más importantes desde el punto de vista dosimétrico), así como ^{10}Be , ^{14}C y ^{24}Na . Además, como consecuencia de la interacción, también se forman fotones de altas energías que vuelven a interaccionar con núcleos en el aire formando más partículas secundarias (electrones y muones)^[26].

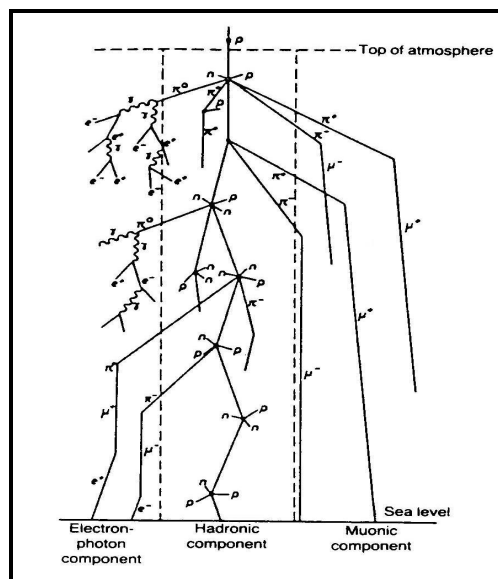
Se ha estimado que, debido a estas interacciones, el flujo de protones primarios se atenúa hasta cerca de la mitad del flujo incidente, el de las partículas alfa a su cuarta parte y el de los iones más pesados hasta alrededor del 3%, o menos, del flujo inicial.

Un protón procedente del espacio exterior debe tener una energía mínima de 2.170 MeV^[22] para ser capaz de penetrar la atmósfera hasta el nivel del mar. Sin embargo la probabilidad de que esto realmente ocurra, aún para energías mucho más altas, es muy pequeña, dado los numerosos procesos de interacción que se producen y que ocasionan considerables pérdidas de energía. Un protón con energía de varios GeV experimenta una interacción nuclear media en trayectoria libre de alrededor de 65 g.cm⁻² en aire, lo que significa que en el camino hacia la superficie de la Tierra se producen en torno a 15 colisiones, en cada una de las cuales pierde el 50% de su energía. De ahí la escasa probabilidad comentada de que los protones primarios lleguen hasta el nivel del mar y que se considere a los protones como los principales responsables de la producción de radiación secundaria en las capas más profundas de la atmósfera.

Los protones, neutrones y piones de alta energía formados en las reacciones de espalación, vuelven a reaccionar con núcleos de los componentes del aire produciendo nuevas partículas secundarias^[27]. A su vez los piones se desintegran en muones o fotones dando lugar a otras interacciones. Este proceso de reacciones en cadena que da origen a la formación de rayos cósmicos secundarios recibe el nombre de *cascada*.

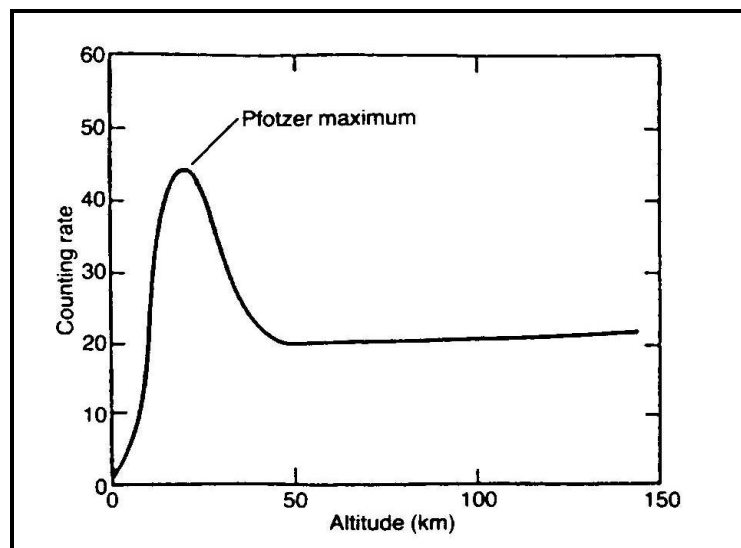
En la **Figura I.7**^[28] se muestra, en forma esquemática, la reacción en cascada originada por la radiación cósmica. En ella se observan separadas las tres componentes básicas: electrones-fotones, hadrones y muones^[22].

Figura I.7.- Representación esquemática de la producción de partículas en la atmósfera.



El número de partículas primarias y secundarias presentes en la atmósfera crece muy rápidamente con la altura. A unos 20 km de altitud este número alcanza un valor máximo (*máximo de Pfozter*). En la **Figura I.8** se presenta la concentración de rayos cósmicos en la atmósfera en función de altitud^[28].

Figura I.8.- Dependencia del flujo de rayos cósmicos con la altitud.



Los componentes nucleónicos, protones y neutrones, se producen en las capas superiores de la atmósfera y contribuyen significativamente a incrementar la *tasa de dosis absorbida*. Los protones se forman sobre todo en las reacciones de espalación, mientras que los neutrones se forman por este tipo de reacciones además de por la llamada evaporación de neutrones debidas a reacciones (p,n) de baja energía^[3]. Los neutrones pierden energía en choques elásticos, siendo capturados, cuando alcanzan niveles energéticos térmicos, por el ^{14}N para formar ^{14}C . De esta manera la tasa de fluencia nucleónica se ve atenuada considerablemente en las capas bajas de la atmósfera, siendo despreciable su contribución a la tasa de dosis absorbida correspondiente a rayos cósmicos al nivel del mar^[29].

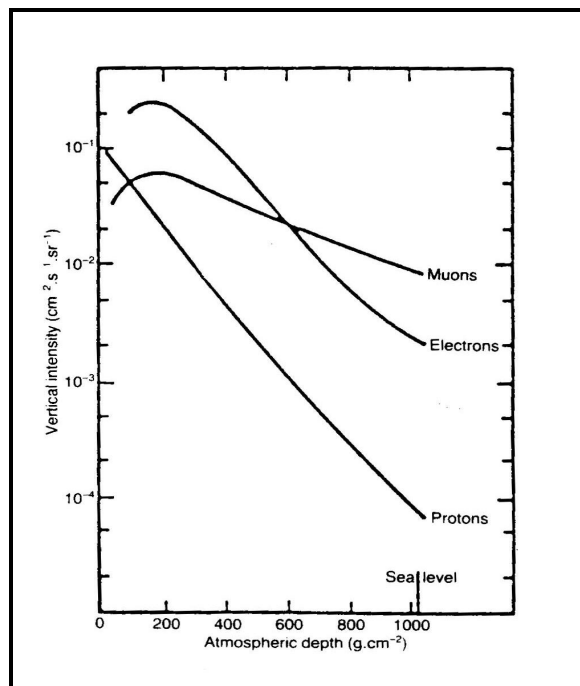
Así, en la superficie terrestre, la principal contribución a la dosis debida a la radiación cósmica corresponde a la aportada por los muones que se producen por desintegración, en alturas superiores de la atmósfera, de los piones cargados de alta energía (por encima de 100 GeV) y por los electrones resultantes de la ionización, de la desintegración de los muones y de los procesos de cascada. En la **Tabla 1.16** siguiente, se presentan las contribuciones a la tasa kerma-aire de los distintos componentes de la radiación cósmica en altitudes próximas al nivel del mar, así como sus rangos energéticos y densidades de flujo^[30].

Tabla 1.16.- Componentes de los rayos cósmicos en un campo de radiación medioambiental típico a 1 m de altitud.

Partícula	Rango energías (MeV)	Densidad flujo (cm ⁻² s ⁻¹)	Tasa kerma-aire (nGy h ⁻¹)
β (e [±])	1-100	6 x 10 ⁻³	6
γ	0-10	≈ 10 ⁻¹	0,5
P	10-1.000	2 x 10 ⁻⁴	0,5
N	0-100	7 x 10 ⁻³	≈ 0,1
μ [±]	100-10.000	2 x 10 ⁻²	25
π [±]	100-100.000	2 x 10 ⁻⁵	≈ 0,1

Para altitudes elevadas, en las distintas capas atmosféricas se producen importantes variaciones en la abundancia de los principales componentes de los rayos cósmicos. En la **Figura I.9**^[28] se puede observar que la cantidad relativa de protones decrece exponencialmente a medida que aumenta la profundidad atmosférica, mientras que la abundancia de electrones crece. Al nivel del mar los muones constituyen, como ya se había indicado, la componente dominante de la radiación cósmica^[22].

Figura I.9.- Variación con la altitud de los componentes principales de los rayos cósmicos.



Los piones cargados tienen una vida media de $2,8 \times 10^{-8}$ s, desintegrándose en neutrinos y muones. Estos últimos, con una vida media de $2,2 \times 10^{-6}$ s y rangos de energía entre 0,2 y 20 GeV (valor medio de 2 GeV)^[31], penetran en la atmósfera y alcanzan fácilmente el nivel del mar, aunque también algunos, los menos, pueden desintegrarse en electrones y neutrinos. Los piones neutros por el contrario decaen, después de 10^{-16} s, a rayos gamma, que contribuyen a intensificar la cascada electromagnética^[21].

Estos fotones crean pares electrón-positrón y electrones Compton, los cuales vuelven a producir nuevos fotones por *bremsstrahlung* y por fenómenos de aniquilación positrón-electrón.

Finalmente, la mayoría de los electrones adquirirán las energías donde dominan las pérdidas por colisión, hasta que la cascada va desapareciendo^[26]. Excepto en las capas más bajas de la atmósfera, los electrones constituyen las principales fuentes de ionización^[29].

I.2.2.- DOSIS ABSORBIDA DEBIDA A LOS RAYOS CÓSMICOS

Como ya se ha indicado anteriormente, las partículas galácticas primarias son rápidamente atenuadas por la atmósfera terrestre, de tal manera que la irradiación de la población humana se debe a la acción de los rayos cósmicos secundarios, principalmente muones, electrones y neutrones.

La tasa de dosis absorbida correspondiente a la radiación cósmica se suele estudiar considerando separadamente la aportación de sus dos componentes fundamentales: rayos cósmicos directamente ionizantes y neutrones.

I.2.2.1.- COMPONENTE DE LOS RAYOS CÓSMICOS DIRECTAMENTE IONIZANTE

La tasa de producción de iones por acción de la radiación en la unidad de volumen de aire libre es una medida de la tasa de fluencia del componente del campo de rayos cósmicos constituido por partículas cargadas, y se suele expresar en número de iones formados por segundo en cada centímetro cúbico de aire a presión y temperatura normales. Los valores comunicados desde 1.960 de esta tasa de densificación iónica de los rayos cósmicos a nivel del mar oscilan entre 1,9 y 2,6 $\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$, estando su media en torno a los 2,1 $\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ ^{[32][33][34]}, valor este último que se suele utilizar normalmente para calcular la tasa de dosis absorbida^[9]. Así, considerando que para que se forme un par iónico en el aire húmedo son necesarios 33,7 eV de energía incidente, la tasa de dosis absorbida en aire resulta ser de 32 nGy h^{-1} , al nivel del mar para latitudes medias y altas^[2].

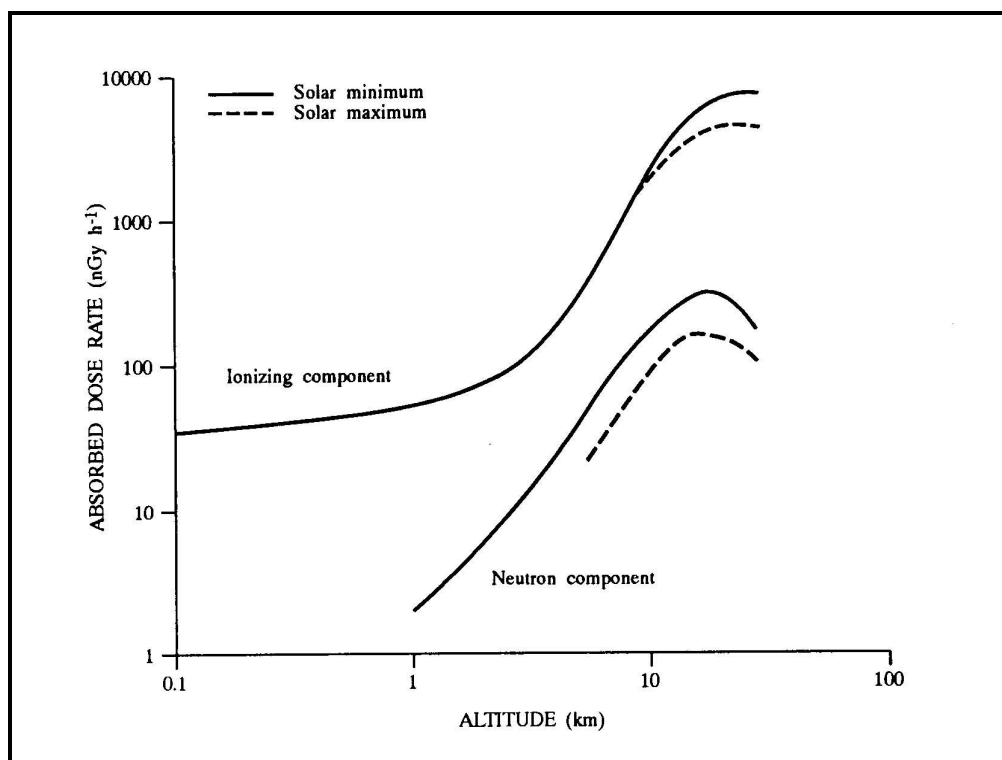
Como la dosis procede fundamentalmente de los muones^[35], para los que el factor de ponderación es la unidad^[36], este valor numérico de 32 puede también ser tomado para la tasa de dosis equivalente al aire libre, es decir, se puede considerar una tasa de dosis efectiva media debida a la radiación cósmica al nivel del mar de 32 nSv h^{-1}

Si no se tiene en cuenta el efecto de protección o disminución de dosis en personas debida al efecto pantalla de los edificios que habitamos, se obtiene un valor anual de índice de dosis absorbida de $2,8 \cdot 10^{-4} \text{ Gy}$.

La tasa de dosis absorbida en aire va creciendo lentamente con la altura sobre el nivel del mar hasta los 3.000 m aproximadamente, a partir de la cual aumenta rápidamente hasta una altura de unos 20.000 m en que vuelve a estabilizarse en un valor en torno a $6 \times 10^{-6} \text{ Gy h}^{-1}$ ^[9]. En la **Figura I.10**, extraída del **Informe UNSCEAR-82**^[2] y basada en numerosas medidas en el suelo y a bordo de naves aéreas, recogidas en el **Informe UNSCEAR-77**^[9], se puede observar las variaciones con la altura de la tasa del índice de dosis absorbida, debidas no sólo a la componente ionizante de la radiación

cósmica sino también a su componente neutrónica. Durante los períodos de máxima actividad solar, las tasas de dosis de la componente ionizante se reducen alrededor de un 10% a 10 km de altitud y en mucho menor grado a nivel del mar^[3].

Figura I.10.- Tasas del índice de dosis absorbida a elevadas latitudes geomagnéticas (50°) procedentes de los componentes ionizante y neutrónico de los rayos cósmicos a diferentes altitudes, en 1969 (actividad solar máxima) y 1965 (actividad solar mínima).

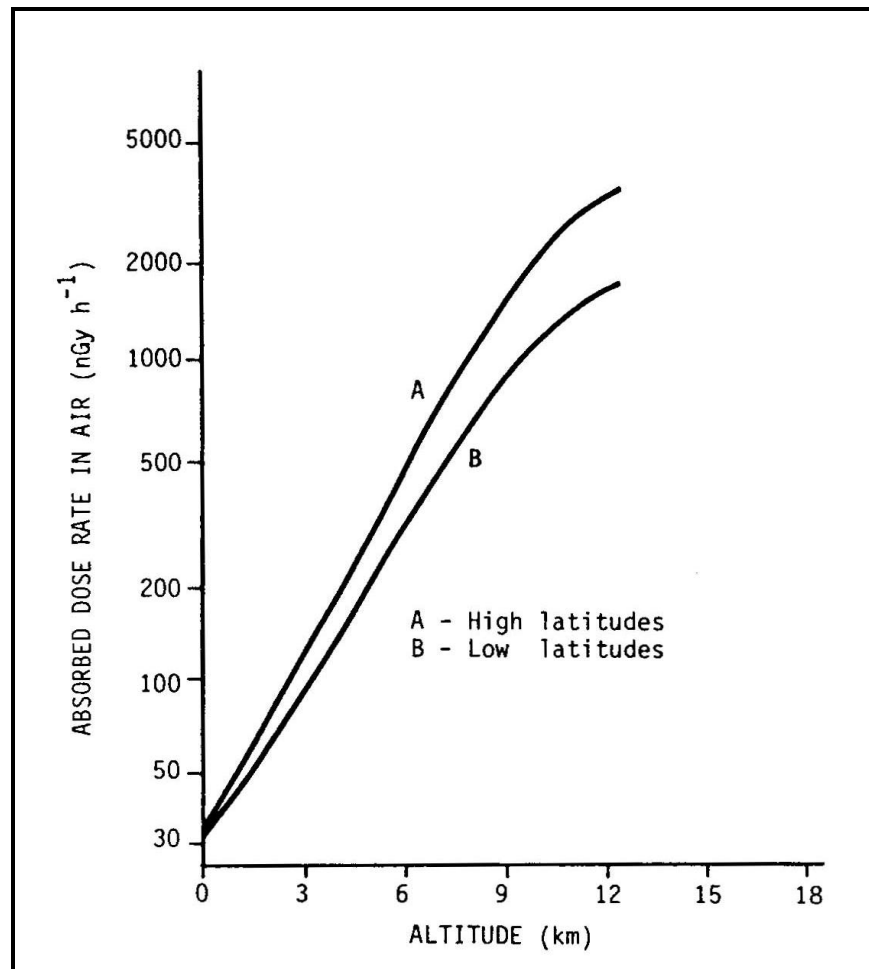


La tasa de dosis absorbida en aire también crece con la latitud al decrecer la eficacia del apantallamiento geomagnético del campo terrestre. Este efecto se propaga a través de la atmósfera de tal manera que al nivel del mar la densidad de flujo de partículas cargadas (y por tanto la tasa de dosis correspondiente) es alrededor de un 10% más bajo en el ecuador que a elevadas latitudes. El efecto se incrementa también con la altitud aumentando en un factor de 2 para una altura de 10 km sobre el nivel del mar^[24].

Se acepta un valor de 32 nGy h⁻¹ como tasa de dosis absorbida en aire, a nivel del mar, debida a los rayos cósmicos para lugares situados en latitudes medias y altas. No obstante, se referencian valores inferiores para localidades que se encuentran en bajas latitudes, como es el caso de Hong Kong (22.3° N) con tasas de dosis que van de 27 a 31 nGy h⁻¹ o Shenzhen, China (22.6° N) para donde se estiman 28 nGy h⁻¹^[3].

La **Figura I.11**^[1] muestra la variación de la dosis absorbida en aire para bajas y altas latitudes en el rango que va desde 0 a 12 km de altitud. Se dan valores de la tasa de dosis debida a la componente ionizante de los rayos cósmicos de unos 30 nGy h⁻¹ al nivel del mar, en media para cualquier latitud, incrementándose hasta cerca de 4.000 nGy h⁻¹ a una altura de 12 km, en altas latitudes^[37].

Figura I.11.- Tasa de dosis absorbida en aire debida a la radiación cósmica en función de la altitud y de la latitud geográfica: (A) altas latitudes; (B) bajas latitudes.



La mayoría de la población mundial vive en altitudes próximas al nivel del mar, aceptándose generalmente un valor de 32 nGy h⁻¹, en media, como la tasa de dosis absorbida *outdoor* en aire procedente de la componente ionizante de la radiación cósmica. Este valor, que se referencia en el *Informe UNSCEAR-82*, coincide con el de la tasa de dosis efectiva.

En el interior de los edificios, las dosis son algo más bajas por el efecto de apantallamiento de las estructuras de las construcciones. Los muones, que contribuyen en cerca de dos tercios a la dosis *outdoor* debida a rayos cósmicos al nivel del mar, son atenuados por la materia de forma muy débil. Los electrones y los neutrones son absorbidos mucho más eficazmente. Se han estimado las atenuaciones producidas por distintos tipos de viviendas: mientras que una casa de madera sólo reduce la dosis debida a partículas cósmicas cargadas en un 10%, las estructuras utilizadas en la construcción de grandes edificios de viviendas o establecimientos públicos producen reducciones entre el 40% y el 90% de las tasas de dosis estimadas en el exterior¹²⁴.

En la **Tabla 1.17**¹³⁸ aparecen los valores medidos de la radiación cósmica en el centro de diferentes pisos de un edificio de 12 plantas, así como el porcentaje de reducción respecto al máximo obtenido en su cubierta. La disminución tan pronunciada que se produce entre el tejado y el piso doceavo (65%), se debe al efecto de filtración sobre el flujo de las componentes relativamente *blandas* de los rayos cósmicos a nivel del mar. Como se puede observar, el valor de la componente *dura* decrece mucho más lentamente con la profundidad de materia atravesada.

Tabla 1.17.- Tasas de dosis absorbidas en aire obtenidas a partir de las tasas de exposición medidas en el centro de cada piso de un edificio de 12 plantas.

Planta	Tasa de dosis (nGy h ⁻¹)	Factor de transmisión
Tejado	31,4	1
12	20,2	0,64
10	20,0	0,64
8	18,1	0,58
5	17,4	0,55
4	13,7	0,44
2	11,5	0,37
Bajo	8,6	0,27

Se han indicado factores de apantallamiento en torno a 0,85 para el caso de capas de hormigón con un espesor de 0,2 m. Otros autores han estimado valores entre 0,42 y 0,82, para Holanda, dependiendo de los tipos de edificaciones considerados y entre 0,54 y 0,96 en distintas viviendas de la antigua Unión Soviética. A partir de estas referencias que se resumen en el *Informe UNSCEAR-88*¹¹ y de las medidas y cálculos que se presentan en el *Informe NCRP N° 94*¹³¹, se pueden establecer factores de apantallamiento que van desde 0,96 para pequeñas casas de madera hasta 0,42 para grandes edificios de hormigón.

Generalmente se acepta, siguiendo el *Informe UNSCEAR-88*¹¹, un factor de apantallamiento de los rayos cósmicos dentro de los edificios de 0,8 como media. Se reconoce, sin embargo, que puede existir una incertidumbre del 25 % asociada con este valor¹³¹. Tomando este factor de 0,8, se suele considerar un valor de 26 nGy h⁻¹ como tasa de dosis absorbida en aire *indoor* al nivel del mar, para la mayoría de la población mundial, debida a la acción de la radiación cósmica directamente ionizante.

Alrededor de la Tierra existen unas fajas o cinturones de radiación que están constituidas fundamentalmente por protones y electrones atrapados geomagnéticamente y formados como resultado de la interacción de las partículas primarias con la magnetosfera y la atmósfera de la Tierra. Las mediciones efectuadas dentro de un blindaje de 0,7 g cm⁻² por *Savun y colaboradores*¹³⁹ dieron un valor máximo de la tasa de dosis absorbida de 0,22 Gy h⁻¹ dentro de la faja inferior y de 0,054 Gy h⁻¹ en la exterior. Estos datos son de interés para la protección radiológica de los astronautas en cuyos viajes espaciales se han medido dosis comprendidas entre 2 x 10⁻⁵ y 500 x 10⁻⁵ Gy.

I.2.2.2.- COMPONENTE DE LOS RAYOS CÓSMICOS CORRESPONDIENTE A NEUTRONES

La variación con la altitud y la latitud de la componente neutrónica de la radiación cósmica es similar a la que experimenta su componente ionizante.

La densidad de flujo de los neutrones cósmicos al nivel del mar es pequeña y difícilmente medible, sobre todo porque su rango de energías es muy amplio, variando desde fracciones de eV hasta decenas de GeV.

Se considera que el valor de la tasa de fluencia neutrónica es de 0,008 cm⁻² s⁻¹ a nivel del mar¹⁹¹¹³⁷ a los efectos de estimar las dosis a elevadas latitudes. Si se utiliza un factor de conversión de tasa de fluencia neutrónica a tasa del índice de dosis absorbida de 5 x 10⁻⁸ Gy h⁻¹ cm² s¹⁴⁰, la tasa del índice de dosis absorbida sería de 0,4 nGy h⁻¹, dando un índice de dosis absorbida anual de 3,5 µGy al nivel del suelo.

Posteriores estudios de Hajnal, recogidos en el *Informe UNSCEAR-88*¹¹, basados en medidas de espectros de energía de neutrones llevadas a cabo en Nueva York en 1986, dieron como resultado un valor de la tasa de dosis absorbida media de 0,8 nGy h⁻¹, lo que elevaría el valor del índice de dosis anual hasta los 7 µGy.

La tasa de dosis neutrónica aumenta rápidamente con la altitud, desde la cota cero hacia arriba, y alcanza un máximo entre 10 y 20 km, como se observa en la **Figura I.10** anterior.

I.2.3.- DOSIS EFECTIVA DEBIDA A LOS RAYOS CÓSMICOS

Muchos de los fenómenos que dan origen a la formación de los rayos cósmicos tanto primarios como secundarios, tienen una gran importancia desde el punto de vista radiobiológico, dado que se depositan grandes cantidades de energía en pequeños volúmenes. En concreto, la compleja muestra de partículas secundarias que se forman a partir de la interacción de los rayos cósmicos primarios con la atmósfera de la Tierra llegan a tener una muy alta efectividad biológica por unidad de energía absorbida, incluso superior a la de las partículas primarias.

Usando la unidad como factor de calidad de la componente ionizante de la radiación cósmica, considerando un factor de ocupación *indoor* medio de 0,8 (se estima que la población mundial permanece, como media, un 20% del total de su tiempo en el exterior de los edificios) y teniendo en cuenta los valores ya indicados anteriormente de la tasa de dosis absorbida *outdoor* (32 nGy h⁻¹) e *indoor* (26 nGy h⁻¹), se obtiene un valor de la dosis efectiva anual debida a la componente ionizante de los rayos cósmicos, al nivel del mar, de unos 240 μSv:

$$H_{\text{outdoor}} = 32 \cdot 10^{-9} \text{ Gy h}^{-1} \times 1 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 24 \text{ h día}^{-1} \times 365 \text{ día año}^{-1} \times 0,2 = 56 \times 10^{-6} \text{ Sv año}^{-1}$$

$$H_{\text{indoor}} = 26 \cdot 10^{-9} \text{ Gy h}^{-1} \times 1 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 24 \text{ h día}^{-1} \times 365 \text{ día año}^{-1} \times 0,8 = 182 \times 10^{-6} \text{ Sv año}^{-1}$$

$$H = H_{\text{outdoor}} + H_{\text{indoor}} = 238 \mu\text{Sv año}^{-1}$$

En lo que se refiere a la componente neutrónica de la radiación cósmica, se indican diferentes valores, como resultado de investigaciones en las que se utilizan procedimientos diversos, que van desde 1,4 y 2,2 nSv h⁻¹ (O'Brien^[34]) a 3 nSv h⁻¹ (Hajnal^[40]) ó 3,3 nSv h⁻¹ (Nakamura^[41]).

El valor medio de 2,4 nSv h⁻¹ que se utiliza en los *Informes UNSCEAR-82*^[2] y *UNSCEAR-88*^[1] refleja la variabilidad asociada con la elección de la geometría usada para calcular la dosis efectiva. En base a esto y de forma general (omitiendo la influencia de apantallamiento que realizan los edificios que se considera no significativa^[3]), se estimaba que la tasa de dosis efectiva, al nivel del mar, originada por la componente neutrónica de la radiación cósmica es de unos 20 μSv por año.

Todo lo anterior hay que enmarcarlo dentro de la consideración de que los factores de calidad que recomienda la *Comisión Internacional para la Protección Radiológica (ICRP)*, y que determinan la dosis equivalente como una medida de la exposición ponderada biológicamente, han cambiado en base a nuevos datos experimentales. La *ICRP* ya realiza desde 1.985 recomendaciones tendentes a que estos factores de calidad correspondientes a neutrones sean incrementados^[42]. Utilizando, en vez de los factores de calidad que se indicaban en la *ICRP 21*^[43], los publicados en 1.991 en la *ICRP 60*^[36], se obtienen incrementos de un 50% en los valores de la tasa de dosis efectiva correspondiente a los neutrones^[44]. De acuerdo con esto, en el *Informe*

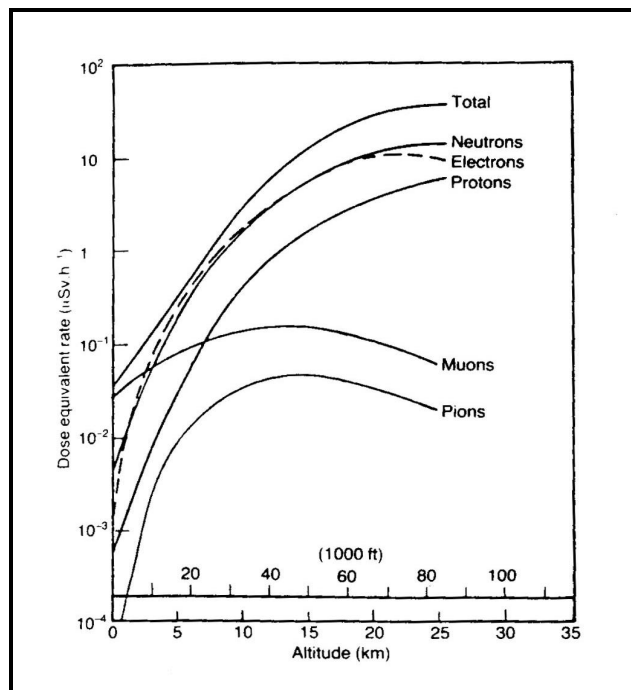
UNSCEAR-93^[3] se recomienda utilizar un nuevo valor medio de $3,6 \text{ nSv h}^{-1}$ para la tasa de dosis efectiva, al nivel del mar, debida a los rayos cósmicos neutrónicos. Esto lleva a elevar hasta unos $30 \text{ } \mu\text{Sv}$ por año la contribución de la componente neutrónica a la tasa de dosis efectiva total.

Estos valores aún tendrían que ser corregidos para poblaciones que vivan en lugares elevados, dado el importante incremento de la exposición debida a la radiación cósmica con la altura. Mientras que al nivel del mar los rayos cósmicos contribuyen en sólo un 10% sobre el total de las fuentes de radiación de origen natural, el flujo de partículas cósmicas se incrementa prácticamente de forma exponencial con la altitud, aumentando aproximadamente en un factor de 2 cada 1.500 m ^[22].

Este efecto no es estrictamente debido a la altitud sino mas bien a la variación de la presión barométrica, que es una medida del peso (la masa) del aire que se encuentra encima de un punto dado. En general las dosis se suelen referir a las presiones medias asociadas a una altitud dada, en condiciones atmosféricas normales.

Las tasas de exposición en función de la altitud fueron medidas en una serie de vuelos por diferentes investigadores (Hewitt^[37], Schaefer^[45], etc). En la **Figura I.12**^[21], se muestra la contribución de las distintas partículas secundarias a la tasa de dosis equivalente, en condiciones solares mínimas y una latitud geomagnética de 55° , en función de la altitud.

Figura I.12.- Tasa de dosis equivalente debida a los rayos cósmicos en función de la altitud para diferentes partículas a 55° de latitud geomagnética durante condiciones solares mínimas.



En el **Informe UNSCEAR-88**^[1] aparecen, basadas en informaciones de distintos autores^{[33][34][40][41]}, las expresiones matemáticas por las que podríamos obtener los valores de la dosis equivalente efectiva anual, en μSv , procedente de radiación cósmica, en función de la altitud z (km).

Para la componente ionizante H_I sería:

$$H_I(z) = H_I(0) [0,205 \exp(-1,649 z) + 0,795 \exp(+0,4528 z)] \quad [1]$$

La componente neutrónica H_N se formularía:

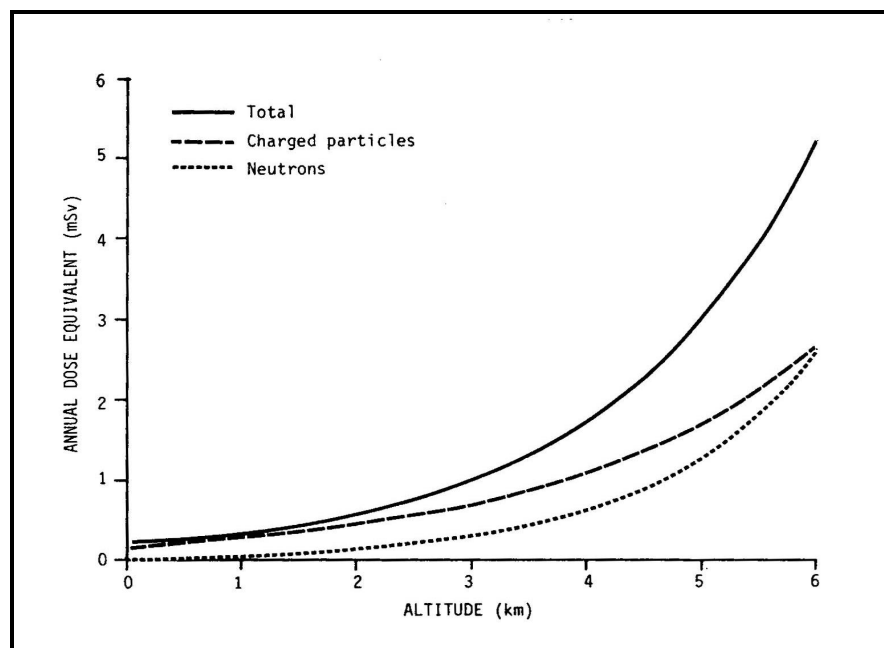
$$H_N(z) = H_N(0) \exp(1,04 z) \quad \text{para } z < 2 \text{ km} \quad [2]$$

$$H_N(z) = H_N(0) [1,98 \exp(0,698 z)] \quad \text{para } z > 2 \text{ km} \quad [3]$$

donde $H_I(0)$ y $H_N(0)$ son los valores estimados de las componentes ionizante y neutrónica al nivel del mar. En la publicación **UNSCEAR-88**^[1] se cifran, respectivamente, en 238 y 20 $\mu\text{Sv año}^{-1}$, mientras que Bouville y Lowder^[24] referencian un valor de 224 $\mu\text{Sv año}^{-1}$ para $H_I(0)$ coincidiendo en los 20 $\mu\text{Sv año}^{-1}$ de media para la componente neutrónica a nivel del mar (con un rango de 4 a 30 $\mu\text{Sv año}^{-1}$, dependiendo del tiempo de permanencia en el interior de los edificios y de sus estructuras).

La **Figura I.13** muestra las variaciones de la dosis efectiva anual con la altitud obtenida a partir de las ecuaciones anteriores^[1].

Figura I.13.- Variación de la dosis efectiva anual debida a las componentes ionizantes y neutrónicas de la radiación cósmica, en función de la altitud.



En el *Informe UNSCEAR-93*^[3], se indican las expresiones analíticas generales que han sido desarrolladas para el cálculo de la tasa de dosis efectiva anual en función de la altitud, para las componentes directa e indirectamente ionizante. Estas ecuaciones, que ahora presentan una formulación más genérica y resumida, están basadas en Informes anteriores y en estimaciones de diversos autores y tienen en cuenta la variación de la dosis con la altitud y la distribución de la población mundial para las distintas altitudes. Pueden aplicarse para estimar la dosis efectiva a la población procedente de los rayos cósmicos en cualquier lugar habitable de la Tierra.

Para la componente directamente ionizante sería:

$$E_I(z) = E_I(0) [a_I \exp(-\alpha_I z) + b_I \exp(\beta_I z)] \quad [4]$$

donde E_I es la tasa de dosis efectiva en $\mu\text{Sv año}^{-1}$ para la componente directamente ionizante; $E_I(0)$ es el valor de referencia al nivel del mar, $240 \mu\text{Sv año}^{-1}$; z es la altitud en km; $a_I = 0,21$; $\alpha_I = 1,6 \text{ km}^{-1}$; $b_I = 0,80$; $\beta_I = 0,45 \text{ km}^{-1}$.

La componente neutrónica E_N se formularía:

$$E_N(z) = E_N(0) \exp(\alpha_N z) \quad \text{para } z < 2 \text{ km} \quad [5]$$

$$E_N(z) = E_N(0) [b_N \exp(\beta_N z)] \quad \text{para } z > 2 \text{ km} \quad [6]$$

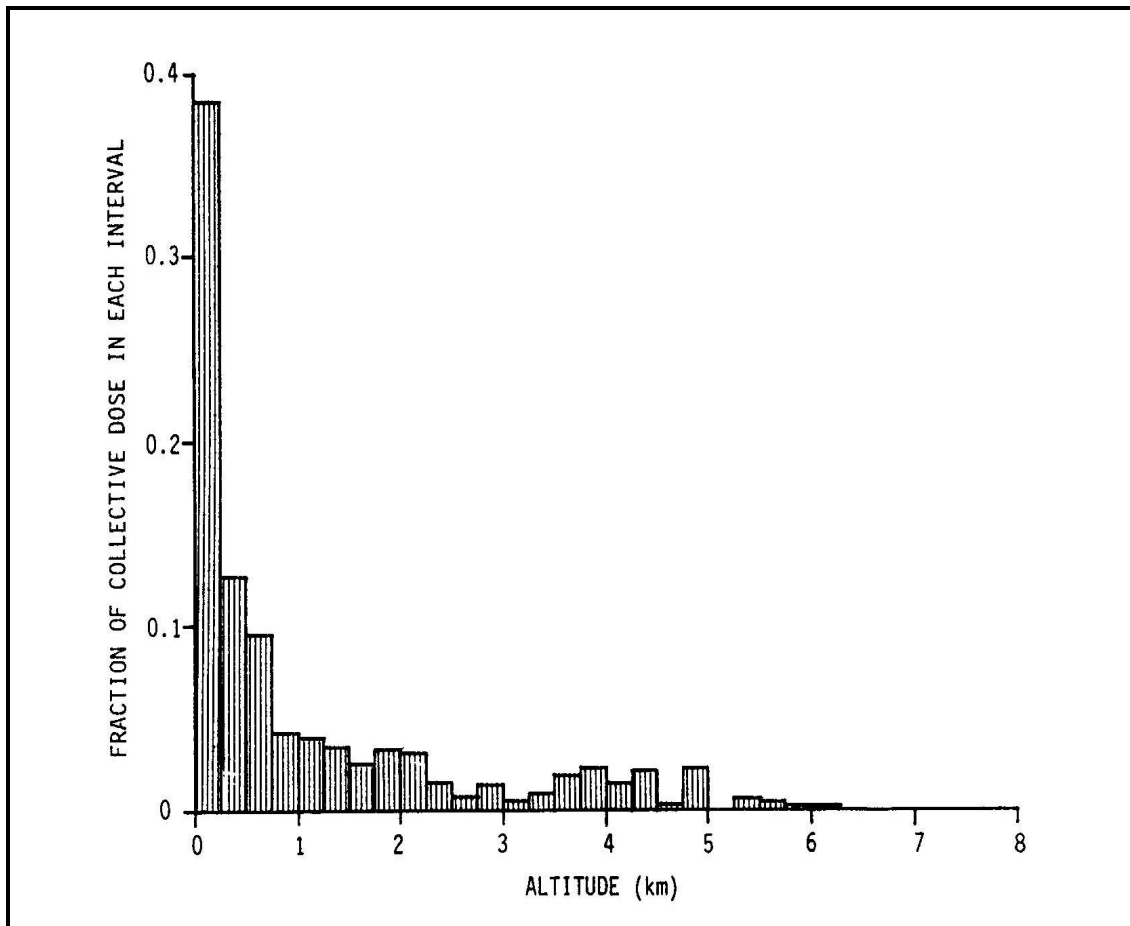
donde E_N es la tasa de dosis efectiva en $\mu\text{Sv año}^{-1}$ para la componente indirectamente ionizante procedente de los neutrones; $E_N(0) = 30 \mu\text{Sv año}^{-1}$; $\alpha_N = 1,0 \text{ km}^{-1}$; $\beta_N = 0,70 \text{ km}^{-1}$.

Hay que hacer notar que la dosis equivalente correspondiente a los neutrones, que es muy pequeña al nivel del mar, crece más rápidamente que la ionizante, llegando a ser más importante a partir de altitudes superiores a 6 km.

La distribución de la dosis efectiva colectiva en función de la altitud, presentada en intervalos de 250 m en la **Figura I.14**^[1], está basada en las estimaciones realizadas por Bouville y Lowder^[24] para todo el planeta. Indica que aunque cerca de la mitad de la dosis es recibida por los dos tercios de la población que vive en altitudes por debajo de 500 m, una contribución de alrededor de un 15 % de la dosis colectiva total es recibida por el 2,3 % de la población que habita en lugares con altitudes superiores a los 3.000 m. Es decir, se estima que más de 100 millones de personas reciben dosis equivalentes anuales debidas a los rayos cósmicos por encima de 1 mSv y otros 2 millones por encima de 5 mSv.

Hay países como Rusia o los Estados Unidos donde la dosis ponderada a la población difiere muy poco de los valores de la radiación cósmica al nivel del mar, dado que la mayoría de sus habitantes viven en regiones de bajas altitudes. Otros, como Etiopía, Irán o Méjico, poseen populosas ciudades situadas a gran altura, lo que da lugar a unos valores medios de exposición para toda la población muy elevados.

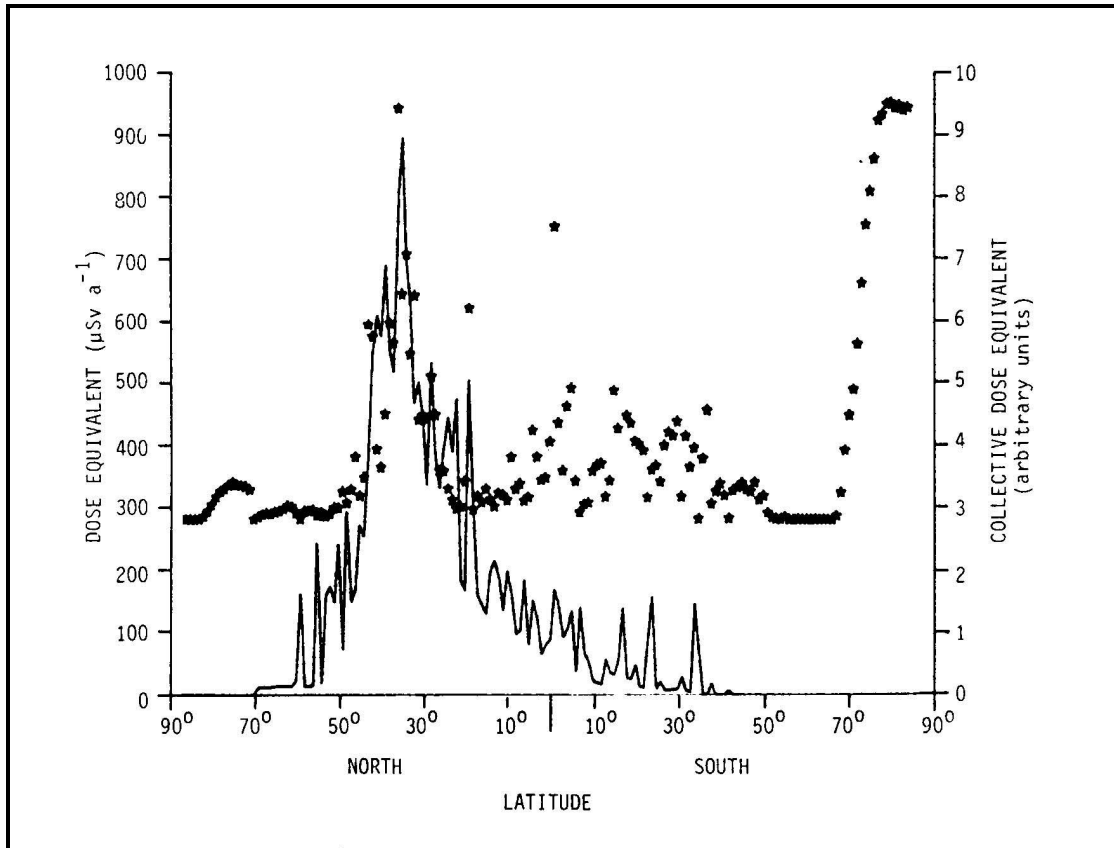
Figura I.14.- Distribución de la dosis efectiva colectiva debida a la radiación cósmica en función de la altitud.



Basado también en estudios de Bouville y Lowder, el *Informe UNSCEAR-88*^[1] representa gráficamente (**Figura I.15**) la distribución de la dosis equivalente colectiva y de la dosis equivalente *per cápita* en función de la latitud.

El valor global de la dosis efectiva colectiva es de alrededor de 2×10^6 Sv-persona, correspondiéndole a la población del Hemisferio Norte cerca del 90% del total^[7].

Figura I.15.- Distribución de la dosis efectiva anual debida a la radiación cósmica en función de la latitud.



De acuerdo con todas estas consideraciones y teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores, se ha llegado a estimar los valores de la contribución de la radiación cósmica a la dosis efectiva *per cápita*, para la media de la población mundial, correspondiendo 300 μSv a la componente ionizante y 80 μSv a la de origen neutrónico^[3]. Por tanto se puede afirmar que la dosis efectiva debida a la radiación cósmica se puede estimar, a partir de *UNSCEAR-93*^[3], en torno a los 380 μSv año⁻¹.

No obstante, en el anterior Informe del Comité de las Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica (*UNSCEAR-88*^[1]), se aceptaban valores para la componente neutrónica de 55 μSv lo que representaba un total de 355 μSv para la dosis efectiva, debida a la radiación cósmica, para la media de la población mundial.

En los trabajos llevados a cabo con anterioridad a 1987 por Bouville y Lowder^[24] para calcular el efecto de la radiación cósmica sobre la población mundial, se estimaron dosis efectivas *per cápita* anuales de 270 μSv para partículas cargadas y de 50 μSv para neutrones, alcanzando la dosis colectiva efectiva un valor de $1,6 \times 10^6$ Sv-persona.

El estudio se realizó aplicando las ecuaciones [1], [2] y [3] anteriores en cada uno de los cuadros en que dividieron la superficie del Planeta mediante una rejilla de 1° x 1°. Para el cálculo se le asignó a cada cuadro su altitud y población correspondiente.

Asumieron una serie de aproximaciones, tales como:

1) distribuir la población urbana total de un país entre las ciudades de las que se disponían datos sobre su número de habitantes, asignándola de una forma ponderada a la población real con que contaba en el momento del estudio;

2) considerar la población rural uniformemente distribuida a lo largo de todo la nación;

3) si el cuadro concreto de la rejilla contenía más de un país, era arbitrariamente asignado a la nación que ocupara la mayor superficie del cuadro.

De acuerdo con estas consideraciones, estimaron las dosis equivalentes anuales *per cápita* de los países más poblados de la Tierra, las cuales se presentan en la **Tabla 1.18**^[24].

Tabla 1.18.- Dosis equivalente anual *per cápita* en los países más poblados del mundo.

País	Población (millones)	Dosis equivalente anual (mSv)		
		Ionizante	Neutrónica	TOTAL
China	1065	338	100	438
India	759	280	62	342
URSS	279	233	26	259
USA	238	237	28	265
Indonesia	166	264	45	309
Brasil	136	242	32	274
Japón	121	227	23	250
Bangladesh	101	225	21	246
Pakistán	100	328	102	430
Nigeria	95	231	26	257

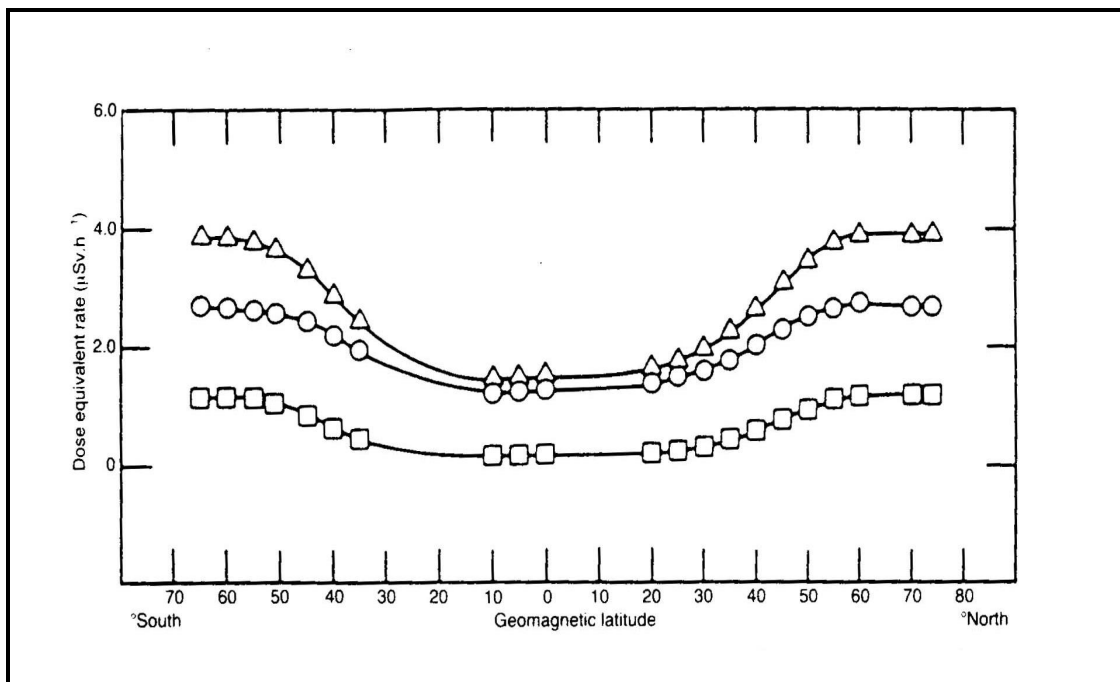
Otro de los factores que hay que considerar al evaluar la dosis equivalente debida a la radiación cósmica es su variación en las distintas estaciones del año. Se ha constatado, en regiones de latitud media del Hemisferio Norte, que la exposición a la radiación cósmica al nivel del mar es más alta en invierno que en verano.

En medidas realizadas en Nagoya (Japón)^[46] se obtuvieron valores de la densidad del flujo de partículas μ y electrones superiores a la media anual en un 6,2% en invierno e inferiores en un 6,8% en verano, aunque la densidad de flujo de fotones cósmicos fue más alta en verano (2,4% por encima de la media) que en invierno (4,5% inferior a la media).

La tasa de dosis equivalente de origen cósmico también depende, como ya se ha comentado anteriormente, de la latitud geomagnética. Ello es debido a la distinta proporción en que se encuentran los distintos componentes de la radiación cósmica según la latitud del lugar considerado, variando significativamente la contribución de cada uno de ellos a la tasa de dosis equivalente y por consiguiente su valor total.

En la **Figura I.16** se representan los valores de los componentes neutrónico e ionizante en función de la latitud geomagnética para una altitud fija de 10,1 km^[21]. Como se puede observar, la contribución correspondiente a los neutrones crece más rápidamente con la latitud que la componente ionizante. De esta manera, el peso de la componente neutrónica en las regiones polares es porcentualmente mayor, respecto al total de la dosis, que en el ecuador.

Figura I.16.- Tasa de dosis equivalente para neutrones y la componente ionizante en función de la latitud geomagnética a una altitud de 10,1 km (1 Sv-100 rem): (D) total; (O) componente ionizante; (□) neutrones ($Q_F = 6,5$).



Asimismo se pueden observar en la **Figura I.13** anterior las tasas de dosis equivalentes anuales calculadas como consecuencia de considerar la diferente eficacia biológica relativa de los distintos tipos de radiación. Se comprueba que la suma de la componente neutrónica y la correspondiente a las partículas cargadas experimenta un crecimiento exponencial con la altura^[22].

Para un lugar geográfico determinado, se citan cinco factores de los que depende la variación temporal de la intensidad de la radiación cósmica^[24]:

- 1) los cambios, ya señalados anteriormente, de la presión barométrica;
- 2) las variaciones estacionales debidas a la compresión y expansión de la atmósfera producida por el calentamiento solar;
- 3) las perturbaciones del campo magnético terrestre debido a los cambios en los vientos solares;
- 4) las deflagraciones solares altamente energéticas que generan una gran cantidad de protones que pueden penetrar en el campo magnético terrestre;
- 5) las importantes variaciones en la actividad del sol que se producen a lo largo de los 11 años del ciclo solar y que originan una sobremodulación de la radiación cósmica galáctica que alcanza las proximidades de la Tierra.

De todos estos factores sólo se pueden considerar significativos en las variaciones que experimenta la radiación cósmica, la latitud geomagnética y la fase del ciclo solar. El resto tienen efectos inapreciables sobre las dosis a largo plazo para altitudes próximas al nivel del mar, excepto en los fenómenos de apantallamiento estructural que ya se han tratado separadamente.

Hay que tener muy en cuenta, sin embargo, todas las consideraciones anteriores cuando se estudian los efectos de la radiación cósmica sobre ciertas muestras de población que pasan parte de su tiempo a gran altura sobre el nivel del mar. Para ellas la tasa de dosis efectiva debida a la radiación cósmica alcanza valores mucho más elevados, ya sea eventualmente, como es el caso de los pasajeros de líneas aéreas comerciales, o de forma continua para las tripulaciones de aviones o aeronaves espaciales (exposición a la radiación de tipo profesional) o para los habitantes de poblaciones ubicadas en elevadas altitudes.

En todos los casos, los valores de la dosis efectiva anual van a depender, fundamentalmente, del tiempo de exposición y de la altura. Los ciudadanos de La Paz, Lhasa o Quito reciben anualmente dosis efectivas procedentes de la radiación cósmica superiores a 1 mSv. En las ciudades que están situadas en elevadas altitudes es evidente la importancia de la componente neutrónica. Existe una gran diferencia en la dosis total de unos lugares a otros. El valor anual para la ciudad de La Paz, por ejemplo, es cinco veces el valor medio global mundial.

En términos generales se puede decir que los valores anuales de la dosis efectiva debida a la radiación cósmica puede variar desde 270 a 2.000 μSv , con un valor medio de unos 380 $\mu\text{Sv año}^{-1}$.

En la **Tabla 1.19**, extraída de **UNSCEAR-93**^[31], aparecen los valores de dosis equivalente *per cápita* que se han calculado para una muestra de ciudades situadas en elevadas altitudes.

Tabla 1.19.- Exposición media anual a los rayos cósmicos.

Lugar	Población (millones)	Altitud (m)	Dosis efectiva anual (mSv)		
			Ionizante	Neutrónica	TOTAL
CIUDADES ELEVADAS:					
La Paz (Bolivia)	1,0	3.900	1.120	900	2.020
Lhasa (China)	0,3	3.600	970	740	1.710
Quito (Ecuador)	11,0	2.840	690	440	1.130
Méjico (Méjico)	17,3	2.240	530	290	820
Nairobi (Kenia)	1,2	1.660	410	170	580
Denver (USA)	1,6	1.610	400	170	570
Teherán (Irán)	7,5	1.180	330	110	440
NIVEL DEL MAR			240	30	270
MEDIA MUNDIAL			300	80	380

Como se puede observar existen importantes poblaciones que reciben exposiciones a la radiación cósmica varias veces superiores a la media. También en varios países aparecen valores de dosis equivalentes *per cápita* notablemente grandes, como puede ser el caso de Bolivia ($1.100 \mu\text{Sv.año}^{-1}$) o Afganistán, Ecuador y Méjico (alrededor de $540 \mu\text{Sv.año}^{-1}$)^[24].

En el *Anexo C* del informe de la **UNSCEAR** del año **1.982**^[21] se establecen valores promedios de las tasas de dosis absorbida y equivalente en función de la altura sobre el nivel del mar, los cuales se presentan en la **Tabla 1.20**^[34] siguiente.

Tabla 1.20.- Variación con la altitud de la tasa de dosis absorbida y equivalente debida a radiación cósmica. (Valores promediados entre las latitudes 43° y 55° y dos períodos de actividad solar máxima y mínima).

Altitud (km)	Tasa de dosis absorbida (mGy h ⁻¹)	Tasa de dosis equivalente (mSv h ⁻¹)
4	0,14	0,20
6	0,33	0,51
8	0,84	1,35
10	1,75	2,88
12	3,01	4,93
14	4,62	7,56
16	5,92	9,70
18	7,09	11,64
20	7,72	12,75

Así, las tasas de dosis de origen cósmico recibidas dependen fundamentalmente de la altitud y, en mucho menor grado, de la latitud, de la estación del año y de la actividad solar.

Se han hecho estimaciones precisas en el caso de las personas expuestas por viajar en avión. Suponiendo que la altura media de los vuelos comerciales sea de 8 km, la tasa media de dosis sería 0,84 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ y la tasa media de dosis equivalente de 1,35 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ ^[34], lo que se traduce, según cálculos realizados en el año 1.978^[2], en una dosis efectiva colectiva a la población mundial de unos 2.000 Sv-persona a consecuencia del transporte aéreo, teniendo en cuenta que, según se desprende del informe de la *International Civil Aviation Organization*, se estimaron 1,6 x 10⁹ horas-pasajero de vuelo durante ese año.

Más recientemente esta misma organización ha proporcionado datos sobre las dosis equivalentes colectivas correspondientes a los pasajeros y tripulaciones de la aviación civil. El número de kilómetros-pasajero en 1.984, excluyendo las aerolíneas Chinas, fue de 1,3 x 10¹². Asumiendo una velocidad media de 600 km h⁻¹ a una altitud de 8 km y una tasa de dosis equivalente efectiva de 2 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ a esa altitud, la dosis efectiva colectiva anual está en torno a los 4.300 Sv-persona.

Otras publicaciones referencian valores de 3.400 Sv-persona^[24] ($1,5 \times 10^{12}$ pasajeros-kilómetro y $2,5 \times 10^9$ pasajeros-hora en 1.984) ó de 3.500 Sv-persona^[47] para el conjunto de la población mundial y no más de 1.600 Sv-persona para los vuelos en los Estados Unidos, mientras que la dosis equivalente colectiva para las tripulaciones aéreas debería estar por encima de los 65 Sv-persona. Tomando como guía la relación de la dosis efectiva colectiva de los pasajeros y la de las tripulaciones en los Estados Unidos, la dosis equivalente colectiva anual para tripulaciones aéreas en todo el mundo debería estar aproximadamente en torno a los 170 Sv-persona^[1].

Todo ello llevaría a considerar una dosis equivalente *per cápita* anual de unos 0,7 μSv para los pasajeros de vuelos comerciales, mientras que para las tripulaciones aéreas se alcanzarían valores mucho más elevados que se encontrarían en el rango de 0,5 a 2 $\text{mSv}\cdot\text{año}^{-1}$, de acuerdo con el número de horas de vuelo efectuadas.

Datos de 1.989^[48] indican que en ese año se produjo un flujo de $1,8 \times 10^{12}$ pasajeros-kilómetro, que se traduce en un total de 3×10^9 pasajeros-hora. Con una tasa de dosis efectiva de $2,8 \mu\text{Sv h}^{-1}$ a 8 km, calculada usando las ecuaciones [4] y [6] anteriores, la dosis colectiva efectiva para el total de los viajes en avión alcanzan alrededor de 10.000 Sv-persona por año. Por consiguiente, se puede considerar para todo el mundo, un valor anual de la dosis efectiva *per cápita* debida a vuelos comerciales de aproximadamente $2 \mu\text{Sv}$; en Norteamérica alcanza valores cercanos a los $10 \mu\text{Sv}$ ^[3].

En general, por tanto, se suele aceptar que los valores de dosis efectiva pueden variar, para diferentes latitudes y fases del ciclo solar, desde 2 a $10 \mu\text{Sv h}^{-1}$ para altitudes entre 11 y 13 km^[49]. En todo caso, cualquier valor comprendido en este rango es pequeño en comparación con la dosis efectiva anual *per cápita* estimada de $380 \mu\text{Sv}$, debida a los rayos cósmicos, al nivel del mar.

Las medidas realizadas en los vuelos supersónicos transoceánicos del Concorde han dado un valor medio de tasa de dosis equivalente durante 1.988 de $12,2 \mu\text{Sv h}^{-1}$, alcanzando un máximo de $75,9 \mu\text{Sv h}^{-1}$ en el año 1.989^[50]. En 1.990, la media obtenida en seis aeronaves supersónicas en Francia, que operan en alturas de crucero de unos 15 km, fue de $12 \mu\text{Sv h}^{-1}$ y la dosis anual para sus tripulaciones alcanzó los 3 mSv ^[51]. Durante ese mismo año la media de la tasa de dosis para unos 2.000 vuelos de este tipo de aviones en el Reino Unido fue $9 \mu\text{Sv h}^{-1}$, con un valor máximo de $44 \mu\text{Sv h}^{-1}$ ^[50].

Todos estos datos no tienen en cuenta los nuevos factores de ponderación para los neutrones, de acuerdo con las recomendaciones de la **ICRP-60** en 1.991^[36], por lo que las tasas de dosis efectivas habría que incrementarlas en cerca de un 30 % sobre los valores reportados más arriba. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que este sector del transporte aéreo comercial es globalmente insignificante.

En estudios llevados a cabo durante 1.993^[52], se estimaron tasas de dosis equivalentes que variaron de 5 a 8 $\mu\text{Sv h}^{-1}$, para latitudes geomagnéticas cercanas a los 50° N y para altitudes entre 10 y 12 km que son los niveles más frecuentemente usados para los vuelos comerciales convencionales. Estos valores llevan a tener que asumir dosis equivalentes de 3 a 5 mSv año^{-1} , considerando unas 600 horas de vuelo anuales de media^[1] y tomando los factores de calidad indicados en **ICRP-60**^[36].

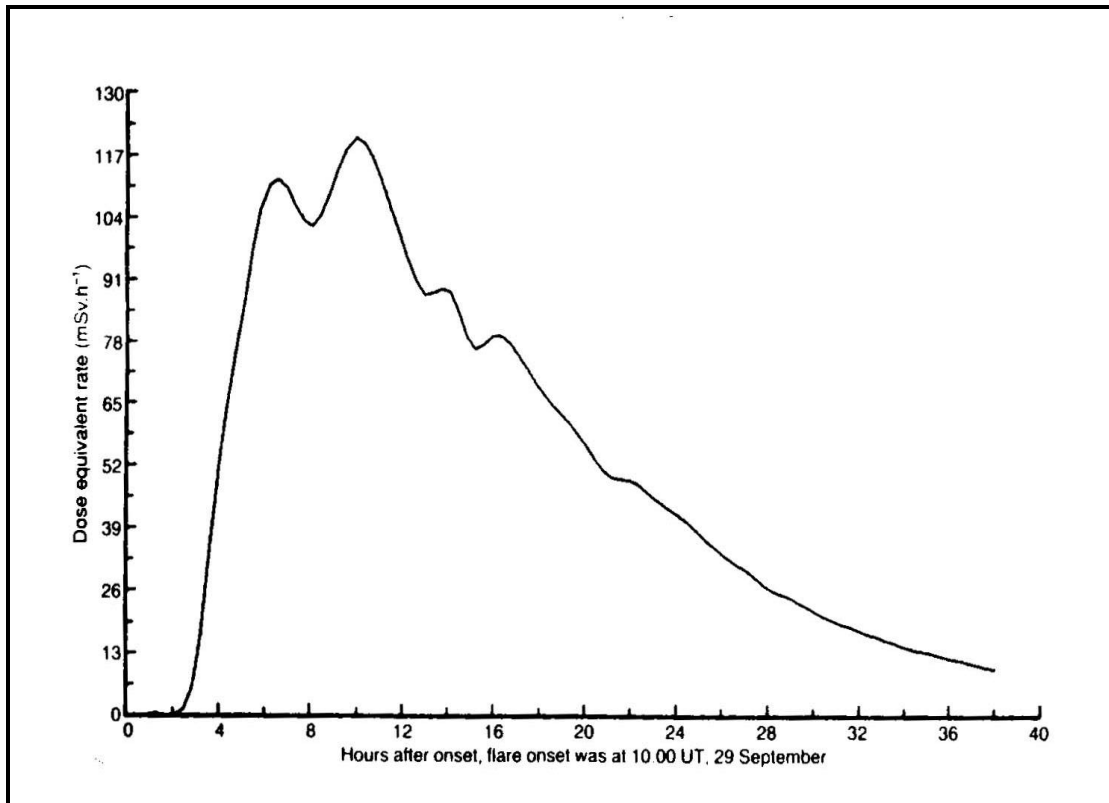
Estos valores de exposición llegan a tener especial interés cuando la **International Commission on Radiation Protection (ICRP-60)** recomienda una reducción en el límite de dosis anual desde 50 a 20 mSv , en períodos de 5 años, para exposiciones ocupacionales, dado el gran incremento en los índices de riesgo de ocurrencia de cáncer para bajos niveles de exposición continuada^[36]. Por eso la **ICRP** recomienda incluir a las tripulaciones aéreas como personal profesionalmente expuesto, considerando que a partir de unas 600 horas de vuelo llegan a ser uno de los grupos profesionales más altamente expuestos a las radiaciones ionizantes.

Se ha estimado^[22] que tripulaciones con permanencias de 500 a 1.000 horas anuales a una altura entre 5 y 12 km podría alcanzar una exposición a la radiación en el rango que va de 1 mSv a 10 mSv , pudiéndose considerar una tasa de dosis efectiva de 5 mSv/año como valor medio típico para este grupo de población.

En general se desprecia la contribución debida a las erupciones solares frente a los rayos cósmicos galácticos: la radiación de origen solar sólo puede llegar a ser importante muy eventualmente durante una erupción solar intensa (duran unas 10 horas y ocurren unas pocas veces durante el ciclo solar) además de presentar energías relativamente bajas cuando alcanzan la Tierra, por lo que la contribución a la dosis colectiva de la población mundial no llega a ser significativa.

En la **Figura I.17**^[23] se representa la tasa de dosis equivalente como función del tiempo a 18 km de altitud durante la emisión de partículas solares producida durante los días 29 y 30 de Septiembre de 1.989. En la medida, realizada durante el vuelo del Concorde desde París a Nueva York, se obtuvo un valor máximo de 0,12 mSv h^{-1} .

Figura I.17.- Tasa de dosis equivalente en función del tiempo, debido a las emisiones de partículas solares el 29-30 de septiembre, a 18 km de altitud, usando factores de calidad estándar.



Como ya se ha indicado con anterioridad, pueden tener más importancia relativa los efectos de modulación sobre la radiación primaria que tienen lugar en la atmósfera durante el ciclo solar (dando origen a alteraciones del corte geomagnético y produciendo, consecuentemente, modificaciones en la dirección e intensidad de los rayos cósmicos que inciden en la atmósfera terrestre), que la propia componente de la radiación de origen solar.

I.2.4.- IRRADIACIÓN INTERNA DEBIDA A LOS RAYOS CÓSMICOS

Un gran número de radionúclidos cosmogénicos se producen en la estratosfera y en las capas altas de la troposfera por la interacción de los rayos cósmicos con los núcleos de los átomos presentes en el aire (nitrógeno, oxígeno y argón), además de la gran variedad de reacciones nucleares que tienen lugar en la biosfera y la litosfera. La producción y distribución de estos núclidos en el medio ambiente fue revisada por el Comité de la Naciones Unidas en el *Informe UNSCEAR 1977*^[9].

Solamente cuatro radionúclidos cosmogénicos (^3H , ^{14}C , ^7Be y ^{22}Na) tienen importancia desde el punto de vista de la dosis de radiación a los hombres. Juntos pueden contribuir a la dosis anual por irradiación interna en un rango que va desde 5 a 25 μGy en los distintos órganos y tejidos de interés.

La dosis efectiva anual a los adultos debida a la ingestión de ^3H , ^7Be y ^{22}Na en alimentos y agua ha sido calculada a partir de la incorporación anual media estimada, aplicando coeficientes estándar para la dosis por unidad de ingestión y asumiendo una situación de equilibrio^{[21][9][31]}. La dosis efectiva anual obtenida para estos tres radionúclidos son mucho más pequeñas que para el ^{14}C . En la **Tabla 1.21**^[31] se presenta la incorporación anual y las dosis efectivas correspondientes a estos cuatro radionúclidos cosmogénicos.

La contribución a la dosis efectiva anual de estos núclidos se estima, como ya se ha indicado anteriormente, en unos 15 μSv , distribuidos de la siguiente manera (**Tabla 1.21**): 0,01 μSv para el ^3H , 0,03 μSv para el ^7Be , 0,15 μSv para el ^{22}Na y 12 μSv para el ^{14}C , que es con mucho el radionucleido más significativo desde el punto de vista de la dosis. La producción natural anual de ^{14}C es 1 PBq, siendo su actividad específica igual a 230 Bq por kg de carbón^[31]. Dada la relativa homogeneidad del flujo de rayos cósmicos sobre la superficie de la Tierra, la variabilidad de la dosis anual debida a los radionúclidos cosmogénicos se espera que sea bastante baja.

Tabla 1.21.- Incorporación anual por ingestión de radionúclidos cosmogénicos y dosis efectiva para los adultos.

Radionúclido	Ingestión (Bq a ⁻¹)	Dosis efectiva anual (mSv)
^3H	500	0,01
^7Be	1.000	0,03
^{14}C	20.000	12,0
^{22}Na	50	0,15

El tritio en forma natural se produce en la atmósfera a consecuencia de la interacción de rayos cósmicos neutrónicos con el nitrógeno y el oxígeno. Cerca del 99% del ^3H se convierte en agua tritiada (HTO) que se incorpora al ciclo normal del agua, llegando a las cosechas de productos agrícolas comestibles e incorporándose parcialmente a la materia orgánica y a la dieta humana en forma de HTO y de compuestos orgánicos.

Se aceptan valores medios de 400 Bq m^{-3} de concentración de tritio en las aguas continentales superficiales (rango de 200 a 900 Bq m^{-3}) y de 100 Bq m^{-3} en aguas oceánicas.

La incorporación de berilio al ser humano se produce sobre todo a través de la ingestión de verduras de hojas comestibles. Las concentraciones ambientales de ^7Be en zonas templadas es de unos pocos $\mu \text{ m Bq m}^{-3}$ en las capas de aire superficiales y de unos 700 Bq m^{-3} en el agua de lluvia.

El ^{14}C natural se genera en las capas altas de la atmósfera al incidir rayos cósmicos neutrónicos lentos sobre el ^{14}N , de acuerdo con la reacción : $^{14}\text{N} (\text{n,p}) ^{14}\text{C}$.

En el *Informe UNSCEAR 1977*^[9] se estimó que el inventario mundial de ^{14}C natural era unas 60 veces la cantidad encontrada en la atmósfera, lo cual se traducía en un valor aproximado de 8.500 PBq , correspondiente a una tasa de producción anual de, aproximadamente, 1 PBq a^{-1} .

Partiendo de un valor para la actividad específica natural de ^{14}C en el organismo de 227 Bq kg^{-1} de carbono, se obtienen dosis absorbidas anuales en los diferentes tejidos de 5 a $24 \mu\text{Gy}$, lo que significa un equivalente de dosis efectiva anual de unos $12 \mu\text{Sv}$. Este valor es concordante con la cifra deducida de las indicaciones de la *ICRP*^[53] suponiendo una incorporación anual de 93 kg de carbono^[54].

A partir de suponer una incorporación anual por ingestión de 50 Bq de ^{22}Na , utilizando dosimetría de la *ICRP*^[53], se estiman dosis absorbidas anuales en los tejidos debidas a este radionúclido de entre $0,1$ y $0,3 \mu\text{Gy}$, lo que corresponde a una dosis equivalente efectiva de unos $0,15 \mu\text{Sv}$.

El hecho de que las dosis absorbidas anuales sean superiores a las del ^3H , a pesar de que la tasa de producción y concentración atmosférica del ^{22}Na sea muy pequeña, se debe al comportamiento metabólico del sodio y a las propiedades de desintegración del ^{22}Na .

I.3.- RADIACIÓN TERRESTRE

I.3.1.- INTRODUCCIÓN

Los principales materiales radiactivos que se encuentran presentes en la corteza terrestre y contribuyen en mayor medida a la dosis a la población son el ^{40}K (vida media: $1,28 \times 10^9$ años) y los correspondientes a las series de desintegración del ^{238}U (vida media: $4,47 \times 10^9$ años) y del ^{232}Th (vida media: $1,41 \times 10^{10}$ años) (**Figura I.18**^[1] y **Figura I.19**^[1]). Con una menor importancia relativa en su contribución a la exposición humana de origen terrestre aparecen el ^{87}Rb ($4,7 \times 10^{10}$ años) y el ^{235}U ($7,04 \times 10^8$ años). Como se ve, todos son radionucleidos con tiempos de vida media comparables a la edad de la Tierra, habiendo existido en ella desde su origen.

Figura I.18.- Serie del ^{238}U .

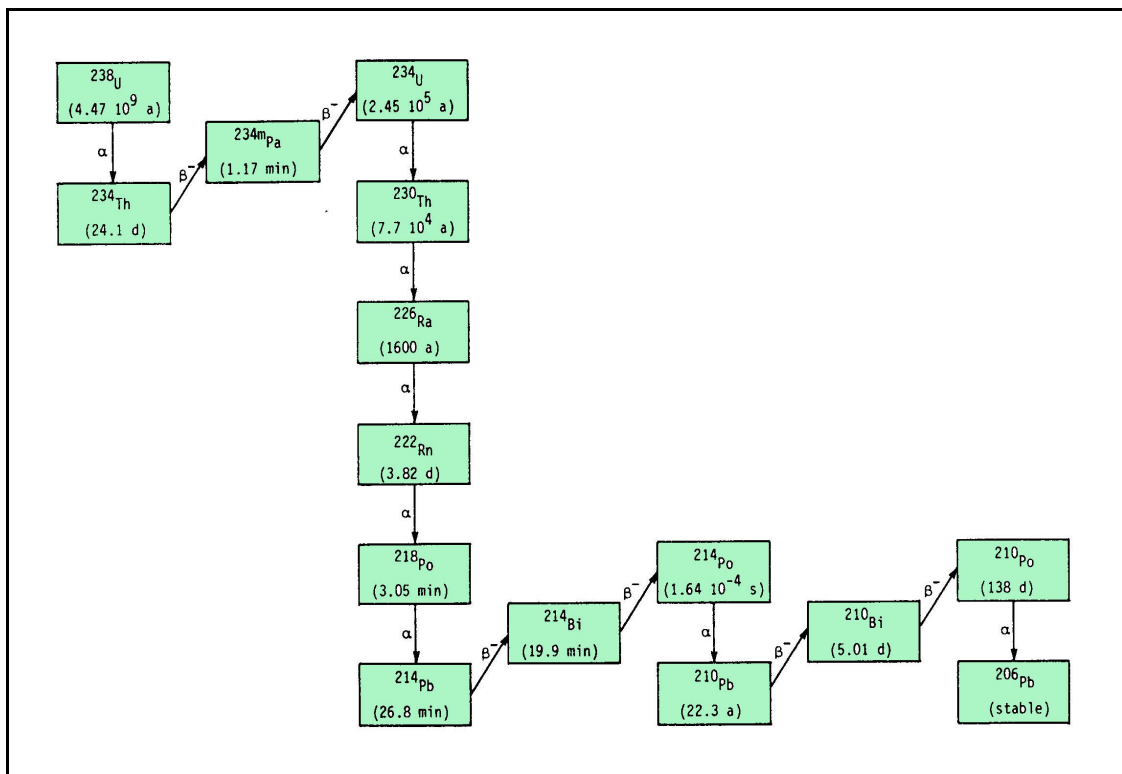
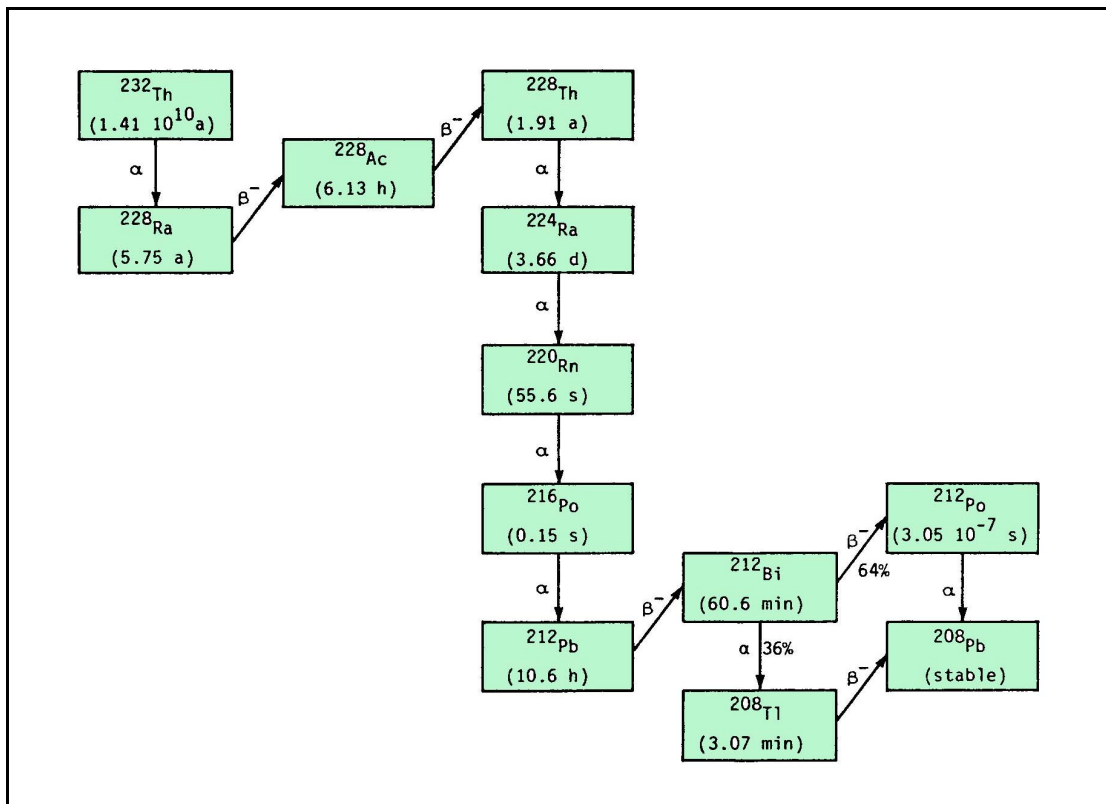


Figura I.19.- Serie del ^{232}Th .



Los niveles de radiación terrestre, varían de un lugar a otro en razón de las respectivas concentraciones de los radionúclidos presentes en los minerales que constituyen los diferentes suelos.

En la mayoría de los lugares, los niveles de radiación detectados no se desvían demasiado de la media, pudiéndose concluir, a partir de numerosos estudios realizados en muchos países del mundo que, aproximadamente, el 95% de la población vive en áreas donde la dosis anual media, de origen terrestre, oscila entre 0,3 y 0,6 mSv. Por el contrario, se ha encontrado que un 3% de la población recibe en torno a 1 mSv por año y un 1,5% de los habitantes del planeta superan niveles de $1,4 \text{ mSv} \times \text{año}^{-1}$ ^[10].

Además, existen puntos geográficos muy concretos donde los niveles de radiación terrestre son mucho más elevados. Así, en una colina cercana a la ciudad de Poços de Caldas (Brasil) se han encontrado índices de radiación unas 800 veces superiores a la media ($250 \text{ mSv} \times \text{año}^{-1}$) o en Guarapari, ciudad con una población de hecho, según las épocas del año, entre 12.000 y 40.000 habitantes, se han medido en sus calles valores de dosis efectiva anual que oscilan entre 8 y 15 mSv y hasta 175 mSv en algunas zonas de su playa, formada por arenas ricas en torio. En una franja del suroeste de la India de unos 55 km, con arenas que también contienen una gran concentración de torio, las 70.000 personas que allí viven reciben unos 3,8 mSv por año, alcanzando en

algunos casos valores de hasta $8,7 \text{ mSv} \times \text{año}^{-1}$. En zonas de Ramsar (Irán) donde existen manantiales ricos en radio, han llegado a medirse hasta 400 mSv por año.

El *Informe UNSCEAR-93*^[3] indica que, por término medio, la población mundial recibe una dosis efectiva procedente de la *radiación natural terrestre externa* de unos $460 \mu\text{Sv}$ por año^[3]. Este valor es ligeramente superior al que proviene de los rayos cósmicos ($380 \mu\text{Sv} \text{ año}^{-1}$) para una persona que viva a nivel del mar.

Por término medio, los dos tercios de la dosis efectiva, de origen natural, recibida por el hombre, procede de sustancias radiactivas que incorpora a su organismo, ya sea a través del aire que respira, el agua que bebe o los alimentos que consume.

Si no se considerara el pequeño valor de dosis que procede de sustancias radiactivas originadas por la radiación cósmica como el ^{14}C o el tritio, podríamos decir que la mayoría de los radionúclidos que se incorporan al organismo provienen de fuentes terrestres. Así el hombre recibe unos $180 \mu\text{Sv}$ por año procedentes del ^{40}K que se ingiere juntamente con el potasio no radiactivo, elemento esencial para la supervivencia.

Pero, con mucho, la mayor parte de la dosis proviene de los elementos resultantes de la desintegración del ^{238}U o, en menor medida, del ^{232}Th . Algunos de ellos, como el ^{210}Pb o el ^{210}Po , se incorporan al organismo con la comida, sobre todo a través del pescado o de los mariscos.

La ingestión de determinados alimentos también tiene gran incidencia en la dosis de ciertas poblaciones con una dieta alimenticia a base de reno o caribú, animales que contienen elevadas concentraciones de ^{210}Po ya que consumen durante el invierno gran cantidad de líquenes que acumulan importantes concentraciones de polonio radiactivo. Estas personas, asentadas en el área más septentrional del hemisferio norte, pueden incorporar radionúclidos que originan dosis hasta 35 veces superiores a la media de la población mundial. También en el oeste de Australia, en una zona rica en uranio, existen núcleos de población que reciben dosis unas 75 veces superiores a la media, debido a su dieta basada en la ingesta de carne de ovino y canguro.

Habitualmente las sustancias radiactivas que llegan al organismo mediante la alimentación, describen complicados itinerarios en el medio ambiente hasta alcanzar al hombre. Casi siempre se incorporan a los animales o a las plantas que consumimos a través de los materiales presentes de forma natural en el agua o en los suelos, o de los radionúclidos que incorporan éstos por precipitación de los existentes en el aire.

En resumen, se puede concluir que la población humana está permanentemente expuesta tanto a la irradiación externa como interna por rayos gamma, partículas beta y partículas alfa, en un rango de energías muy variable, procedentes de la desintegración radiactiva de ciertos elementos de los minerales constituyentes de la corteza terrestre o incorporados desde ella al aire, al agua, a los materiales orgánicos o a los organismos vivos.

I.3.2.- COMPONENTE EXTERNA DE LA RADIACIÓN TERRESTRE

La exposición a la radiación gamma de origen natural se produce tanto dentro de los edificios (*indoor*) como al aire libre (*outdoor*).

Durante los últimos años se han llevado a cabo numerosos estudios en los diferentes países del mundo con objeto de evaluar la contribución de la radiación de origen terrestre a las dosis globales a la población^[55]. En la **Tabla 1.22**, extraída del **Informe UNSCEAR-93**^[3], se presenta un resumen de los valores de tasa de dosis absorbida, ya sea *outdoor* o *indoor*, en aquellos países donde se han realizado investigaciones más amplias y exhaustivas a este respecto.

Tabla 1.22.- Tasas de dosis absorbidas en aire por radiación gamma terrestre en diferentes países del mundo.

PAIS	Tasa de dosis absorbida (nGy h ⁻¹)				Relación indoors/ /outdoors
	Outdoor		Indoor		
	Media	Rango	Media	Rango	
Austria	43	20-150	71		1,65
Bélgica	43	13-58	58		1,35
Bulgaria	70	48-96	75	57-93	1,07
China	62	2-341	99	11-418	1,60
Dinamarca	38	17-52	63		1,66
España	46	25-83	68		1,48
Estados Unidos	46	13-100	37		0,80
Francia	68	10-250	75		1,10
Gran Bretaña	34	8-89	60		1,76
Holanda	32	10-60	64	30-100	2,02
Hungría	55	20-130	84	10-200	1,53
Irlanda	42	1-180	62	10-140	1,48
Italia	57	7-500	86		1,51
Japón	49	5-100	50		1,02
Namibia	120	80-260	140	120-160	1,17
Noruega	73	20-1200	95		1,30
Portugal	85	9-226	105	37-244	1,24
Alemania	54	4-430	70		1,30
Suecia	56	41-69	110	20-460	1,96
Media ponderada (*)	57		83		1,44

(*) **Media ponderada a la población:** Hay que hacer notar que la media que se pondera a la población, se refiere a todos los países que figuran en el *Informe UNSCEAR-93*^[3], de los cuales aquí sólo se han reflejado aquellos que cuentan con los estudios más significativos. La población considerada en este *Informe* para llegar al valor dado de dosis absorbida *outdoors*, 57 nGy h⁻¹, representa las tres quintas partes de la población mundial.

I.3.2.1.- EXPOSICIÓN EXTERNA OUTDOORS

La contribución media a la tasa de dosis a las personas debida a la radiación natural, medida a 1 m del suelo, en el exterior de las edificaciones, se cifra actualmente, para un rango medio de 24 a 160 nGy h⁻¹, en 57 nGy h⁻¹ [3]. Este valor es ligeramente superior a los 55 nGy h⁻¹ que aparecía en el anterior *Informe UNSCEAR-88*^[1], como media para toda la población mundial.

También las concentraciones estimadas para los principales radionúclidos presentes en el suelo han tomado, después de los resultados de las medidas llevadas a cabo en los últimos años en todo el mundo, valores medios ligeramente más altos. Así, para el caso de ²³⁸U y ²³²Th, las concentraciones que se establecían en el *Informe UNSCEAR-88*^[1] como media mundial eran, en ambos casos, 25 Bq kg⁻¹. Posteriormente, se han aceptado valores próximos a 40 Bq kg⁻¹ como más adecuados, sobre todo después de los exhaustivos estudios realizados en Estados Unidos, China y en los países nórdicos. En la **Tabla 1.23** se presenta un resumen de estos resultados, para los dos primeros países, extraídos del *Informe UNSCEAR-93*^[3].

Tabla 1.23.- Concentraciones de radionúclidos presentes en los suelos y tasa de dosis absorbida en aire (calculada a partir de los datos anteriores), en China y EE.UU.

Radionúclidos	CHINA		ESTADOS UNIDOS	
	Concentración (Bq kg ⁻¹)	Tasa de dosis (nGy h ⁻¹)	Concentración (Bq kg ⁻¹)	Tasa de dosis (nGy h ⁻¹)
K-40	580	24	370	15
Series ²³² Th	49	31	35	22
Series ²³⁸ U	40	(°)	35	(°)
Subseries ²²⁶ Ra	37	17	40	18
TOTAL		72		55

Notas a la Tabla 1.23:

P En ambos casos se han tomado los siguientes *coeficientes de conversión*^{[31][56][57]} para obtener la tasa de dosis absorbida en aire (en nGy h⁻¹ por Bq kg⁻¹):

⁴⁰ K:	0,0414
Series del ²³² Th:	0,623
Subseries del ²²⁶ Ra:	0,461

P (°) Dosis incluida en las subseries del ²²⁶Ra.

Comparando los datos presentados en los *Informes UNSCEAR* correspondientes a los años **1.988** y **1.993**, también se encuentran diferencias entre los valores de los coeficientes utilizados para calcular la tasa de dosis absorbida de radiación gamma en aire, a partir de las concentraciones de los radionúclidos presentes en el suelo^{[1][3]} (Tabla 1.24).

Tabla 1.24.- Coeficientes de conversión utilizados en los *Informes UNSCEAR-88* y *UNSCEAR-93*, para el cálculo de la tasa de dosis absorbida en aire *outdoor* (nGy h⁻¹ por Bq kg⁻¹).

RADIONÚCLIDOS	UNSCEAR-88	UNSCEAR-93
⁴⁰ K	0,043	0,0414
²³² Th	0,662	0,623
²³⁸ U	0,427	-
²²⁶ Ra	-	0,461

En cualquier caso, no existe acuerdo en cuanto a los valores de los factores de conversión utilizados para el cálculo de las tasas de dosis *outdoor* absorbidas en aire. Diferentes investigadores han considerado distintos coeficientes que inducen a pequeñas diferencias en los resultados finales obtenidos.

También se ha discutido profusamente la no coincidencia entre los valores de la tasa de dosis absorbida en aire por radiación gamma, obtenida mediante la expresión matemática que tiene en cuenta la contribución de las concentraciones de los diferentes radionúclidos presentes y la obtenida por medida directa a 1 m del suelo, mediante cámara de ionización o dosimetría termoluminiscente.

Las diferencias, casi nunca significativas, han sido explicadas por los distintos autores como consecuencia de factores ambientales (contenido de humedad en los

suelos, presencia de nieve, etc), contenido de fertilizantes fosfatados, contribuciones de emisores gamma no tenidos en cuenta, etc.

Así, en la **Tabla 1.23** anterior, se dan unos valores *calculados* de tasa de dosis por radiación gamma *outdoor* en aire para China y Estados Unidos de 72 y 55 nGy h⁻¹, respectivamente, mientras que en la **Tabla 1.22**, en la que aparecen los valores *medidos* en los más importantes países del mundo, se presenta para China el valor de 62 nGy h⁻¹, tomándose 57 nGy h⁻¹ como media mundial. Como se observa, la diferencias no son apreciables y más teniendo en cuenta que los últimos son valores medios ponderados a la población de la humanidad, que mayoritariamente, además, habita en áreas de geología sedimentaria, mientras que los primeros son valores obtenidos a partir de la medida de las actividades específicas de los radionúclidos contribuyentes, después de analizar muestras recogidas en los suelos de toda la geografía del país.

Las áreas donde se producen altas tasas de dosis en aire a lo largo del mundo se asocian, casi siempre, con materiales con predominio del torio y del uranio. Los suelos formados por arenas que contienen monacita pueden originar tasas de dosis absorbidas en aire del orden de 10⁵ nGy h⁻¹, dependiendo de la geometría. En la geografía mundial hay dos zonas, ampliamente estudiadas, de estas características: en Kerala (India), en la costa del Mar de Arabia, y en la costa Atlántica de Espiritu Santo, en Brasil, donde las tasas de dosis absorbidas en aire, debidas a radiación gamma *outdoor*, se mueven en el rango que va desde 100 ó 200 nGy h⁻¹ hasta los 4.000 nGy h⁻¹.

En la **Tabla 1.25**, se presenta un resumen de las zonas que en el mundo presentan valores anormalmente altos de tasas de dosis absorbidas en aire^[3].

Tabla 1.25.- Localizaciones con altos índices de radiactividad ambiental gamma *outdoor*.

Lugar / Zona	Tasa de dosis absorbida en aire (nGy h ⁻¹)	Observaciones
Delta del Nilo	20-400	
Delta del Ganges	260-440	
Cerca de Mombasa (Costa Kenya)	> 12.000	Carbonatita rica en Th
Minas Gerais (Brasil)	100-3.500	Intrusivas volcán.(Th+U)
Ramsar (Irán) Costa Mar Caspio	> 30.000	Manantiales (depos.Th+U)
Suecia	> 100.000	Rocas uraníferas

Para no olvidar ningún aspecto relacionado con la contribución a la tasa de dosis *outdoor* en aire por radiación terrestre, hay que considerar la que aportan los emisores gamma de alguno de los productos de desintegración de vida corta del ^{222}Rn .

Un estudio semi-empírico llevado a cabo en Japón^[58], concluyó que se puede estimar como porcentualmente despreciable la contribución relativa de los emisores gamma del radón a la tasa de dosis en aire en el exterior de los edificios, frente a la predominante tasa de dosis desde el suelo.

I.3.2.2.- EXPOSICIÓN EXTERNA INDOORS

La cantidad de estudios realizados sobre las tasas de dosis de radiación gamma terrestre absorbidas dentro de los edificios no es tan grande como los llevados a cabo para la componente *outdoor*. No obstante, en los últimos tiempos se han muestreado amplias zonas de la geografía habitada de la Tierra, que corresponden a más de la tercera parte de la población mundial^[3]. Los resultados obtenidos se encuentran en el rango de 29 a 190 nGy h⁻¹, alcanzando la tasa de dosis externa *indoor* ponderada a la población un valor medio de alrededor de 80 nGy h⁻¹. Este valor, es más alto que el de 70 nGy h⁻¹ que se tomaba como media mundial en el *Informe UNSCEAR-88*^[1].

Comparando los valores de tasas de dosis medias externas terrestres *indoor* y *outdoor*, se observa que las medidas dentro de las edificaciones, en valor medio, siempre superan en un 40 ó 50% a las realizadas al aire libre. Así, en las investigaciones llevadas a cabo, se cumple que, en la gran mayoría de los países, la relación de tasa de dosis en aire a la población *indoor/outdoor* está comprendida entre 1,0 y 2,0. Únicamente, entre las naciones más importantes, se refiere el caso de Estados Unidos en que la relación obtenida fue de 0,8 (ver la **Tabla 1.22**).

La tasa de dosis *indoor* va a depender, entonces, de los materiales de construcción, de sus componentes, de su espesor y de su disposición constructiva. En todo caso, el estrecho margen de variación que presenta la relación entre la tasa de dosis *indoor* y *outdoor*, es representativa de que, lógicamente, los materiales de construcción empleados en la edificación de viviendas van a estar constituidos, casi siempre, por minerales de la propia zona donde se ha medido la radiactividad terrestre *outdoor*.

En otros casos, también, las paredes de las edificaciones pueden convertirse en eficaces blindajes a la radiación externa. Entonces los elementos constructivos (paramentos verticales y horizontales) se comportan como elementos que incrementan o disminuyen, en un factor determinado, el valor de la tasa de dosis medido en su interior.

En un edificio construido en madera o con tabiques muy finos, se puede esperar que, prácticamente, no haya diferencias apreciables entre la tasa de dosis medida en su interior por radiación gamma terrestre y la existente en el exterior. Por el contrario, en las casas fabricadas a base de grandes cantidades de ladrillos, piedra o cemento, se pueden observar diferencias con la medida externa, ya que por un lado las gruesas paredes actúan como apantallamiento de la radiación gamma procedente de fuera y por otro, la medida *indoor*, va a depender fuertemente de si entre los minerales constituyentes de los elementos constructivos existen o no altas concentraciones de emisores gamma.

Por ello, siempre va a existir, a priori, un alto grado de incertidumbre en la estimación de los valores esperados de la tasa de dosis absorbida *indoor* para cada caso, pudiendo incluso producirse una gran variabilidad en los resultados obtenidos, aún en zonas geográficamente muy cercanas, si los materiales de construcción tuvieran componentes muy diferentes. Parecería lógico que en las regiones de la Tierra con climas cálidos, donde las edificaciones pueden ser de madera o de tabiques más finos, las tasas de dosis absorbidas en aire *indoor* llegaran a ser más bajas. Sin embargo aún no se ha podido asegurar que, de forma genérica, puedan alcanzarse conclusiones de este tipo.

Estudios realizados en distintas partes del mundo han presentado situaciones anómalas en los valores de las tasas *indoor*. Ejemplo de ello puede ser el valor de 230 nGy h⁻¹ medido en el interior de ciertas casas de Suecia fabricadas con hormigones aligerados que contienen alúminas uraníferas, o en viviendas de Checoslovaquia construidas con materiales derivados de escorias de carbón ricas en uranio en donde se han medido tasas de dosis de hasta 1.000 nGy h⁻¹, o en ciertas regiones del Reino Unido donde se edifica con rocas graníticas de la zona o en las viviendas hechas con bloques de barro en Jamaica, con medias de tasas de dosis absorbidas en el interior debidas a la radiación terrestre próximas a 100 y 200 nGy h⁻¹, respectivamente.

Se han aceptado como valores típicos de las concentraciones de ⁴⁰K, ²³²Th y ²²⁶Ra que se encuentran en los materiales de construcción, los siguientes^[59]:

$$\begin{aligned} A_K &= 500 \text{ Bq kg}^{-1} \\ A_{Th} &= 50 \text{ Bq kg}^{-1} \\ A_{Ra} &= 50 \text{ Bq kg}^{-1} \end{aligned}$$

A partir de estos valores y de los coeficientes de contribución de los diferentes radionúclidos presentes en el suelo a la tasa de dosis absorbida en aire (**Tabla 1.24**), se puede definir un *índice de utilización de actividad*, que facilite el cálculo de las tasas de dosis *indoor* esperadas en función de los diferentes combinaciones de los componentes de los materiales de construcción. Este índice viene dado por la expresión:

$$[(C_K/A_K) f_K + (C_{Ra}/A_{Ra}) f_{Ra} + (C_{Th}/A_{Th}) f_{Th}] w_m$$

donde C_K , C_{Ra} y C_{Th} son, en $Bq\ kg^{-1}$, los valores reales de las concentraciones de ^{40}K , ^{232}Th y ^{226}Ra , respectivamente, en los materiales de construcción considerados; f_K , f_{Ra} y f_{Th} son las contribuciones fraccionarias de la tasa de dosis en aire para las concentraciones típicas de estos radionúclidos; y w_m , la fracción de uso de cada uno de los materiales de construcción empleados con la actividad característica.

Para un edificio en el se haya usado en su totalidad mampostería típica, el *índice de utilización de actividad* es la unidad por definición. Este valor se acepta para obtener una tasa de dosis de $80\ nGy\ h^{-1}$, igual a la media mundial ponderada a la población^[3].

Tabla 1.26.- Tasa de dosis absorbida en aire estimada en el interior de los edificios.

Material	Concentración ($Bq\ kg^{-1}$)			Índice utilización actividad (#)	Tasa de dosis absorbida en aire para la fracción, en masa, indicada de material de edificación ($nGy\ h^{-1}$)			
	C_K	C_{Ra}	C_{Th}		1,0	0,75	0,5	0,25
Mampostería típica	500	50	50	1,0	80	60	40	20
Bloque de granito	1200	90	80	1,9	140	105	70	35
Agregado de cenizas de carbón	400	150	150	2,4	180	135	90	45
Hormigón aluminoso	770	1300	67	9,0	670	500	390	170
Yeso fosfatado	60	600	20	3,9	290	220	145	70
Yeso natural	150	20	5	0,25	20	15	10	5

(#) Asumiendo la completa utilización de los materiales, es decir, $w_m = 1$.

Para estimar el efecto del uso de materiales de construcción atípicos en la tasa de dosis a la población, es necesario determinar la fracción de utilización de cada uno de ellos, identificar su tasa de dosis asociada y restarle la tasa de dosis correspondiente a la mampostería típica.

Así, por ejemplo, en una construcción en que se utilice un 50% de granito, debería incrementarse la dosis, con respecto a otra construida con mampostería normal, en: $70 - 40 = 30 \text{ nGy h}^{-1}$; un 50% de utilización de hormigón rico en aluminio, aumentaría la tasa de dosis en: $390 - 40 = 350 \text{ nGy h}^{-1}$; el uso de la cuarta parte de yeso fosfatado, representaría un incremento de $70 - 20 = 50 \text{ nGy h}^{-1}$; mientras que el empleo de una fracción similar de yeso natural produciría una disminución de la tasa de dosis absorbida en aire en unos $5 - 20 = -15 \text{ nGy h}^{-1}$.

No obstante, hay que resaltar que todas las consideraciones y cálculos anteriores son estimaciones globales y muy aproximadas, y que para poder llegar a aceptar todos esos datos como exactos no queda más remedio que proceder a su confirmación mediante una medida *in situ* con los medios técnicos adecuados.

Otra de las contribuciones a la tasa de dosis en aire debido a radiación gamma terrestre que, en principio, hay que tener en cuenta, como ya se ha comentado anteriormente, sería la correspondiente a los emisores gamma de alguno de los productos de desintegración de vida corta del ^{222}Rn , siempre presente en el aire dentro de las edificaciones.

Investigaciones y estudios realizados concluyeron^[60], en un análisis semi-empírico realizado para una casa unifamiliar, que la contribución a la tasa de dosis en aire por unidad de actividad específica (en Bq m^{-3}) del radón en equilibrio con sus progenitores, es del orden de $0,01 \text{ nGy h}^{-1}/\text{Bq m}^{-3}$. Esto daría, para una concentración típica en el interior de una vivienda igual a 20 Bq m^{-3} , una contribución relativa a la tasa de dosis absorbida en aire *indoor* de $0,2 \text{ nGy h}^{-1}$, lo que representa un valor prácticamente despreciable, en relación a la correspondiente a la radiación gamma directa procedente de los materiales de construcción, o de la tasa de dosis generada por la aspiración hacia los pulmones de partículas alfa de radón.

I.3.3.- COMPONENTE INTERNA DE LA RADIACIÓN TERRESTRE

El tercer contribuyente a la dosis a la población debida a la radiación de origen natural, además de los rayos cósmicos y de la radiación procedente de la corteza terrestre, es el conjunto de radionúclidos de larga vida presentes en el interior del cuerpo humano y que han llegado a él a través de su inhalación y su ingestión.

Los más importantes de todos ellos son, sin duda, los isótopos del radón y sus productos de desintegración de vida corta, cuyo aporte al incremento de la dosis interna de origen terrestre natural es, comparativamente, mucho mayor que el del resto de los radionúclidos presentes en el suelo. No obstante, dado que en esta memoria no se hace referencia a la componente alfa de la radiación natural, únicamente vamos a detenernos en el análisis de aquellos radionucleidos emisores gamma, presentes en la naturaleza, susceptibles de ser inhalados o ingeridos.

La presencia del ^{40}K en el cuerpo humano ha sido muy bien estudiada desde hace mucho tiempo, tanto desde el punto de vista de su presencia en el aire que respiramos o de los alimentos que ingerimos^[29], como a través de los análisis post-mortem de diferentes individuos. La media del contenido en potasio del cuerpo, para ambos sexos, en países industrializados, se considera en torno al 0,20% en edades comprendidas entre 1 y 10 años y del 0,18% a la edad de 30 años^[61]. Considerando que la abundancia isotópica de ^{40}K es de $1,18 \cdot 10^{-4}$, que su actividad específica media es de 55 Bq por kg de peso del cuerpo y que el factor de conversión es de $3 \mu\text{Sv a}^{-1}$ por Bq kg^{-1} ^[31], resulta que la dosis efectiva anual debida al ^{40}K en el cuerpo humano es 165 μSv para los adultos.

La contribución de los isótopos de las series del uranio y del torio a la exposición natural interna, se hace patente por su incorporación al organismo humano a través del aire que respiramos y de la dieta alimenticia que ingerimos. En todos los **Informes UNSCEAR**^{[1][2][3][9][29]} se estiman dosis a partir de la medida de la actividad en tejidos, usando apropiados coeficientes dosimétricos, y datos sobre la incorporación directa al cuerpo humano de estos radionúclidos.

Se han realizado muy diversos estudios sobre la parte de la dosis que corresponde a la presencia de estos radionucleidos en el cuerpo humano (vía comida, agua, aire), en base a los valores medios normalizados de alimentos que se ingieren adoptados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), procedentes de datos elaborados por la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

En la **Tabla 1.27** siguiente, se presenta un resumen de la incorporación anual media, ponderada a la edad, por ingestión, así como de la dosis efectiva asociada. Esta ha

sido estimada usando una distribución porcentual del 65% para adultos, 30% para niños y adolescentes y 5% para niños pequeños³¹.

Tabla 1.27.- Incorporación media anual de radionúclidos naturales de las series del U y del Th, ponderada a la edad, y dosis efectiva asociada.

RADIONÚCLIDO	INGESTIÓN		INHALACIÓN	
	Incorporación (Bq)	Dosis (mSv)	Incorporación (Bq)	Dosis (mSv)
U-238	4,9	0,12	6,9	0,21
U-234	4,9	0,15	6,9	0,21
Th-230	2,5	0,18	3,5	0,18
Ra-226	19	3,8	3,5	0,01
Pb-210	32	32	3.500	7,0
Po-210	55	11	350	0,35
Th-232	1,3	0,52	6,9	1,4
Ra-228	13	3,9	6,9	0,01
Th-228	1,3	0,09	6,9	0,69
U-235	0,21	0,01	0,4	0,01
TOTAL		52		10

Los valores de la tabla anterior, procedentes del *Informe UNSCEAR-93*³¹, son similares a los presentados en el anterior del año 88¹¹, tanto para la ingestión como para la inhalación. Únicamente, para el primer caso, el valor del ²¹⁰Po es algo más alto porque ahora se incluye la contribución en la dieta alimenticia de los pescados y los invertebrados (mariscos, moluscos, etc). En ambos estudios se puede observar el predominio del ²¹⁰Po y del ²¹⁰Pb como principales contribuyentes a la dosis de origen natural por estas dos vías de incorporación al organismo.

I.3.4.- DOSIS DEBIDA A LA RADIACIÓN TERRESTRE

La dosis efectiva a la población de origen terrestre natural, se obtiene como conjunción de la producida por la exposición externa debida a los radionúclidos presentes en la corteza terrestre y la procedente de la concentración de los emisores radiactivos naturales existentes en el interior del cuerpo humano, incorporados al organismo a través de los alimentos o el agua que ingerimos o inhalados a través del aire que respiramos

I.3.4.1.- EXPOSICIÓN EXTERNA

A partir de los datos experimentales presentados y los cálculos realizados, se acepta, desde el *Informe UNSCEAR-82*^[2], un valor de **0,7 Sv Gy⁻¹** para, en caso de personas adultas, convertir los valores de dosis absorbida en aire por radiación gamma a dosis efectiva.

Posteriormente se han llevado a cabo ciertas matizaciones y ajustes que consideran un poco más elevado este valor. En la **Tabla 1.28**, del *Informe UNSCEAR-93*^[3], se relacionan los valores correspondientes a la conversión de Gy a Sv para cada uno de los radionúclidos que contribuyen a la dosis de procedencia terrestre y para las diferentes edades del ser humano.

Tabla 1.28. Factores de conversión de kerma aire a dosis efectiva, para radiación gamma terrestre.

Radionúclidos	Factor de conversión (Sv por Gy)		
	Adultos	Adolescentes / Niños	Niños pequeños
K-40	0,74	0,81	0,95
Series Th-232	0,72	0,81	0,92
Series U-238	0,69	0,78	0,91
GLOBAL	0,72	0,80	0,93

Otro de los valores universalmente aceptados (*Informes UNSCEAR de 1.977*^[9], *1.982*^[2], *1.988*^[1] y *1.993*^[3]) es el de **0,8** como **factor de ocupación indoor**. Aceptar esta cifra significa asumir que, en media, la población humana solamente pasa el 20 % de su tiempo en el exterior de las edificaciones. Es difícil llegar a considerar este valor de forma totalmente generalizada dado que eso llevaría a pensar que el nivel de permanencia en el interior de los edificios sería el mismo para los habitantes de una

ciudad ubicada en una zona industrializada con clima extremado que para la población rural que habita regiones del Planeta de climas cálidos y suaves. No obstante, y en aras de la simplicidad y la estandarización, sigue aceptándose como válido ese valor de 0,8 como factor de ocupación *indoor*, como media para la población mundial.

A partir de los anteriores factores (de conversión dosis absorbida-dosis efectiva: $0,7 \text{ Sv Gy}^{-1}$; de ocupación *indoor*: 0,8), y aceptando el valor medio de 57 nGy h^{-1} como tasa de dosis absorbida en aire *outdoor* para exposición de la población a la radiación gamma terrestre, y de 80 nGy h^{-1} la correspondiente *indoor*, se puede afirmar que la media aritmética anual de la dosis efectiva para todo el mundo, ponderada a la población, es $0,46 \text{ mSv}^{[3]}$, que resulta algo más alta que la aceptada para la otra componente de la radiación de origen natural, la radiación cósmica, que se cifra en $0,38 \text{ mSv año}^{-1}$.

Para la población joven (niños/adolescentes) e infantil (bebés/niños pequeños) el valor considerado debe ser algo más elevado, estimándose como aceptable un incremento en las tasas de dosis efectivas anuales de un 10% y un 30%, respectivamente. En la siguiente **Tabla 1.29** se presentan los resultados de los estudios llevados a cabo en algunos países el mundo^[3].

Tabla 1.29.- Dosis efectivas anuales medias en diferentes países del mundo, procedente de radiación gamma terrestre.

PAÍS	DOSIS EFECTIVA (mSv año ⁻¹)
Alemania	0,41
Bulgaria	0,45
Canadá	0,23
China	0,55
Dinamarca	0,36
España	0,40
Estados Unidos	0,28
Finlandia	0,49
Japón	0,32
Noruega	0,48
Reino Unido	0,35
Rusia	0,32
Suecia	0,65
MEDIA MUNDIAL PONDERADA	0,45

Se observa un rango de valores que va desde 0,23 a 0,65 mSv, con una media para España de 0,40 mSv por año. El valor ponderado a la población de estas trece naciones es 0,45 mSv, que concuerda con lo apuntado anteriormente.

I.3.4.2.- EXPOSICIÓN INTERNA

En lo que respecta a la dosis que se origina por la incorporación de radionúclidos de larga vida media al cuerpo humano, se pueden asumir los valores anteriormente indicados aún después de re-estimar las dosis anuales con los nuevos factores de ponderación de la **ICRP**^[36].

Para las series del ^{238}U y el ^{232}Th , las dosis efectivas son $62\ \mu\text{Sv}$, comprometida por incorporación anual, y $130\ \mu\text{Sv}$, como media anual para el contenido total del cuerpo. Para el ^{40}K las mismas dosis son, respectivamente, $170\ \mu\text{Sv}$ y $180\ \mu\text{Sv}$. Con ello las dosis efectivas totales son de $230\ \mu\text{Sv}$, correspondiente a la incorporación de radionúclidos naturales al organismo, y $310\ \mu\text{Sv}$, para el contenido global de esos radionúclidos en todo el cuerpo.

Estos resultados son completamente consistentes y ratifican la validez del método de estimación por la incorporación de radionúclidos mediante la dieta alimenticia, el agua y el aire. La ventaja de este método sobre el que utiliza análisis de tejidos de cadáveres humanos, es que se encuentran más datos de la actividad específica de los diferentes isótopos naturales en los productos alimenticios que en los tejidos humanos, facilitando, además, la estimación de dosis para casos de ingestión de altas concentraciones en circunstancias extraordinarias.

También es verdad que se producen grandes incertidumbres, sobre todo cuando se tienen en cuenta factores de difícil determinación como es, por ejemplo, la fracción de absorción intestinal para cada uno de los radionúclidos, ya que va a depender de la naturaleza química de los elementos ingeridos y de condicionantes biológicos con distinto comportamiento en el caso de animales de laboratorio respecto al ser humano.

Como en anteriores apartados de este capítulo, es necesario resaltar, aunque sea someramente, las situaciones más significativas en cuanto a la presencia de casos en que los valores medidos exceden en varios órdenes de magnitud a los que se apuntan como normales. Así, en el área volcánica de Minas Gerais (Brasil) o en la zona arenosa de Kerala (India), se encuentran valores muy altos de actividad específica en alimentos como la leche, la carne, los cereales, las verduras, los tubérculos y la fruta. O en la zona granítica de Guandong (China), donde se reportan importantes concentraciones de radionúclidos naturales en alimentos como el arroz o los rábanos.

Especial mención merecen algunos casos muy característicos, correspondientes a comunidades expuestas a inusuales exposiciones de origen natural interno, tales como la presencia de elevadas concentraciones de ^{210}Po en el *mate*, planta usada para la preparación de una infusión ampliamente difundida en muchas zonas de Sudamérica, o las altas concentraciones de ^{210}Po y ^{210}Pb incorporadas en las dietas de los habitantes de ciertas regiones árticas y sub-árticas por el consumo de carne de reno y caribú, mamíferos que se alimentan de musgos y líquenes con altos contenidos de estos radionúclidos.

I.4.- OBJETIVOS

- I.4.1.-** Realizar la planificación para llevar a cabo determinaciones de radiación gamma ambiental en el aire y de concentración de diversos radionúclidos en los suelos de las Islas Canarias Occidentales, con la intencionalidad de establecer valores representativos de los niveles de radiación ambiental existente.
- I.4.2.-** Poner a punto el equipamiento científico para realizar las medidas de radiación gamma medioambiental en aire y suelos, con un grado de confianza equiparable al exigido en los congresos y reuniones científicas internacionales de máximo nivel sobre este tema y en las recomendaciones de los organismos internacionales.
- I.4.3.-** Obtener un conjunto representativo de valores de radiación gamma en aire en las Islas Canarias Occidentales, para elaborar mapas de estas Islas en los que puedan reflejarse las posibles diferencias entre unas zonas y otras, en función de sus niveles de radiación gamma medioambiental.
- I.4.4.-** Medir la concentración de radionúclidos naturales y artificiales en muestras de suelos, obtenidas en número suficiente y distribuidas de manera uniforme en las Islas Canarias Occidentales, con objeto de caracterizar el contenido de sustancias radiactivas en estos suelos y elaborar mapas de las Islas en los que se refleje la diferencia entre zonas en función de dichos contenidos.
- I.4.5.-** Analizar el grado de concordancia entre los valores medidos de radiación gamma ambiental en aire y los obtenidos a partir de las concentraciones de sustancias radiactivas en suelos, mediante la aplicación de expresiones matemáticas propuestas para ello en la bibliografía científica y determinar las que mejor se adapten a los datos adquiridos en el medio ambiente de las Islas Canarias Occidentales.
- I.4.6.-** Establecer, en los resultados obtenidos de concentración de radionúclidos en suelos, la influencia de factores que puedan afectar a dichos valores, tales como la densidad de las muestras medidas y la profundidad a la que se tome la muestra de suelo.
- I.4.7.-** Calcular, a partir de los valores medidos, la magnitud de las dosis a la población de las Islas Canarias Occidentales debidas a la radiación gamma medioambiental.

II. MATERIAL Y MÉTODO

II.1.- INSTRUMENTACIÓN Y MATERIALES UTILIZADOS

II.1.1.- INTRODUCCIÓN

En este apartado se relacionarán todos aquellos elementos de trabajo, utensilios e instrumentos, utilizados para la planificación de las medidas, la toma de muestras, la preparación y almacenado de las mismas, las medidas realizadas en el campo, las llevadas a cabo en el laboratorio, y la puesta a punto, controles de calidad y ejecución de los análisis y cálculos necesarios para la obtención de los resultados que se presentan como conclusión de este trabajo.

Además se procederá a describir, de forma exhaustiva, todos los materiales y aparatos que han sido usados para caracterizar la radiactividad natural gamma del medio ambiente de las Islas Canarias Occidentales, deteniéndonos en remarcar sus características más destacables.

II.1.2.- MATERIALES Y EQUIPAMIENTO UTILIZADOS

En la **Tabla 2.1**, se presenta la lista de todos los elementos, accesorios y equipos utilizados en todas y cada una de las distintas fases de este trabajo, con indicación de sus características más destacables y parte del trabajo en que fueron usados.

Tabla 2.1.- Materiales y equipamiento utilizados.

MATERIAL / / EQUIPO	TIPO / / MARCA / / MODELO	CARACTERÍSTICAS	USO
MAPAS	Servicio Geográfico del Ejército	<i>Escala 1:25.000</i> Nº Mapas por Isla: <i>Tenerife: 21; La Palma: 3; Gomera: 5; Hierro: 5</i>	A y S
LIBRETA DE CAMPO (1)	Elaboración personal	Tamaño: 22 x 16 cm ² (DIN-A4 / 2) Tapas rígidas plastificadas	A y S
LIBRETA DE CAMPO (2)	Elaboración personal	Tamaño: 22 x 16 cm ² (DIN-A4 / 2) Tapas rígidas plastificadas	A y S
HERRAMIENTA DE CAMPO	Pala (1) Azadón Pala (2) Azada Picareta Cepillo (1) Cepillo (2)	Mango largo y pala ligera Mediano y ligero Pequeña de mano Pequeña de mano Mango corto y con herramienta doble De púas metálicas De cerdas	S S S S S S S
OTROS UTENSILIOS PARA TRABAJOS DE CAMPO	Bolsas plásticas Rotulador Lápiz y goma Cinta métrica	Blancas de dos asas Indeleble; grueso Enrollable; metálica; de 3 m	S S A y S A y S
BARÓMETRO - ALTÍMETRO	Marca: THOMMEN Modelo: TX-11	Precisión: 1/10 m ; 1/1 mmHg Hasta 5.000 m	A y S
TERMÓMETRO - HIGRÓMETRO	Marca:HANNA Instruments Modelo: HI 8564	Portátil Digital	A y S
EQUIPO DETECTOR GEIGER-MÜLLER (1) (SONDA: G-M) (1)	Marca: Mini-Instruments Modelo: Type 6-80 Nº Serie: 001963 Sonda: MC-71 Nº Serie: 891	Portátil Analogico (tasa de dosis) Digital (valor integrado) Sonda compensada en energía	A
EQUIPO DETECTOR GEIGER-MÜLLER (2) (SONDA: G-M) (2)	Marca: Mini-Instruments Modelo: Type 6-80 Nº Serie: 002232 Sonda: MC-71 Nº Serie: 1170	Portátil Analogico (tasa de dosis) Digital (valor integrado) Sonda compensada en energía	A
CÁMARA DE IONIZACIÓN DE ALTA PRESIÓN	Marca: Reuter-Stokes Modelo: RSS-112-100mR Nº Serie: K-1117	Cámara ionización esférica de alta presión (HPIC) Con cartuchos de memoria	A

ESTUFA (1)	Marca: Selecta Modelo: 374 Nº Serie: 55468	Potencia: 5.000 W Capacidad: 100 x 60 x 100 cm ³	S
ESTUFA (2)	Marca: Carbolite Modelo: NRI-200 Nº serie: 23719	Temperatura: de 0°C a 300°C Programable: 0 a 7 días Capacidad: 80 x 60 x 60 cm ³	S
MOLINO DE RODILLOS	De 2 rodillos cilíndricos	Rodillos de 25 cm de diámetro Ajuste de tamaño de grano manual	S
TAMIZ MANUAL	Semiesférico	Tamaño de la malla \cong 2 mm	S
TAMIZADORA AUTOMÁTICA	Marca: Fritsch Nº Serie 03.502/1094	Mallas de: W = 2 mm; W = 1,25 mm W = 0,63 mm; W = 0,18 mm	S
MATERIAL DIVERSO PARA PREPARACIÓN Y ALMACENAJE DE MUESTRAS	Batea plástica rígida	Dimens. Interior \cong 30 x 30 x 10 cm ³	S
	Bandejas de Aluminio para horno doméstico	Dimens. Interior \cong 15 x 25 x 4 cm ³ / \cong 18 x 28 x 4,5cm ³ / \cong 23 x 28 x 5,5cm ³	S
	Brocha		S
	Pliegos papel filtro	Dimensiones \cong 42 x 52 cm ²	S
	Frascos de vidrio Pegamento	Cerrado hermético: 1,5 l y 2 l Para sellado de Marinelli's	S
BALANZA	Marca: AND Modelo: EW - 3000 A Nº Serie: B-6422451	Electrónica digital Capacidad máxima: 3.000 g Precisión: 1 g	S
RECIPIENTES PARA MEDIDA GERMANIO	Frasco de 115 ml Marinelli de 1 litro	Plásticos; cilíndricos; con tapa roscada Modelo 130 G (3")	S
DETECTOR DE GERMANIO DE ALTA PUREZA INTRÍNSECO	Marca: Canberra Modelo: GR2520 Nº Serie: b93529 Mod.Criostato:7500SL	De Germanio Ultrapuro (GeHP) Detector Coaxial Reverse Eficiencia relativa: 20% Resol.(FWHM):2 keV a 1,33 MeV	S
RACK DE EQUIPOS ELECTRÓNICOS ASOCIADOS	Fuente alimentación (PS) Fuente alta tensión (HV) Amplificad. Espectroscópico Convert. Analóg.-dig.(ADC)	Marca: Canberra / Modelo: 2000 Marca: Canberra / Modelo: 3106 D Marca: Canberra / Modelo: 2020 Marca: Canberra / Modelo: 8075	S
ANALIZADOR MULTICANAL	Marca: Canberra Modelo: S-35 Plus Nº serie: 04927585	Sistema integrado	S
ORDENADOR PERSONAL	Marca: Samsung Modelo: S-800 Nº serie: SG801071	Microprocesador 80386 Disco duro con memoria 120 MB Monitor color Samsung SVGA	A y S
IMPRESORA	Marca: Epson Modelo: MX-80F/T Nº serie: 526524	Matricial 80 columnas	A y S
PROGRAMAS INFORMÁTICOS	Reuter Sokes: HPIC.exe & HPIC.wk1	Almacenaje datos y cálculos (HPIC)	A
	Canberra: Spectran-AT	Análisis de espectros (GeHP)	S

USO:

A: Medidas de radiación gamma en aire.

S: Medidas de concentración de radionúclidos en suelos.

II.1.2.1.- MAPAS

Los mapas utilizados en el estudio han sido los editados por el *Servicio Geográfico del Ejército*, dentro de la colección *Cartografía Militar de España*.

A continuación, en la **Tabla 2.2**, se indica: el número de mapas por isla, la escala en la que están dibujados y el año de publicación de la edición que se ha utilizado:

Tabla 2.2.- Características de los mapas utilizados en los trabajos de campo.

ISLA	Nº MAPAS	ESCALA	AÑO EDICIÓN
TENERIFE	21	1 : 25.000	1987
LA PALMA	3	1 : 50.000	1980
LA GOMERA	5	1 : 25.000	1989
EL HIERRO	5	1 : 25.000	1989

La calidad de los mapas permitió su uso, no sólo en la identificación de los puntos de medida de radiactividad gamma en aire y de toma de muestras de suelo sino, también, como ayuda imprescindible para encontrar el camino y mejor acceso a todos los lugares geográficos seleccionados y que, previamente, fueron fijados en el laboratorio de acuerdo con la distribución preestablecida. Además se utilizaron para determinar la altitud de los puntos de muestreo, a partir de sus curvas de nivel que en los mapas de escala 1:25.000 equidistan 10 m y en los de escala 1:50.000 equidistan 20 m.

II.1.2.2.- LIBRETAS DE CAMPO

Con el objetivo de tener un medio cómodo, útil y perdurable, donde anotar todos aquellos datos que luego pudieran ser necesarios para acotar las condiciones de las medidas y de la toma de muestras, tanto las inherentes a ellas como las de tipo ambiental, se diseñó una hoja de toma de datos que, convenientemente fotocopiada, reducida y encuadernada, se le dio forma para poder utilizarla como *libreta de campo*.

Inicialmente se diseñó una hoja que fue la base de la que denominamos *Libreta de Campo (1)*. En ella, como se ve en la **Figura II.1**, se podía tomar nota de datos de identificación general (investigador, fecha, hora), geográficos (isla, lugar -números de mapa y de cuadro, puntos de referencia- y altitud), climatológicos (temperatura, presión y humedad), ambientales (tanto en lo que se refiere al terreno como al medio), etc., tratando de componer el más amplio abanico posible que delimitara las condiciones de las medidas y la toma de muestras, por si en algún momento pudiera detectarse alguna variable que fuera determinante, de algún modo, en los resultados obtenidos.

La medida de radiactividad gamma ambiental, correspondía a la efectuada con el equipo de Mini-Instruments (modelo 6-80) dotado de una sonda tipo Geiger-Müller (compensada en energía, modelo MC-71), tanto del valor integrado de cuentas obtenidas durante 600 segundos, como de la tasa de dosis media, en $\mu\text{Gy h}^{-1}$, debida a la radiactividad gamma en aire.

En la *Libreta de Campo (2)*, que se diseñó posteriormente, se dejaba espacio también para tomar nota de los valores obtenidos con la Cámara de Ionización de Alta Presión (HPIC), modelo RSS-112, de Reuter Stockes, de la que se dispuso después de haber iniciado el trabajo. Los nuevos datos anotados se refieren a la fecha y hora de la medida y a los valores medio, máximo, mínimo y desviación estándar, de la tasa de dosis absorbida en aire obtenida. La **Figura II.2**, representa la hoja que configuró esta segunda libreta de campo.

Figura II.1.- Hoja de la Libreta de Campo (1)

<u>RADIATIVIDAD AMBIENTAL EN CANARIAS</u>			
<u>LIBRETA DE CAMPO</u>		<u>HOJA N° :</u>	
INVESTIGADOR:			
FECHA:		HORA:	
LUGAR:			
N° de Mapa:			
N° de Cuadro:			
Puntos de Referencia:			
ALTITUD:			
MEDIDA:			
Cuentas durante 600 s:			
Tasa de dosis media:		$\mu\text{Gy/h}$	
TEMPERATURA:	°C.	PRESIÓN:	mm Hg.
		HUMEDAD:	%.
COMENTARIOS:			
1.- Tipo de terreno.		Estado del terreno.	
Tierra:		Mojado:	
Arenoso:		Húmedo:	
Lava:		Seco:	
Pedregal:			
Rocoso:			
2.- Tipo de vegetación en la zona.		Vegetación sobre el cuadro-muestra.	
Cultivado:.....		Viva:	
.....		Muerta:	
Barbecho:			
Erial:			
Herbáceo:			
Matorral:			
Arbolado:			
Boscoso:			
3.- Condiciones ambientales.			
- En altura.		- A nivel.	
Soleado:		Despejado:	
Nuboso:		Calima:	
Cubierto:		Niebla:	
Lluvia:		Viento:	
		- Ambiente.	
		Calor:	
		Templado:	
		Fresco:	
		Frío:	
OBSERVACIONES:			

Figura II.2.- Hoja de la Libreta de Campo (2)

<u>RADIATIVIDAD AMBIENTAL EN CANARIAS</u>			
<u>LIBRETA DE CAMPO</u>		<u>HOJA N°</u>	
INVESTIGADOR:			
FECHA:		HORA:	
LUGAR:		ISLA:	
N° de Mapa:		N° de Cuadro:	
Puntos de Referencia:			
MEDIDA CON G-M, MC-71:			
Cuentas en 600 s:		Tasa de dosis media:	µGy/h.
DATOS DE CÁMARA, RSS-112:			
START DATE:		END TIME:	
AVE:	MAX:	MIN:	SD:
ALTITUD:	m.	PRESIÓN:	mm Hg.
TEMPERATURA:	°C.	HUMEDAD:	%.
OTROS DATOS:			
1.- Tipo de terreno.		Estado del terreno.	
Tierra:		Mojado:	
Arenoso:		Húmedo:	
Lava:		Seco:	
Pedregal:			
Rocoso:			
2.- Tipo de vegetación.		Vegetación en cuadro-muestra.	
Barbecho:		Viva:	
Erial:		Muerta:	
Herbáceo:			
Matorral:			
Arbolado:			
Boscoso:			
Cultivado:.....			
3.- Condiciones ambientales.			
- En altura.	- A nivel.	- Ambiente.	
Soleado:	Despejado:	Calor:	
Nuboso:	Calima:	Templado:	
Cubierto:	Niebla:	Fresco:	
Lluvia:	Viento:	Frío:	
OBSERVACIONES:			

II.1.2.3.- HERRAMIENTA DE CAMPO

Para proceder a la recogida de muestras de suelo se utilizaron una serie de herramientas que se consideró eran las más adecuadas para realizar la excavación en el terreno.

Se emplearon: dos tipos de palas, una de mango de madera largo y pala pequeña y puntiaguda y la otra de mano, totalmente metálica; un azadón para los terrenos más duros y secos; una azada de pequeñas dimensiones y mango corto; una picareta con mango de madera de unos 30 cm de longitud y herramienta terminal doble robusta, por un lado en punta y por el otro con final plano, utilizadas ambas en los casos en que el terreno llegaba a ser pedregoso o muy duro y de difícil excavación; y dos cepillos para limpiar la herramienta y eliminar los restos de tierra que pudiera quedar después de cada utilización, uno con mango de madera y púas de acero y el otro de cerdas blandas, como los que utilizan para pintar paredes.

II.1.2.4.- OTROS UTENSILIOS PARA TRABAJOS DE CAMPO

Para el transporte de las muestras de suelo se usaron bolsas de plástico blancas, ligeras y resistentes, de capacidad suficiente como para poder cargar unos 5 kg de los materiales constitutivos del suelo. Normalmente, por motivos de seguridad, previendo cualquier rotura accidental por el roce con ramas o rocas, se utilizaron dos bolsas, una dentro de otra, para la recogida de cada una de las muestras de terreno.

Un elemento de uso habitual en estos trabajos de campo, tanto para la recogida de muestras de suelos como para la medida de radiactividad gamma ambiental, fue una cinta métrica (metálica, enrollable, de tres metros) que se utilizó para delimitar en el terreno el cuadro que luego sería excavado y medir la profundidad de cavado, así como para fijar la altura a la que debía situarse, 1 metro sobre la superficie del suelo, el detector Geiger-Müller, MC-71, o la cámara de ionización de alta presión, RSS-112.

La identificación de cada una de las bolsas contenedoras de la muestra se aseguró escribiendo con un rotulador grueso, de tinta indeleble, el número del mapa y del cuadro a los que se asocia inequívocamente cada uno de los puntos de muestreo fijados en el planteamiento inicial del estudio (por ejemplo: *C-6*; *M-4*; que correspondería al Cuadro 6 del Mapa 4).

II.1.2.5.- BARÓMETRO-ALTÍMETRO

Un dato que siempre se consideró importante fue la altitud del punto de medida, ya que, al tener las islas Canarias occidentales un perfil muy montañoso, llega a ser un

detalle determinante para fijar la componente de radiación cósmica presente y, por tanto, el valor neto de radiación gamma debida a la componente terrestre, es decir, a la presencia de los diferentes radionúclidos emisores gamma en la parte del terreno donde se realizaba la medida.

Para fijar el dato de la altitud se utilizó un barómetro-altímetro de bolsillo, analógico, de la marca Thommen, modelo TX-11, que tiene una precisión de 10 metros en altitud y 1 mm de Hg en presión atmosférica por división, con un rango de medida hasta los 5.000 m (nótese que la máxima altitud en el archipiélago canario es de 3.714 m en el Pico del Teide).

Este aparato servía para confirmar el valor que se extraía de los mapas usados del Servicio Geográfico del Ejército en los que, identificando el punto de medida, a partir de las curvas de nivel representadas, se conseguía conocer, con bastante precisión (en algunos casos hasta de 1 metro), la cota correspondiente a cada localización concreta. También se tomó nota del valor de la presión atmosférica leída en el barómetro en cada punto.

II.1.2.6.- TERMÓMETRO-HIGRÓMETRO

La temperatura y la humedad ambiente se medían utilizando un instrumento, con el que se obtenían la temperatura, en grados centígrados y Fahrenheit, y la humedad relativa. Se basa en una sonda compuesta por un termistor (transistor colocado en un microcontenedor) y una capacitancia (con polímero higroscópico) de película delgada. Estos sensores están diseñados para conseguir una respuesta suficientemente rápida.

Este higrómetro digital, de la marca Hanna Instruments, modelo HI 8564 y número de fabricación 928191, con teclado de membrana y pantalla de cristal líquido (1/2" LCD), es de fácil manejo y totalmente portátil (pesa 525 gramos incluyendo el estuche), y dispone de una gran autonomía al ser alimentado con una pila de 9 voltios y tener bajo consumo (en las especificaciones técnicas se fija en 100 horas el tiempo mínimo en uso continuo).

Su rango de medida va desde el 10 % al 95 % en valores de humedad relativa, y en temperaturas de 0° C a 60° C (ó de 32° F a 140° F). Su resolución es, respectivamente, de 0,1 % RH; 0,1° C y 1° F y su precisión de 2 % RH; 0,4° C y 1° F. El tiempo de respuesta, hasta alcanzar el 95 % de precisión, se cifra en 6 segundos para obtener el valor de humedad y en 15 segundos para la temperatura.

Los sensores de la sonda y el preamplificador están protegidos dentro de un cilindro ranurado que se encuentra al final de un tubo que sirve para sostener la sonda durante la medida. Este tubo se encuentra unido al instrumento de lectura mediante un cable en espiral que puede alargarse hasta 1 metro.

II.1.2.7.- EQUIPO DETECTOR GEIGER-MÜLLER

En la medida de los niveles de radiactividad gamma en aire, se utilizó un aparato detector dotado de una sonda Geiger-Müller compensada en energía, de uso bastante frecuente en muy distintas investigaciones: desde aquéllas en las que se compara su exactitud y fiabilidad frente a otros equipos o métodos de medida mucho más sofisticados, complejos y costosos^{162|163|}, hasta otras en las que se usa como equipo de referencia para realizar exhaustivas revisiones de los niveles de tasas de dosis, debidos a radiación gamma en aire, en diferentes países del mundo como el Reino Unido^{164|}, Portugal^{165|} o España^{166|167|168|}.

Este equipo es el monitor medioambiental de la marca Mini-Instruments, tipo 6-80, dotado de una sonda Geiger-Müller, modelo MC-71, compensada en energía.

A lo largo de todo el proceso de realización de este trabajo se utilizaron dos aparatos de este tipo. El primero de ellos, con número de serie 001963, disponía de la sonda G-M, tipo MC-71, con número de serie 891. El segundo corresponde al número de serie 002232, con sonda MC-71 de número de serie 1170. Estos equipos, muy manejables y de fácil montaje para la toma de medidas en el campo, se alojan, desmontados y protegidos contra posibles golpes accidentales, en una maleta rígida de dimensiones 46 x 37 x 15 cm.

El sistema está constituido por: **1)** un trípode de aluminio de bajo peso, en el que, para la medida, se engancha en posición vertical el detector MC-71, cilindro muy ligero de unos 4 cm de diámetro y 30 cm de longitud; **2)** un cable coaxial para la interconexión de la sonda; y **3)** el equipo medidor asociado que presenta, de forma digital e integrada, el número de cuentas en diferentes periodos de tiempo y, en un indicador de aguja, el nivel de tasa de dosis gamma ambiental instantáneo. Este dispositivo, que también es de pequeño tamaño (paralelepípedo de 24 x 12 x 10 cm), se cuelga del trípode que sostiene el detector durante la medida.

El peso total del conjunto, compuesto por la maleta con todo el equipo incorporado, es de unos 4 kg, lo que posibilita que el aparato no presente grandes dificultades para su transporte, aún en terrenos muy accidentados.

Otro dato a valorar positivamente a la hora de utilizar este equipo detector para las medidas de radiación gamma ambiental, es el relativamente corto periodo de tiempo que se precisa para completar una medida. Se puede estimar que, como valor promedio, el necesario para la preparación del equipo y la realización de una medida (para un tiempo de muestreo típico de 600 segundos) es de unos 15 minutos.

La fiabilidad del detector MC-71 se comprobó por comparación de los resultados obtenidos con este equipo y los dados por una cámara de ionización de alta presión tipo RSS-112, de la marca Reuter Stokes^{169|}.

II.1.2.8.- CÁMARA DE IONIZACIÓN DE ALTA PRESIÓN

La Cámara de Ionización de Alta Presión (HPIC: *High Pressure Ionization Chamber*) utilizada es de la marca Reuter-Stokes, modelo RSS-112-100mR, con número de serie K-1117.

Presenta geometría esférica y se encuentra ubicada en el interior de un cubo metálico de unos 30 cm de lado.

El equipo asociado está dotado de microprocesador, manejando y presentando la información de forma digital en una pantalla de cristal líquido. Incorpora unos cartuchos de memoria capaces de almacenar datos correspondientes a las diferentes medidas realizadas durante un periodo de tiempo prolongado o en distintos puntos de muestreo.

La medida se realiza durante un intervalo de tiempo determinado (en nuestro estudio se fijó en 20 minutos), periodo durante el cual se produce una toma continua de datos (cada 5 segundos) que son almacenados en el sistema de memoria. Además, si se requiere en el momento de finalizar la medida, calcula y presenta, de forma instantánea, los valores medio, máximo, mínimo y desviación estándar de la tasa de dosis gamma ambiental existente.

Esta Cámara de Ionización de Alta Presión, que se encuentra indicada en diversos trabajos como un equipo de referencia, por su gran fiabilidad y exactitud, para la medida de niveles de radiación gamma ambiental^{[62][70][71]}, presenta como principal inconveniente que su transporte manual por el campo es bastante dificultoso.

Además de las características físicas del cubo metálico que contiene la Cámara de Ionización esférica (unos 30 cm de lado y 12 kg de peso), el instrumento de medida asociado es también voluminoso (dimensiones: 42 x 28 x 12 cm) y pesado (9 kg). Completan el sistema un trípode metálico, robusto y resistente, y un grueso cable de conexión entre la cámara y el equipo de procesado.

Con todo, la dificultad en el transporte radica, no sólo en el tamaño y el peso del conjunto de elementos constitutivos del equipo, sino en la incomodidad para la carga por una sola persona de todos estos dispositivos, sobre todo cuando se va a realizar una medida en algún lugar no accesible con un vehículo.

La colocación del sistema en situación de medir también es más compleja, delicada y costosa. De promedio, para periodos de muestreo de 20 minutos, se necesitaron un total de 30 minutos, como mínimo, para completar todo el proceso de medida.

II.1.2.9.- ESTUFAS

Inicialmente se dispuso de una estufa de gran capacidad (600 litros) con dimensiones interiores: 100 x 60 x 100 cm³, ubicada en el Laboratorio de Edafología de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad de la Laguna.

En sus 5 estantes interiores se depositaban las bandejas de aluminio con la tierra a secar durante períodos de, aproximadamente, 24 horas a una temperatura de 110° C. En cada estante cabían 5 bandejas, cada una de las cuales conteniendo una muestra, por lo que en total se pudieron secar 25 muestras por día. Su puesta en marcha y desconexión se realizaba de forma manual.

Esta estufa de la marca Selecta, modelo 374 y n° de serie 55468, dispone de una potencia nominal de 5.000 W y mantiene la temperatura seleccionada mediante un termostato de tipo electromecánico que actúa conectando o desconectando, alternativamente, las resistencias calefactoras.

Posteriormente, cuando en el Laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental se adquirió una estufa, el proceso de secado pasó a realizarse en ella.

Se trata de una estufa programable, no sólo en lo respecta a su control de temperatura sino también a su funcionamiento automático de puesta en marcha y parada. Los márgenes de regulación en temperatura van desde 0° C a 300° C, siendo posible programar su temporizador para periodos de hasta 7 días en intervalos mínimos de 1 hora. Es una estufa de la marca Carbolite, modelo NRI-200 y número de serie 23719.

Su capacidad, sin embargo, es menor (unos 250 litros), por lo que para secar la misma cantidad de muestras son necesarios un mayor número de procesos de secado. Sus dimensiones exteriores son 80 x 60 x 60 cm³ y dispone de 2 bandejas interiores de posición variable.

II.1.2.10.- MOLINO DE RODILLOS

Para moler las muestras de suelo hasta diámetros de grano inferiores a los 2 mm, se utilizó un molino de 2 rodillos de tamaño medio (cilindros de 250 mm de diámetro) y una potencia de 20 CV.

La separación de los rodillos es ajustable manualmente, mediante un volante, desde unos 10 mm hasta distancias cercanas al milímetro.

La muestra molida va cayendo a un cajón que se encuentra en un receptáculo situado en la parte inferior del molino.

En el proceso de la molienda también se utilizó otro conjunto de pequeño material accesorio, tal como: cepillos de cerda metálica y de cerda suave para limpiar los rodillos y el molino después de moler cada muestra, a fin de evitar las posibles contaminaciones de unas muestras con otras; pliegos de papel de filtro, que se colocaban cubriendo interiormente el cajón de recogida de cada una de las muestras molidas; frascos de cristal de cierre hermético para depositar y almacenar las muestras de suelo ya procesadas; etiquetas adhesivas que se fijaban a los frascos de vidrio, una vez rotuladas, para la identificación de la muestra (siempre denominada por el número de cuadro y el número de mapa; por ejemplo: C4, M3); cajas de cartón para el transporte de los recipientes de vidrio; etc. Como protección personal contra la gran cantidad de polvo generada durante estos trabajos, se usaron vestimentas, mascarillas y gorros, de los que habitualmente se utilizan en aplicaciones quirúrgicas hospitalarias.

II.1.2.11.- TAMIZADORAS

Se emplearon dos tipos distintos de tamices para la selección del tamaño de las partículas de la muestra de suelo. Inicialmente se utilizó un cedazo de estructura y malla metálica, de forma semiesférica, de 17 cm de diámetro, y una luz de malla de aproximadamente 2 mm. Las muestras tamizadas por este procedimiento son las analizadas en el Laboratorium voor Kernfysica de la Universidad de Gante, en Bélgica, y que comprenden el primer bloque de muestras medidas.

Más adelante se utilizó una tamizadora automática, de la marca Fritsch, con número de serie 03.502/1094, de plataforma vibrante y mallas de 2, 1.25, 0.63 y 0.18 mm. Con este equipo se procesaron las muestras de suelo correspondientes a los estudios realizados posteriormente, en los que se seleccionó un tamaño de grano inferior a 2 mm.

II.1.2.12.- MATERIAL DIVERSO PARA PREPARACIÓN Y ALMACENAJE DE MUESTRAS

Como operación previa a los procesos de secado, molido y tamizado de las muestras, es preciso proceder a la retirada de todas las piedras, ramas, hojas, raíces y demás materiales orgánicos que normalmente acompañan a la porción de suelo recogida en el campo. La eliminación de todos estos elementos indeseables se llevó a

cabo manualmente en una batea poco profunda (10 cm), de plástico rígido, de forma cuadrada y dimensiones interiores: 30 x 30 cm².

Una vez realizada esta selección previa, y para proceder al secado de las muestras de suelo, se depositaron en bandejas desechables de aluminio, de las que se utilizan para hornos domésticos, que se introdujeron en las estufas en todos los estantes disponibles hasta conseguir completar toda su capacidad. Cuando se usó la primera estufa indicada en el *Apartado II.1.2.9*, se utilizaron bandejas de aluminio de 23 x 28 x 5,5 cm³. En la nueva estufa programable del Laboratorio de Física Médica, de mucha menor capacidad, cada porción de suelo diferente se distribuía en bandejas más pequeñas, que tenían unas dimensiones de 18 x 28 x 4,5 cm³ ó, en otros casos, de 15 x 25 x 4 cm³.

Después del triturado de cada una de las muestras en el molino, se utilizaron un cepillo de alambres y una brocha de cerdas para limpiar los rodillos de los restos de polvo depositado durante la molienda.

A medida que se iban moliendo las diferentes muestras, éstas caían en la gaveta inferior del molino de rodillos, encima de un pliego de papel de filtro (42 x 52 cm²) que se colocaba cubriendo todo el fondo del cajón, al objeto de evitar la contaminación de unas muestras con otras. Después del triturado de cada muestra este compartimento también se sacudía y se limpiaba con la misma brocha utilizada para los rodillos.

Las muestras molidas recogidas en los diferentes pliegos de papel de filtro se introdujeron en frascos de vidrio de cierre hermético, mediante bisagra de presión de alambres y junta de goma. Las capacidades de estos recipientes fueron inicialmente de 1,5 litros de capacidad, para acabar utilizando en la fase final del trabajo otros más grandes con 2 litros de cabida.

Para conseguir el sellado de los Marinelli's donde se depositaron, para su medida en el detector de Germanio, las muestras correspondientes a la fase final de este proyecto, se empleó un pegamento de secado lento, obtenido mediante la mezcla de sus dos componentes.

II.1.2.13.- BALANZA

Se usó una balanza electrónica de la marca AND, modelo EW-3000 A, y número de serie B-6422451. Esta balanza alcanza una capacidad máxima para pesadas de hasta 3.000 gramos, con posibilidad de decremento automático de la tara para la medida de pesos netos. Su precisión es de 1 gramo.

II.1.2.14.- RECIPIENTES PARA ANÁLISIS DE MUESTRAS DE SUELO EN DETECTOR DE GERMANIO

Las muestras de suelo correspondientes a la primera fase de la campaña, que se analizaron en el detector de Germanio con que cuenta el Laboratorium voor Kernfysica de la Universidad belga de Gante, se introdujeron para su medida en unos frascos de plástico, de geometría cilíndrica, con tapa de cierre a rosca del mismo diámetro que el frasco, y una capacidad de 115 ml.

Para las medidas realizadas en el Laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental de la Universidad de La Laguna se usaron recipientes tipo Marinelli, modelo 130 G, con tapa que cierra a presión, de 1 litro de capacidad y 7,6 cm (3") de diámetro en su cavidad interior.

II.1.2.15.- DETECTORES DE GERMANIO INTRÍNSECO

El análisis de los radionúclidos presentes en las muestras de suelo se realizó mediante espectrometría gamma en detectores de Germanio intrínseco ultrapuro (GeHP).

En una primera etapa las medidas fueron realizadas por el Laboratorium voor Kernfysica de la Universidad de Gante (Bélgica).

El espectrómetro gamma con que cuenta el Laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental de la Universidad de La Laguna, es un detector de Germanio intrínseco de alta pureza. Este detector GeHP es de la marca Canberra, modelo GR2520, y número de serie b93529. Se mantiene a la temperatura del nitrógeno líquido mediante un criostato, modelo 7500SL, de la misma marca. Este contenedor Deward está conectado a un depósito de nitrógeno líquido de 100 litros, modelo TP100, suministrado por la firma Air Liquide. La recarga del Deward se realiza manualmente, una vez a la semana (todos los viernes), desde el contenedor TP100.

El detector de Germanio es del tipo Coaxial Reverse, estando caracterizado por tener una eficiencia relativa del 20 % y una resolución (FWHM) de 2 keV en la línea de emisión de fotones gamma de 1,33 MeV correspondiente a la desintegración del ^{60}Co .

El cabezal detector se encuentra ubicado dentro de un blindaje de hierro antiguo (procedente del desguace de un barco hundido) de forma paralelepípedica de 55 x 55 cm² de base y 70 cm de altura (medidas exteriores). Este blindaje tiene un espesor de 15 cm y dispone de una puerta, para la introducción de las muestras, de 36,5 x 40 cm² de medidas exteriores y una abertura interior efectiva mucho menor, de 25 x 40 cm². Esta puerta cuenta con dos robustas bisagras siendo su cierre biselado por un lateral y

encastrado en escalón por el otro, a fin de procurar el cierre que asegure la protección ante emisiones ambientales externas. El conjunto tiene un peso aproximado de 1,5 toneladas. En su base inferior cuenta con un hueco cilíndrico de 13 cm de diámetro que permite la introducción del vástago que soporta el detector de Germanio.

II.1.2.16.- EQUIPOS ELECTRÓNICOS ASOCIADOS

El conjunto de equipos electrónicos asociados al sistema detector de Germanio, que conforman el espectrómetro gamma para el análisis de los radionúclidos presentes en las muestras de suelo, medidas en el Laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental de la Universidad de La Laguna, todos ellos de la marca Canberra y conectados a un *rack* específico para este uso, suministrado por el mismo fabricante, son:

- Fuente de alimentación de baja tensión (PS: *Power Supply*); modelo 2000: Suministra tensiones de ± 12 voltios y de ± 24 voltios.
- Fuente de alimentación de alta tensión regulable (H.V.PS: *High Voltage Power Supply*); modelo 3106 D: Se encuentra ajustada a una tensión de 4.500 voltios, de acuerdo con los requerimientos técnicos del detector de Germanio intrínseco que alimenta.
- Amplificador espectroscópico (*Spectroscopy Amplifier*); modelo 2020: Dispositivo electrónico utilizado para amplificar las señales detectadas antes de ser digitalizadas en el ADC, convertidor al que se encuentra conectada su salida.
- Convertidor analógico-digital (ADC: *Analog-digital Converter*); modelo 8075: La señal digital obtenida a la salida de este elemento se conecta a la entrada del analizador multicanal, en el que se obtienen los diferentes espectros gamma correspondientes a cada una de las muestras de suelo a medir.

II.1.2.17.- ANALIZADOR MULTICANAL

El analizador multicanal asociado al detector de Germanio intrínseco usado es del modelo S-35 Plus, también de la marca Canberra, con número de serie 04927585.

Se trata de un sistema integrado, en forma de monitor u osciloscopio, con todas las funciones y facilidades necesarias para la obtención del espectro de emisión gamma, así como con el resto de datos de interés para la completa realización de este tipo de estudios. La presentación se realiza de forma analógica, en una pantalla (tubo de rayos catódicos en fósforo verde) rectangular de 16 x 12 cm de lado.

Se encuentra conectado en modo paralelo (cable en cinta plana) al ordenador personal (PC) donde se realiza el tratamiento de los datos.

II.1.2.18.- ORDENADOR PERSONAL E IMPRESORA

El ordenador personal que se usó en el Laboratorio de Radiactividad Ambiental de La Laguna conectado al detector de Germanio, como un elemento más constitutivo de él, es de la marca Samsung, modelo S-800 y número de serie SG801071. Está dotado de un microprocesador 80386, dispone de un disco duro de 120 MB y de un monitor color SVGA, asimismo de la marca Samsung.

Este PC también se utilizó para el tratamiento de los datos obtenidos en las medidas realizadas para la determinación de la tasa de dosis de radiación gamma absorbida en aire, mediante la Cámara de Ionización de Alta Presión RSS-112 y almacenados en los cartuchos de memoria con que cuenta. La conexión entre ambos equipos se realiza mediante un cable especial tipo RS-232 suministrado por Reuter Stokes con la HPIC.

Las hojas de resultados de ambos tipos de análisis (suelos y aire) se editaron mediante una impresora de tipo matricial, de 80 columnas, de la marca Epson, modelo MX-80F/T, y número de serie 526524.

II.1.2.19.- PROGRAMAS INFORMÁTICOS

Los programas utilizados fueron los siguientes:

- Almacenamiento de datos y cálculos sobre medidas de tasa de dosis absorbida de radiación gamma ambiental, realizadas en aire mediante la HPIC RSS-112: “*HPIC.EXE & HPIC.WKI*”, suministrado por Reuter Stokes con la cámara de ionización, y el apoyo de un macro en *Lotus 123* para importar los datos desde los archivos en código ASCII a la hoja de datos.
- Análisis de espectros gamma de muestras de suelo, obtenidos en el GeHP (Laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental - Universidad La Laguna): *Spectran-AT*, suministrado por Canberra.

II.2.- MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS DE REALIZACIÓN DE MEDIDAS

II.2.1.- INTRODUCCIÓN

A continuación se describirán los procedimientos y métodos empleados durante la ejecución de este trabajo para la recogida de muestras y realización de medidas conducentes a la obtención de los niveles de radiación gamma ambiental que caracterizan el medio ambiente de las islas occidentales del archipiélago canario.

Por un lado, se trata de obtener los valores de la tasa de dosis absorbida y equivalente debida a la radiación gamma natural en aire y, por otro, determinar la concentración de los radionúclidos emisores gamma presentes en los suelos de estas islas.

II.2.2.- DOSIS EN AIRE DEBIDA A LA RADIACIÓN GAMMA NATURAL

II.2.2.1.- PROCEDIMIENTO GENERAL DE MEDIDA

El primer paso fue establecer en los mapas de cada una de las islas los lugares donde deberían realizarse las medidas y las recogidas de muestras de suelos. Estos lugares fueron los correspondientes a los centros geométricos de cada uno de los cuadros en que quedaron divididas las islas al trazar sobre sus mapas un cuadrículado uniformemente distribuido en forma de rejilla.

El segundo paso fue decidir la superficie de cada cuadrado de esta rejilla. En Tenerife, debido a la gran diversidad de sus suelos, a su variada estructura geológica y geográfica (es la isla más extensa y con una mayor heterogeneidad en su relieve) y, sobre todo, a su mayor densidad demográfica, se decidió realizar un estudio más exhaustivo que en el resto de las islas. Por ello se establecieron cuadrados de 5 x 5 km², mientras que en las demás islas fueron de 10 x 10 km². Con esta partición resultaron

finalmente 103 puntos de muestreo en la isla de Tenerife, 12 en La Palma, 10 en La Gomera y 6 en El Hierro.

Para realizar las medidas y recogida de muestras hubo que desplazarse con el equipo técnico necesario a cada uno de los puntos seleccionados. En algunos casos, y debido a la imposibilidad de llegar en coche, por no existir acceso para vehículos en las proximidades de la ubicación elegida, fue necesario caminar a lo largo de varios kilómetros a través de caminos y senderos, e incluso campo a través, por zonas con difícil comunicación (montes, barrancos, campos no cultivados, terrenos volcánicos, pedregales, etc.) hasta llegar al lugar seleccionado. En las raras ocasiones en que el acceso no resultó factible, se consideró como punto de muestreo el que estuviera lo más próximo posible al elegido y siempre dentro del cuadro seleccionado.

En todo caso siempre primó, sobre cualquier otro condicionante, el cumplimiento de los protocolos previamente establecidos para la medida de radiación gamma en aire por nuestro Laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental de Canarias^{[68][72]}. El procedimiento de trabajo está basado en las normas dadas por la *NRPB*^[64].

Este protocolo, utilizado para la medida de la tasa de dosis debida a la radiación gamma ambiental en aire, establece que el centro geométrico de la sonda detectora, ya sea del Geiger-Müller (G-M) cilíndrico del medidor MC-71 o de la cámara de ionización de alta presión (HPIC) del sistema RSS-112, deberá estar situado a 1 metro de la superficie del suelo, el primero en posición vertical y la segunda totalmente horizontal.

En ningún caso los equipos de medida deben ubicarse en zonas boscosas con denso arbolado, próximos a grandes acumulaciones de agua (embalses, estanques, etc.), o en áreas encharcadas. El lugar elegido para la colocación de los detectores G-M o HPIC, ha estado siempre situado, como mínimo, a:

- 30 m de edificios de 2 plantas.
- 50 m de construcciones de más de 2 alturas.
- 10 m de paredes de 1 m de alto.
- 15 m de paredes de 2 m.
- 10 m de carreteras o superficies pavimentadas o asfaltadas.
-

También debe procurarse que la medida se realice sobre suelos que sean relativamente llanos.

Una vez en el lugar previamente seleccionado, se montaron los detectores, G-M y/ó HPIC, sobre sus respectivos trípodes, y se conectaron a sus equipos de medida asociados, manteniendo el primero suspendido del propio trípode y el segundo colocándolo sobre el terreno a suficiente distancia de la cámara de ionización para evitar interferencias o apantallamientos. El tiempo de medida fue de 600 segundos para el Geiger MC-71 y de 20 minutos para la cámara RSS-112.

El detector Geiger-Müller compensado en energía, MC-71, acumula, en un display digital en modo *scaler*, las cuentas detectadas durante los 600 segundos de medida, indicando también simultáneamente, de forma analógica, la tasa de dosis absorbida en cada instante en $\mu\text{Gy h}^{-1}$ durante todo el tiempo que dura la medida. Ambos datos se fueron anotando en la hoja correspondiente de la Libreta de Campo. El protocolo seguido se indica en la **Figura II.3** siguiente:

Figura II.3.- Niveles de radiación gamma en Canarias: Protocolo para la realización de medidas con el Geiger-Müller MC-71.

NIVELES DE RADIACIÓN GAMMA EN CANARIAS

PROTOCOLO PARA LA REALIZACIÓN DE MEDIDAS CON EL G-M MC-71:

1.- Tome la medida en el centro del cuadro señalado en el mapa. Si no es posible, hágalo en otro punto cercano al centro dentro del cuadro. Si tampoco puede hacerlo, mida en un punto lo más cerca posible del cuadro pero siempre dentro de la cuadrícula correspondiente de $5 \times 5 \text{ km}^2$. En cualquier caso, marque el lugar de medida sobre el mapa, con lápiz.

2.- El lugar elegido para la colocación del detector Geiger-Müller ha de estar situado, como mínimo:

- A 30 m de edificios de 2 plantas y a 50 m de edificios más altos.
- A 10 m de paredes de 1 m de alto y a 15 m de paredes de 2 m.
- A 10 m de carreteras y otras superficies pavimentadas.

3.- No mida **nunca**:

- En áreas densamente boscosas.
- Cerca de estanques u otras reservas de agua.
- Cerca de zonas encharcadas.

4.- Mida sobre suelos relativamente llanos, evitando, siempre que sea posible, hondonadas y altozanos.

5.- Conecte la sonda detectora G-M al equipo de medida mediante el cable coaxial.

6.- Encaje el detector G-M, en posición vertical, en el enganche que se habrá atornillado a la parte superior del trípode, de forma que el centro del cilindro esté a 1 m del suelo.

**PROTOCOLO PARA LA REALIZACIÓN DE MEDIDAS CON EL G-M MC-71:
(CONTINUACIÓN)**

6.- Encienda el aparato colocando la perilla "time in sec" en la posición "600".

7.- Espere aproximadamente 2 minutos, antes de iniciar la medida, hasta que se estabilice la posición de la aguja indicadora del medidor (display analógico: *mGy/h in air*).

8.- Compruebe que en el display digital aparece "000000". Si no fuera así, pulsar simultáneamente los botones START y STOP.

9.- Apretar el pulsador START.

10.- Una vez transcurridos los 10 minutos (600 segundos) de medida (el "signo menos" del display se mantendrá fijo, sin parpadear), tomar nota del valor de cuentas medidas que aparece en el display.

11.- Apagar el equipo llevando la perilla "time in sec" a la posición OFF.

La medida con la Cámara de Ionización de Alta Presión RSS-112 se lleva a efecto mediante la recogida y almacenamiento de un conjunto de valores instantáneos de la tasa de dosis absorbida, a intervalos constantes de tiempo. Se programó el equipo para que realizara un muestreo cada 5 segundos. Al cabo de los 20 minutos que duró cada una de las medidas, además de almacenar los 240 datos en el Cartucho de Memoria, se obtuvieron en la pantalla del medidor asociado (con microprocesador incorporado) los valores medio, máximo, mínimo y desviación estándar (que se apuntaban en la Libreta de Campo) de los, aproximadamente, 240 valores instantáneos conseguidos en ese periodo de tiempo. Una vez en el Laboratorio, los datos contenidos en los Cartuchos de Memoria de la RSS-112 se transferían al ordenador personal descrito anteriormente, creando y almacenando archivos para cada una de las medidas.

Todos estos procesos seguían los protocolos escritos que sirvieron de guía en todo momento y que se detallan a continuación:

Figura II.4.- Niveles de radiación gamma en Canarias: Protocolo para la realización de medidas con la Cámara RSS-112.

NIVELES DE RADIACIÓN GAMMA EN CANARIAS

PROTOCOLO PARA LA REALIZACIÓN DE MEDIDAS CON LA CÁMARA RSS-112:

1.- Tome la medida en el centro del cuadro señalado en el mapa. Si no es posible, hágalo en otro punto cercano al centro dentro del cuadro. Si tampoco puede hacerlo, mida en un punto lo más cerca posible del cuadro pero siempre dentro de la cuadrícula correspondiente de 5x5 km². En cualquier caso, marque el lugar de medida sobre el mapa, con lápiz.

2.- El lugar elegido para la colocación de la cámara de ionización ha de estar situado, como mínimo:

- A 30 m de edificios de 2 plantas y a 50 m de edificios más altos.
- A 10 m de paredes de 1 m de alto y a 15 m de paredes de 2 m.
- A 10 m de carreteras y otras superficies pavimentadas.

3.- No mida **nunca**:

- En áreas densamente boscosas.
- Cerca de estanques u otras reservas de agua.
- Cerca de zonas encharcadas.

4.- Mida sobre suelos relativamente llanos, evitando, siempre que sea posible, hondonadas y altozanos.

5.- Coloque la cámara sobre el trípode, en posición horizontal, de forma que el centro de la misma esté a 1 m del suelo.

6.- Encender el aparato colocando la perilla en la posición ZERO.

7.- Después de comprobar que la tasa de dosis es menor de 0,030 µGy/h, pasar la perilla a la posición READ.

8.- Esperar aproximadamente 1 minuto hasta que aparezca en el display el valor corriente de tasa de dosis estabilizada.

9.- Introducir el cartucho de memoria con la tapa de la pila hacia el teclado de la unidad.

**PROTOCOLO PARA LA REALIZACIÓN DE MEDIDAS CON LA CÁMARA RSS-112:
(CONTINUACIÓN)**

- 10.- Volver al menú principal, pulsando la tecla 1 (1ª de la izquierda), y seleccionar MEMORY CART.
- 11.- Pulsar en el MEMORY CARTRIDGE MENU la tecla de START ACQUIRE. Apuntar la hora de inicio.
- 12.- Presionar la tecla 1: CONT.
- 13.- Volver a MAIN MENU.
- 14.- Espere 20 minutos, desde Start Acquire, para completar la medida.
- 15.- Volver a MEMORY CARTRIDGE MENU.
- 16.- Pulsar la tecla STOP ACQUIRE.
- 17.- **Extraer el cartucho de memoria.**
- 18.- Volver a MAIN MENU.
- 19.- Presionar DATA.
- 20.- Pulsar STOP ACQUIRE.
- 21.- Seleccionar DATA STATS.
- 22.- Tomar nota de: START DATE, END TIME, AVE, MAX, MIN Y SD.
- 23.- Volver a MAIN MENU.
- 24.- Apagar el equipo.

Figura II.5.- Procedimiento para la transferencia de datos de los Cartuchos de Memoria de la Cámara RSS-112 al ordenador del Laboratorio.

NIVELES DE RADIACIÓN GAMMA EN CANARIAS

PROTOCOLO PARA RECUPERACIÓN DE DATOS DE LA CÁMARA RSS-112:

- 1.- Conectar el cable de comunicación RS-232 en la unidad y en el ordenador.
- 2.- Encender el equipo (posición READ).
- 3.- Introducir el cartucho de memoria en la RSS-112, con la tapa de la pila hacia el teclado de la unidad.
- 4.- Seleccionar MEMORY CART.
- 5.- Entrar en el ordenador en el programa HPIC.
- 6.- Colocar en el **Setup** los siguientes datos: Port **2**, Baud **1200**, Parity **N**, Data bits **8**.
- 7.- Entrar en **Input Data**, introduciendo el nombre del archivo que serán los dígitos correspondientes a la fecha de medida.
- 8.- Pulsar "**Enter**" en el ordenador.
- 9.- Inmediatamente después presionar PRINT DATA en la RSS-112.
- 10.- Una vez finalizada la transmisión de datos (código "4" en pantalla), salir con **Quit**: El archivo se almacenará en el disquete del programa.

Durante la realización de las medidas se tomaba nota de las características geográficas y físicas del lugar de muestreo, así como de las condiciones medioambientales del entorno y de la configuración del terreno, cumplimentando los epígrafes contenidos en la hoja correspondiente de la Libreta de Campo (**Figura II.1** y **Figura II.2**).

II.2.2.2.- DETERMINACIÓN DEL “FONDO” DE LOS EQUIPOS DE MEDIDA DE RADIACIÓN GAMMA EN AIRE

Para determinar los valores de radiación de fondo (*background*) propia de los equipos utilizados, se realizaron medidas de la tasa de dosis gamma en aire en el mar en dos ocasiones diferentes. El cálculo del fondo de los detectores, se obtuvo por diferencia del valor medido en ese lugar y el de la radiación cósmica existente en la zona geográfica en que nos encontramos, que se acepta igual a 32 nGy h^{-1} para regiones de la Tierra con latitud similar a la de las Islas Canarias, tal como se referencia en los *Informes UNSCEAR-88*^[1] y *UNSCEAR-93*^[3].

La primera determinación se llevó a cabo midiendo con el detector Geiger-Müller, MC-71, colocado en la borda de una lancha motora de fibra de vidrio que se alejó de la costa unos 2.000 metros, en un punto situado frente a la playa de Masca, en el Acantilado de Los Gigantes (suroeste de la isla de Tenerife). Se estimó que la profundidad existente en el punto de medida era de unos 150 metros^[72].

El número de cuentas acumuladas durante los 600 segundos que duró la medida fue de 489, anotando también una tasa de dosis absorbida aproximada (indicador analógico) de unos $0,04 \mu\text{Gy h}^{-1}$.

En una segunda ocasión, se realizó una nueva determinación, esta vez con los dos equipos detectores, en un punto de alta mar distante de la costa unos 2.700 metros (1,5 millas) frente al puerto deportivo de Radazul (sureste de la isla de Tenerife). El barco utilizado en este caso era más grande que el anterior (8,40 metros de eslora) estando construido en su totalidad con materiales sintéticos. La profundidad de la zona donde se efectuaron las medidas se pudo estimar en unos 700 metros.

Se realizaron dos medidas consecutivas con el detector MC-71, durante 600 segundos cada una, obteniéndose un valor medio de 490 cuentas y una tasa de dosis absorbida aproximada del orden de $0,04 \mu\text{Gy h}^{-1}$.

La tasa de dosis absorbida en aire obtenida con la Cámara de Ionización de Alta Presión RSS-112, durante los 20 minutos que duró la medida, resultó tener un valor medio de $0,035 \mu\text{Gy h}^{-1}$ (valor máximo: $0,045 \mu\text{Gy h}^{-1}$; mínimo: $0,028 \mu\text{Gy h}^{-1}$; desviación estándar: $0,003 \mu\text{Gy h}^{-1}$).

Una vez realizados los cálculos correspondientes, tal como se detalla más adelante (*Apartado III.2.2.* del Capítulo de “**Resultados y Discusión**”), se obtuvo como valor de fondo de cada uno de los equipos:

DETECTOR	FONDO (nGy h ⁻¹)
<i>MC - 71</i>	9,2
<i>RSS - 112</i>	3

II.2.2.3.- PRIMERA CAMPAÑA EN LA ISLA DE TENERIFE

El primer conjunto de medidas de la tasa de dosis en aire se realizó en los lugares de la isla de Tenerife seleccionados después de aplicar el procedimiento indicado. Los 103 espacios en que se ubicaban estos puntos tenían una superficie igual a 25 km², o menor si se trataba de zonas costeras, en cuyo caso, parte del cuadrado se ubicaba en el mar.

En la **Tabla 2.3** se presentan datos que identifican los 103 puntos de medida y de recogida de muestras de suelo en esta isla. Se reflejan en ella la denominación adoptada para cada uno de los cuadrados seleccionados, relacionada con la población o zona geográfica contenida, así como las coordenadas geográficas (longitudes referidas al meridiano de Greenwich) de cada uno de los puntos concretos de medida y muestreo, la altitud (referida al nivel medio sobre el nivel del mar en Santa Cruz de Tenerife) y la composición geológica del suelo correspondiente al lugar de medida^[73].

La Isla de Tenerife, la más grande del archipiélago con una extensión de 2.034 km², se ha formado por la acción de un volcanismo prolongado con multitud de formas diversas. Presenta un relieve abrupto y accidentado encontrándose en ella la mayor altitud de España (Teide: 3.718 m). Las erupciones volcánicas históricas en esta isla han sido predominantemente de carácter fisural y naturaleza basáltica, de la serie alcalina (basaltos alcalinos), a las que hay que añadir erupciones sálicas (traquitas y fonolitas) que han dado lugar a la formación de la parte central de la isla, denominada edificio central Teide-Pico Viejo^[74].

Las altitudes, que se refieren al nivel medio del mar en Santa Cruz de Tenerife, se obtuvieron empleando las curvas de nivel de los mapas utilizados. Para conseguir la caracterización geológica de cada uno de los puntos de la isla, se emplearon los Mapas Geológicos de Canarias^[73] correspondientes a Tenerife.

Además, en el **Anexo I-A**, se detallan las coordenadas de los vértices de todos los cuadros, en proyección UTM, elipsoide de Hayford (Cartografía Militar de España), identificando cada uno de los puntos de medida con un nombre, un número de mapa y un número de cuadro.

Tabla 2.3.- Nomenclatura de los cuadros y coordenadas geográficas, altitud y constitución geológica del suelo, en los puntos de medida de la isla de Tenerife.

Cuadro (1)	Denominación del cuadro	Altitud (m)	Longitud (O)	Latitud (N)	Constitución geológica del suelo
1	Chamorga	570	16°09'40"	28°34'13"	Piroclastos Serie I media / Aglomerados volcánicos Serie I superior (moderna)
2	Iguste de San Andrés	120	16°09'17"	28°32'14"	Piroclastos Serie I media
3	Almáciga	130	16°11'42"	28°34'02"	Coladas y piroclastos basálticos del Arco de Taganana Serie I inferior (antigua)
4	El Bailadero	380	16°12'00"	28°32'24"	Piroclastos Serie I media / Pitón sáfico (extrusivos)
5	San Andrés (Sta. Cruz Tfe.)	230	16°12'03"	28°30'30"	Piroclastos Serie I media
6	Roque de Taborno	500	16°15'40"	28°33'47"	Piroclastos Serie I media
7	Afur	570	16°15'03"	28°32'10"	Piroclastos Serie I media
8	Barrio Alegría (Sta. Cruz Tfe.)	100	16°15'01"	28°29'28"	Piroclastos Serie I media / Coladas basálticas Serie I media
9	Santa Cruz de Tenerife	88	16°15'53"	28°27'41"	Coladas basálticas Serie III
10	Punta del Hidalgo	50	16°18'29"	28°33'58"	Piroclastos Serie I media
11	El Moquinal - El Batán	828	16°18'15"	28°32'11"	Coladas basálticas Serie I superior (moderna)
12	El Bronco (La Laguna)	630	16°18'21"	28°29'26"	Coladas basálticas Serie I superior (moderna)
13	Taco	375	16°18'12"	28°26'56"	Coladas basálticas Serie III / Tobas pumíticas Serie III
14	Santa María del Mar	212	16°18'36"	28°24'56"	Coladas basálticas Serie III
15	Tejina	180	16°21'25"	28°32'03"	Coladas basálticas Serie III
16	El Portezuelo	540	16°21'15"	28°39'38"	Coladas basálticas Serie III
17	La Esperanza	773	16°21'10"	28°26'52"	Coladas basálticas Serie III
18	Barranco Hondo	330	16°21'04"	28°24'05"	Coladas basálticas Serie III
19	Candelaria	72	16°22'24"	28°21'23"	Coladas de traquibasaltos y fonolitas máficas / Tobas pumíticas Series II y III

20	Montaña Grande	85	16°22'03"	28°18'45"	Coladas basálticas Serie IV
21	Valle Guerra	110	16°23'43"	28°31'33"	Coladas basálticas Serie III
22	Tacoronte-Los Naranjeros	452	16°24'18"	28°29'30"	Coladas basálticas Serie III
23	Jara - Agua García	1004	16°24'12"	28°26'51"	Coladas basálticas Serie III
24	Las Lagunetas	1050	16°24'06"	28°23'59"	Coladas basálticas Serie II / Coladas basálticas Serie III
25	Cuevecitas de Candelaria	470	16°24'04"	28°21'27"	Coladas basálticas Serie III
26	Güimar	230	16°24'14"	28°18'41"	Depósitos de barranco Edades radiométricas / Toba pumítica Serie III / Colada basáltica Serie IV
27	La Medida (Güimar)	400	16°24'28"	28°16'11"	Tobas pumíticas Serie III
28	Fasnia	50	16°24'34"	28°13'52"	Coladas basálticas Serie III
29	El Sauzal	300	16°26'10"	28°28'20"	Coladas basálticas Serie III
30	La Matanza	530	16°27'09"	28°26'27"	Coladas basálticas Serie III
31	Monte de Santa Úrsula	1470	16°26'56"	28°23'37"	Coladas basálticas Serie II
32	Ayosa	1950	16°27'41"	28°21'29"	Coladas basálticas Serie II / Piroclastos basálticos Serie II
33	Bco.del Agua (Alto Güimar)	1010	16°27'10"	28°18'29"	Coladas basálticas Serie III
34	Camino Arrastradero	950	16°27'10"	28°15'47"	Coladas basálticas Serie III / Tobas pumíticas Serie III
35	La Sombrera - Fasnia	465	16°27'12"	28°13'15"	Tobas pumíticas Serie III
36	Arico El Viejo	160	16°26'55"	28°10'40"	Tobas pumíticas Series II y III
37	Abades	80	16°27'30"	28°08'03"	Tobas pumíticas traquíticas y/o fonolíticas Series II y III
38	Santa Úrsula	200	16°29'23"	28°25'55"	Coladas basálticas Serie III
39	Cuesta Villa (La Orotava)	315	16°30'29"	28°23'57"	Coladas basálticas Serie III
40	La Caldera (La Orotava)	1110	16°30'21"	28°21'26"	Coladas basálticas Serie III
41	Izaña	2150	16°30'13"	28°18'40"	Piroclastos basálticos finos Serie III
42	Bco. Palmero - Izaña	1960	16°30'13"	28°16'07"	Coladas basálticas Serie III
43	El Bueno (Arico Viejo)	1140	16°29'58"	28°13'07"	Coladas sálicas Serie II
44	Los Gavilanes (Lomo Arico)	540	16°29'58"	28°10'18"	Coladas sálicas Serie II / Fonolitas hauynicas Series II y III
45	El Río	232	16°30'16"	28°07'41"	Toba pumítica traquítica y/o fonolítica Series II y III
46	Loma del Camello	70	16°30'19"	28°05'22"	Toba pumítica traquítica y/o fonolítica Series II y III
47	La Vera (Puerto Cruz)	220	16°33'21"	28°23'31"	Coladas traquibasálticas de los conos históricos Serie IV

48	Tres Pinos - La Orotava	930	16°33'29"	28°21'10"	Coladas traquibasálticas del Portillo Serie IV
49	Montaña Alto - El Portillo	2145	16°33'25"	28°18'34"	Piroclastos de Montaña Guamasa y Montaña Roja Serie III
50	Cañada de Las Pilas	2075	16°33'37"	28°15'56"	Lavas de Montaña Blanca (traquitas) y Montaña Rajada Serie IV
51	Madre del Agua (Izaña)	1750	16°33'17"	28°13'06"	Eutaxitas y fonolitas superiores Serie II
52	Morro de las Arbejas-Izaña	1270	16°33'24"	28°10'47"	Eutaxitas y fonolitas superiores Serie II / Basaltos Serie III
53	Blanquitos (Granadilla)	540	16°33'02"	28°07'39"	Coladas fonolíticas hauynicas Serie II
54	San Isidro	245	16°33'07"	28°05'06"	Coladas basálticas Serie III
55	Aeropuerto S. - Las Tejitas	53	16°33'09"	28°02'51"	Tobas pumíticas Serie III
56	Mirador Gimena	130	16°36'26"	28°23'25"	Coladas basálticas y traquibasálticas con intercalaciones sálicas subordinadas Serie II
57	FuenteBrando (Icod el Alto)	850	16°37'06"	28°21'49"	Coladas traquibasálticas con intercalaciones de basaltos y fonolitas subordinadas Serie II
58	El Portillo - El Cabezón	2065	16°34'58"	28°18'21"	Lavas de Montaña Blanca (traquitas) y Montaña Rajada Serie IV
59	Montaña Blanca	2420	16°36'08"	28°15'40"	Lavas Montaña Blanca (traquitas) y Montaña Rajada Serie IV / Piroclastos Montaña Blanca Serie IV
60	Montaña Guajara	2215	16°36'26"	28°13'17"	Derrubios de ladera y pie de monte Serie IV
61	Madre Agua (Vilaflor)	1730	16°36'17"	28°10'19"	Coladas de basaltos y traquibasálticas Serie IV
62	Vilaflor - Cruz de Tea	880	16°36'15"	28°07'40"	Domos sálicos (extrusiones) / Coladas de traquibasaltos Serie II
63	Las Zocas - San Miguel	375	16°36'09"	28°05'01"	Tobas pumíticas Serie III / Coladas basálticas Serie III
64	Los Abrigos - El Guincho	85	16°36'15"	28°02'25"	Tobas pumíticas Serie III
65	Santa Catalina	150	16°39'36"	28°23'18"	Coladas traquítico-fonolíticas de Montaña Avejera Serie IV
66	La Guancha	705	16°39'11"	28°21'45"	Coladas traquítico-fonolíticas de Montaña Avejera Serie IV
67	Cruz Vieja - Boca Tauce	1550	16°39'40"	28°18'29"	Coladas de la erupción central del Teide Serie IV
68	Pico del Teide	3710	16°38'29"	28°16'16"	Coladas de la erupción central del Teide Serie IV
69	Llano de Ucanca	2050	16°39'26"	28°12'58"	Lavas "aa". Emisiones sálicas del estrato volcán del Pico Viejo Serie IV
70	Boca Tauce - Vilaflor	1880	16°39'15"	28°10'25"	Fonolitas Serie II
71	Vilaflor - La Escalona	1200	16°39'17"	28°07'41"	Coladas basálticas Serie III
72	Valle de San Lorenzo	370	16°39'02"	28°04'58"	Coladas basálticas Serie III
73	Las Galletas	83	16°39'23"	28°02'06"	Coladas basálticas Serie IV
74	Las Galletas - Ten Bel	12	16°39'08"	28°00'34"	Coladas basálticas Serie IV
75	San Marcos (Icod)	160	16°42'52"	28°22'41"	Coladas traquítico-fonolíticas de los Roques Blancos Serie IV
76	El Amparo (Icod)	490	16°42'27"	28°21'15"	Coladas de basaltos plagioclásicos Series III y IV
77	Hoya Negra - Boca Tauce	1570	16°42'26"	28°18'27"	Coladas traquíticas-fonolíticas Roques Blancos / Traquibasaltos estrato Volcán Pico Viejo Serie IV

78	Cruz de Tea - Boca Tauce	2080	16°42'32"	28°15'45"	Piroclastos basálticos y pirobasálticos Serie IV / Coladas traquibasálticas máficas Montaña Reventada Serie IV
79	Mña. Cedro - Ucanca	2020	16°42'08"	28°13'05"	Fonolitas Serie II
80	Montaña Teresme	1740	16°41'23"	28°10'53"	Basaltos Serie III / Piroclastos Serie III
81	Barranco El Infierno	400	16°43'08"	28°07'42"	Coladas de traquibasaltos Serie II
82	Los Cristianos	170	16°42'14"	28°04'24"	Coladas basálticas Serie III
83	Mesas de Guaza	148	16°41'59"	28°02'11"	Coladas traquíticas y/o fonolíticas Serie III
84	Rasca (Palm-Mar)	50	16°41'40"	28°00'42"	Coladas basálticas Serie III
85	San Juan del Reparó	700	16°45'30"	28°21'04"	Coladas de traquibasaltos y traquito-fonolíticas máficas (basaltos subordinados) Serie IV
86	Vuelta Grande - Boca Tauce	1380	16°45'39"	28°18'26"	Coladas traquíticas máficas Montaña Reventada Serie IV / Coladas traquibasálticas traquitas máficas Serie IV
87	Altos de Chío	1380	16°45'43"	28°15'48"	Coladas de basaltos y traquibasaltos Serie IV
88	Chirche	900	16°45'29"	28°12'53"	Traquibasaltos predominantes y basaltos Serie II
89	Vera de Erques	580	16°45'26"	28°10'13"	Coladas de traquibasaltos Serie II (moderna)
90	Armeñime	162	16°45'14"	28°07'27"	Aglomerado poligénico Serie II
91	La Caleta	65	16°44'13"	28°05'49"	Coladas de traquibasaltos Serie II
92	Los Silos	32	16°49'24"	28°22'51"	Coladas de la Montaña de Taco con recubrimientos pumíticos Serie III
93	Las Moradas (Los Silos)	170	16°48'47"	28°21'20"	Coladas basálticas y traquibasaltos subordinados Serie III / Derrubios de ladera Serie IV / Diques básicos
94	Santiago del Teide	1015	16°48'37"	28°18'21"	Coladas basálticas con intercalaciones de escorias Serie I
95	Tamaimo	670	16°48'49"	28°15'44"	Coladas de basaltos y traquibasálticas Serie IV
96	Era del Llano (Alcalá)	310	16°48'28"	28°12'50"	Coladas recientes Montaña Reventada y otros. Predominio basaltos plagioclásicos Serie IV
97	Playa de San Juan	135	16°47'52"	28°10'36"	Traquibasaltos predominantes y basaltos Serie II
98	Marazul - Playa S. Juan	75	16°47'15"	28°08'37"	Coladas de traquibasaltos Serie II / Coladas de traquibasaltos Serie II (moderna)
99	Buenavista del Norte	95	16°50'16"	28°22'32"	Colada Montaña de Taco con recubrimientos pumíticos Serie III / Coladas basálticas con traquibas. subord. Serie III
100	Cbre. Molina (Buenavista)	105	16°51'48"	28°21'35"	Derrubios ladera Periodo histórico Serie IV / Depósitos sedimentarios. Indiferenciados Periodo histórico Serie IV
101	Masca	720	16°50'54"	28°18'52"	Basaltos plagioclásicos. Basaltos piroxénicos y ankaramitas. Serie I (antigua)
102	Acantilado de Los Gigantes	130	16°50'05"	28°14'58"	Alternancias de basaltos olivínicos plagioclásicos y traquibasaltos Serie I (antigua)
103	Punta de Teno	120	16°54'13"	28°21'12"	Coladas basálticas Serie II

(¹) Ver en el **Anexo I** la situación de los cuadrados elegidos en Tenerife.

La primera campaña de medidas en la isla de Tenerife se llevó a cabo durante un total de 9 meses, en los que se obtuvieron los datos de radiación gamma en aire y se tomaron las muestras de suelo correspondientes que serían posteriormente analizadas, en cada uno de los 103 puntos que previamente habían sido señalados en los mapas.

Todas las medidas de esta fase del trabajo se realizaron con el detector Geiger-Müller, dotado con la sonda compensada en energía modelo MC-71.

II.2.2.4.- SEGUNDA CAMPAÑA EN LA ISLA DE TENERIFE

Se realizó una segunda campaña de medidas y toma de muestras en la isla con dos diferentes objetivos: 1) comprobar la constancia o no de las medidas tomadas en distintas épocas del año; y 2) realizar un estudio comparativo de los valores obtenidos con el detector Geiger-Müller modelo MC-71 y con la Cámara de Ionización de Alta Presión RSS-112.

Se distribuyeron las 103 medidas realizadas en la primera campaña en 5 subconjuntos de valores que variaron (una vez deducidas la radiación cósmica, corregida por la altitud, y el fondo del equipo) entre 18,42 nGy h⁻¹ (Mapa 4; Cuadro 12: “*El Bronco – La Laguna*”) a 162,75 nGy h⁻¹ (Mapa 12; Cuadro 77: “*Hoya Negra - Boca Tauce*”). Los 5 grupos (o tramos) de medidas están determinados por el hecho de incluir lugares cuyos valores de tasa de dosis se diferenciaban en 30 nGy h⁻¹. Dentro de cada uno de ellos se eligieron aleatoriamente, como lugares de medida en esta 2ª campaña, un conjunto de puntos en número proporcional al número de cuadrados correspondientes a cada tramo. De esta manera, resultaron un total de 17 lugares de medida, los cuales se relacionan en la **Tabla 2.4**.

Tabla 2.4.- Cuadros elegidos para la segunda campaña de medidas en la isla de Tenerife en razón de los valores obtenidos en la primera.

1º tramo: 18-48 nGy h⁻¹		5 / 41 cuadros		
	C 12	M 4	El Bronco (La Laguna)	18,42 nGy h ⁻¹
	C 18	M 6	Barranco Hondo	29,58 nGy h ⁻¹
	C 87	M 12	Altos de Chío	35,11 nGy h ⁻¹
	C 39	M 7	Cuesta de la Villa (La Orotava)	35,22 nGy h ⁻¹
	C 11	M2	El Moquinal – El Batán	37,80 nGy h ⁻¹
2º tramo: 48-78 nGy h⁻¹		4 / 25 cuadros		
	C 47	M 7	La Vera (Puerto de la Cruz)	49,69 nGy h ⁻¹
	C 9	M 4	Santa Cruz de Tenerife	49,93 nGy h ⁻¹
	C 19	M 6	Candelaria	54,14 nGy h ⁻¹
	C 16	M 5	El Portezuelo	56,38 nGy h ⁻¹
3º tramo: 78-108 nGy h⁻¹		4/ 22 cuadros		
	C 17	M 5	La Esperanza	79,97 nGy h ⁻¹
	C 49	M 11	Montaña del Alto - El Portillo	80,77 nGy h ⁻¹
	C 1	M 1	Chamorga	89,20 nGy h ⁻¹
	C 69	M 15	Llano de Ucanca	99,20 nGy h ⁻¹
4ºtramo: 108-138 nGy h⁻¹		2 / 9 cuadros		
	C 37	M 17	Abades	108,43 nGy h ⁻¹
	C 46	M 18	Loma del Camello (Granadilla)	112,39 nGy h ⁻¹
5ºtramo: 138-168 nGy h⁻¹		2 / 6 cuadros		
	C 65	M 7	Santa Catalina	144,20 nGy h ⁻¹
	C 59	M 11	Montaña Blanca	155,44 nGy h ⁻¹

Las medidas se realizaron con los dos detectores, el Geiger-Müller MC-71 y la Cámara de Alta Presión RSS-112.

II.2.2.5.- MEDIDAS EN LAS ISLAS OCCIDENTALES

Las campañas de medida de la radiación gamma medio-ambiental en el resto de las islas de la provincia de Santa Cruz de Tenerife, se llevaron a cabo a lo largo de ocho meses.

II.2.2.5.1.- Isla de La Palma

La primera isla recorrida fue La Palma, donde se realizaron un total de 13 medidas. Doce de ellas se efectuaron en el centro de cada uno de los 12 cuadrados de 10 km de lado en que quedó uniformemente dividida su geografía. Otra medida se hizo en el borde del cráter del volcán Teneguía, por el posible interés que podría tener una medida en el cono formado por la última erupción volcánica acaecida en Canarias (año 1.971).

Para fijar y localizar los lugares exactos de medida, se utilizaron los 3 mapas (Escala 1:50.000) del Servicio Geográfico del Ejército, en los que se representa esta isla (ver **Anexo II-A**). Para la medida de la tasa de dosis absorbida en aire, se utilizó la Cámara de Ionización de Alta Presión RSS-112. Las trece medidas de la tasa de dosis en aire y la recogida de las muestras de suelo en los lugares seleccionados, se realizaron a lo largo de una semana de trabajo de campo.

En la siguiente **Tabla** se identifica cada cuadro mediante un nombre que corresponde con la población o zona contenida, y cada punto concreto de medida (teórico centro geométrico de cada uno de los cuadrados) mediante su altitud (sobre el nivel medio del mar en Santa Cruz de Tenerife) y sus coordenadas geográficas (longitudes referidas al meridiano de Greenwich) .

Tabla 2.5.- Nomenclatura de los cuadros establecidos, y altitud y coordenadas geográficas de los puntos de medida en la isla de La Palma.

Cuadro (²)	Denominación del cuadro	Altitud (m)	Longitud (O)	Latitud (N)
1	Las Cabezadas (Barlovento)	480	17°47'50"	28°48'57"
2	El Corcho (Puntallana)	770	17°46'00"	28°44'28"
3	Miranda	340	17°47'05"	28°39'00"
4	San Juan de Belmaco	390	17°46'49"	28°34'47"
5	Franceses	880	17°51'54"	28°48'48"
6	Borde de la Caldera de Taburiente	2.351	17°51'16"	28°45'00"
7	Llanos del Paso	825	17°51'18"	28°39'15"
8	Los Campanarios	1.520	17°50'51"	28°35'05"
9	Volcán de San Antonio	650	17°50'41"	28°29'24"
10	Llano Negro (Garafía)	780	17°56'13"	28°48'38"
11	Llanos Lance (Tijarafe)	1.120	17°57'16"	28°44'39"
12	Las Angustias (Los Llanos)	300	17°55'55"	28°39'53"
(*)	Borde del Cráter del Volcán Teneguía	400	17°50'51"	28°28'26"

(²) Cuadrados representados en el mapa de La Palma en el **Anexo II**.

(*) No figuraba en la distribución geográfica inicial.

En el **Anexo II-A**, se presenta una tabla en la que se concreta la ubicación de cada cuadro en el mapa correspondiente (Cartografía Militar de España) así como las coordenadas en proyección UTM de cada uno de los cuadrados seleccionados en la isla de La Palma.

II.2.2.5.2.- Isla de La Gomera

También en la isla de La Gomera se delimitaron 10 sectores de 10 x 10 km² (**Tabla 2.6**) en los 5 mapas del Servicio Geográfico del Ejército (Escala 1:25.000) en que está cartografiada la isla. Se realizaron las medidas gamma en aire con los dos detectores disponibles, MC-71 y RSS-112, con lo que el muestreo también sirvió para el estudio comparativo del resultado de las medidas con ambos equipos.

Tabla 2.6.- Denominación de los cuadrados establecidos, y altitud y coordenadas de los puntos de medida y recogida de muestras en la isla de La Gomera.

Cuadro (³)	Denominación del cuadro	Altitud (m)	Longitud (O)	Latitud (N)
1	Casas del Moralito (Hermigua)	230	17°10'16"	28°09'55"
2	Las Casetas (San Sebastián)	480	17°09'09"	28°07'19"
3	Los Revolcaderos (San Sebastián)	405	17°08'26"	28°04'39"
4	Tamargada (Vallehermoso)	410	17°14'22"	28°10'52"
5	Monte del Cedro	1.080	17°15'05"	28°08'16"
6	Alajeró	750	17°14'01"	28°03'21"
7	Tazo	295	17°18'35"	28°10'53"
8	Arure	895	17°18'56"	28°07'38"
9	La Mejora (La Dama)	270	17°17'54"	28°03'42"
10	Laguna Grande	1.245	17°15'22"	28°07'28"

(³) Los cuadrados elegidos en la isla de La Gomera figuran en el **Anexo III**.

La ubicación concreta de cada cuadrado en los mapas utilizados, además de las coordenadas, en proyección UTM, de cada uno de ellos, se especifican en el **Anexo III-A** de esta memoria.

II.2.2.5.3.- Isla de El Hierro

Finalmente, en la isla de El Hierro se realizaron medidas y toma de muestras de suelo en el centro geográfico de las 6 regiones en que quedó dividida la isla mediante la rejilla de 10 km de lado establecida sobre los 5 mapas (escala 1:25.000) del Servicio Geográfico del Ejército que la representan.

En cada punto se midió dos veces consecutivas con el detector Geiger-Müller MC-71 (10 minutos cada una) y una vez, simultáneamente durante los 20 minutos que fija el protocolo, con la HPIC RSS-112, con lo que, además de asegurar la reproducibilidad y exactitud del resultado final, se han podido utilizar los valores obtenidos para el estudio comparativo de la fiabilidad de medida con ambos equipos.

En la **Tabla 2.7** siguiente, se detalla la ubicación concreta de cada punto de medida y recogida de muestras de suelo en esta isla, especificando sus coordenadas geográficas (longitudes referidas al meridiano de Greenwich) y su altitud. Asimismo, en el **Anexo IV-A** se especifican los mapas que fueron utilizados y se dan las coordenadas de los vértices de cada uno de los cuadrados.

Tabla 2.7.- Denominación de los cuadros establecidos y datos geográficos de los puntos de medida en la isla de El Hierro.

Cuadro (⁴)	Denominación del cuadro	Altitud (m)	Longitud (O)	Latitud (N)
1	Valverde	470	17°54'41''	27°48'37''
2	Las Montañetas (Guarazoca)	790	17°57'43''	27°47'53''
3	Gorona de Los Difuntos	1.050	17°58'00''	27°44'09''
4	Gorona del Lajial (La Restinga)	300	17°59'24''	27°39'49''
5	Montaña de la Virgen	735	17°07'03''	27°43'54''
6	Chorro Jable (Frontera)	1.450	17°02'33''	27°43'28''

(⁴) Los cuadrados de El Hierro se indican en el **Anexo IV**.

II.2.2.6.- MEDIDAS EN CONTINUO CON LA HPIC RSS-112 DURANTE LARGOS PERIODOS DE TIEMPO

Se trató de comprobar la posible evolución con el tiempo de los valores obtenidos de la tasa de dosis absorbida gamma en aire, durante largos periodos de tiempo, para una ubicación geográfica determinada (constancia de los datos en la medida). Asimismo se intentaba descubrir las posibles perturbaciones en la tasa de dosis a lo largo del día o de la noche, o sus variaciones debidas a los cambios climatológicos.

Para ello se instaló la Cámara de Ionización de Alta Presión, modelo RSS-112, en un terreno de la zona de Geneto (La Laguna) donde se aseguró que no se iban a producir perturbaciones externas ajenas a las normales variaciones climatológicas. Las medidas en modo continuo se realizaron durante 10 días seguidos (en concreto desde las 18:04 del 28.12.93 a las 16:00 del 07.01.94), con intervalos de muestreo de 5 segundos, siguiendo los protocolos de actuación habituales para las medidas con este aparato.

II.2.2.7.- DETERMINACIONES REALIZADAS EN LA CAMPAÑA DE MEDIDA DE CONCENTRACIONES DE CESIO EN SUELOS

Además de las muestras de suelos tomadas en las campañas anteriores, durante el año 1.994 se realizó una nueva campaña de determinación de las actividades específicas de radionúclidos emisores gamma en los suelos de la isla de Tenerife, con especial incidencia en la presencia de ^{134}Cs y ^{137}Cs y en la posible variación de su concentración con la profundidad.

Al mismo tiempo que se fueron recogiendo las diferentes muestras de suelo para su posterior tratamiento y análisis en el Laboratorio, también se realizaron medidas de las tasas de dosis absorbida en aire debidas a radiación gamma en los mismos puntos geográficos donde se tomaban las muestras.

En esta campaña, que se desarrolló en un periodo de dos meses y medio, se realizaron una serie de 20 nuevas medidas de radiactividad gamma en aire en la isla de Tenerife, con la HPIC RSS-112, en otros tantos lugares de los 103 establecidos inicialmente.

Estos 20 puntos de medida fueron 19 de los anteriormente medidos, en los que se habían detectado las concentraciones más elevadas de ^{134}Cs ($> 5 \text{ Bq kg}^{-1}$) y de ^{137}Cs ($> 30 \text{ Bq kg}^{-1}$) en las determinaciones llevadas a cabo previamente y otro (Cuadro 22; Mapa 5: "Tacoronte-Los Naranjeros") en el que se consideró interesante volver a realizar medidas de comprobación para verificar los niveles de radiación gamma en aire encontrados con anterioridad.

II.2.3.- CONCENTRACIÓN DE RADIONÚCLIDOS EMISORES GAMMA EN SUELOS

II.2.3.1.- PROCEDIMIENTO GENERAL DE MEDIDA

Para realizar las medidas de la actividad específica de los radionúclidos emisores gamma presentes en sus suelos, se siguió el procedimiento que se indica a continuación.

Los lugares donde debían recogerse las muestras de suelo para su posterior análisis, coincidían con los de medida de la tasa de dosis de radiación gamma en aire, es decir, 103 en la isla de Tenerife (**Tabla 2.3**), 12 en La Palma (**Tabla 2.5**), 10 en La Gomera (**Tabla 2.6**) y 6 en El Hierro (**Tabla 2.7**).

En el lugar de toma de muestras, se procedía a seleccionar y dibujar sobre el terreno un cuadrado de 25 x 25 cm², del que primeramente se eliminaban todas las piedras, hojas, ramas u otros materiales o restos orgánicos de su superficie. A continuación, con ayuda de las herramientas que se portaban (pico, pala, azadón, picareta, etc., según la composición o dureza del terreno) se excavaba el trozo de suelo marcado hasta una profundidad de aproximadamente 5 cm, como mínimo. Esto determinaba un volumen de muestra de entre 3 y 6 dm³ que se introducía en las bolsas de plástico (dos superpuestas para cada muestra, para evitar posibles pérdidas del material en caso de que se produjera alguna rotura accidental por roce con ramas o rocas del terreno), sobre las que se marcaba con rotulador indeleble el número de mapa y de cuadro correspondiente (por ejemplo: **M3 - C14** para representar la muestra del *Cuadro n° 14* que se encuentra en el *Mapa n° 3*), lo que sirvió de identificación inequívoca de cada una.

Ya en el Laboratorio se procedió, depositando el material recogido en bateas de gran superficie y poca profundidad, a la limpieza de cada muestra de suelo, de las que se retiraron las piedras, materiales orgánicos presentes (raíces, hojas, etc.) y resto de otros elementos extraños que pudieran allí encontrarse (papeles, vidrios, etc.).

A continuación se procedió al secado de las muestras. Una vez distribuidas en una, dos o tres bandejas desechables de aluminio (según el tamaño de las utilizadas en cada fase del trabajo), se introdujeron en una estufa, previamente precalentada, donde se mantuvieron a una temperatura de 110° C durante 24 horas. Para evitar posibles errores de identificación, cada bandeja fue marcada con una etiqueta en la que se apuntaba el número de mapa y cuadro de cada muestra, según la nomenclatura ya indicada. Además, para cada ciclo de secado de un grupo de muestras, se anotaba en un pliego de papel de filtro la distribución e identificación de las mismas en el volumen de la estufa, tratando así de minimizar los posibles errores accidentales de identificación posterior.

Cuando se usó la primera estufa indicada en el *Apartado II.1.2.9*, del Laboratorio de Edafología de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad de La Laguna, cada una de las muestras llenó 1 bandeja de aluminio de 23 x 28 x 5,5 cm³ con lo que se posibilitaba, completando toda su capacidad, el secado de hasta 25 muestras por proceso. En el momento en que se empezó a utilizar la nueva estufa programable de nuestro Laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental, con menor capacidad, cada porción de suelo diferente se distribuía en 2 o 3 bandejas más pequeñas, de 18 x 28 x 4,5 cm³ ó de 15 x 25 x 4 cm³, repectivamente, lo que permitía capacidades de secado simultáneo de hasta 6 muestras por ciclo.

Tras el proceso de secado, se transportaron las muestras en las bandejas hasta el local de la Facultad de Ciencias donde se encuentra el molino de rodillos ya descrito anteriormente en este mismo capítulo (*II.1.2.10*).

Aquí se procedió a la molturación de las muestras de suelo haciendo pasar el conjunto de material correspondiente a cada una, a través de los cilindros del molino dispuestos para obtener un tamaño de grano de aproximadamente 2 mm. El material resultante era recogido en el cajón inferior del molino, que se mantenía recubierto interiormente por un pliego de papel de filtro que era sustituido en cada proceso. Después de pasar todo el suelo correspondiente a cada una de las muestras por el molino, se limpiaban concienzudamente los rodillos principales (con un cepillo de alambres y otro de cerdas), el cajón de recolección (que había estado protegido por el pliego de papel de filtro) y el resto de la máquina, a fin de evitar la posible contaminación de una muestra con los restos de la anterior.

Las muestras molidas se guardaron en frascos de cristal, con capacidades de 1,5 ó 2 litros y se dejaron herméticamente tapados con juntas de goma. Cada recipiente se etiquetó con la identificación habitual de la muestra formada por el número del mapa y del cuadro donde había sido recogida (*M3-C4*, por ejemplo).

Posteriormente, se tamizaron sistemáticamente todos los productos resultantes hasta garantizar un tamaño de grano menor o igual a 2 mm de diámetro, usando la tamizadora automática, marca FRITSCH, descrita anteriormente (*II.1.2.11*).

Este conjunto de muestras de suelo se fue almacenando en nuestro Laboratorio hasta que se llevó a cabo el proceso de análisis espectrométrico gamma en un detector de germanio intrínseco de alta pureza, *coaxial reverse* modelo GR-2520, de la marca CANBERRA, que cuenta con una eficiencia relativa del 20% y una resolución de 2 keV a 1,33 MeV, equipado con un analizador multicanal S-35 PLUS, de la misma marca, y conectado a un ordenador personal en el que se tenía instalado el programa de análisis espectral SPECTRAN-AT.

La geometría utilizada para la medida de estas muestras en el detector de germanio, fue la consecuente a dos procesos distintos llevados a cabo en equipos similares pero diferenciados en el tiempo, y que fueron desarrollados en el Laboratorium voor Kernfysica de la Universidad belga de Gante, donde se utilizaron

recipientes cilíndricos de 115 ml de capacidad, para las determinaciones correspondientes al primer muestreo llevado a cabo en todas las islas, y en el Laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental de la Universidad de La Laguna, en que se usaron recipientes Marinelli de 1 litro para la medida de las muestras de suelo tomadas con posterioridad.

Las medidas llevadas a cabo en el detector GeHP del Laboratorium voor Kernfysica de Gante se realizaron por colección de los fotones gamma emitidos desde cada muestra durante un periodo de 10.000 segundos. En todos los análisis espectrométricos posteriores, materializados en el detector de Germanio con que cuenta el Laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental de la Universidad de La Laguna, se usó un tiempo de colección de 8 horas (28.800 segundos).

Los radionúclidos analizados en estas determinaciones iniciales, fueron el ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs y ^{134}Cs . En otro estudio posterior, donde se trató de comprobar la influencia de la densidad de la muestra en la curva de eficiencia del detector de Germanio, se añadieron en el caso de algunas muestras otro conjunto de radionúclidos (^{238}U , ^{212}Pb y ^{214}Bi).

Para obtener las actividades específicas de los diferentes radionúclidos en muestras en las islas de Tenerife, La Palma, La Gomera y El Hierro, que fueron llevadas a cabo en el Laboratorio belga citado, se hicieron los cálculos correspondientes al tamaño de las áreas de los fotopicos, considerando el tamaño de la muestra y el tiempo de colección. La concentración de ^{226}Ra se obtuvo como media de la resultante de las emisiones de 351,9 keV (^{214}Pb) y de 609,3 keV (^{214}Bi)^{[75][76]} y la del ^{232}Th como media de las del ^{212}Pb (238,6 keV) y del ^{208}Tl (583,1 keV)^{[77][78]}. El ^{40}K se estudió a partir de la línea de emisión de 1.460,8 keV, como es normalmente aceptado^{[66][75][76][77][78][79][80]}.

En los trabajos desarrollados con el equipamiento de nuestro Laboratorio, el fotopico tenido en cuenta para la determinación de la concentración de ^{40}K correspondió también a la emisión gamma de 1.461 keV, mientras que el ^{232}Th se midió a través de la línea del ^{228}Ac (911 keV)^{[66][79][80]}. Para determinar las concentraciones del ^{238}U se usaron las energías de las transiciones gamma correspondientes al ^{234}Th (92,5 keV)^[81]. La actividad específica del ^{226}Ra se ponderó, de forma directa, por análisis de la emisión gamma en el fotopico de 186 keV^{[82][83]}.

Antes del proceso de medida en el GeHP, las muestras se depositaron en los frascos Marinelli, perfectamente sellados con pegamento de secado lento (obtenido mediante la mezcla de sus dos componentes), por un periodo mínimo de 4 semanas (30 días), a fin de permitir alcanzar el equilibrio radiactivo secular entre el radio y el radón que había sido roto como consecuencia de la toma de las muestras. Este tiempo de almacenamiento en atmósfera cerrada, que representa 7 u 8 veces el periodo más corto de filiación, suele ser el habitual cuando la determinación se realiza mediante análisis espectrométrico gamma^{[66][75][79][84][85][86]}. Otros autores referencian tiempos diferentes, que se cifran en 15 días^{[77][87]}, 20 días^[80], 25 días^[88] ó hasta 40 días^{[76][89]}.

Todo con el objetivo de conseguir valores en las medidas de la concentración de ^{226}Ra , lo suficientemente fiables como para considerar aceptable su determinación mediante espectrometría gamma directa, siguiendo las indicaciones dadas en distintas publicaciones^[82], y no tener que verse obligados a utilizar procesos previos de separación radioquímica.

Las medidas de las actividades específicas del ^{137}Cs y del ^{134}Cs , se realizaron a partir de las emisiones gamma detectadas en las líneas de 662 keV y 605 keV, respectivamente^{[90][91][92][93][94][95]}.

II.2.3.2.- MEDIDAS EN LA ISLA DE TENERIFE

En esta campaña se recogieron muestras de suelo en 104 ubicaciones distintas, en vez de en los 103 lugares prefijados y que se habían marcado en los mapas de la isla de Tenerife, dado que, por la gran diferencia aparente en las características morfológicas y de composición del suelo en dos lugares muy próximos al punto del Cuadro 49 ("*Montaña del Alto en el Portillo*": cono volcánico resultado de una erupción muy reciente respecto al resto del terreno), se obtuvo otra muestra que se denominó M11-C49B.

Cuando finalizó la campaña de recogida de muestras, se procedió al secado de todas ellas (calentamiento a 110° C durante 24 horas) y a su molturación, respectivamente, en la estufa y el molino del Departamento de Edafología de la Facultad de Biológicas de la Universidad de la Laguna ya descritos.

Posteriormente fueron tamizadas y, en recipientes plásticos de unos 200 cm³ de capacidad por muestra, enviadas a la Universidad de Gante (Bélgica), donde en el Laboratorium voor Kernfysica se analizaron en su detector de Germanio intrínseco. Inicialmente se desarrolló el proceso de medida de un primer grupo de 18 muestras. Las 86 muestras restantes fueron analizadas, en el mismo Laboratorio, a lo largo de los meses siguientes.

II.2.3.3.- MEDIDAS EN LAS ISLAS OCCIDENTALES

Como las de la isla de Tenerife, una vez preparadas, secadas, molidas y tamizadas, se remitieron al Laboratorium voor Kernfysica (Gante) donde fueron medidas las concentraciones de los radionúclidos emisores gamma (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs y ^{134}Cs).

II.2.4.- CONCENTRACIÓN DE ^{134}Cs Y ^{137}Cs EN SUELOS

El punto de partida para abordar con especial interés estas determinaciones, fue el conjunto de los valores de la actividad específica de ^{137}Cs y ^{134}Cs obtenidos en las 103 primeras muestras de suelos, recogidas en la primera campaña de medidas, correspondientes a los puntos de Tenerife regularmente distribuidos en los cuadrados de $5 \times 5 \text{ km}^2$ en que se dividió la isla inicialmente.

En todos los suelos analizados en la primera campaña en los que las actividades específicas del ^{137}Cs fueron superiores a 30 Bq kg^{-1} y en aquellos en las que la concentración de ^{134}Cs fue superior a 5 Bq kg^{-1} , se realizó otra determinación con el detector de Ge intrínseco del Laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental de la Universidad de La Laguna, lo que, además de permitimos comprobar la evolución de la incidencia de estos radionúclidos en los suelos de las islas, posibilitó también realizar una comparación entre este equipo de medida y su homólogo de la Universidad de Gante en que se realizaron las primeras determinaciones.

Este criterio de selección condujo a 13 lugares para la repetición de medidas de ^{137}Cs y de 7 lugares para el ^{134}Cs , del total de las 103 localizaciones iniciales. En uno de los puntos ("*El Cabezón*": *El Portillo/Las Cañadas*) coincidió que se obtuvieron, en aquellas primeras medidas, valores de concentración de ^{137}Cs superiores a 30 Bq kg^{-1} y de ^{134}Cs mayores de 5 Bq kg^{-1} simultáneamente, por lo que el número total de puntos de recogida de muestras fue 19.

Estos puntos de muestreo seleccionados se relacionan en la **Tabla 2.8**, donde se indica también las concentraciones de los dos isótopos del Cesio en cada uno de ellos. Es de destacar que se tuvo gran cuidado en que la recogida de suelo se hiciera exactamente en los mismos puntos del terreno donde se produjo el muestreo inicial, atendiendo con precisión a las anotaciones que se hicieron en su día en la *Libreta de Campo*.

Tabla 2.8.- Puntos de muestreo en el estudio de la incidencia del ^{137}Cs y del ^{134}Cs en los suelos de la isla de Tenerife, con indicación de los valores de concentración obtenidos en la campaña inicial.

Puntos con ^{137}Cs > 30 Bq kg⁻¹	CUADRO	^{137}Cs en Bq kg⁻¹	^{134}Cs en Bq kg⁻¹
Las Lagunetas (La Esperanza)	24	100,9 ± 2,5	0,0
El Bronco (La Laguna)	12	70,3 ± 2,2	0,0
La Caldera (La Orotava)	40	52,9 ± 0,9	2,8
Barranco Hondo	18	50,4 ± 1,9	0,0
La Quinta (Santa Úrsula)	38	43,3 ± 1,6	0,0
Lomo Mesetas (Santa Úrsula)	31	41,6 ± 1,1	0,0
Igüeste de San Andrés	2	39,8 ± 1,2	0,0
Jara (Agua García)	23	35,0 ± 0,8	3,8
El Sauzal	29	35,0 ± 1,0	2,0
San Marcos-Riquer (Icod)	75	34,1 ± 1,7	0,0
Era del Llano (Alcalá)	96	32,3 ± 1,6	0,0
El Cabezón (El Portillo/Las Cañadas)	58	31,2 ± 1,2	6,5 ± 0,9
San Juan del Reparo (Garachico)	85	30,8 ± 1,0	0,0
Puntos con ^{134}Cs > 5 Bq kg⁻¹	CUADRO	^{137}Cs en Bq kg⁻¹	^{134}Cs en Bq kg⁻¹
Arico El Viejo	36	1,5	7,8 ± 0,7
Fuente Madre del Agua (Izaña)	51	10,7	6,9 ± 0,8
La Esperanza	17	12,2	6,5 ± 1,2
El Cabezón (El Portillo/Las Cañadas)	58	31,2 ± 1,2	6,5 ± 0,9
Cruz de Tea (Vilaflor/Granadilla)	62	9,1	6,0 ± 0,8
Los Gavilanes (Lomo de Arico)	44	6,4	5,6 ± 0,6
Fuente del Bardo (Icod El Alto)	57	10,8	5,6 ± 0,8

Además de estos 19 puntos de medida, se tomaron muestras en otro lugar en el que se consideró interesante volver a realizar medidas de verificación tanto de los niveles de radiación en aire, como de las concentraciones de radionúclidos emisores gamma encontrados con anterioridad. Este punto adicional es el denominado: “*Tacoronte-Los Naranjeros*” (C22-M5).

La presencia de ^{137}Cs y ^{134}Cs en los suelos de Tenerife cuenta con un especial interés si se tiene en cuenta la lejanía de la isla a los posibles centros productores de estos radionúclidos artificiales, no habiéndose comunicado el transporte atmosférico desde lugares tan distantes como aquellos donde se han producido emisiones incontroladas (por ejemplo Chernobyl). En este sentido, y tratando de establecer posibles relaciones entre las concentraciones encontradas y procesos de *fall-out*, se procedió a tomar muestras de suelo a diferentes profundidades en esos puntos, a fin de medir las actividades específicas de ^{137}Cs y ^{134}Cs en cada una de ellas.

En dichos puntos se volvió a determinar también, la radiactividad gamma medioambiental a 1 m del suelo, haciendo uso de una cámara de ionización de alta presión RSS-112 (HPIC).

La zona del terreno elegida se limpió de sustancias vegetales y restos orgánicos y se obtuvo una primera muestra superficial (**A**) correspondiente a un paralelepípedo de 25 x 25 x 5 cm. Se procedió luego a profundizar hasta unos 30 cm de profundidad donde se recogió una segunda muestra (**B**) de iguales dimensiones que la superficial. Por último, se ahondó otros 30 cm y se obtuvo una tercera muestra de suelo (**C**) a los 60 cm de profundidad.

Las muestras se prepararon siguiendo el procedimiento ya indicado (“**II.2.3.1.- Procedimiento general de medida**”). Fueron analizadas en nuestro laboratorio haciendo uso del detector Canberra de Ge intrínseco con que contamos. El tiempo de contaje fue de 8 horas (28.800 segundos), se emplearon 2.048 canales, el nivel de confianza fue del 95% y el margen de error considerado de $\pm 2\sigma$. Los recipientes usados para contener las muestras de suelo durante la colección fotónica en el GeHP fueron Marinelli de 1 litro.

Además de las actividades de los dos isótopos del Cs, se midieron también las concentraciones del ^{226}Ra , ^{40}K , ^{232}Th y ^{238}U .

II.2.5.- INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE LA MUESTRA EN LA EFICIENCIA DEL DETECTOR DE GERMANIO

Diferentes autores han estudiado los factores que pueden influir en el resultado de la determinación de las concentraciones de los radionúclidos presentes en muestras de suelo, mediante análisis espectrométrico, tales como la geometría de la muestra, el tamaño de la misma, el diámetro del grano o su densidad^{[96][97][98]}.

En este trabajo se ha tratado de encontrar un método que posibilitara la aplicación de un factor corrector de la eficiencia del detector para cada determinación en función de la densidad de la muestra a medir.

Para llevar adelante este propósito, era necesario obtener una serie de muestras que tendrían que contar con las características de presentar la misma composición y propiedades radiológicas y además tener densidades variables que abarcaran el margen de valores que se han encontrado en los diferentes puntos del territorio de las Islas Canarias Occidentales.

Tratando de descubrir el tipo de suelo más adecuado para ello, se eligió piedra pómez de naturaleza volcánica, existente en zonas próximas al Teide en la isla de Tenerife, cuya densidad se consiguió variar mediante un proceso de sucesivos pasos de molturación y tamizado, lo que permitió obtener muestras con densidades en el rango comprendido entre 800 y 1400 kg m⁻³, que cubren todo el margen de los suelos que habitualmente son analizados en nuestro laboratorio.

Se recogió una cantidad suficiente de suelo (unos 10 kg) y se prepararon las muestras mediante un procedimiento que fue, en su parte inicial, similar al seguido en otros casos; sin embargo, a continuación, el suelo resultante fue sometido a sucesivos procesos de molido y tamizado hasta obtener 6 diferentes muestras de 1 litro con densidades que, como se presenta en la **Tabla 2.9**, variaron entre 0,88 y 1,33 g cm⁻³, correspondientes a tamaños de grano con diámetros comprendidos entre 5 y 0,4 mm.

Tabla 2.9.- Densidades y tamaños de grano usados para la determinación de la influencia de la densidad de las muestras de suelo en la eficiencia del detector de Germanio.

NÚMERO DE MUESTRA	DENSIDAD (g cm ⁻³)	TAMAÑO DE GRANO (Æ en mm)
1	0,88	> 5
2	0,93	2 a 5
3	1,00	1,25 a 2
4	1,13	0,63 a 1,25
5	1,23	0,4 a 0,63
6	1,33	< 0,4

Para cada una de las muestras se realizaron dos medidas sucesivas, en el detector GeHP del Laboratorio de Radiactividad Ambiental de La Laguna ya descrito, por un período de 28.800 segundos (8 horas) en cada caso, utilizando contenedores Marinelli de 1 litro. Los radionúclidos que se determinaron fueron: ²³⁸U, ²²⁶Ra, ²¹²Pb, ²¹⁴Bi, ²³²Th y ⁴⁰K, con un factor de confianza para el cálculo del límite inferior de detección del 95% y un margen de error de $\pm 2\sigma$. El análisis multicanal llevado a cabo en el monitor S-35 Plus, de Canberra, se realizó seleccionando 4.096 canales en todos los casos.

Se estudió también la presencia en las muestras de ¹³⁷Cs y ¹³⁴Cs, pero solamente en tres de ellas se encontró presencia de ¹³⁷Cs con valores superiores al límite de detección cuando el nivel de confianza se rebajó hasta el 68%, por lo que los resultados correspondientes a estos dos radionúclidos no se consideran representativos, por lo que no se incluyen en este trabajo.

Las emisiones gamma consideradas fueron: para la determinación del ²²⁶Ra la línea de 186 keV, para el ²¹²Pb la de 239 keV, la de 609 keV para el ²¹⁴Bi y la de 1461 keV para el ⁴⁰K. El ²³⁸U se midió a través de la línea de emisión del ²³⁴Th (92,5 keV) y el ²³²Th a partir del ²²⁸Ac (911 keV).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

III.1.- INTRODUCCIÓN

III.1.- INTRODUCCIÓN

De las cuatro islas que conforman las Canarias Occidentales (Tenerife, La Palma, La Gomera y El Hierro), es en Tenerife donde se ha realizado un mayor número de medidas y una más exhaustiva recogida de muestras, en razón a que es la isla de mayor extensión de todo el archipiélago, la que cuenta con un relieve más accidentado, lo que haría prever una mayor diversidad de resultados en las medidas, y donde se concentra la mayor parte de la población de la provincia occidental.

Algunos de los datos demográficos y geográficos más destacados de estas islas, se presentan en la **Tabla 3.1**^{[99][100]}.

Tabla 3.1.- Datos de las Islas Canarias Occidentales.

	TENERIFE	LA PALMA	LA GOMERA	EL HIERRO
Extensión (km²)	2.034,21	708,26	369,74	268,70
Población^(*) (habitantes)	680.190	82.183	17.028	7.957
Capital	Santa Cruz de Tenerife	Santa Cruz de la Palma	San Sebastián de la Gomera	Valverde
Población^(*) de Capital (habitantes)	203.929	17.454	6.123	3.744
Punto de mayor altitud	Teide	Roque de los Muchachos	Garajonay	Malpaso
Máxima altitud (m)	3.718	2.426	1.487	1.501

(*) Padrón del año 1.995.

Los niveles de radiación gamma existentes en el aire se presentan en unidades de tasa de dosis absorbida (nGy h^{-1}) y las concentraciones de los radionúclidos emisores gamma, presentes en los suelos de las islas, en valores de actividad por unidad de masa (Bq kg^{-1}). En la totalidad de las muestras de suelos se midió la actividad específica del ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K y en alguna de ellas se determinó, además, la concentración del ^{238}U , ^{212}Pb y ^{214}Bi .

Por otra parte, al haberse detectado en algunos lugares la presencia de radionúclidos artificiales como el ^{137}Cs y ^{134}Cs , se ha estudiado su posible relación con el *fall-out* (lluvia radiactiva), consecuencia de emisiones incontroladas a la atmósfera en otras partes del planeta, así como su difusión desde la superficie del terreno, donde se depositó inicialmente, hacia capas más profundas del suelo.

También se analiza en este Capítulo, la posibilidad que nos planteamos de establecer algún tipo de relación entre las características geológicas de los suelos y la correspondiente tasa de dosis medida en el aire en cada uno de los puntos considerados.

Se ha realizado un estudio comparativo entre la cámara de ionización de alta presión modelo RSS-112 y el detector Geiger-Müller tipo MC-71, a partir de las determinaciones realizadas con los dos aparatos, de la tasa de dosis absorbida en aire a un metro del suelo.

Asimismo, se presentan los datos correspondientes al estudio de la influencia que tiene la densidad de la muestra de suelos en la eficiencia de la medida realizada con el detector de germanio.

Se establecen los niveles de radiación ambiental en las islas Canarias Occidentales en términos de tasa de dosis equivalente, obteniendo así los valores de exposición de la población a la radiación natural.

III.2.- TASA DE DOSIS GAMMA EN AIRE

III.2.1.- INTRODUCCIÓN

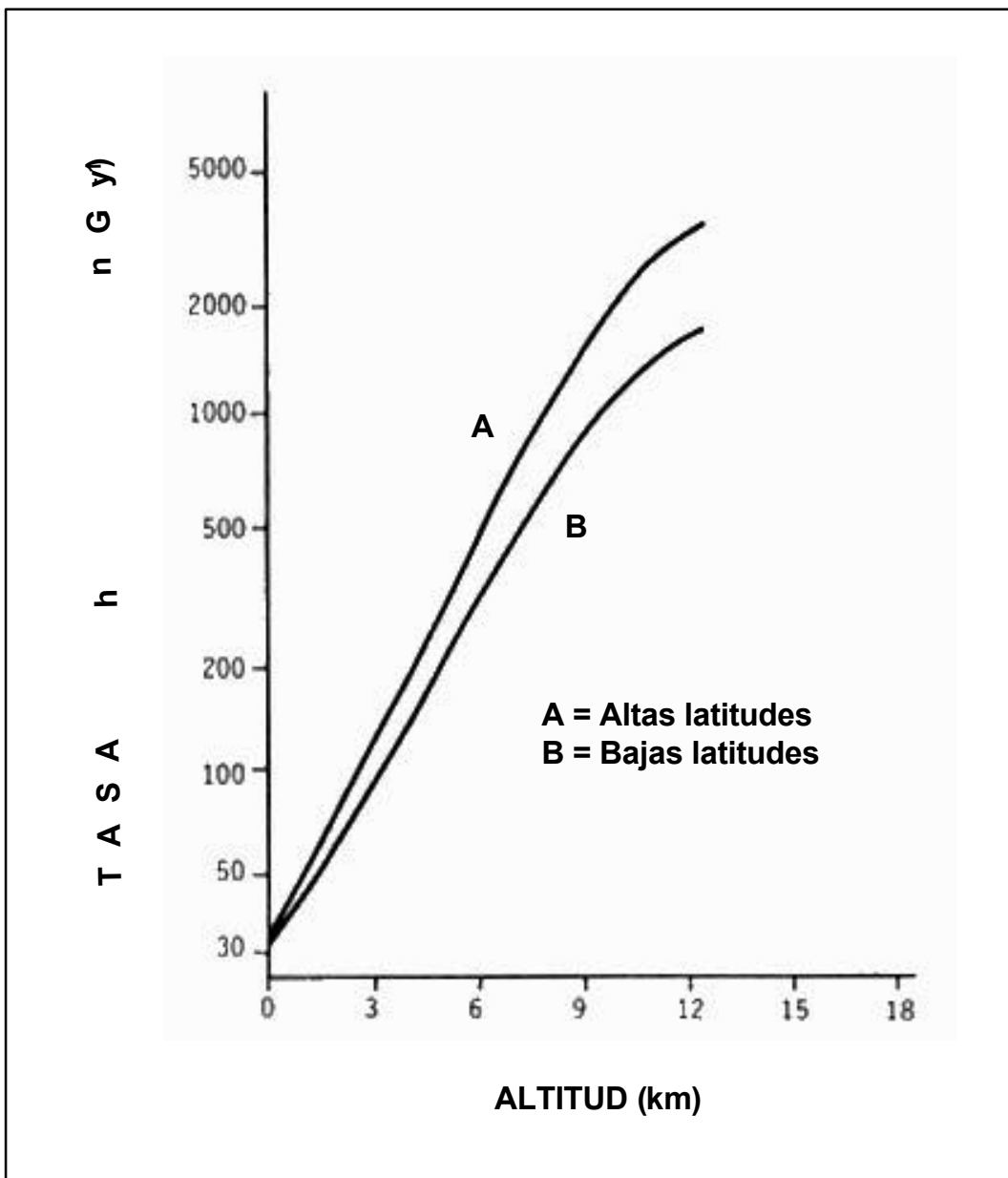
Se presentan los resultados obtenidos en las diferentes campañas de medida de radiación gamma en aire en las cuatro Islas Canarias Occidentales, llevadas a cabo en toda su geografía en distintos periodos de tiempo. La asignación de estos valores a cada uno de los puntos de medida, ha posibilitado la construcción de mapas “radiométricos” de estas islas, en los que se presenta la distribución de los niveles de tasa de dosis debidos a estas fuentes ambientales de radiación.

III.2.2.- TASA DE DOSIS ABSORBIDA EN AIRE DEBIDA A LA RADIACIÓN CÓSMICA. VARIACIÓN CON LA ALTITUD

El primer factor que hay que analizar en un estudio de radiación natural, es la radiación cósmica. Se aceptó inicialmente el valor de 32 nGy h⁻¹ como tasa de dosis absorbida en aire debida a la radiación cósmica a nivel del mar, atendiendo a lo referenciado a este respecto en los *Informes UNSCEAR-88*^[1] y *UNSCEAR-93*^[3] para regiones de la Tierra con latitud similar a la de las Islas Canarias.

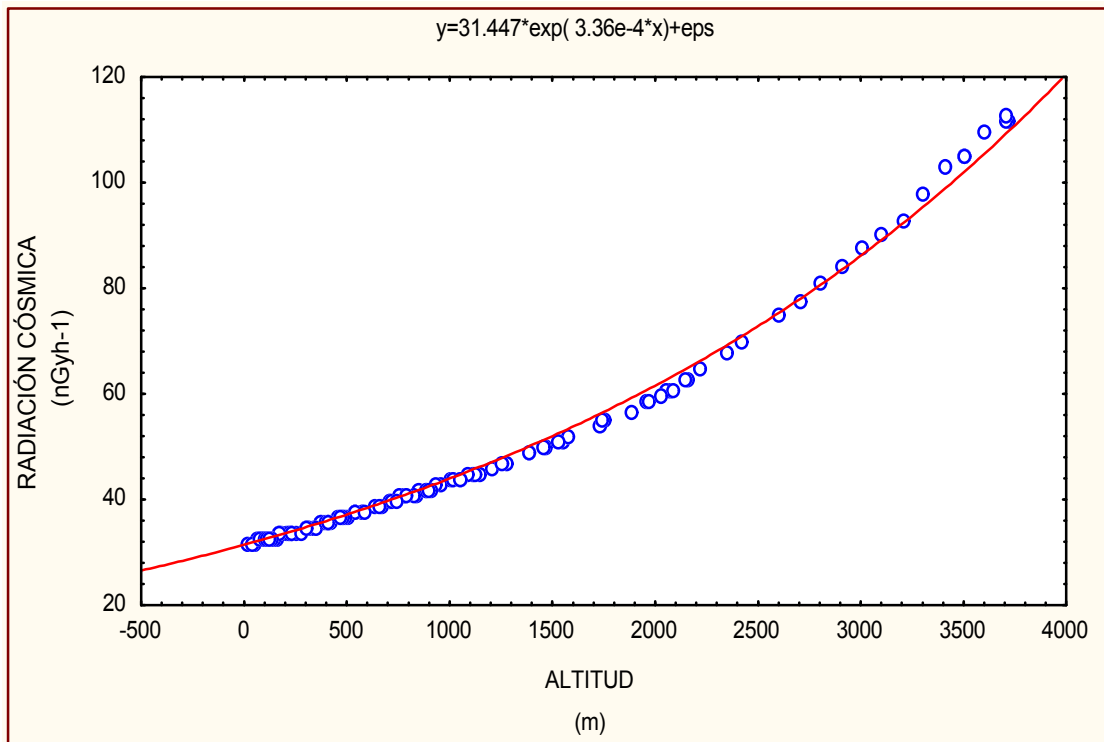
Posteriormente se realizaron las oportunas correcciones para obtener, en función de la altitud de cada lugar de medida, los valores numéricos de la correspondiente tasa de dosis en aire debida a la radiación cósmica. Para ello, se utilizó la gráfica representativa de la variación de la radiación cósmica con la altura sobre el nivel del mar, que aparece en los *Informes UNSCEAR*^{[1][3]} (Figura III.1).

Figura III.1.- Variación de los valores de la radiación cósmica (tasa de dosis absorbida en aire) con la altitud.



La representación gráfica que aparece en la **Figura III.2** siguiente, corresponde al tramo de curva aplicable a las altitudes de Canarias, que responde a la expresión matemática que también se indica.

Figura III.2.- Valores de radiación cósmica (tasa de dosis absorbida en aire, en nGy h^{-1}) versus altitud, para la latitud de Canarias.



En las siguientes **Tabla 3.2**, **Tabla 3.3**, **Tabla 3.4** y **Tabla 3.5** se dan los datos de altitud y de la componente de la tasa de dosis absorbida en aire debida a la radiación cósmica, para cada uno de los puntos considerados, en las cuatro islas muestreadas.

Tabla 3.2.- Altitud y valor de la tasa de dosis absorbida en aire debida a la radiación cósmica, en cada uno de los puntos de medida de la isla de Tenerife.

Cuadro (¹)	Nombre del Cuadro	Altitud (m)	Radiación Cósmica (nGy h⁻¹)
1	Chamorga	570	38
2	Igüeste de San Andrés	120	33
3	Almáciga	130	33
4	El Bailadero	380	36
5	San Andrés (Sta. Cruz Tfe.)	230	34
6	Roque de Taborno	500	37
7	Afur	570	38
8	Barrio de la Alegría (Sta. Cruz Tfe.)	100	33
9	Santa Cruz de Tenerife	88	33
10	Roque Dos Hermanos-Punta del Hidalgo	50	32
11	El Moquinal -El Batán	828	41
12	El Bronco (La Laguna)	630	39
13	Taco	375	36
14	Santa María del Mar	212	34
15	Tejina	180	34
16	El Portezuelo	540	38
17	La Esperanza	773	41
18	Barranco Hondo	330	35
19	Candelaria	72	33
20	Montaña Grande (Güimar)	85	33
21	Valle Guerra	110	33
22	Tacoronte - Los Naranjeros	452	37
23	Jara – Agua García	1004	44
24	Las Lagunetas (La Esperanza)	1050	44
25	Cuevecitas de Candelaria	470	36
26	Güimar	230	34
27	La Medida (Güimar)	400	36
28	La Cardonera (Fasnia)	50	32
29	El Sauzal	300	35
30	La Matanza	530	38
31	Lomo Mesetas (Santa Úrsula)	1470	50
32	Ayosa	1950	59
33	Barranco del Agua (Altos de Güimar)	1010	44
34	Camino Arrastradero (El Escobonal)	950	43
35	La Sombrera - Fasnia	465	37
36	Arico el Viejo	160	33
37	Abades	80	33
38	La Quinta (Santa Úrsula)	200	34
39	Cuesta de la Villa (La Orotava)	315	35
40	La Caldera (La Orotava)	1110	45
41	Izaña	2150	63
42	Barranco del Palmero –Izaña	1960	59
43	Morra Ramos - El Bueno (Arico Viejo)	1140	45
44	Los Gavilanes (Lomo Arico)	540	38
45	El Río	232	34
46	Loma del Camello - Parque eólico	70	33
47	La Vera (Puerto Cruz)	220	34
48	Tres Pinos - La Orotava	930	43

49	Montaña del Alto (A) - El Portillo	2145	63
49-B	Montaña del Alto (B) - El Portillo	2070	61
50	Cañada de las Pilas (Las Cañadas)	2075	61
51	Fuente Madre del Agua (Izaña)	1750	55
52	Morro de las Arbejas – Izaña	1270	47
53	Los Blanquitos (Granadilla)	540	38
54	San Isidro	245	34
55	Aeropuerto del Sur - Las Tejitas	53	32
56	Mirador de la Grimona (Los Realejos)	130	33
57	Fuente del Bardo (Icod el Alto)	850	42
58	El Portillo - El Cabezón	2065	61
59	Montaña Blanca (Teide)	2420	70
60	Montaña Guajara (Las Cañadas)	2215	65
61	Madre del Agua (Vilaflor)	1730	54
62	Cruz de Tea (Vilaflor-Granadilla)	880	42
63	Las Zocas - San Miguel	375	36
64	Los Abrigos - El Guincho	85	33
65	Santa Catalina (S. Juan de la Rambla)	150	33
66	La Guancha	705	40
67	Cruz de Vieja (Boca de Tauce)	1550	51
68	Pico del Teide	3710	117
69	Llano de Ucanca	2050	61
70	Lomo Tabladillo (Boca Tauce-Vilaflor)	1880	57
71	Los Quemados (Vilaflor-La Escalona)	1200	46
72	Valle de San Lorenzo	370	36
73	Cañada Verde (Las Galletas)	83	33
74	Las Galletas -Ten Bel	12	32
75	San Marcos - Riquer (Icod de los Vinos)	160	33
76	El Amparo (Icod de los Vinos)	490	37
77	Hoya Negra (Boca de Tauce)	1570	52
78	Cruz de Tea (Boca de Tauce)	2080	61
79	Montaña del Cedro (Ucanca)	2020	60
80	Montaña Teresme (Adeje-Vilaflor)	1740	55
81	Barranco del Infierno (Adeje)	400	36
82	Chayofa (Los Cristianos)	170	34
83	Mesas de Guaza (Los Cristianos)	148	33
84	Rasca (Palm-Mar / Los Cristianos)	50	32
85	San Juan del Reparó (Garachico)	700	40
86	Vuelta Grande (Boca de Tauce)	1380	49
87	Altos de Chío	1380	49
88	Chirche	900	42
89	Vera de Erques	580	38
90	Armeñime	162	34
91	La Caleta (Adeje)	65	33
92	Los Silos	32	32
93	Roque de las Moradas (Los Silos)	170	34
94	Santiago del Teide	1015	44
95	Taimo	670	39
96	Era del Llano (Alcalá)	310	35
97	Playa de San Juan	135	33
98	Marazul (Playa de San Juan)	75	33
99	Buenavista del Norte	95	33
100	Cumbre de la Molina (Buenavista)	105	33
101	Masca	720	40
102	Acantilado de los Gigantes	130	33
103	Punta de Teno	120	33

(¹) El mapa de la isla, con la localización de los cuadros, se muestra en el **Anexo I**.

Tabla 3.3.- Altitud y valor de la tasa de dosis absorbida en aire, debida a la radiación cósmica en cada uno de los puntos de medida de la isla de La Palma.

Cuadro (²)	Nombre del Cuadro	Altitud (m)	Radiación Cósmica (nGy h ⁻¹)
1	Las Cabezas (Barlovento)	480	37
2	El Corcho (Puntallana)	770	41
3	Miranda	340	35
4	San Juan de Belmaco	390	36
5	Franceses	880	42
6	Borde de la Caldera de Taburiente	2351	68
7	Llanos del Paso	825	41
8	Los Campanarios	1520	51
9	Volcán de San Antonio	650	39
10	Llano Negro (Garafía)	780	41
11	Llanos de Lance (Tijarafe)	1120	45
12	Las Angustias	300	35
13	Borde del Cráter del Volcán Teneguía	400	36

(²) El mapa cuadrículado de La Palma se ve en el **Anexo II**.

Tabla 3.4.- Altitud y valor de la tasa de dosis absorbida en aire, debida a la radiación cósmica en cada uno de los puntos de medida de la isla de La Gomera.

Cuadro (³)	Nombre del Cuadro	Altitud (m)	Radiación Cósmica (nGy h ⁻¹)
1	Casas El Moralito (Hermigua)	230	34
2	Las Casetas (San Sebastián)	480	37
3	Los Revolcaderos (San Sebastián)	405	36
4	Tamargada (Vallermoso)	410	36
5	Monte del Cedro	1080	45
6	Alajeró	750	41
7	Tazo	295	35
8	Arure	895	42
9	La Mejora (La Dama)	270	34
10	Laguna Grande	1245	47

(³) Los cuadros de esta isla se muestran en el mapa del **Anexo III**.

Tabla 3.5.- Altitud y valor de la tasa de dosis absorbida en aire, debida a la radiación cósmica en cada uno de los puntos de medida de la isla de El Hierro.

Cuadro (⁴)	Nombre del Cuadro	Altitud (m)	Radiación Cósmica (nGy h⁻¹)
1	Valverde	470	37
2	Las Montañetas (Guarazoca)	790	41
3	Gorona de los Difuntos	1050	44
4	Gorona del Lajial (La Restinga)	300	35
5	Montaña de la Virgen (Sabinosa)	735	40
6	Chorro del Jable (Frontera)	1450	50

(⁴) El mapa de la isla con estos cuadros se puede ver en el **Anexo IV**.

III.2.3.- DETERMINACIÓN DEL VALOR DE RADIACIÓN DE FONDO DE LOS EQUIPOS

Para determinar los valores de la radiación de fondo (*background*) de los equipos utilizados, se realizaron medidas de la tasa de dosis gamma en aire en alta mar en dos ocasiones diferentes, obteniendo la tasa de dosis absorbida en aire a bordo de dos embarcaciones distintas fabricadas con materiales plásticos.

Para fijar el valor de fondo del medidor Geiger-Müller, equipado con la sonda MC-71, se midió en aguas próximas al Acantilado de Los Gigantes, frente a la playa de Masca, obteniéndose un total de 489 cuentas acumuladas durante 600 segundos.

A partir del *Certificado de Calibración* de este equipo (ver **Anexo V**), en el que se indica que la sensibilidad de la Sonda Detectora es de **19,80 cps/mGy h⁻¹**, se obtiene un valor de:

$$\begin{aligned} 489 \text{ cuentas} / 600 \text{ segundos} &= 0,815 \pm 0,04 \text{ cps} \\ (0,815 \pm 0,04) \text{ cps} / 19,80 \text{ cps}/\mu\text{Gy h}^{-1} &= 41,162 \pm 0,002 \text{ nGy h}^{-1} \end{aligned}$$

De ahora en adelante se expresarán los datos con una precisión máxima de décimas de nGy h⁻¹, sin indicar valores de incertidumbre que sólo afectarían a los resultados de las medidas a partir de la tercera cifra decimal, lo que correspondería a valores de tasa de dosis indetectables.

La radiación cósmica a nivel del mar en Canarias es de 32 nGy h⁻¹. Por tanto, el valor de fondo del detector MC-71 que se ha utilizado es de:

$$41,2 - 32 = \boxed{9,2 \text{ nGy h}^{-1}}$$

Posteriormente, en la segunda ocasión en que se comprobó el valor del fondo de los equipos detectores usados, se realizaron dos medidas consecutivas (frente a la costa de Radazul) con el detector MC-71, durante 600 segundos cada una, confirmándose el valor anterior.

De igual forma se midió la tasa de dosis absorbida en aire usando la Cámara de Ionización de Alta Presión RSS-112, a fin de calcular su fondo. El tiempo de medida fue el utilizado habitualmente para este equipo (20 minutos), resultando finalmente un valor medio de 0,035 μGy h⁻¹.

Por tanto, y deduciendo la tasa de dosis correspondiente a la radiación cósmica, se obtuvo un valor de fondo para la cámara RSS-112 de:

$$35 - 32 = \boxed{3 \text{ nGy h}^{-1}}$$

III.2.4.- PRIMERA CAMPAÑA DE MEDIDAS EN LA ISLA DE TENERIFE

En un periodo de nueve meses consecutivos, se procedió a la medida de la tasa de dosis en aire debida a la radiación gamma, a 1 metro del suelo, en cada uno de los 103 lugares seleccionados en Tenerife, tal como se indicó en el apartado de "*Material y Método*". En el cuadro nº 49 ("*Montaña del Alto - El Portillo*") se hizo una medida adicional en la ladera del cono volcánico que se encuentra en dicho lugar (punto 49-B), con lo que el total de medidas realizadas en Tenerife fue de 104.

Las determinaciones llevadas a cabo en esta fase del trabajo se realizaron con el medidor Mini-Instrument, modelo 6-80, dotado de la sonda detectora Geiger-Müller MC-71, de acuerdo con los procedimientos y protocolos de actuación ya explicados anteriormente. Los resultados de estas medidas para la isla de Tenerife, se presentan en la **Tabla 3.6** siguiente.

Tabla 3.6.- Valores de la tasa de dosis absorbida en aire debida a radiación gamma ambiental, a 1 metro del suelo, en cada uno de los lugares de medida de la isla de Tenerife.

Cua- dro (¹)	Lugar	Altitud (m)	Radiac. Cósmica (nGy h ⁻¹)	Cuentas medidas en 600 s (nº ctas.)	Tasa dosis (medida analógica) (nGy h ⁻¹)	Tasa dosis (calculada) (nGy h ⁻¹)	Tasa dosis Neta MC-71 (nGy h ⁻¹)
1	Chamorga	570	38	1.620	140	136,4	89,2
2	Iguste de San Andrés	120	33	723	65	60,9	18,7
3	Almáciga	130	33	1.113	110	93,7	51,5
4	El Bailadero	380	36	843	70	71,0	25,8
5	San Andrés (S/C de Tfe.)	230	34	838	70	70,5	27,3
6	Roque de Taborno (Anaga)	500	37	1.032	90	86,9	40,7
7	Afur	570	38	845	70	71,1	23,9
8	Barrio de la Alegría (S/C de Tfe.)	100	33	805	70	67,8	25,6
9	Santa Cruz de Tenerife	88	33	1.094	100	92,1	49,9
10	Roque Dos Hermanos-Pta.Hidalgo	50	32	884	80	74,4	33,2
11	Moquinal-El Batán	828	41	1.045	90	88,0	37,8
12	El Bronco (La Laguna)	630	39	791	70	66,6	18,4
13	Taco	375	36	1.049	100	88,3	43,1
14	Santa María del Mar	212	34	1.064	95	89,6	46,4
15	Tejina	180	34	884	75	74,4	31,2
16	El Portezuelo	540	38	1.230	110	103,5	56,3
17	La Esperanza	773	41	1.546	140	130,1	79,9
18	Barranco Hondo	330	35	876	75	73,7	29,5

19	Candelaria	72	33	1.144	110	96,3	54,1
20	Montaña Grande (Güimar)	85	33	824	75	69,4	27,2
21	Valle Guerra	110	33	1.255	110	105,6	63,4
22	Tacoronte-Los Naranjeros	452	37	1.037	90	87,3	41,1
23	Jara (Agua García)	1004	44	1.146	100	96,5	43,3
24	Las Lagunetas (La Esperanza)	1050	44	962	90	81,0	27,8
25	Cuevecitas de Candelaria	420	36	1.083	95	91,2	46,0
26	Güimar	230	34	1.104	105	92,9	49,7
27	La Medida (Güimar)	400	36	1.691	170	142,3	97,1
28	La Cardonera (Fasnia)	50	32	1.329	110	111,9	70,7
29	El Sauzal	300	35	1.010	90	85,0	40,8
30	La Matanza	530	38	916	80	77,1	29,9
31	Lomo Mesetas (Sta. Ursula)	1470	50	948	80	79,8	20,6
32	Ayosa	1950	59	1.434	140	120,7	52,5
33	Barranco del Agua (Güimar)	1010	44	1.083	100	91,2	38,0
34	Camino Arrastradero (Escobonal)	950	43	1.792	180	150,8	98,6
35	La Sombrera (Fasnia)	465	37	2.068	200	174,1	127,9
36	Arico El Viejo	160	33	1.886	170	158,8	116,6
37	Abades	80	33	1.789	160	150,6	108,4
38	La Quinta (Santa Úrsula)	200	34	1.082	100	91,1	47,9
39	Cuesta de La Villa (La Orotava)	315	35	943	90	79,4	35,2
40	La Caldera (La Orotava)	1110	45	972	80	81,8	27,6
41	Izaña	2150	63	1.208	120	101,7	29,5
42	Barranco El Palmero (Izaña)	1960	59	1.218	110	102,5	34,3
43	Morra Ramos-El Bueno (Arico)	1140	45	1.440	130	121,2	67,0
44	Los Gavilanes (Lomo de Arico)	540	38	1.611	150	135,6	88,4
45	El Río	232	34	1.663	150	140,0	96,8
46	Parque Eólico de Granadilla	70	33	1.836	165	154,5	112,3
47	La Vera (Puerto de la Cruz)	220	34	1.103	95	92,8	49,6
48	Palo Blanco (Orotava/Realejos)	930	43	1.574	140	132,5	80,3
49	Montaña del Alto-A (El Portillo)	2145	63	1.435	130	120,8	48,6
49B	Montaña del Alto-B (El Portillo)	2070	61	1.793	160	150,9	80,7
50	Cañada de Las Pilas (Las Cañadas)	2075	61	2.570	220	216,3	146,1
51	Fuente Madre del Agua (Izaña)	1750	55	2.183	185	183,8	119,6
52	Morro de las Arbejas (Izaña)	1270	47	1.423	140	119,8	63,6
53	Los Blanquitos (Granadilla)	540	38	1.714	140	144,3	97,1
54	San Isidro	245	34	1.094	105	92,1	48,9
55	Aeropuerto del Sur-Las Tejitas	53	32	1.578	140	132,8	91,6
56	Mirador de la Grimona (Realejos)	130	33	954	85	80,3	38,1
57	Fuente del Bardo (Icod El Alto)	850	42	1.708	145	143,8	92,6
58	El Cabezón (Portillo/Las Cañadas)	2065	61	2.260	200	190,2	120,0
59	Montaña Blanca (Teide)	2420	70	2.787	225	234,6	155,4
60	Montaña Guajara (Las Cañadas)	2215	65	2.384	200	200,7	126,5
61	Madre del Agua (Vilaflor)	1730	54	1.619	135	136,3	73,1
62	Cruz de Tea (Vilaflor/Granadilla)	880	42	2.166	200	182,3	131,1
63	Las Zocas (San Miguel)	375	36	1.386	130	116,7	71,5

64	Los Abrigos-El Guincho	85	33	1.534	140	129,1	86,9
65	Sta Catalina (S.Juan de la Rambla)	150	33	2.214	210	186,4	144,2
66	La Guancha	705	40	1.737	150	146,2	97,0
67	Cruz de la Vieja (Falda N. Teide)	1550	51	2.601	215	218,9	158,7
68	Pico del Teide	3710	117	2.438	215	205,2	79,0
69	Llano de Ucanca	2050	61	2.012	180	169,4	99,2
70	Lomo Tabladillo(B.Tauce/Vilafior)	1880	57	2.021	180	170,1	103,9
71	Los Quemados (Vilafior)	1200	46	1.646	155	138,6	83,4
72	Valle de San Lorenzo	370	36	1.021	95	85,9	40,7
73	Cañada Verde (Las Galletas)	83	33	1.024	90	86,2	44,0
74	Las Galletas-Ten Bel	12	32	970	85	81,6	40,4
75	San Marcos-Riquer (Icod)	160	33	2.310	200	194,4	152,2
76	El Amparo (Icod)	490	37	1.251	105	105,3	59,1
77	Hoya Negra (B.Tauce/Teide Viejo)	1570	52	2.660	230	223,9	162,7
78	Cruz de Tea (Boca Tauce)	2080	61	1.662	145	139,9	69,7
79	Montaña Cedro (Ucanca)	2020	60	2.126	185	179,0	109,8
80	Montaña Teresme (Adeje/Vilafior)	1740	55	1.095	100	92,2	28,0
81	Barranco del Infierno (Adeje)	400	36	1.167	110	98,2	53,0
82	Chayofa (Los Cristianos)	170	34	1.177	110	99,1	55,9
83	Mesas de Guaza (Los Cristianos)	148	33	1.396	130	117,5	75,3
84	Rasca (Palm-Mar/Los Cristianos)	50	32	1.021	95	85,9	44,7
85	S. Juan del Reparó (Garachico)	700	40	1.163	110	97,9	48,7
86	Vuelta Grande (Boca de Tauce)	1380	49	1.748	160	147,1	88,9
87	Altos de Chio	1380	49	1.108	100	93,3	35,1
88	Chirche	900	42	1.548	140	130,3	79,1
89	Vera de Erque	580	38	1.477	130	124,3	77,1
90	Armeñime	162	34	1.080	100	90,9	47,7
91	La Caleta (Adeje)	65	33	1.204	110	101,3	59,1
92	Los Silos	32	32	1.423	130	119,8	78,6
93	Roque de las Moradas (Los Silos)	170	34	982	95	82,7	39,5
94	Santiago del Teide	1015	44	1.100	90	92,6	39,4
95	Tamaimo	670	39	1.276	120	107,4	59,2
96	Era del Llano (Alcalá)	310	35	1.431	130	120,5	76,3
97	Playa de San Juan	135	33	1.503	135	126,5	84,3
98	Marazul (Playa de San Juan)	75	33	1.521	140	128,0	85,8
99	Buenavista del Norte	95	33	1.334	135	112,3	70,1
100	Cumbre de la Molina (Buenavista)	105	33	973	85	81,9	39,7
101	Masca	720	40	844	80	71,0	21,8
102	Acantilado de los Gigantes	130	33	914	80	76,9	34,7
103	Punta de Teno	120	33	875	80	73,7	31,5
0	<i>Atta Mar (2 Km de Playa Masca)</i>	<i>-150</i>	<i>32</i>	<i>489</i>	<i>40</i>	<i>41,2</i>	<i>0</i>

(¹) Estos cuadros del mapa de la isla de Tenerife se muestran en el **Anexo I**.

Los valores que aparecen en la columna “*Tasa de dosis (calculada) (nGy h⁻¹)*”, se obtuvieron a partir del número de cuentas detectados en los 600 segundos de medida con el MC-71 (columna: “*Cuentas medidas en 600 s (nº ctas.)*”), mediante las siguientes operaciones:

$$\begin{aligned} \text{Nº de cuentas medidas} / 600 \text{ segundos} &= \text{“n” cps} \\ \text{“n” cps} / 19,80 \text{ cps}/\mu\text{Gy h}^{-1} &= \text{“N” nGy h}^{-1} \end{aligned}$$

siendo 19,80 cps/ μ Gy h⁻¹ la sensibilidad de la sonda detectora MC-71 utilizada.

Se encuentran ligeras diferencias entre este valor así obtenido de dosis absorbida en aire, que se toma como resultado de la medida y que denominamos “*Tasa de dosis (calculada) (nGy h⁻¹)*”, y el valor aproximado que presenta directamente el equipo detector en su indicador analógico, expresado en la **Tabla 3.6** anterior como “*Tasa de dosis (medida analógica) (nGy h⁻¹)*”, y que es el valor medio de la indicación señalada por la aguja, perceptiblemente variable en torno a un valor central durante todo el tiempo de medida.

Para obtener el valor de la “*Tasa de dosis neta MC-71 (nGy h⁻¹)*” que aparece como resultado final en la última columna de la **Tabla 3.6**, se le descontó a la “*Tasa de dosis (calculada) (nGy h⁻¹)*” el valor de la radiación cósmica en cada punto (segunda columna numérica) y el valor de fondo del equipo de medida MC-71 (9,2 nGy h⁻¹).

El grado de desviación porcentual (en valor absoluto) del valor analógico respecto al calculado a partir de las cuentas detectadas en 600 segundos, es de promedio un 7,3%, presentando una media geométrica de 5,3%, una desviación estándar de 4,8% y unos valores extremos de 20,2% (máximo) y 0,3% (mínimo), lo que muestra la bondad de la estimación de la tasa de dosis que hace el indicador analógico del aparato.

El valor promedio para Tenerife, de 66,7 nGy h⁻¹, resulta ser un 21,3 % superior a los 55 nGy h⁻¹, que se establece en el *Informe UNSCEAR-88*^[1] como media mundial de la tasa de dosis absorbida en aire debida a radiación terrestre gamma ambiental. Para el conjunto de las 104 determinaciones realizadas en esta isla se obtuvo una media geométrica de 57,9 nGy h⁻¹ y una desviación estándar aritmética de 35,4 nGy h⁻¹.

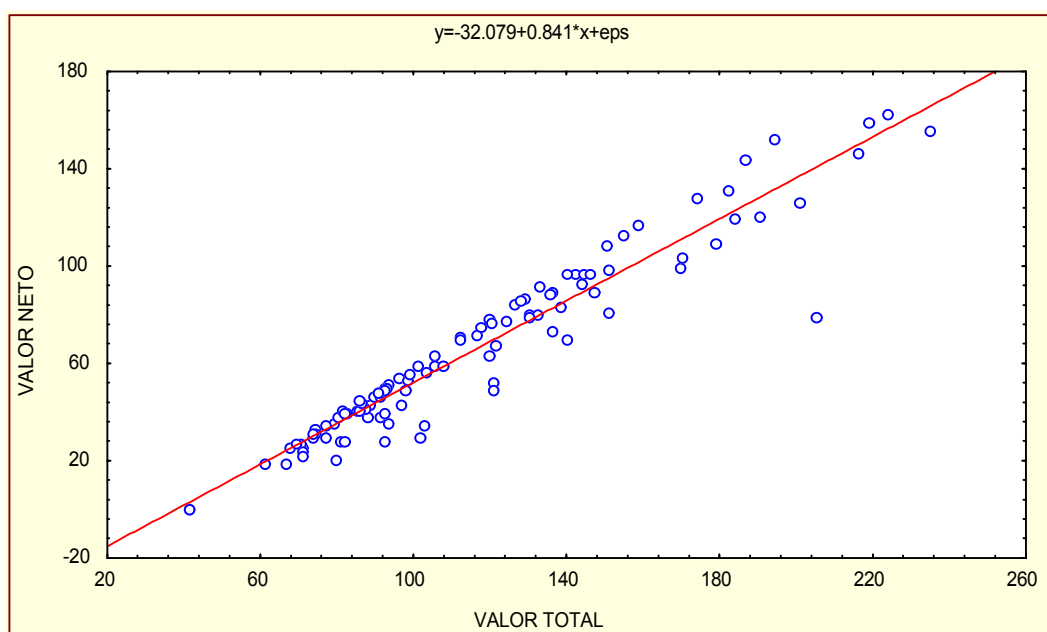
Del análisis estadístico de los datos presentados en la **Tabla 3.6** anterior, se concluye que existe asociación entre los valores netos de la tasa de dosis medida en aire (descontada la radiación cósmica) en la isla de Tenerife y sus valores totales, calculados a partir de las medidas realizadas en cada punto. En la **Tabla 3.7** se observa que, aunque los valores promedio son diferentes, existe una alta covariación entre las medias ($p \ll 0,05$).

Tabla 3.7.- Comparación entre los valores totales medidos de la tasa de dosis absorbida gamma ambiental en Tenerife y sus valores netos (deducida la radiación cósmica y el fondo del equipo), en nGy h⁻¹.

Tasa de dosis (nGy h ⁻¹)	Media aritmética	Desviación estándar	r ²	p
<i>Valor Total</i>	117,4	40,7	0,9208	< 0,001
<i>Valor Neto</i>	66,7	35,4		

La recta que aparece en la **Figura III.3**, y cuya expresión matemática se indica en la parte superior, representa gráficamente la correlación lineal existente entre los valores netos y los valores totales medidos en los 104 lugares de la isla de Tenerife.

Figura III.3.- Correlación entre tasa de dosis en aire neta y total (en nGy h⁻¹), medida a 1 metro del suelo, en la isla de Tenerife.



Se puede establecer que el error de estimación de las medidas realizadas con el detector MC-71 es de $\pm 3,23 \text{ nGy h}^{-1}$, con un nivel de confianza del 95%. Para calcularlo se han tenido en cuenta, no sólo los 104 valores obtenidos en la primera campaña en la isla de Tenerife (**Tabla 3.6**), sino también las 10 medidas llevadas a cabo en la isla de La Gomera (**Tabla 3.15**) y las 6 hechas en El Hierro (**Tabla 3.20**) con este mismo equipo. La media aritmética del valor neto de estas 120 determinaciones fue $62,73 \text{ nGy h}^{-1}$.

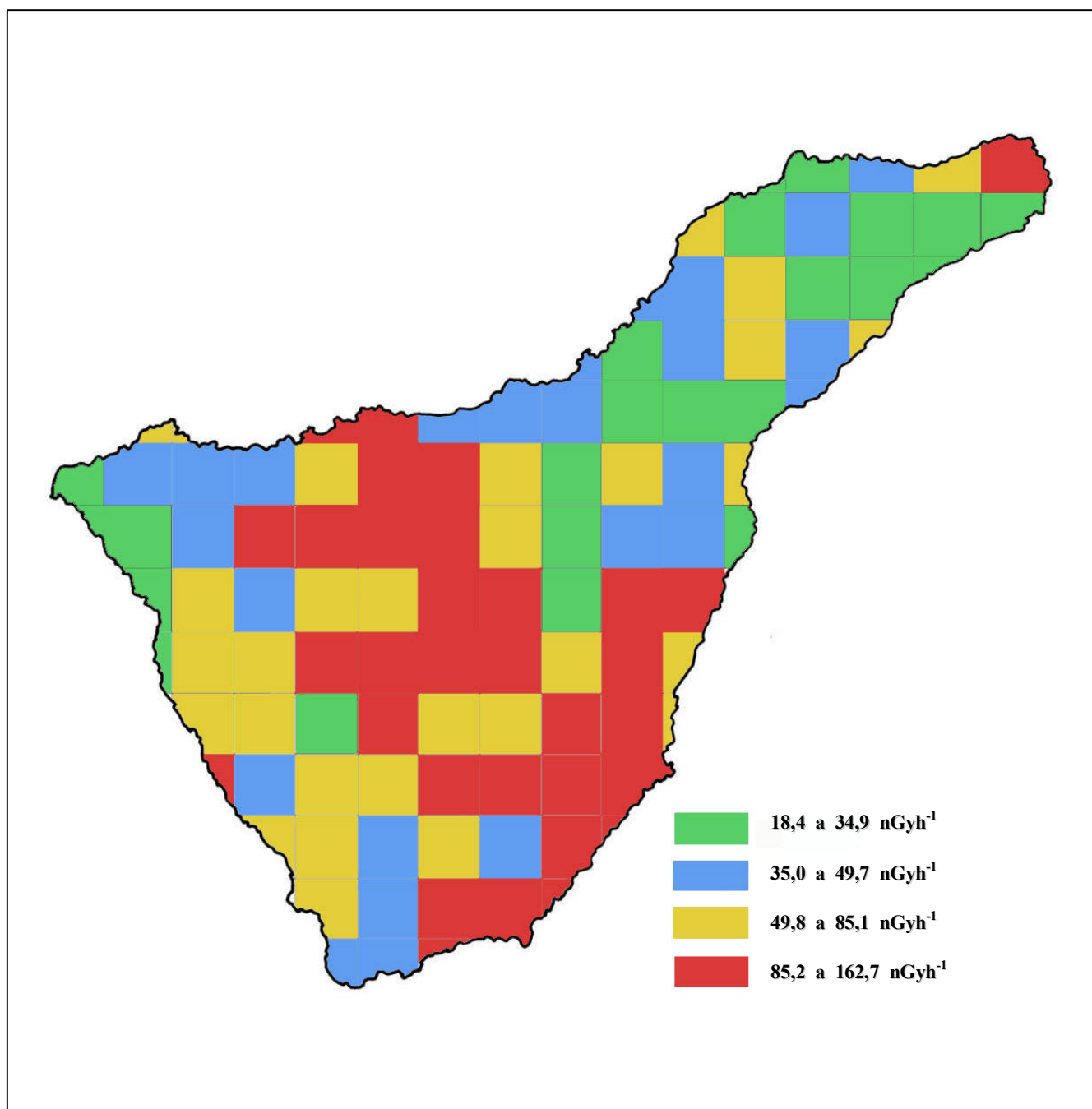
En la **Tabla 3.8** se agrupan los resultados finales (valores netos) de estas 120 medidas de la tasa de dosis absorbida en aire debida a radiación gamma ambiental en 4 tramos de valores diferentes, correspondientes a los cuatro *cuartiles* que se establecen entre el mínimo de $18,4 \text{ nGy h}^{-1}$, que se obtuvo en la montaña de “*El Bronco (La Laguna)*” (Cuadro 12 de la isla de Tenerife), y el valor máximo de $162,7 \text{ nGy h}^{-1}$ medido también en Tenerife en el Cuadro 77, en “*Hoya Negra (Boca de Tauce/Pico Viejo del Teide)*”. Se indican los límites inferior y superior de los cuatro intervalos fijados, así como el color que, en la representación gráfica del nivel de tasa de dosis neta existente en las diferentes zonas de las islas, se ha asignado a cada uno de los cuartiles.

Tabla 3.8.- Límites inferior y superior (en nGy h^{-1}) de los cuatro *cuartiles* en que se han agrupado los resultados de la medida con el detector MC-71 de la tasa de dosis absorbida en aire en las islas de Tenerife, La Gomera y El Hierro.

CUARTIL	Mínimo (nGy h^{-1})	Máximo (nGy h^{-1})	COLOR
1°	18,4	34,9	Verde
2°	35,0	49,7	Azul
3°	49,8	85,1	Amarillo
4°	85,2	162,7	Rojo

La **Figura III.4** ilustra los niveles medidos de tasa de dosis gamma en aire, de origen terrestre, en cada una de los cuadrados en que se dividió la isla de Tenerife, mediante los cuatro colores diferentes que se indican en la **Tabla 3.8** y que identifican los intervalos en que se han agrupado los resultados de las 104 determinaciones llevadas a cabo en esta isla.

Figura III.4.- Mapa radiométrico de la tasa de dosis absorbida en aire, debida a radiación gamma ambiental terrestre, de la isla de Tenerife.



La distribución de valores de tasa de dosis, que se han considerado homogéneos para todo el cuadrado donde se encuentra el punto de medida, muestra una distribución aparentemente aleatoria en toda la isla. Sin embargo, la observación de esta figura señala una tendencia a encontrarnos con valores de tasa de dosis superiores en la zona central y sur de Tenerife.

En concreto, si se compara el valor medio de la tasa de dosis correspondiente a zonas de superficie similar, de unos 15 x 25 Km², en la zona central (cuadrados 49 a 53, 58 a 62 y 67 a 71) y en la noreste (cuadrados 1 a 18 y 21 a 24), zona esta última donde vive la mayor parte de la población de la isla de Tenerife (ciudades de Santa Cruz y La Laguna), se puede constatar que el valor medio de la tasa de dosis neta en la parte centro (109,2 nGy h⁻¹) es 2,7 veces superior que en la región noreste (41,1 nGy h⁻¹). En la **Figura III.5** se pueden ver los cuadrados considerados en cada una de las zonas y en la **Figura III.6** se representan, coloreadas de acuerdo con el criterio establecido, las dos zonas de la isla que se comparan. En la **Tabla 3.9** se resumen los valores medios de tasa de dosis en aire correspondientes a cada una de ellas.

Figura III.5.- Zonas de la isla de Tenerife (centro y noreste) en las que se comparan los valores medios de la tasa neta de dosis ambiental.

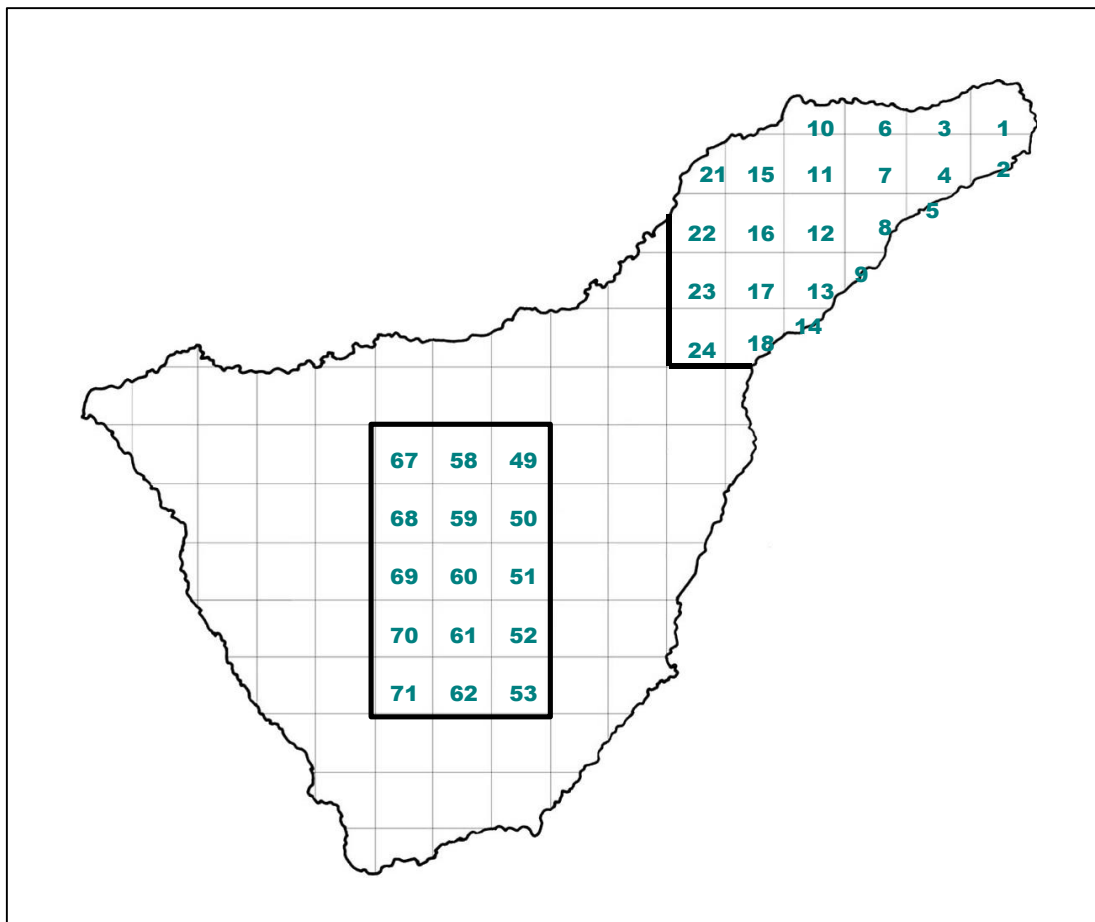


Figura III.6.- Valores medios de tasa de dosis ambiental neta en la zona central y noreste de la isla de Tenerife.

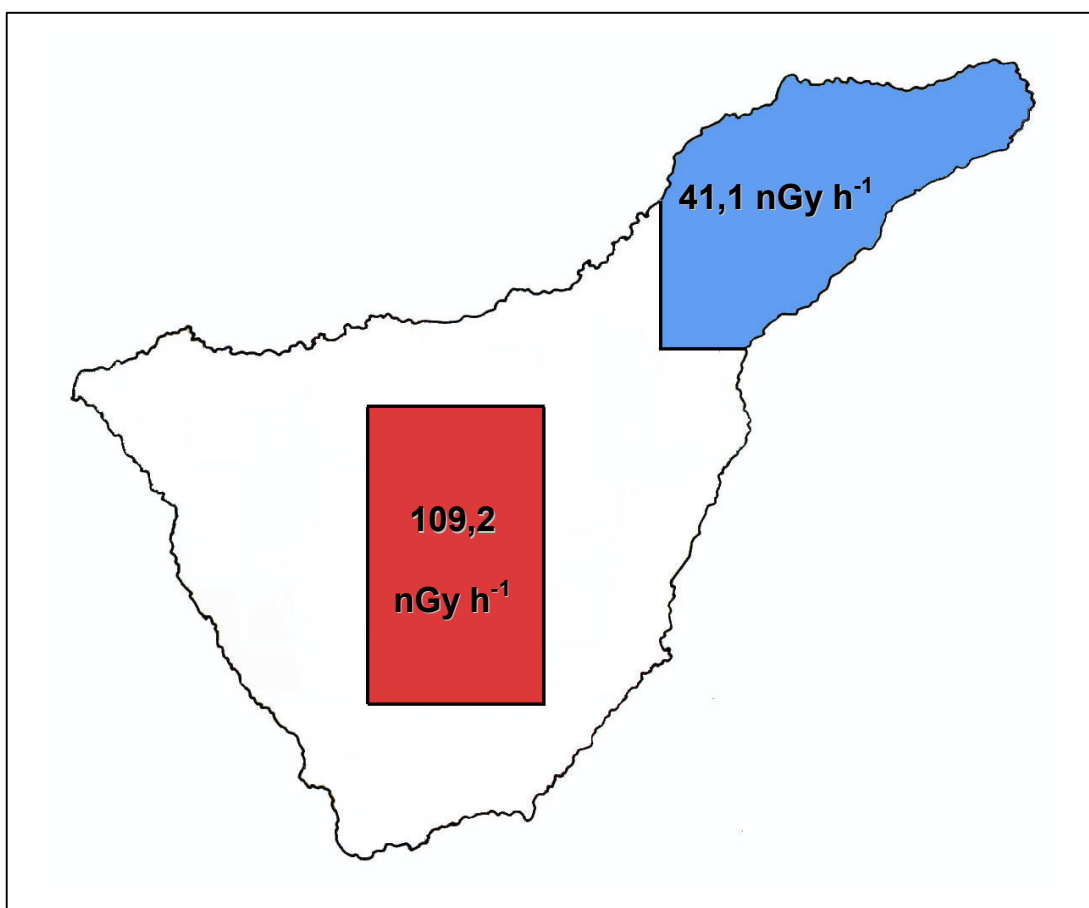


Tabla 3.9.- Valores medios y desviación estándar de la tasa de dosis absorbida en aire total y neta, en la zona central y noreste de la isla de Tenerife.

Tasa de dosis en aire (nGy h ⁻¹)	Zona noreste		Zona centro	
	Valor total	Valor neto	Valor total	Valor neto
Media aritmética	86,8	41,1	177,4	109,2
Desviación estándar	19,3	18,6	34,3	30,5

III.2.5.- MEDIDAS EN LAS ISLAS MENORES OCCIDENTALES

Se desarrolló un programa de medidas de la tasa de dosis absorbida en lugares seleccionados en cada una de las tres islas más occidentales del Archipiélago Canario. Los puntos de medida fueron los centros de los cuadrados que se obtuvieron al superponer una cuadrícula de 10 km de lado sobre los mapas de dichas islas. En la isla de El Hierro, dado su irregular forma y su pequeña superficie, se optó por una división en rectángulos de 7 km de base (dirección este-oeste) por 10 km de altura (dirección norte-sur).

En total se realizaron 29 medidas con la cámara de ionización RSS-112, distribuidas de la siguiente manera: 13 en La Palma, 10 en La Gomera y 6 en El Hierro. En estas dos últimas islas también se llevaron a cabo medidas con el detector MC-71, de forma simultánea y en los mismos puntos que las anteriores.

Se calculó el error de estimación correspondiente a los 29 valores obtenidos con el equipo de medida RSS-112, que fue $\pm 3,74 \text{ nGy h}^{-1}$, con un nivel de confianza del 95%. El promedio de las 29 determinaciones de la tasa de dosis neta en aire en estas tres islas, fue $42,34 \text{ nGy h}^{-1}$.

Este valor promedio representa únicamente el 67% del resultado de la media aritmética de los 120 valores obtenidos con el medidor Geiger-Müller MC-71 en el conjunto de estas tres islas más la de Tenerife, que fue significativamente superior: $62,73 \pm 3,23 \text{ nGy h}^{-1}$. Ello se debe al mayor peso de las medidas llevadas a cabo en Tenerife (104 valores en total), isla donde se midieron los más altos niveles de radiación gamma ambiental.

Distribuyendo todos los datos obtenidos con el detector RSS-112 en sus *cuartiles*, se establecen cuatro tramos de valores que se representan por un color diferente, tal como aparece en la **Tabla 3.10**, a fin de mostrar de una forma más ilustrativa los niveles existentes en cada una de las zonas de las islas. En la misma tabla se indican los límites inferior y superior de cada *cuartil*.

Tabla 3.10.- Límites de los *cuartiles* en que se distribuyeron los resultados de las medidas, realizadas con el detector RSS-112, de la tasa de dosis absorbida en aire (valores netos) en las islas de La Palma, La Gomera y El Hierro.

CUARTIL	Mínimo (nGy h ⁻¹)	Máximo (nGy h ⁻¹)	COLOR
1º	11	30	Verde
2º	31	39	Azul
3º	40	52	Amarillo
4º	53	118	Rojo

III.2.5.1- RADIACIÓN AMBIENTAL GAMMA EN AIRE EN LA ISLA DE LA PALMA

Para conocer este dato, se realizaron un total de 13 medidas de radiación gamma en aire, utilizando la cámara de ionización de alta presión RSS-112. Doce de las medidas se realizaron en los puntos preseleccionados y la número 13 se obtuvo en el borde del cráter del Volcán Teneguía, por el posible interés que podía tener la medida en un terreno volcánico de muy reciente constitución. Los valores obtenidos de la tasa de dosis absorbida a 1 metro del suelo, se presentan en la **Tabla 3.11** siguiente.

Tabla 3.11.- Resultados de las medidas de tasa de dosis absorbida en aire, debida a radiación gamma, en la isla de La Palma.

Cuadro (²)	LUGAR	Medida con RSS-112 (nGy h ⁻¹)	Radiación Cósmica (nGy h ⁻¹)	Tasa de dosis neta (nGy h ⁻¹)
1	Las Cabezadas (Barlovento)	92	37	52
2	El Corcho (Puntallana)	88	41	44
3	Miranda	82	35	44
4	San Juan de Belmaco	99	36	60
5	Franceses	72	42	27
6	Borde de la Caldera de Taburiente	82	68	11
7	Llanos del Paso	100	41	56
8	Los Campanarios	127	51	73
9	Volcán de San Antonio	110	39	68
10	Llano Negro (Garafía)	71	41	27
11	Llanos de Lance (Tijarafe)	89	45	41
12	Las Angustias	71	35	33
13	Borde del Cráter del Volcán Teneguía	91	36	52

(²) Cuadros mostrados en el **Anexo II**.

El promedio de los valores resultantes de tasa de dosis neta en aire de radiación gamma fue de 45,2 nGy h⁻¹, presentando una desviación estándar de 17,6 nGy h⁻¹, con un valor máximo de 73 nGy h⁻¹ (Cuadro 8, Mapa 2: “*Los Campanarios*”) y un mínimo de 11 nGy h⁻¹ obtenido en el “*Borde de la Caldera de Taburiente*” (Cuadro 6, Mapa 2). Curiosamente, este último punto es el de mayor altitud de todos los seleccionados, lo que hace que el valor de radiación cósmica calculado sea también el mayor de todos (68 nGy h⁻¹).

Por otra parte, de los datos presentados en la **Tabla 3.11** anterior se infiere que existe asociación entre los valores netos de la tasa de dosis medida en aire (descontada la radiación cósmica) en la isla de La Palma y sus valores totales (medida a 1 metro del

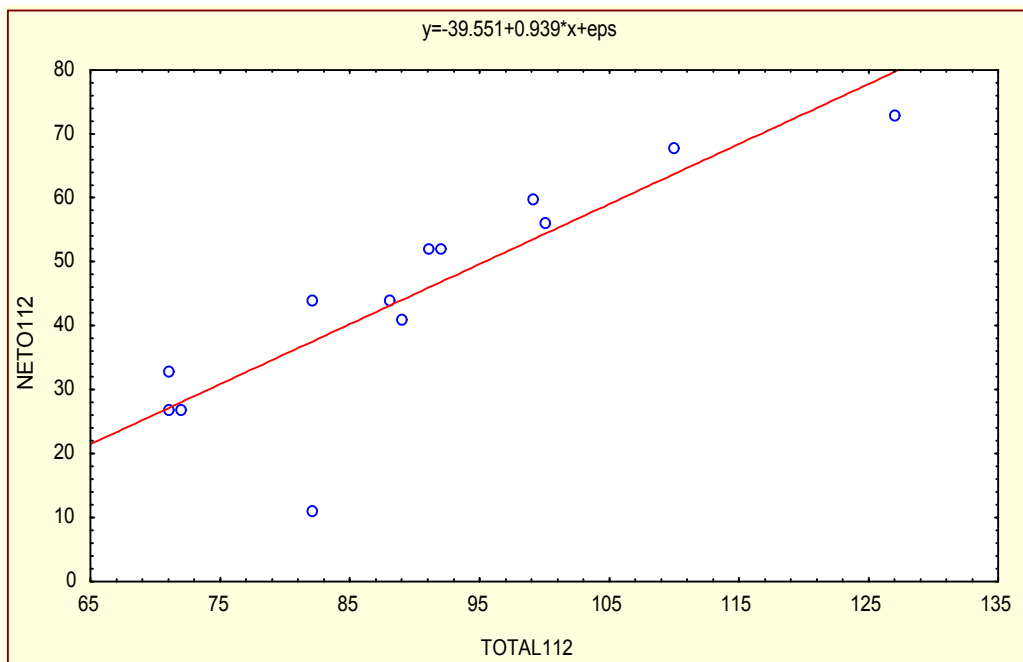
suelo, descontando únicamente el fondo del equipo). En la **Tabla 3.12** se observa la alta covariación que hay entre los resultados de ambas determinaciones ($p \ll 0,05$).

Tabla 3.12.- Comparación entre los valores totales (radiación terrestre más cósmica) de la tasa de dosis absorbida gamma ambiental en La Palma y sus valores netos (radiación total menos cósmica), en nGy h⁻¹.

Tasa de dosis (nGy h ⁻¹)	Media aritmética	Desviación estándar	r ²	p
<i>Valor Total</i>	90,3	17,6	0,7418	0,000155
<i>Valor Neto</i>	45,2	16,2		

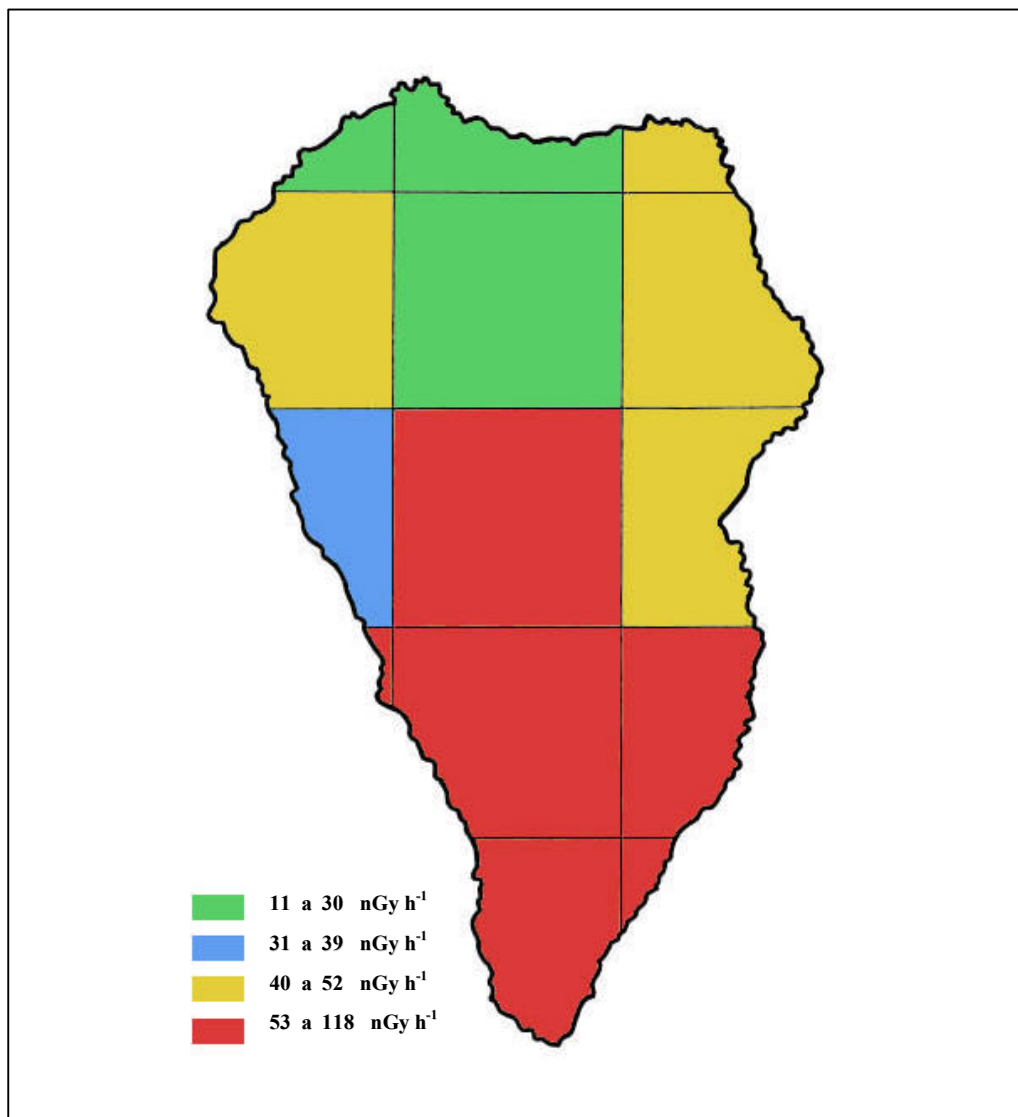
La recta que aparece en la **Figura III.7**, cuya expresión matemática también se indica, representa gráficamente la correlación lineal existente entre los valores netos (sólo contribución de la radiación terrestre) y los valores totales medidos (incluye la aportación de la radiación cósmica) en las 13 determinaciones llevadas a cabo en la isla de La Palma.

Figura III.7.- Correlación entre tasa de dosis en aire neta y total (en nGy h⁻¹), medida a 1 metro del suelo, en la isla de La Palma.



La **Figura III.8** es una representación de los niveles medios de radiación ambiental gamma en aire, descontada la componente cósmica, en la que se asigna el color correspondiente a cada uno de los cuadrados en que se dividió la isla de La Palma.

Figura III.8.- Mapa de la tasa de dosis absorbida en aire (valores netos) de la isla de La Palma.



También se presentan, en la **Tabla 3.13**, otros datos que se obtuvieron durante la medida en cada uno de los lugares y que permiten una más completa caracterización de la misma.

Tabla 3.13.- Datos geográficos, cronológicos y de las condiciones medioambientales en que se realizaron las medidas en la isla de La Palma.

Cuadro (²)	LUGAR	Altitud (m)	Hora	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Presión (mmHg)
1	Las Cabezadas (Barlovento)	480	16:41	31,6	48,3	722
2	El Corcho (Puntallana)	770	13:11	27,8	52,6	719
3	Miranda	340	17:31	25,7	71,4	729
4	San Juan de Belmaco	390	18:51	24,3	66,1	731
5	Franceses	880	18:38	29,8	50,1	694
6	Borde de Caldera de Taburiente	2351	11:42	21,2	16,4	581
7	Llanos del Paso	825	18:15	27,0	56	690
8	Los Campanarios	1520	12:26	25,6	57,6	698
9	Volcán de San Antonio	650	17:28	25,1	68,5	707
10	Llano Negro (Garafia)	780	19:52	24,8	16,7	695
11	Llanos de Lance (Tijarafe)	1120	13:19	27,0	13,2	679
12	Las Angustias	300	11:48	25,2	58,5	737
13	Borde de Cráter del Volcán Teneguía	400	19:44	22,4	78,5	729

(²) Indicados en el Anexo II.

No se ha encontrado relación significativa entre los parámetros meteorológicos y los valores de tasa de dosis neta medidos. En la **Tabla 3.14** se resumen los estadísticos resultantes de las asociaciones entre los valores obtenidos de tasa de dosis en aire y la temperatura, humedad y presión en cada punto de medida.

Tabla 3.14.- Relaciones entre los valores netos de la tasa de dosis en aire en la isla de La Palma y los parámetros meteorológicos en el momento y lugar de la medida.

La Palma	Media aritmética	Desviación estándar	r ²	p
<i>Tasa de dosis (nGy h⁻¹)</i>	45,2	17,6	0,0225	0,6250
<i>Temperatura (°C)</i>	26,0	2,8		
<i>Tasa de dosis (nGy h⁻¹)</i>	45,2	17,6	0,3990	0,0206
<i>Humedad (%)</i>	50,3	21,7		
<i>Tasa de dosis (nGy h⁻¹)</i>	45,2	17,6	0,2955	0,0548
<i>Presión (mm Hg)</i>	700,8	40,5		

La **Figura III.9**, la **Figura III.10** y la **Figura III.11** presentan gráficamente las posibles asociaciones entre los valores netos de la tasa de dosis en aire obtenidos con la cámara de ionización de alta presión RSS-112 y la temperatura, humedad y presión, respectivamente, en el lugar y en el momento de la medida.

Figura III.9.- Relación entre la tasa de dosis absorbida en aire en la isla de La Palma y la temperatura (en °C) en el momento de la medida.

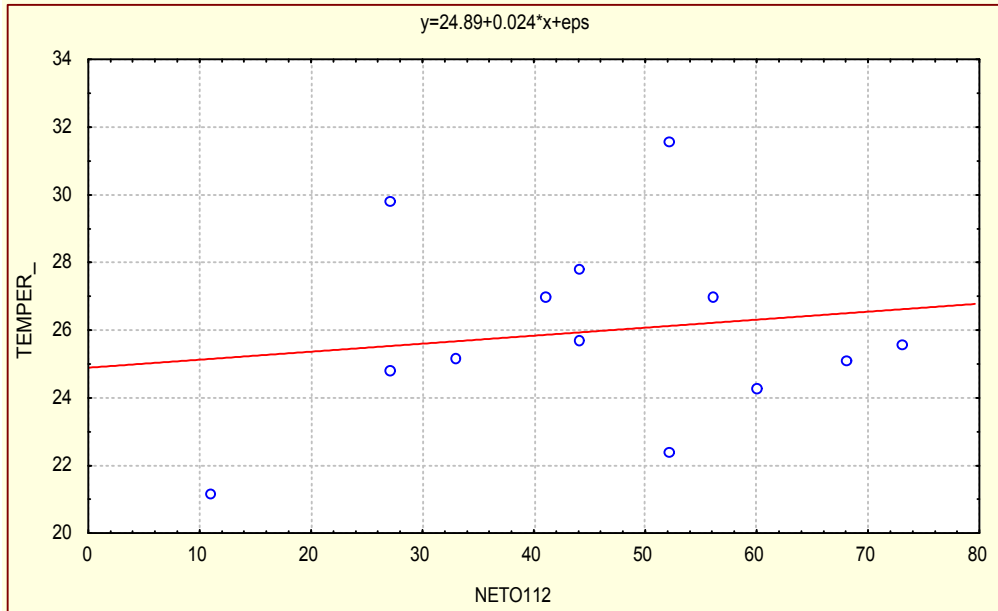


Figura III.10.- Relación entre la tasa de dosis absorbida en aire en la isla de La Palma y la humedad (en %) existente en el lugar de la medida.

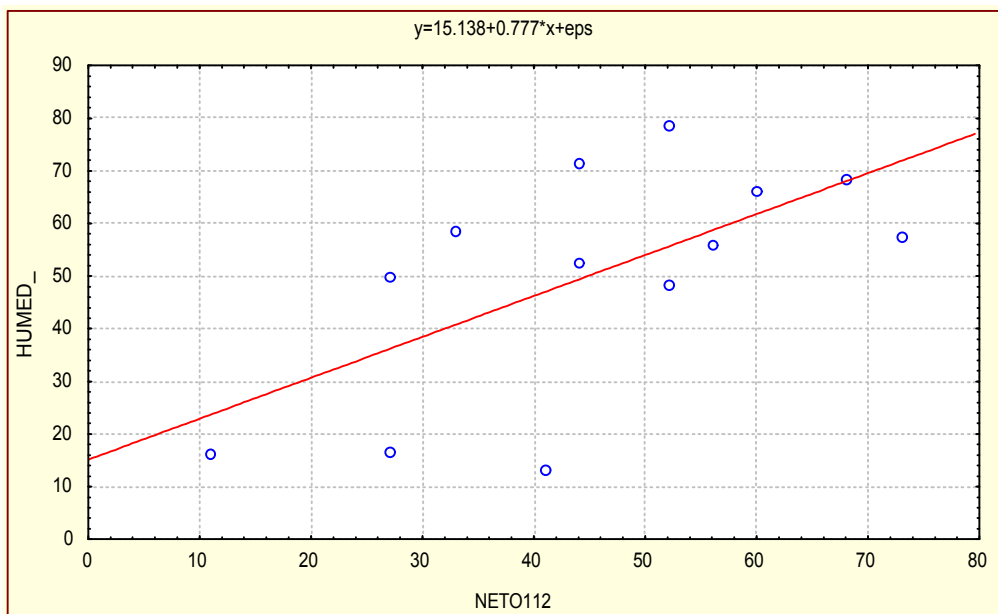
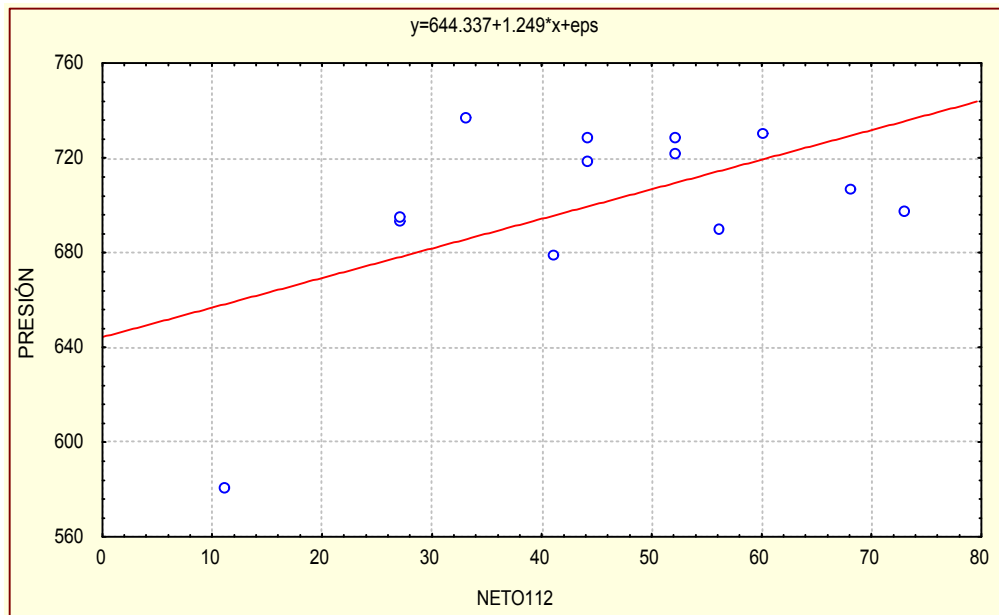


Figura III.11.- Relación existente entre la tasa de dosis absorbida en aire en la isla de La Palma y la presión atmosférica (en mmHg) en el lugar y en el momento de la medida.



III.2.5.2- RADIACIÓN AMBIENTAL GAMMA EN AIRE EN LA ISLA DE LA GOMERA

En la isla de La Gomera se realizaron 10 medidas de radiación ambiental gamma en aire, utilizando el detector Geiger-Müller MC-71 y la Cámara de Ionización de Alta Presión RSS-112, en el centro geométrico de los cuadrados de 10 x 10 km² resultantes de aplicar el procedimiento de selección de lugares de muestreo ya indicado. Los valores finales de la radiación gamma ambiental en aire de origen terrestre, en nGy h⁻¹, figuran en la **Tabla 3.15**.

Tabla 3.15.- Resultados de las medidas de tasa de dosis absorbida en aire, debida a radiación gamma, en la isla de La Gomera.

Cua-dro (³)	Medida de campo Con MC-71 (Cuentas en 600 s)	Medida con MC71: Indicador analógico (nGyh ⁻¹)	Medida con RSS-112 (nGyh ⁻¹)	Radiación cósmica (nGyh ⁻¹)	Tasa de dosis neta con MC-71 (nGyh ⁻¹)	Tasa de dosis neta con RSS-112 (nGyh ⁻¹)
1	766	60	61	34	21,3	24
2	973	90	84	37	35,7	44
3	891	75	72	36	29,8	33
4	1781	150	157	36	104,7	118
5	922	85	74	45	23,4	26
6	1182	100	99	41	49,3	55
7	896	75	69	35	31,2	31
8	958	80	79	42	29,4	34
9	987	90	79	34	39,9	42
10	1024	95	82	47	30,0	32

(³) El número de los cuadros se refiere a los indicados en el mapa de la isla del **Anexo III**.

El valor máximo encontrado corresponde al punto situado en el Cuadro 4 (“*Tamargada – Vallehermoso*”) con un valor neto de tasa de dosis ambiental en aire (medido con la cámara RSS-112) de 118 nGy h⁻¹. El mínimo se midió en el barrio de “*Casas del Moralito de Hermigua*” con 24 nGy h⁻¹ (Cuadro 1). La media aritmética de todos los valores netos obtenidos fue de 43,9 nGy h⁻¹, con una desviación estándar de 27,6 nGy h⁻¹.

Con el detector Geiger-Müller MC-71 se midieron los valores máximos y mínimos (104,7 y 21,3 nGy h⁻¹, respectivamente) en los mismos puntos que con la RSS-112. El valor medio de todas las medidas realizadas en La Gomera con este equipo fue de 39,5 nGy h⁻¹ y la desviación estándar resultó ser 24,3 nGy h⁻¹.

Las diferencias encontradas entre las medidas con los dos detectores distintos fueron, en valor absoluto, como máximo de 13,3 nGy h⁻¹ (en “*Tamargada – Vallehermoso*”, punto donde se obtuvo el mayor valor de toda la isla), con una diferencia media, en valor absoluto, de 4,5 nGy h⁻¹. La mayor desviación porcentual

entre las medidas con los dos equipos se detectó en el punto situado en el Cuadro 2 (“*Las Casetas- San Sebastián*”), con un 18,9% de diferencia entre las dos medidas (44 y 35,7 nGy h⁻¹, respectivamente con la RSS-112 y con el MC-71). La diferencia promedio entre las medidas de ambos instrumentos fue 9,7%.

El resultado del análisis estadístico de los datos que se presenta en la **Tabla 3.16**, corrobora la asociación existente entre los valores netos de la tasa de dosis absorbida en aire en la isla de La Gomera, obtenidos utilizando uno u otro instrumento de medida. Se observa que, aunque los valores promedio son diferentes, existe una alta covariación entre las medias ($p \ll 0,05$).

Tabla 3.16.- Comparación entre los valores netos de tasa de dosis absorbida gamma ambiental en La Gomera, medidos con el detector Geiger Müller MC-71 y con la cámara de ionización de alta presión RSS-112.

Tasa de dosis neta (nGy h ⁻¹)	Media aritmética	Desviación estándar	r ²	p
<i>MC-71</i>	39,5	24,3	0,9939	< 0,001
<i>RSS-112</i>	43,9	27,6		

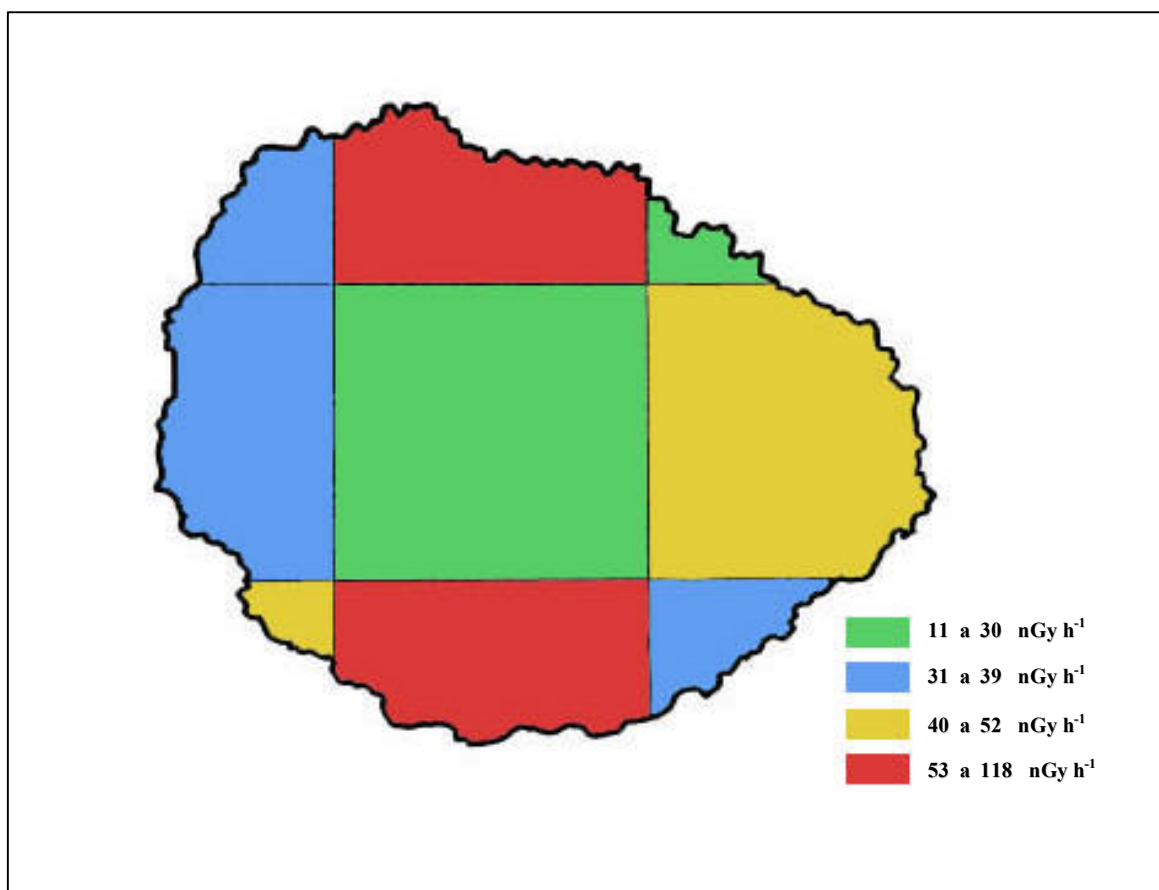
Por otra lado, de los datos presentados en la **Tabla 3.17** siguiente se concluye que, también para la isla de La Gomera, existe relación significativa ($p \ll 0,05$) entre los valores netos de la tasa de dosis en aire a 1 metro del suelo (descontada la radiación cósmica y el fondo del equipo) y los valores totales medidos con la cámara de ionización de alta presión RSS-112.

Tabla 3.17.- Comparación entre los valores totales, medidos con la cámara RSS-112 en la isla de La Gomera, de la tasa de dosis gamma ambiental en aire y sus valores netos.

Tasa de dosis (nGy h ⁻¹) medida con RSS-112	Media aritmética	Desviación estándar	r ²	p
<i>Valor Total</i>	85,6	27,0	0,9709	< 0,001
<i>Valor Neto</i>	43,9	27,6		

En la **Figura III.12** se presenta el mapa de la isla de La Gomera en el que se ha asignado el color correspondiente (**Tabla 3.10**) a cada uno de los cuadrados en que se dividió su territorio de acuerdo con los niveles medios (valores netos, descontada la componente cósmica y el fondo del aparato de medida) de radiación ambiental gamma en aire, obtenidos con la cámara de ionización de alta presión RSS-112.

Figura III.12.- Mapa de los niveles medios de la tasa de dosis absorbida de radiación gamma en aire (valores netos), medidos en la isla de La Gomera.



En la **Tabla 3.18**, se presenta el conjunto de datos que se han tomado como indicadores de las condiciones en que fueron realizadas las medidas anteriores.

Tabla 3.18.- Datos sobre las condiciones meteorológicas, geográficas y temporales en las medidas realizadas en la isla de La Gomera.

Cuadro (³)	Mapa	LUGAR	Altitud (m)	Hora	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Presión (mm Hg)
1	4	Casas El Moralito (Hermigua)	230	9:48	15,7	66,1	747
2	1	Las Casetas (San Sebastián)	480	8:13	13,3	72	734
3	2	Los Revolcaderos (S. Sebastián)	405	11:38	23,5	34	731
4	3	Tamargada (Vallehermoso)	410	11:43	20,5	52,2	735
5	4	Monte del Cedro	1080	8:31	9,6	79,5	674
6	5	Alajeró	750	9:50	12	63	705
7	3	Tazo	295	13:41	18,9	48	739
8	4	Arure	895	15:22	13,2	62	774
9	5	La Mejora (La Dama)	270	17:14	21,3	43	741
10	4	Laguna Grande	1245	18:56	5,4	96	742

(³) Representados en el mapa del **Anexo III**.

No se ha encontrado, tal como ocurrió en las islas de Tenerife y La Palma, ningún tipo de relación entre estos parámetros meteorológicos y los valores de tasa de dosis neta obtenidos. Como demostración de ello, se presentan en la **Tabla 3.19** los resultados estadísticos de la comparación de los cuatro conjuntos de valores.

Tabla 3.19.- Relaciones entre los valores netos de la tasa de dosis en aire en la isla de La Gomera, medidos con la RSS-112, y los valores de los parámetros meteorológicos en el momento y en el lugar de la medida.

La Gomera	Media aritmética	Desviación estándar	r ²	p
<i>Tasa de dosis (nGy h⁻¹)</i>	43,9	27,6	0,0936	0,3898
<i>Temperatura (°C)</i>	15,3	5,7		
<i>Tasa de dosis (nGy h⁻¹)</i>	43,9	27,6	0,0475	0,5451
<i>Humedad (%)</i>	61,6	18,3		
<i>Tasa de dosis (nGy h⁻¹)</i>	43,9	27,6	0,00002	0,9896
<i>Presión (mm Hg)</i>	732,2	26,5		

III.2.5.3- RADIACIÓN AMBIENTAL GAMMA EN AIRE EN LA ISLA DE EL HIERRO

En la isla de El Hierro, utilizando el mismo procedimiento, se delimitaron 6 regiones geográficas rectangulares de 7 x 10 km², en cuyo centro geométrico se llevó a cabo la medida de dosis gamma en aire y la recogida de las muestras de suelo.

Tabla 3.20.- Resultados de las medidas de tasa de dosis absorbida en aire, debida a radiación gamma, en la isla de El Hierro.

Cua-dro (⁴)	Medida de campo con MC-71 (Cuentas en 600 s)	Medida con MC71: Indicador analógico (nGyh ⁻¹)	Medida con RSS-112 (nGyh ⁻¹)	Radiación cósmica (nGyh ⁻¹)	Tasa de dosis neta con MC-71 (nGyh ⁻¹)	Tasa de dosis neta con RSS-112 (nGyh ⁻¹)
1	944	85	77	37	33,3	37
2	896	77	72	41	25,2	28
3	985	100	77	44	29,7	30
4	1015	85	77	35	41,2	39
5	828	75	69	40	20,5	26
6	1169	105	94	50	39,2	41

(⁴) Ver los cuadros en el mapa del **Anexo IV**.

En las medidas hechas con la cámara RSS-112, se observa un valor máximo de 41 nGy h⁻¹ en el Cuadro 6 (“*Chorro del Jable – Frontera*”) y un mínimo en el punto situado en el Cuadro 5 (“*Montaña de la Virgen – Sabinosa*”) con 26 nGy h⁻¹. La media fue de 33,5 nGy h⁻¹ y la desviación estándar de 6,3 nGy h⁻¹.

Con el detector Geiger MC-71 se obtuvieron los siguientes valores: máximo: 41,2 nGy h⁻¹ (Cuadro 4: “*Gorona del Lajial – La Restinga*”); mínimo: 20,5 nGy h⁻¹ (Cuadro 5: “*Montaña de la Virgen – Sabinosa*”); media aritmética: 31,5 nGy h⁻¹; desviación estándar: 8 nGy h⁻¹.

Las diferencias medias en valor absoluto de las medidas con ambos detectores fueron, en valor absoluto, de 2,7 nGy h⁻¹, lo que porcentualmente representa un 8,7% de desviación. La máxima diferencia entre las dos series de medidas significó un 21,2% (Cuadro 5) y la mínima un 1% (Cuadro 3: “*Gorona de los Difuntos*”, midiendo 30 y 29,7 nGy h⁻¹ respectivamente con RSS-112 y con MC-71).

En todo caso, existe una asociación significativa ($p < 0,05$) entre los resultados de las medidas (valores netos de tasa de dosis, una vez descontado el valor de fondo de los aparatos y la componente cósmica) realizadas con el detector Geiger-Müller MC-71 y con la cámara de ionización de alta presión RSS-112, tal como se desprende de los estadísticos que aparecen en la **Tabla 3.21**.

Tabla 3.21.- Comparación entre los valores netos de tasa de dosis absorbida gamma ambiental en El Hierro, medidos con el detector Geiger Müller MC-71 y con la cámara de ionización de alta presión RSS-112.

Tasa de dosis neta (nGy h ⁻¹)	Media aritmética	Desviación estándar	r ²	p
<i>MC-71</i>	31,5	8,0	0,9148	0,0028
<i>RSS-112</i>	33,5	6,3		

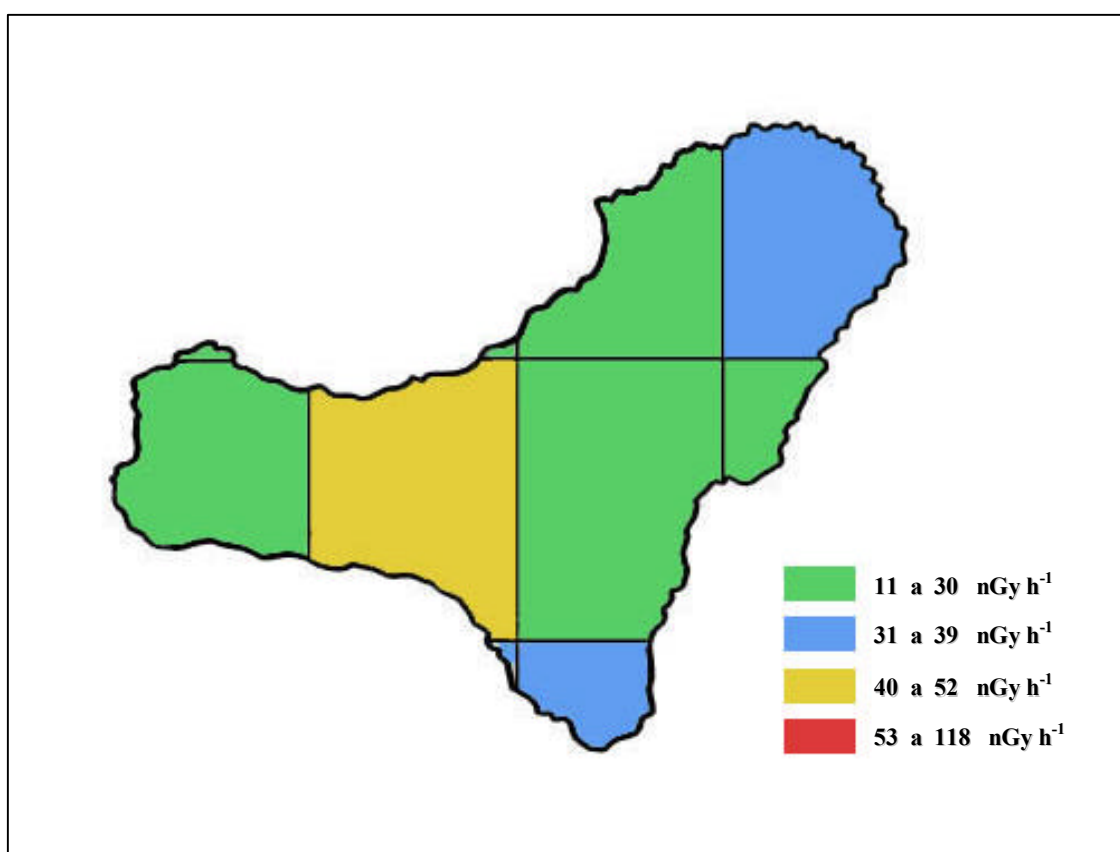
En la **Tabla 3.22**, se presentan los resultados de comparar los valores netos de la tasa de dosis absorbida en aire de origen terrestre y los valores totales (que incluyen la aportación de la radiación cósmica y el valor de fondo del aparato) medidos con la cámara de ionización de alta presión RSS-112, en la isla de El Hierro.

Tabla 3.22.- Comparación entre los valores totales medidos de la tasa de dosis absorbida gamma ambiental en El Hierro y sus valores netos, en nGy h⁻¹

Tasa de dosis (nGy h ⁻¹) medida con RSS-112	Media aritmética	Desviación estándar	r ²	p
<i>Valor Total</i>	77,7	8,7	0,6236	0,0617
<i>Valor Neto</i>	33,5	6,3		

En la **Figura III.13** se representa el mapa de El Hierro dividido en los cuadrados seleccionados, que han sido coloreados de acuerdo al criterio establecido (**Tabla 3.10**) para cada uno de los cuatro *cuartiles* en que se agruparon todas las medidas realizadas con la HPIC RSS-112 en las islas más occidentales la provincia.

Figura III.13.- Mapa radiométrico de la tasa de dosis absorbida en aire (valores netos) debida a radiación gamma ambiental de origen terrestre, de la isla de El Hierro.



Los trabajos de campo en esta isla se desarrollaron con las condiciones meteorológicas que se indican en la **Tabla 3.23**. Se presentan, como en las demás islas, otros datos característicos del lugar y del momento en que se realizó la medida.

Tabla 3.23.- Datos sobre las condiciones meteorológicas y temporales de las medidas realizadas en la isla de El Hierro.

Cuadro (4)	Ma-Pa	LUGAR	Altitud (m)	Hora	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Presión (mm Hg)
1	1	Valverde	470	8:00	14,1	81	720
2	1	Las Montañetas (Guarazoca)	790	10:47	13,9	63,9	696
3	2	Gorona de los Difuntos	1050	16:28	10,9	81,4	673
4	5	Gorona del Lajial (La Restinga)	300	18:05	17	62,2	655
5	4	Montaña de la Virgen (Sabinosa)	735	13:23	15,8	66,3	704
6	4	Chorro del Jable (Frontera)	1450	12:01	8,3	82,3	647

(4) Se pueden ver en el **Anexo IV**.

Tampoco en El Hierro se encontró ninguna relación entre los valores de estos parámetros meteorológicos (**Tabla 3.23**) y los de la tasa de dosis neta obtenidos. En la **Tabla 3.24** se muestran los resultados de la comparación estadística de éstos con los datos de temperatura, humedad y presión atmosférica en el momento y lugar de la medida.

Tabla 3.24.- Relaciones entre los valores netos de la tasa de dosis en aire en la isla de El Hierro, medidos con la RSS-112, y los valores de los parámetros meteorológicos.

El Hierro	Media aritmética	Desviación estándar	r^2	p
<i>Tasa de dosis (nGy h⁻¹)</i>	33,5	6,3	0,0768	0,5950
<i>Temperatura (°C)</i>	13,3	3,2		
<i>Tasa de dosis (nGy h⁻¹)</i>	33,5	6,3	0,1299	0,4828
<i>Humedad (%)</i>	72,8	9,6		
<i>Tasa de dosis (nGy h⁻¹)</i>	33,5	6,3	0,2906	0,2697
<i>Presión (mm Hg)</i>	682,5	28,8		

III.2.6.- SEGUNDA CAMPAÑA DE MEDIDAS EN LA ISLA DE TENERIFE

En la segunda campaña desarrollada en la isla de Tenerife se trató, por un lado, de conocer la posible influencia de la época del año en que se hicieron las medidas y, por otro, realizar un estudio comparativo de los resultados de las determinaciones llevadas a cabo con dos diferentes detectores, el Geiger-Müller (G-M) MC-71 y la Cámara de Ionización de Alta Presión (HPIC) RSS-112. Este último estudio comparativo se presenta y desarrolla más adelante, en el *Apartado III.8* de esta memoria.

Para conseguir este doble objetivo, y de acuerdo con los criterios fijados (ver *Apartado II.2.2.4* del capítulo: "*Material y Método*"), se seleccionaron 17 de los 104 puntos medidos con anterioridad.

Los nuevos valores obtenidos con el Geiger-Müller MC-71 para cada uno de los puntos de muestreo se reseñan (“*Campaña 2ª*”) en la siguiente **Tabla 3.25**, donde también aparece el resultado de la medida realizada en la primera campaña en ese mismo lugar.

Tabla 3.25.- Valores de tasa de dosis ambiental gamma en aire, medidos con el detector MC-71 en dos periodos diferentes, en 17 puntos de la isla de Tenerife.

Cuadro (¹)	Lugar	Medida en 600 s (cuentas)		Indicador analógico (nGyh-1)		Tasa de dosis neta (nGyh-1)	
		Campaña 1ª	Campaña 2ª	Campaña 1ª	Campaña 2ª	Campaña 1ª	Campaña 2ª
1	Chamorga	1.620	1.546	140	140	89,2	82,9
9	Santa Cruz de Tenerife	1.094	1.063	100	97	49,9	47,3
11	Moquinal - El Batán	1.045	939	90	87	37,8	28,8
12	El Bronco (La Laguna)	791	833	70	75	18,4	21,9
16	El Portezuelo	1.230	1.346	110	117	56,3	66,1
17	La Esperanza	1.546	1.432	140	135	79,9	70,3
18	Barranco Hondo	876	918	75	85	29,5	33,1
19	Candelaria	1.144	1.268	110	117	54,1	64,5
37	Abades	1.789	1.745	160	157	108,4	104,7
39	Cuesta de la Villa (La Orotava)	943	1.106	90	92	35,2	48,9
46	Parque Eólico de Granadilla	1.836	1.745	165	160	112,3	104,7
47	La Vera (Puerto de la Cruz)	1.103	1.148	95	100	49,6	53,4
49B	Montaña del Alto-B (Portillo)	1.793	1.802	160	160	80,7	81,5
59	Montaña Blanca (Teide)	2.787	2.807	225	257	155,4	157,1
65	Sta Catalina (S.Juan Rambla)	2.214	2.326	210	205	144,2	153,6
69	Llano de Ucanca	2.012	1.982	180	182	99,2	96,6
87	Altos de Chío	1.108	1.160	100	97	35,1	39,4
0	<i>Alta Mar (2,7 Km Radazul)</i>	<i>489</i>	<i>490</i>	<i>40</i>	<i>45</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>

(¹) Se refieren a los mismos cuadros que aparecen en el mapa del **Anexo I**.

El segundo conjunto de medidas, que se llevó a cabo 18 meses después de las primeras, permitió observar la relativa constancia de los valores de tasa de dosis de radiación cósmica ya medidos y los valores de radiación de fondo de los equipos indicada anteriormente, de acuerdo con las mediciones realizadas en alta mar (700 m de profundidad) en un punto situado a unos 2.700 metros de la costa de Tenerife, frente al puerto deportivo de Radazul.

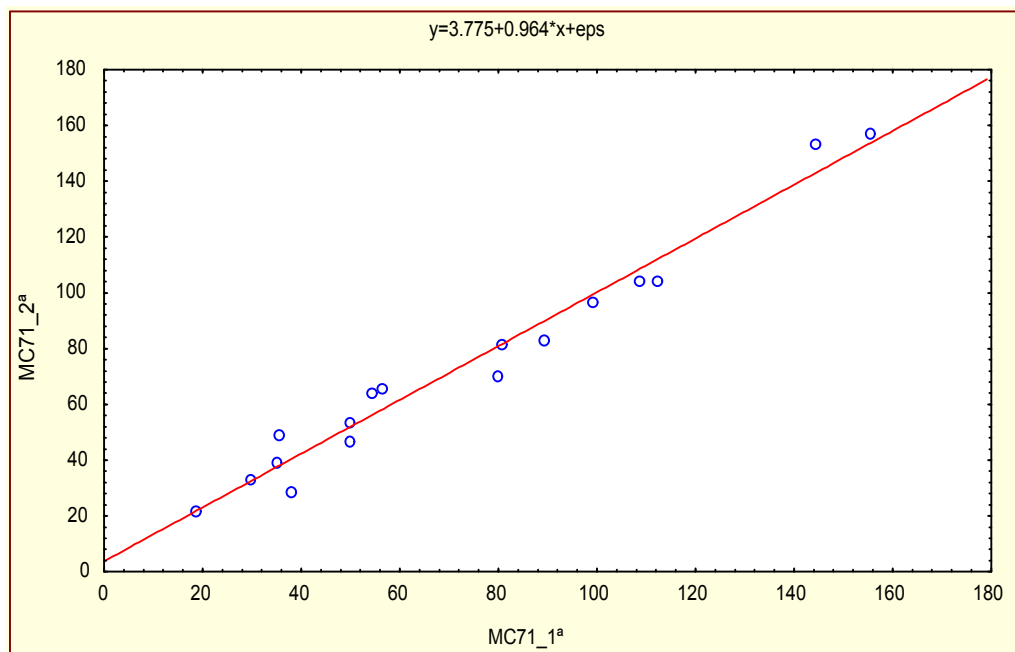
En la **Tabla 3.26** se indican los estadísticos básicos que permiten establecer la existencia de asociación significativa entre los valores obtenidos en ambas campañas.

Tabla 3.26.- Comparación entre los valores netos obtenidos de la tasa de dosis absorbida debida a radiación gamma ambiental, en fechas diferentes, en la isla de Tenerife.

Tasa de dosis neta (nGy h ⁻¹)	Media aritmética	Desviación estándar	r ²	p
<i>1ª Campaña</i>	72,7	40,6	0,9691	< 0,001
<i>2ª Campaña</i>	73,8	39,8		

La relación lineal existente entre los valores netos medidos en ambas campañas, se representa gráficamente en la **Figura III.14**.

Figura III.14.- Representación gráfica de la relación entre los valores obtenidos de tasa de dosis neta en aire en dos intervalos de tiempo diferentes, en la isla de Tenerife.



Comparando los datos obtenidos en las dos distintas fechas, se encuentra una diferencia entre sus valores medios de 1,1 nGy h⁻¹, con una desviación máxima de 13,7 nGy h⁻¹ (cuadro 39: “Cuesta de la Villa – La Orotava”) y una diferencia mínima de 0,8 nGy h⁻¹ (cuadro 49B: “Montaña del Alto B – El Portillo”).

La variación media porcentual resultó ser, en valor absoluto, de un 10,8 % con una desviación estándar del 10,3 %. Únicamente se observan variaciones máximas superiores al 16 % en las medidas realizadas en el cuadro 11 (“*Moquinal – El Batán*”) con un - 31,3 % de diferencia entre las medidas realizadas en las dos campañas y en el cuadro 39 “*Cuesta de la Villa – La Orotava*”) en el que se obtuvo una desviación del 28 %.

En la **Tabla 3.27**, se especifican la temperatura (en grados centígrados), la humedad (en %) y la presión atmosférica (en mm de Hg) medidas en cada uno de los lugares de realización de medidas en la segunda campaña.

Tabla 3.27.- Condiciones meteorológicas en el momento de las medidas, en la segunda campaña llevada a cabo en la isla de Tenerife.

Cua- dro (1)	Lugar	Altitud (m)	Hora	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Presión (mmHg)
1	Chamorga	570	18.25	16	79	722
9	Santa Cruz de Tenerife	88	20.14	24	52	757
11	Moquinal-El Batán	828	16.47	18	80	695
12	El Bronco (La Laguna)	630	10.30	28,5	29	709
16	El Portezuelo	540	11.18	31	16,5	716
17	La Esperanza	773	16.30	20	66,5	696
18	Barranco Hondo	330	16.19	33,5	10,5	735
19	Candelaria	72	17.01	36	20	755
37	Abades	80	17.48	27,5	40,5	756
39	Cuesta de la Villa (La Orotava)	315	12.12	28	58,5	736
46	Parque Eólico de Granadilla	70	18.37	30	34,5	757
47	La Vera (Puerto de la Cruz)	220	13.00	31,5	49	743
49B	Montaña del Alto-B (El Portillo)	2070	18.02	23	22,5	596
59	Montaña Blanca (Teide)	2420	19.10	20,5	21,5	576
65	Sta Catalina (S.Juan Rambla)	150	13.51	30,5	38	749
69	Llano de Ucanca	2050	19.09	26,5	26,5	598
87	Altos de Chío	1380	16.49	32	12,5	736
0	<i>Alta Mar (2,7 Km de Radazul)</i>	<i>-700</i>	<i>11.55</i>	<i>21,5</i>	<i>71</i>	<i>766</i>

(1) Corresponden a los mismos cuadros del mapa de la isla de Tenerife del **Anexo I**.

A partir de los datos anteriores, no se encuentra ninguna relación significativa ($p \gg 0,05$) entre las condiciones meteorológicas en el momento y lugar de la medida y los valores netos obtenidos de la tasa de dosis en aire en esta segunda campaña. En la **Tabla 3.28** se presentan los estadísticos que se obtienen de comparar estos valores con los datos medidos de los tres parámetros atmosféricos.

Tabla 3.28.- Relaciones entre los valores netos de la tasa de dosis en aire en la isla de Tenerife, obtenidos en la segunda campaña de medidas, y los valores de los parámetros meteorológicos.

Tenerife (2ª Campaña)	Media aritmética	Desviación estándar	r^2	p
<i>Tasa de dosis neta (nGy h⁻¹)</i>	73,8	39,8	0,0213	0,5763
<i>Temperatura (°C)</i>	26,8	5,7		
<i>Tasa de dosis neta (nGy h⁻¹)</i>	73,8	39,8	0,0146	0,6445
<i>Humedad (%)</i>	38,6	22,2		
<i>Tasa de dosis neta (nGy h⁻¹)</i>	73,8	39,8	0,1108	0,1917
<i>Presión (mm Hg)</i>	707,8	59,8		

III.2.7.- MEDIDAS EN CONTINUO CON LA HPIC RSS-112 DURANTE LARGOS PERIODOS DE TIEMPO

Se realizó una medida en continuo durante casi 10 días (9 días 21 horas y 56 minutos), de forma ininterrumpida, con la Cámara de Ionización de Alta Presión RSS-112, en un terreno de la localidad de Geneto (La Laguna) donde, a excepción de los propios cambios meteorológicos, se aseguró su preservación de cualquier otra perturbación externa.

Los resultados obtenidos demuestran la constancia en la medida que proporciona este equipo, así como su independencia con las variaciones no extremas de las condiciones meteorológicas y de los cambios horarios, no presentando alteraciones que pudieran achacarse al paso del día a la noche.

El conjunto de los 57.104 valores, obtenidos de forma automática a intervalos de 15 segundos, desde las 18:04 de día 28 de diciembre de 1.993 hasta las 16:00 horas del 7 de enero de 1.994, se muestran en la **Tabla 3.29**, en unidades de tasa de dosis absorbida en aire (nGy h^{-1}) y agrupados en dos intervalos horarios: desde las 7 a las 19 horas (día) y el resto (noche).

Tabla 3.29.- Valores medios, máximos, mínimos y de la desviación estándar de la tasa de dosis absorbida en aire total (incluida radiación cósmica y valor de fondo del equipo), obtenidos durante los días y las noches de la medida en continuo realizada con el detector RSS-112.

FECHA	HORARIO	Media aritmética (nGy h⁻¹)	Máximo (nGy h⁻¹)	Mínimo (nGy h⁻¹)	Desviación estándar (nGy h⁻¹)
28.12.93	Día (*)	95,2	105	85	3,6
	Noche	95,1	129	84	3,7
29.12.93	Día	95,2	113	85	3,5
	Noche	95,1	108	85	3,6
30.12.93	Día	95,1	112	84	3,5
	Noche	96,5	120	86	3,5
31.12.93	Día	96,5	109	83	3,5
	Noche	95,9	110	85	3,6
01.01.94	Día	95,9	115	86	3,5
	Noche	95,9	117	83	3,6
02.01.94	Día	96,1	114	84	3,6
	Noche	96,6	118	86	3,6
03.01.94	Día	96,5	114	85	3,6
	Noche	97,2	111	86	3,6
04.01.94	Día	96,7	115	84	3,5
	Noche	96,2	117	85	3,7
05.01.94	Día	95,6	108	85	3,4
	Noche	96,4	112	83	3,6
06.01.94	Día	96,9	110	85	3,6
	Noche	96,9	112	86	3,7
07.01.94	Día (**)	95,4	110	84	3,6
	Noche				
TOTAL	DÍA	96,1	115	83	3,5
	NOCHE	96,2	129	83	3,6

(*) Desde las 18:04 a las 19:00 horas del 28.12.93.

(**) Desde las 7:00 a las 16:00 horas del 07.01.94.

Los valores presentados son los que se obtienen directamente en el equipo RSS-112, no habiéndose descontado el fondo de la cámara de ionización (3 nGy h⁻¹) ni el valor de la tasa de dosis absorbida en aire debida a la radiación cósmica en el punto de medida (“Geneto-La Laguna”: 38 nGy h⁻¹).

En la **Tabla 3.30** se indican los estadísticos descriptivos básicos que representan el conjunto de valores obtenidos en el lugar en que se realizaron las determinaciones en este periodo de casi 10 días. Estos datos confirman las condiciones de reproducibilidad de la Cámara de Ionización de Alta Presión utilizada. El error estándar poblacional se ha obtenido para un nivel de confianza del 95% ($E.E.P. = [\sigma / (2n)^{1/2}] * Z$; siendo $\sigma = 3,6$; $Z = 1,96$ y $n = 16.383$, las medidas no repetidas en el tiempo).

Tabla 3.30.- Media aritmética, máximo, mínimo, error estándar poblacional y desviación estándar de las medidas realizadas (valores totales) de forma continua con la cámara de ionización RSS-112 durante 10 días.

NÚMERO DE MEDIDAS	Intervalo entre medidas (seg.)	Media aritmética	Error estándar poblacional	Máximo	Mínimo	Desviac. estándar
		(nGy h ⁻¹)				
57.104	15	96,1	0,039	129	83	3,6

III.3.- CONCENTRACIÓN DE RADIONÚCLIDOS EMISORES GAMMA EN SUELOS

III.3.1.- INTRODUCCIÓN

En cada uno de los lugares seleccionados para realizar las determinaciones de la tasa de dosis en aire, se procedió a la recogida de una muestra del suelo contenida en el volumen delimitado por un cuadrado dibujado en la superficie del terreno, de 25 x 25 cm de lados, y una profundidad de 5 cm.

A partir del análisis por espectrometría gamma de las muestras (tratadas como se indica en el Capítulo de "*Material y Método*"), se obtuvieron los valores correspondientes a la concentración existente de diferentes radionúclidos naturales y artificiales (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{238}U , ^{212}Pb y ^{214}Bi) en cada una de ellas.

III.3.2.- MEDIDAS EN LA ISLA DE TENERIFE

Los suelos de Tenerife tienen un origen eminentemente volcánico, como consecuencia de erupciones de carácter fisural, y naturaleza basáltica, con presencia predominante de basaltos alcalinos, traquitas y fonolitas, sobre todo en la parte central de la isla correspondiente a la zona de Las Cañadas y del Teide ^[74].

El análisis de los suelos representativos de las 103 zonas o cuadros en que resultó dividida la isla de Tenerife, fue llevado a cabo en el Laboratorio Voor Kernfysica de la Universidad de Gante, por espectrometría gamma mediante detector de germanio intrínseco, utilizando para colocar la muestra contenedores plásticos de geometría cilíndrica herméticamente cerrados con tapa roscada y volumen de 115 ml.

Estas determinaciones dieron como resultado el conjunto de valores de la **Tabla 3.31**, que representan la actividad específica (en Bq kg^{-1}) de los radionúclidos presentes en las muestras recogidas en los 103 lugares elegidos. El número total de muestras es 104 porque en el cuadro nº 49 ("*Montaña del Alto - El Portillo*"), se recogió una porción de suelo adicional en la ladera de un cono volcánico, con origen geológico más reciente que el resto de la zona, que se encuentra en dicho lugar (punto 49-B).

Tabla 3.31.- Resultados de las medidas de la concentración de radionúclidos emisores gamma presentes en los suelos de la isla de Tenerife.

Cua- dro (1)	[Ra-226] (Bq kg ⁻¹)	s	[Th-232] (Bq kg ⁻¹)	s	[K-40] (Bq kg ⁻¹)	s	[Cs-137] (Bq kg ⁻¹)	s	[Cs134] (Bq kg ⁻¹)	s
1	43.4	2.9	52.8	4.4	924.9	70.9	11.3	1.1	.0	.0
2	16.7	1.3	20.0	2.1	308.5	28.3	39.8	1.2	.0	.0
3	23.1	1.9	32.9	3.1	736.5	58.5	13.2	.7	.0	.0
4	7.3	.8	14.8	1.6	239.4	20.7	1.9	.3	.0	.0
5	17.7	1.5	20.7	2.1	191.1	19.8	15.9	.6	.0	.0
6	35.7	2.7	53.5	5.0	239.3	26.3	22.5	1.0	.0	.0
7	20.9	1.5	23.5	2.1	181.0	19.5	8.6	.5	.0	.0
8	9.0	.9	11.9	1.4	214.7	20.2	2.4	.3	.0	.0
9	61.3	3.9	71.8	5.8	531.7	44.0	.0	.0	.0	.0
10	17.7	2.2	24.1	3.5	383.4	41.6	(*)	-	(*)	-
11	51.5	3.1	60.4	?	313.3	29.8	4.6	.6	.0	.0
12	13.0	1.5	26.5	2.7	141.6	22.9	70.3	2.2	.0	.0
13	40.7	2.5	50.9	4.1	389.5	31.7	8.4	.5	3.1	.4
14	41.5	2.6	52.1	4.6	456.8	40.2	.0	.0	.0	.0
15	24.1	1.7	28.8	2.6	370.5	30.8	4.2	.5	.0	.0
16	53.3	3.5	59.9	5.1	663.7	52.5	15.2	.8	.0	.0
17	104.0	6.4	100.1	7.8	579.2	47.9	12.2	1.0	6.5	1.2
18	25.3	2.1	33.0	3.3	232.7	26.5	50.4	1.9	.0	.0
19	54.3	4.6	79.9	7.1	867.0	73.3	(*)	-	(*)	-
20	12.4	.9	15.5	1.5	243.7	21.2	3.2	.3	.0	.0
21	52.0	4.3	67.4	6.5	456.1	51.7	(*)	-	(*)	-
22	50.1	3.7	55.3	5.0	511.8	42.6	13.1	.7	.0	.0
23	74.4	4.1	71.3	5.3	200.4	22.8	35.0	.8	3.8	.4
24	21.7	1.9	25.4	3.0	209.0	?	100.9	2.5	.0	.0
25	36.6	3.7	60.5	5.9	380.4	34.5	(*)	-	(*)	-
26	31.1	2.4	33.8	3.1	430.0	35.3	.0	.0	.0	.0
27	51.2	4.1	69.6	6.5	776	61.3	(*)	-	(*)	-
28	47.7	2.8	63.7	4.9	724.4	55.2	5.9	.5	4.6	.6
29	36.2	2.3	41.6	3.4	496.6	40.5	35.0	1.0	2.0	.4
30	37.6	2.7	30.3	3.2	190.6	25.5	22.5	1.1	.0	.0
31	20.2	1.4	28.0	2.6	224.2	24.0	41.6	1.1	.0	.0
32	39.3	2.8	52.9	4.7	652.8	50.4	15.5	1.0	.0	.0
33	22.1	2.3	32.3	3.3	306.0	32.3	(*)	-	(*)	-
34	62.7	3.7	73.9	6.0	952.9	72.1	10.4	.7	4.0	.5
35	67.4	5.4	84.3	8.0	853.1	73.3	(*)	-	(*)	-
36	64.1	3.9	111.6	9.6	1410.3	103.0	1.5	.6	7.8	.7
37	55.4	3.5	75.8	6.2	1176.8	89.2	.0	.0	.0	.0
38	40.7	3.2	54.5	4.6	543.5	44.7	43.4	1.6	.0	.0
39	32.8	2.5	37.3	3.3	302.8	26.7	4.7	.5	2.5	.5

40	43.1	2.6	40.6	3.4	290.2	28.1	52.9	.9	2.8	.5
41	35.3	2.3	38.1	3.6	212.6	25.2	14.9	.8	.0	.0
42	23.7	1.6	28.8	2.6	335.4	27.1	5.0	.4	.0	.0
43	31.4	2.3	45.1	3.9	438.7	36.3	9.5	.8	.0	.0
44	49.5	3.0	80.7	6.3	835.6	62.3	6.4	.6	5.6	.6
45	40.8	4.0	67.9	6.5	1003.1	88.1	(*)	-	(*)	-
46	41.8	3.0	73.8	5.9	1251.2	93.8	6.5	.7	.0	.0
47	61.1	3.5	32.2	2.9	523.3	42.5	28.5	1.0	2.4	.5
48	61.3	3.7	67.4	5.4	1044.2	81.4	.0	.0	.0	.0
49	28.5	2.2	30.8	3.0	417.2	35.7	.0	.0	.0	.0
49B	59.4	3.4	75.6	5.6	787.0	58.1	7.7	.5	3.6	.4
50	78.5	4.5	110.5	8.4	1233.7	95.1	18.5	1.2	.0	.0
51	48.9	3.3	94.8	7.2	1090.6	81.7	10.7	.9	6.9	.8
52	54.7	3.2	77.6	5.9	703.3	52.6	15.3	.5	.0	.0
53	56.0	3.3	86.9	6.8	1084.1	84.0	.0	.0	4.8	.8
54	40.3	2.5	55.7	4.5	550.0	50.0	.0	.0	.0	.0
55	52.3	2.8	67.6	4.9	1098.9	79.2	8.2	.4	3.7	.3
56	26.0	1.6	36.5	2.8	484.2	37.7	2.3	.3	2.6	.3
57	56.7	3.8	78.9	6.5	918.9	71.0	10.8	.8	5.6	.8
58	82.3	4.6	105.5	8.2	1296.6	94.3	31.2	1.2	6.5	.9
59	73.2	5.4	91.4	9.7	1146.3	109.4	(*)	-	(*)	-
60	45.8	3.0	86.6	6.8	1488.8	110.6	6.9	.8	.0	.0
61	45.8	3.6	65.3	5.8	553.5	53.3	(*)	-	(*)	-
62	89.7	5.0	107.9	8.2	1195.1	92.9	9.1	.6	6.0	.8
63	49.3	3.0	69.2	5.4	767.2	67.5	9.6	.8	3.1	.8
64	46.4	3.0	71.2	5.8	955.5	71.6	7.4	.6	4.2	.7
65	49.4	4.5	71.2	6.5	973.2	79.8	(*)	-	(*)	-
66	76.2	4.5	67.0	5.7	885.3	70.9	23.1	1.0	.0	.0
67	80.9	4.4	79.2	5.9	1407.3	101.1	15.1	.7	4.7	.6
68	92.0	5.6	90.1	7.6	1379.4	105.5	.0	.0	.0	.0
69	58.5	4.4	63.8	5.5	899.1	79.5	(*)	-	(*)	-
70	36.8	2.2	63.3	5.0	1211.1	88.1	17.1	.5	.0	.0
71	67.3	3.7	87.1	6.6	790.8	59.8	6.5	.5	3.7	.5
72	50.6	3.2	55.6	4.5	623.8	51.8	20.6	.9	3.8	.5
73	23.1	2.6	33.3	3.6	456.1	45.2	(*)	-	(*)	-
74	48.8	3.0	52.6	4.4	822.6	64.2	11.8	.6	3.7	.5
75	83.7	5.2	93.6	7.3	1313.5	98.3	34.1	1.7	.0	.0
76	55.2	3.5	50.7	4.0	464.9	40.0	22.5	.9	.0	.0
77	63.3	5.4	92.7	8.2	1027.2	86.9	(*)	-	(*)	-
78	50.0	3.1	38.2	3.5	730.7	58.0	24.5	1.3	.0	.0
79	51.5	4.2	70.1	6.6	781.8	61.8	(*)	-	(*)	-
80	12.5	1.1	14.4	1.5	236.9	20.6	3.2	.3	.0	.0
81	32.0	2.4	47.4	4.2	737.9	58.8	12.4	.9	.0	.0
82	39.9	2.7	57.2	5.3	1030.8	77.8	.0	.0	.0	.0
83	39.5	2.4	64.8	5.2	811.0	59.9	.0	.0	.0	.0
84	27.0	2.5	23.9	3.0	620.2	53.2	(*)	-	(*)	-

85	42.0	2.7	37.9	3.4	397.8	37.4	30.8	1.0	.0	.0
86	32.9	2.3	28.1	3.0	606.5	50.1	21.7	.0	.0	.0
87	31.3	2.0	30.0	2.5	517.9	42.2	27.7	.8	.0	.0
88	42.2	3.0	63.0	5.2	738.4	58.2	16.9	1.0	.0	.0
89	40.1	2.5	58.3	4.6	705.4	53.3	21.6	.7	.0	.0
90	33.9	2.3	47.1	3.9	666.1	51.4	5.0	.5	.0	.0
91	36.8	2.5	51.8	4.2	696.6	53.6	.0	.0	.0	.0
92	50.4	3.1	68.5	5.4	949.1	71.9	6.2	.6	.0	.0
93	24.2	1.9	37.6	3.3	276.7	26.8	26.1	.8	.0	.0
94	17.6	1.6	19.0	1.9	296.0	30.1	12.7	.8	.0	.0
95	36.8	2.3	31.7	2.8	603.9	45.3	15.5	.7	.0	.0
96	44.6	3.0	44.9	3.9	698.1	55.1	32.3	1.6	.0	.0
97	47.3	2.8	52.1	4.3	737.1	55.6	5.7	.5	3.3	.4
98	46.6	3.3	55.5	4.6	845.8	64.6	6.2	.7	.0	.0
99	32.3	3.3	51.3	5.0	586.3	58.2	(*)	-	(*)	-
100	22.8	2.4	30.8	3.4	378.3	36.6	(*)	-	(*)	-
101	11.5	1.2	15.4	1.7	163.8	18.7	17.0	.9	.0	.0
102	24.2	1.6	21.0	2.2	439.1	36.1	.0	.0	.0	.0
103	23.3	1.8	25.3	2.6	270.1	23.3	23.0	.8	.0	.0

(¹) Los números de cuadro se refieren a los representados en el mapa de la isla del **Anexo I**.

(*) No se dispone de datos acerca de las concentraciones de ¹³⁷Cs y ¹³⁴Cs en los lugares indicados.

En la siguiente **Tabla 3.32** se indican valores estadísticos descriptivos (promedios, máximo, mínimo, desviación estándar y mediana) de los resultados de las medidas realizadas, para cada uno de los radionúclidos considerados.

Tabla 3.32.- Valores estadísticos asociados a las medidas de la concentración de radionúclidos gamma presentes en los suelos de la isla de Tenerife.

Tenerife	[Ra-226] (Bq kg⁻¹)	s	[Th-232] (Bq kg⁻¹)	s	[K-40] (Bq kg⁻¹)	s	[Cs-137] (Bq kg⁻¹)	s	[Cs-134] (Bq kg⁻¹)	s
MEDIA ARITM.	43,4	3,0	54,6	4,7	658,5	54,1	15,5	0,7	1,3	0,2
MEDIA GEOM.	38,7	2,8	48,4	4,3	563,6	48,6	-	-	-	-
MÁXIMO	104,0	6,4	111,6	9,7	1488,8	110,6	100,9	2,5	7,8	1,2
MÍNIMO	7,3	0,8	11,9	1,4	141,6	18,7	0,0	0,0	0,0	0,0
DESV. STD.	19,5	1,1	24,6	1,9	344,2	24,3	16,7	0,5	2,1	0,3
MEDIANA	41,9	2,9	54,0	4,6	622,0	52,5	11,1	0,7	0,0	0,0

En la isla de Tenerife es donde se midieron los niveles (valores medios) de concentración de los radionúclidos ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K más elevados de todas las islas de la provincia occidental^[101], destacando la actividad específica del ^{40}K , cuya media aritmética en esta isla ($658,5 \text{ Bq kg}^{-1}$) es superior al doble de cualquiera de los valores promedio obtenidos en el resto de las islas ($227,6 \text{ Bq kg}^{-1}$ en La Palma, $317,4 \text{ Bq kg}^{-1}$ en La Gomera y $262,4 \text{ Bq kg}^{-1}$ en El Hierro).

En general, los valores promedio obtenidos en la isla de Tenerife son superiores a los que dan los *Informes UNSCEAR-82*^[2] y *UNSCEAR-88*^[11] como media mundial para las concentraciones de estos tres radionúclidos naturales emisores gamma, ya que en esas publicaciones se estima un valor de 25 Bq kg^{-1} (rango de 10 a 50 Bq kg^{-1}) para el ^{226}Ra , de 25 Bq kg^{-1} (rango de 7 a 50 Bq kg^{-1}) para el ^{232}Th y de 370 Bq kg^{-1} (rango de 100 a 700 Bq kg^{-1}) para el ^{40}K .

Comparando con los datos que aparecen en el *Informe UNSCEAR-93*^[3] para los Estados Unidos y China, los valores obtenidos en Tenerife se aproximan más a los promedios del país asiático ($580 \pm 200 \text{ Bq kg}^{-1}$ para el ^{40}K , $49 \pm 28 \text{ Bq kg}^{-1}$ para el ^{232}Th y $37 \pm 22 \text{ Bq kg}^{-1}$ para el ^{226}Ra) que a los de USA (370 , 35 y 40 Bq kg^{-1} , respectivamente, para ^{40}K , ^{232}Th y ^{226}Ra), que resultan inferiores y similares a los publicados por este organismo^{[11][2]} como media mundial.

También son claramente inferiores los promedios obtenidos en el Delta del Nilo y el Medio Egipto por Ibrahiem y colaboradores^[84] o en Grecia por Probonas y Kritidis^[88]. Para este último país se dan cifras de 40 , 33 y 460 Bq kg^{-1} como valores medios de las concentraciones respectivas de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K .

Sí se aproximan mucho más, en cambio, los resultados obtenidos en Tenerife a los valores de concentración que se proponen como media para toda España en los estudios realizados por Quindós y colaboradores^[66], que evalúan en 39 , 41 y 578 Bq kg^{-1} , respectivamente, los valores medios de las actividades específicas de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K .

Todavía están aún más cerca los resultados de las medidas realizadas en los suelos de la provincia de Cáceres (España)^[75] que alcanzaron un valor de 46 Bq kg^{-1} (rango: $13\text{-}165 \text{ Bq kg}^{-1}$) para el ^{226}Ra , 49 Bq kg^{-1} ($7\text{-}204$) para el ^{232}Th y 650 Bq kg^{-1} ($48\text{-}1586$) para el ^{40}K .

También son similares los valores publicados por Malanca y colaboradores^[76] para los suelos del estado de "Rio Grande do Norte" (Brasil). Los niveles encontrados de contenidos en ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K fueron, respectivamente, 29 Bq kg^{-1} , $46,6 \text{ Bq kg}^{-1}$ y $677,8 \text{ Bq kg}^{-1}$.

Los datos relativos a las medidas de concentración de radionúclidos en los suelos de la isla volcánica de Milos, en el mar Egeo^[77], revelan valores algo superiores a los obtenidos en Tenerife. En los suelos de la isla griega se obtuvieron promedios de $50 \pm 21 \text{ Bq kg}^{-1}$ para el ^{226}Ra (rango entre 21 y 101 Bq kg^{-1}), de $57 \pm 21 \text{ Bq kg}^{-1}$ para el ^{232}Th (rango de 26 a 94 Bq kg^{-1}) y de $877 \pm 332 \text{ Bq kg}^{-1}$ para el ^{232}Th (rango entre 352 y 1796 Bq kg^{-1}).

Para realizar una representación gráfica que resulte ilustrativa de los diferentes niveles de concentración de emisores gamma encontrados en los suelos de los distintos lugares de las islas, se han agrupado los 133 valores obtenidos para cada uno de los radionúclidos naturales ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K (104 medidas en Tenerife, 13 en La Palma, 10 en La Gomera y 6 en la isla de El Hierro) en sus cuatro *cuartiles*, representándose cada intervalo en un tono progresivamente más oscuro de un mismo color, a medida que los niveles de actividad específica medidos fueron más elevados.

Para el caso del ^{137}Cs , el número total de medidas tenidas en cuenta para su *cuartiles* fue de 115, ya que en 18 de las muestras recogidas en la isla de Tenerife no fue posible medir la actividad específica de este radionúclido artificial.

En las **Tabla 3.33**, **Tabla 3.34**, **Tabla 3.35** y **Tabla 3.36** se indican los valores máximos y mínimos de cada uno de los intervalos que conforman los cuatro *cuartiles* correspondientes al ^{226}Ra (color azul), ^{232}Th (color rojo), ^{40}K (color verde) y ^{137}Cs (color marrón), respectivamente.

Tabla 3.33.- Límites inferior y superior (en Bq kg^{-1}) de los cuatro *cuartiles* en que se han agrupado los resultados de la medida de la concentración de ^{226}Ra en las islas de Tenerife, La Palma, La Gomera y El Hierro.

CUARTIL	Mínimo (Bq kg^{-1})	Máximo (Bq kg^{-1})	^{226}Ra Color: AZUL
1º	6,1	23,7	Azul cielo
2º	23,8	39,2	Azul claro
3º	39,3	51,2	Azul
4º	51,3	104	Azul oscuro




Tabla 3.34.- Valores extremos (en Bq kg⁻¹) de cada uno de los cuatro intervalos (cuartiles) en que se han asociado los resultados de la medida de [²³²Th] en las islas Canarias occidentales.

CUARTIL	Mínimo (Bq kg ⁻¹)	Máximo (Bq kg ⁻¹)	²³² Th Color: ROJO
1º	9,3	30,1	Rosa claro
2º	30,2	47,4	Rojo claro
3º	47,5	67,4	Rojo
4º	67,5	111,6	Rojo oscuro

Tabla 3.35.- Valores máximo y mínimo (en Bq kg⁻¹) de los cuatro cuartiles en que se agruparon los resultados obtenidos de actividad específica de ⁴⁰K en cada uno de los lugares seleccionados de las islas.

CUARTIL	Mínimo (Bq kg ⁻¹)	Máximo (Bq kg ⁻¹)	⁴⁰ K Color: VERDE
1º	57,6	270,1	Verde claro
2º	270,2	484,5	Verde lima
3º	484,6	790,8	Verde
4º	790,9	1488,8	Verde oscuro

Tabla 3.36.- Rango de valores (en Bq kg⁻¹) de cada uno de los cuatro intervalos (cuartiles) en que se han asociado los resultados de la medida de [¹³⁷Cs] en Tenerife.

CUARTIL	Mínimo (Bq kg ⁻¹)	Máximo (Bq kg ⁻¹)	¹³⁷ Cs Color: MARRÓN
1º	0	5	Naranja claro
2º	5,1	11,8	Marrón claro
3º	11,9	21,7	Marrón
4º	21,8	100,9	Marrón oscuro

Las **Figura III.15**, **Figura III.16**, **Figura III.17** y **Figura III.18**, ilustran los niveles medidos de concentración de estos tres radionúclidos naturales en las muestras de suelo obtenidas en cada uno de los cuadrados en que se dividió la isla de Tenerife, mediante los diferentes tonos (más oscuro cuanto mayor concentración) de cada uno de los colores indicados.

Figura III.15.- Mapa de los niveles medios de concentración de ^{226}Ra existentes en los diferentes lugares de la isla de Tenerife.

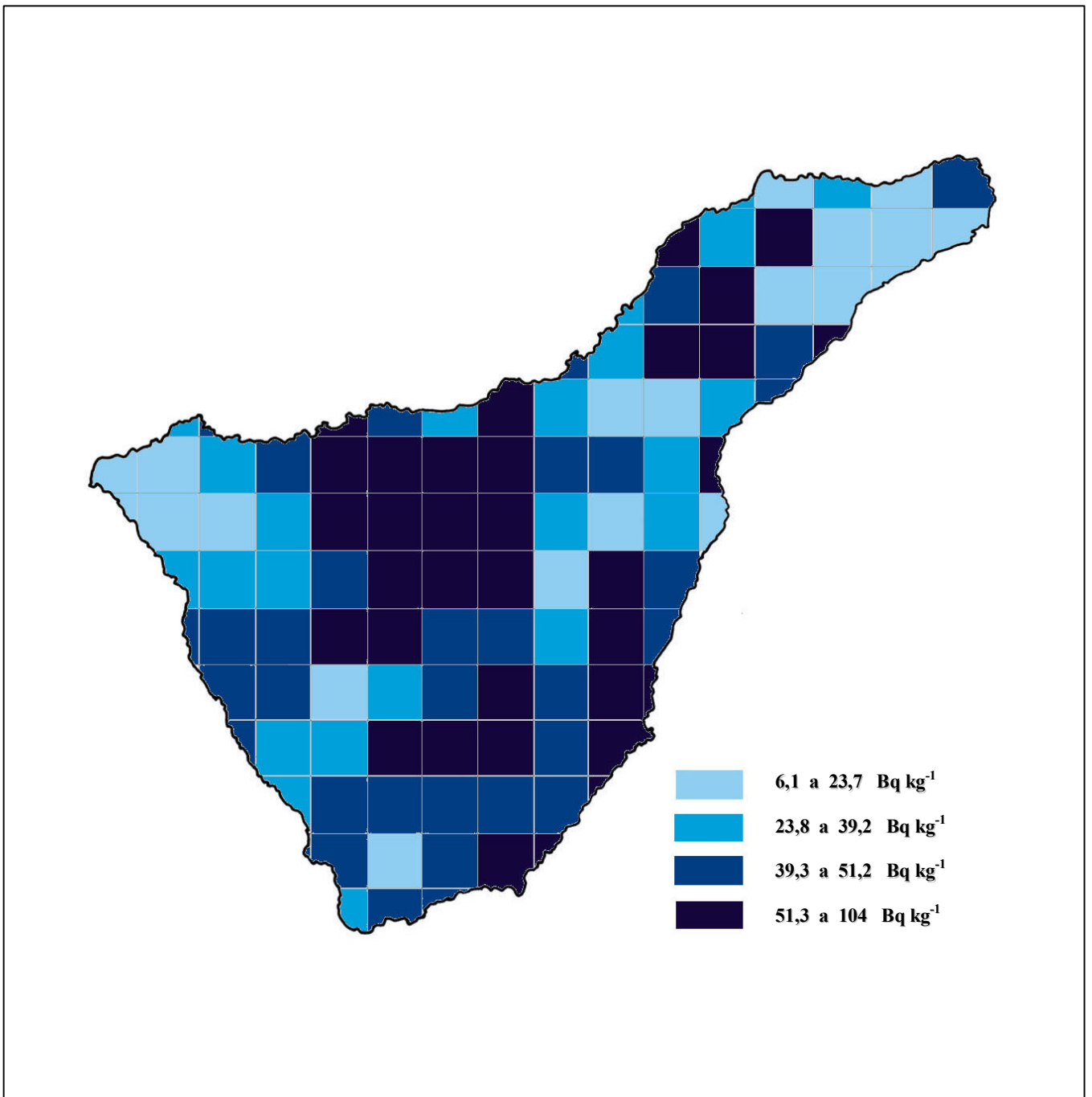


Figura III.16.- Mapa de los niveles medios de actividad específica medida de ^{232}Th en cada uno de los cuadrados de la isla de Tenerife.

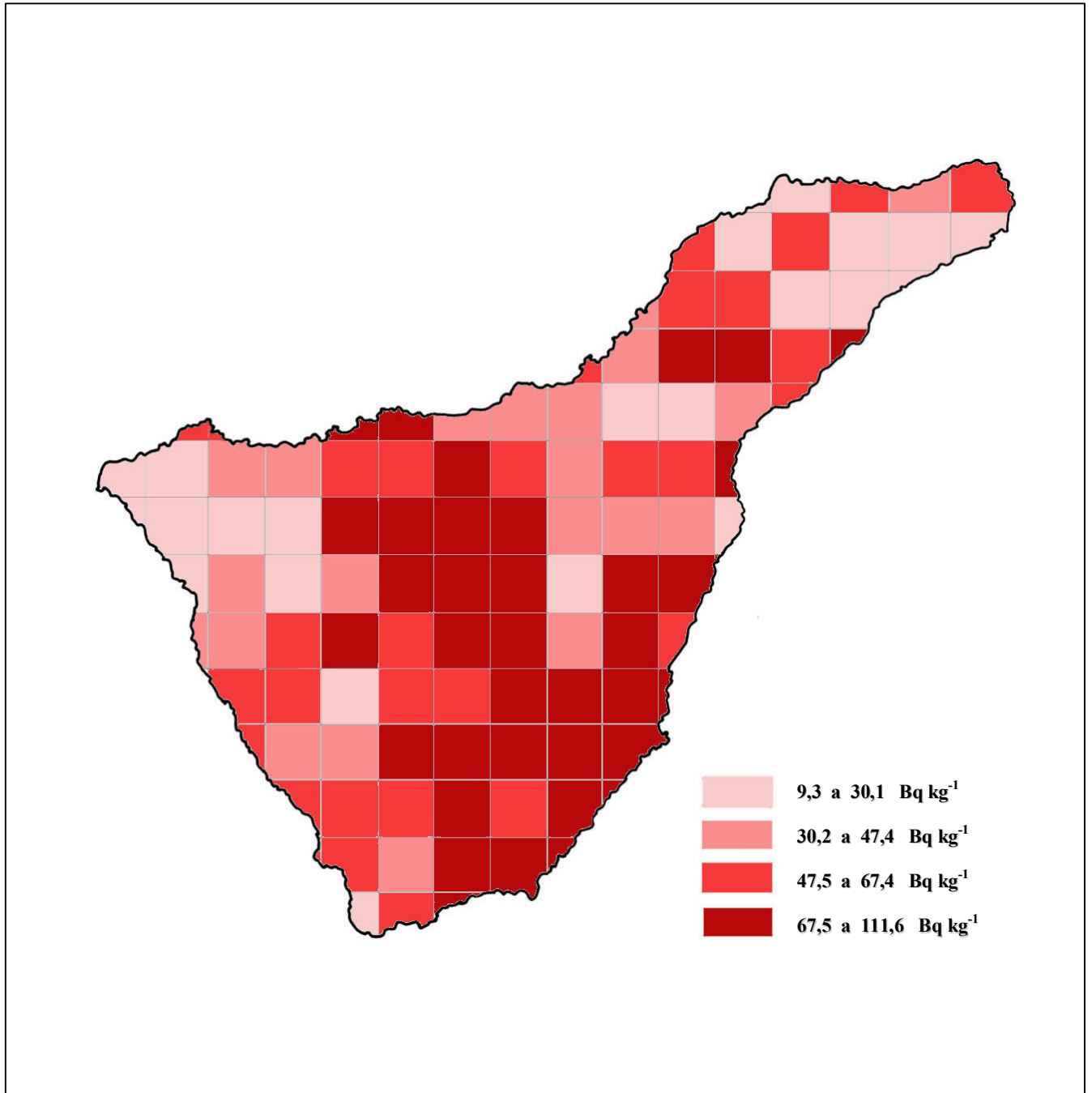


Figura III.17.- Mapa radiométrico de los niveles medios de concentración de ^{40}K en la isla de Tenerife.

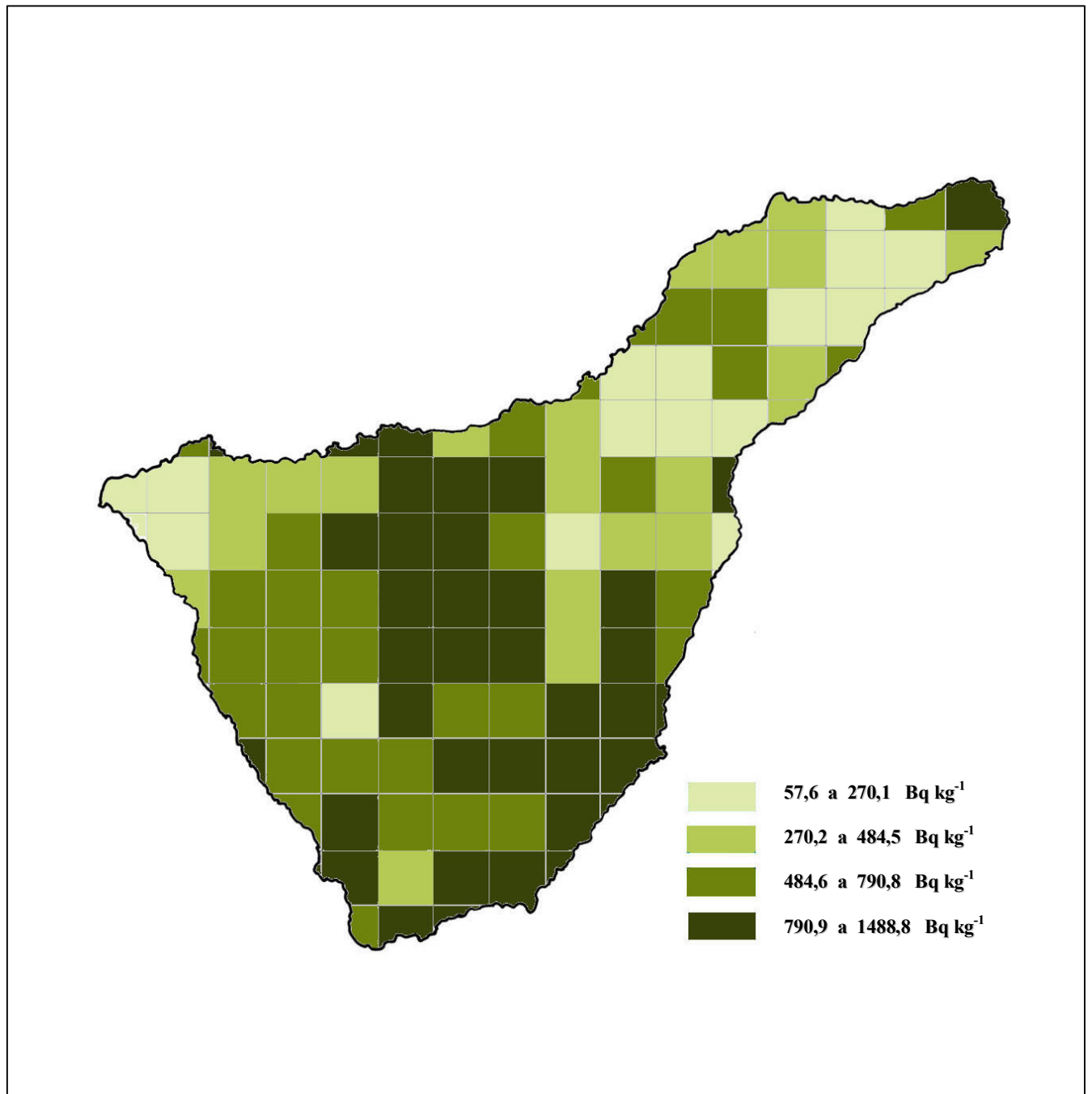
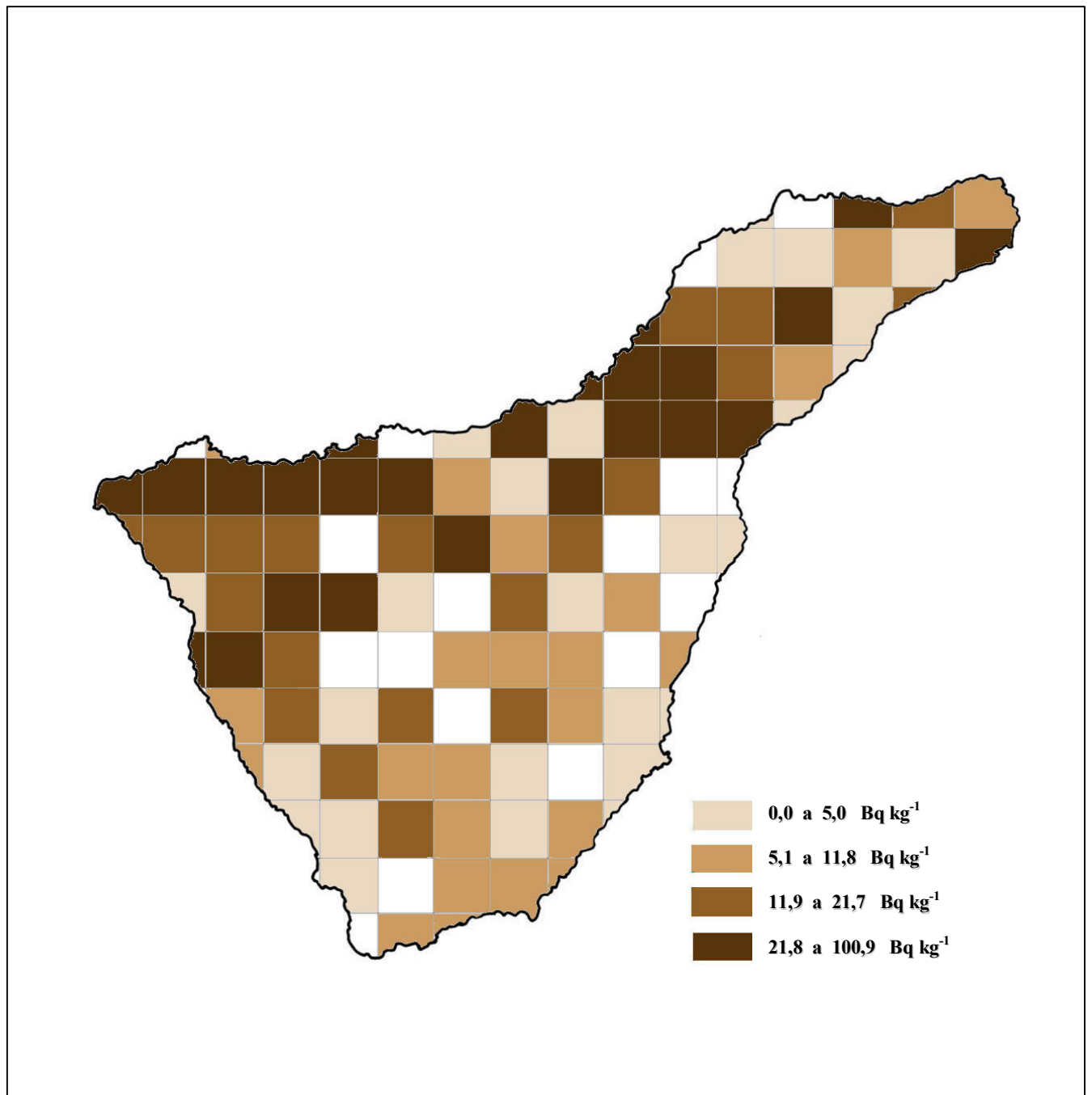


Figura III.18.- Mapa de valores de actividad específica de ^{137}Cs medidos en los diferentes lugares de Tenerife.



Nota: Los cuadrados no coloreados corresponden a lugares donde no fue posible determinar [^{137}Cs].

En la **Tabla 3.37** se presentan otros datos complementarios en relación a estas medidas, tales como la denominación de los lugares de recogida del suelo o la cantidad de muestra procesada (peso y densidad) y utilizada para el análisis en el detector de germanio.

Tabla 3.37.- Lugares de recogida de suelo en la isla de Tenerife, así como cantidad y densidad de las muestras, una vez procesadas, utilizada en cada una de las determinaciones realizadas.

Cuadro (¹)	Mapa	Lugar	Peso (g)	Densidad (kg m ⁻³)
1	1	Chamorga	122.66	1067
2	1	Iguste de San Andrés	124.05	1079
3	2	Almáciga	140.20	1219
4	2	El Bailadero	162.18	1410
5	2	San Andrés (Santa Cruz de Tenerife)	133.53	1161
6	2	Roque de Taborno	128.42	1117
7	2	Afur	128.15	1114
8	4	Barrio de la Alegría (Santa Cruz Tenerife)	166.92	1451
9	4	Santa Cruz de Tenerife	124.62	1084
10	2	Roque Dos Hermanos - Punta del Hidalgo	-	-
11	2	El Moquinal - El Batán	101.27	881
12	4	El Bronco (La Laguna)	105.37	916
13	4	Taco	131.23	1141
14	4	Santa María del Mar	-	-
15	3	Tejina	131.66	1145
16	5	El Portezuelo	122.06	1061
17	5	La Esperanza	128.25	1115
18	6	Barranco Hondo	140.30	1220
19	6	Candelaria	-	-
20	10	Montaña Grande (Güimar)	212.21	1845
21	3	Valle Guerra	-	-
22	5	Tacoronte - Los Naranjeros	130.25	1133
23	5	Jara - Agua García	98.86	860
24	6	Las Lagunetas (La Esperanza)	96.78	842
25	6	Cuevecitas de Candelaria	-	-
26	10	Güimar	174.31	1516
27	10	La Medida (Güimar)	-	-
28	14	La Cardonera (Fasnia)	130.61	1136
29	5	El Sauzal	121.12	1053
30	5	La Matanza	101.44	882
31	6	Lomo Mesetas (Santa Úrsula)	111.22	967
32	6	Ayosa	134.37	1168

33	10	Barranco del Agua (Altos de Güimar)	-	-
34	10	Camino Arrastradero (El Escobonal)	104.25	907
35	14	La Sombrera - Fasnía	-	-
36	14	Arico el Viejo	100.05	870
37	17	Abades	134.50	1170
38	5	La Quinta (Santa Úrsula)	126.42	1099
39	7	Cuesta de la Villa (La Orotava)	167.64	1458
40	7	La Caldera (La Orotava)	90.06	783
41	11	Izaña	123.57	1075
42	11	Barranco del Palmero - Izaña	165.23	1437
43	14	Morra Ramos - El Bueno (Arico Viejo)	140.75	1224
44	14	Los Gavilanes (Lomo Arico)	107.15	932
45	18	El Río	-	-
46	18	Loma del Camello - Parque eólico	145.07	1261
47	7	La Vera (Puerto Cruz)	107.62	936
48	7	Tres Pinos - La Orotava	143.61	1249
49	11	Montaña del Alto (A) - El Portillo	129.48	1126
49B	11	Montaña del Alto (B) - El Portillo	117.98	1026
50	11	Cañada de las Pilas (Las Cañadas)	109.76	954
51	15	Fuente Madre del Agua (Izaña)	125.63	1092
52	15	Morro de las Arbejas – Izaña	134.75	1172
53	18	Los Blanquitos (Granadilla)	127.96	1113
54	18	San Isidro	144.71	1258
55	20	Aeropuerto del Sur - Las Tejitas	159.33	1385
56	7	Mirador de la Grimona (Los Realejos)	138.75	1207
57	7	Fuente del Bardo (Icod el Alto)	122.58	1066
58	11	El Portillo - El Cabezón	118.09	1027
59	11	Montaña Blanca (Teide)	-	-
60	15	Montaña Guajara (Las Cañadas)	142.48	1239
61	15	Madre del Agua (Vilaflor)	-	-
62	18	Cruz de Tea (Vilaflor - Granadilla)	113.32	985
63	18	Las Zocas - San Miguel	139.70	1215
64	20	Los Abrigos - El Guincho	148.48	1291
65	7	Santa Catalina (San Juan de la Rambla)	-	-
66	7	La Guancha	112.13	975
67	11	Cruz de Vieja (Boca de Tauce)	143.89	1251
68	11	Pico del Teide	102.65	893
69	15	Llano de Ucanca	-	-
70	15	Lomo Tabladillo (Boca Tauce - Vilaflor)	152.58	1327
71	18	Los Quemados (Vilaflor - La Escalona)	135.25	1176
72	20	Valle de San Lorenzo	138.89	1208
73	20	Cañada Verde (Las Galletas)	-	-
74	20	Las Galletas -Ten Bel	125.36	1090
75	8	San Marcos - Riquer (Icod de los Vinos)	111.50	970
76	8	El Amparo (Icod de los Vinos)	106.64	927
77	12	Hoya Negra (Boca de Tauce)	-	-

78	12	Cruz de Tea (Boca de Tauce)	116.59	1014
79	16	Montaña del Cedro (Ucanca)	-	-
80	16	Montaña Teresme (Adeje - Vilaflor)	155.94	1356
81	19	Barranco del Infierno (Adeje)	114.37	995
82	21	Chayofa (Los Cristianos)	130.84	1138
83	21	Mesas de Guaza (Los Cristianos)	127.23	1106
84	21	Rasca (Palm-Mar / Los Cristianos)	-	-
85	8	San Juan del Reparó (Garachico)	109.74	954
86	12	Vuelta Grande (Boca de Tauce)	169.37	1473
87	12	Altos de Chío	150.55	1309
88	16	Chirche	126.19	1097
89	16	Vera de Erques	129.58	1127
90	19	Armeñime	137.97	1200
91	19	La Caleta (Adeje)	153.49	1335
92	8	Los Silos	141.22	1228
93	8	Roque de las Moradas (Los Silos)	114.89	999
94	12	Santiago del Teide	166.90	1451
95	12	Tamaimo	150.45	1308
96	16	Era del Llano (Alcalá)	164.17	1428
97	16	Playa de San Juan	142.56	1240
98	19	Marazul (Playa de San Juan)	145.07	1261
99	9	Buenavista del Norte	-	-
100	9	Cumbre de la Molina (Buenavista)	-	-
101	13	Masca	157.14	1366
102	13	Acantilado de los Gigantes	165.06	1435
103	9	Punta de Teno	145.38	1264

(¹) Los números de cuadro son los indicados en el mapa del **Anexo I**.

En la **Tabla 3.38** se presentan las medias, máximo, mínimo y desviación estándar de los pesos y densidades de cada una de las muestras de suelo analizadas.

Tabla 3.38.- Valores estadísticos de las muestras medidas de los suelos de Tenerife.

Tenerife	Peso (g)	Densidad (kg m⁻³)
MEDIA ARITMÉTICA	132,6	1153,4
MED. GEOMÉTRICA	131,0	1138,9
MÁXIMO	212,2	1845,0
MÍNIMO	90,1	783,0
DESV. ESTÁNDAR	21,5	186,8
MEDIANA	130,6	1136,0

III.3.3.- MEDIDAS EN LAS TRES ISLAS OCCIDENTALES DE MENOR SUPERFICIE

En cada uno de los puntos que se habían seleccionado previamente en los mapas de las islas de La Palma (13), La Gomera (10) y El Hierro (6), se recogieron muestras de suelo, las cuales, una vez preparadas, se analizaron por espectrometría gamma en el Laboratorio Voor Kernfysica de la Universidad de Gante.

En la **Tabla 3.39** se indican, en primer lugar, los resultados obtenidos en la medida de la concentración (en Bq kg⁻¹) de los emisores gamma naturales ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K, y de los radionúclidos de origen artificial ¹³⁷Cs y ¹³⁴Cs, en los suelos de la isla de La Palma.

Tabla 3.39.- Concentraciones de radionúclidos emisores gamma en los suelos de La Palma.

Cua- dro (²)	[Ra-226] (Bq kg ⁻¹)	s	[Th-232] (Bq kg ⁻¹)	s	[K-40] (Bq kg ⁻¹)	s	[Cs-137] (Bq kg ⁻¹)	s	[Cs-134] (Bq kg ⁻¹)	s
1	36.6	2.4	57.3	4.7	185.2	20.7	0	0	0	0
2	35.2	2.2	57.4	4.6	131.4	-	21.7	.9	0	0
3	34.8	2.1	35.3	2.9	159.4	18.5	19.3	.6	0	0
4	29.5	2.3	34.9	3	228.2	23	25.5	1	0	0
5	25.6	2.1	35	3.3	60	-	52.4	2.1	0	0
6	6.1	.7	9.3	1.1	57.6	11	19.2	.5	0	0
7	27.8	1.9	35.4	3.3	227.3	23.5	20.1	.8	0	0
8	55.4	3.3	36.6	3	484.5	38	18.3	.8	0	0
9	53.8	3.2	33.9	3	404	31	8.0	.8	0	0
10	17.7	1.4	25.1	2.3	222.9	21.5	6.5	.5	0	0
11	39.2	2.5	52.4	4.3	224.3	21.4	0	0	0	0
12	17.7	1.2	35.1	2.8	222.9	20.7	15.2	.7	1.8	.3
13	44.4	2.6	24.2	2.1	351	-	1.5	.3	0	0

(²) Referidos a los indicados en el mapa de la isla en el **Anexo II**

Las siguientes **Figura III.19**, **Figura III.20**, **Figura III.21** y **Figura III.22** corresponden al mapa de la isla de La Palma, coloreado de acuerdo con los mismos criterios expuestos anteriormente para Tenerife (**Tabla 3.33**, **Tabla 3.34**, **Tabla 3.35** y **Tabla 3.36**). Estas representaciones gráficas permiten caracterizar cada uno de los cuatro niveles (división en *cuartiles*) en que se agruparon los valores obtenidos de concentración de ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K y ¹³⁷Cs.

Figura III.19.- Mapa de los niveles medios de concentración de ^{226}Ra existentes en los diferentes lugares de la isla de La Palma.

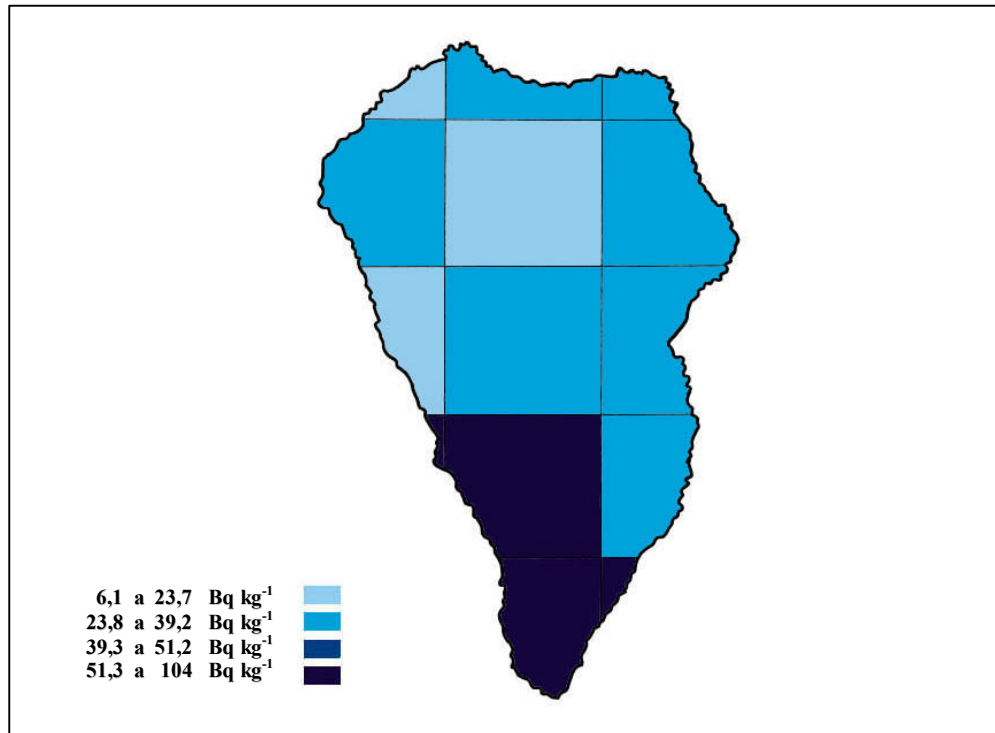


Figura III.20.- Mapa de los niveles medios de actividad específica medida de ^{232}Th en cada uno de los cuadrados de la isla de La Palma.

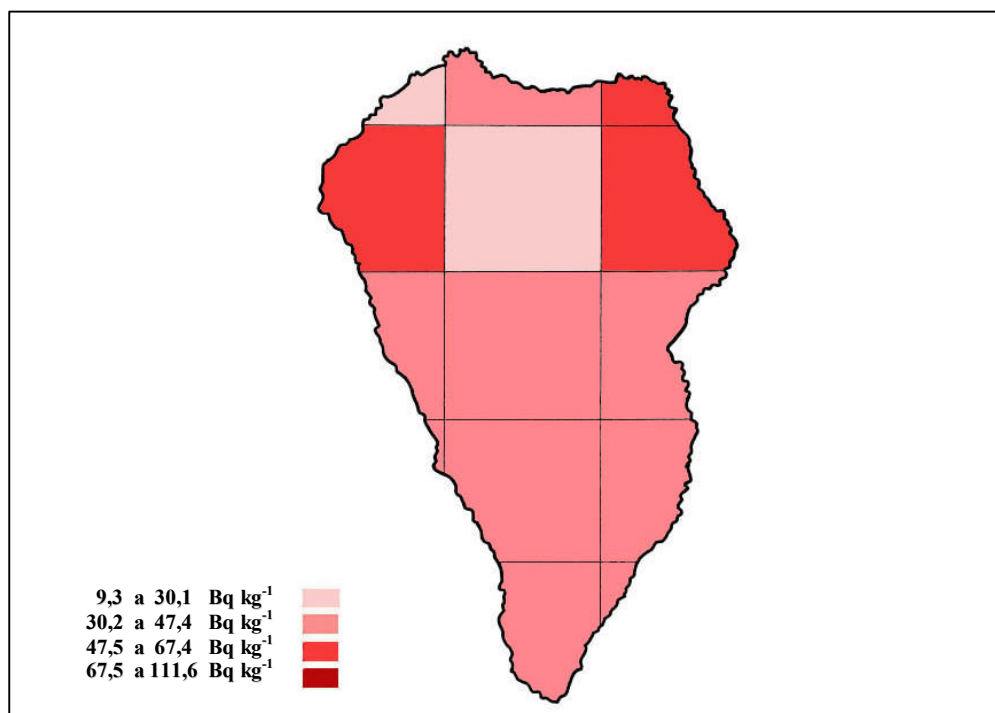


Figura III.21.- Mapa radiométrico de los niveles medios de concentración de ^{40}K en la isla de La Palma.

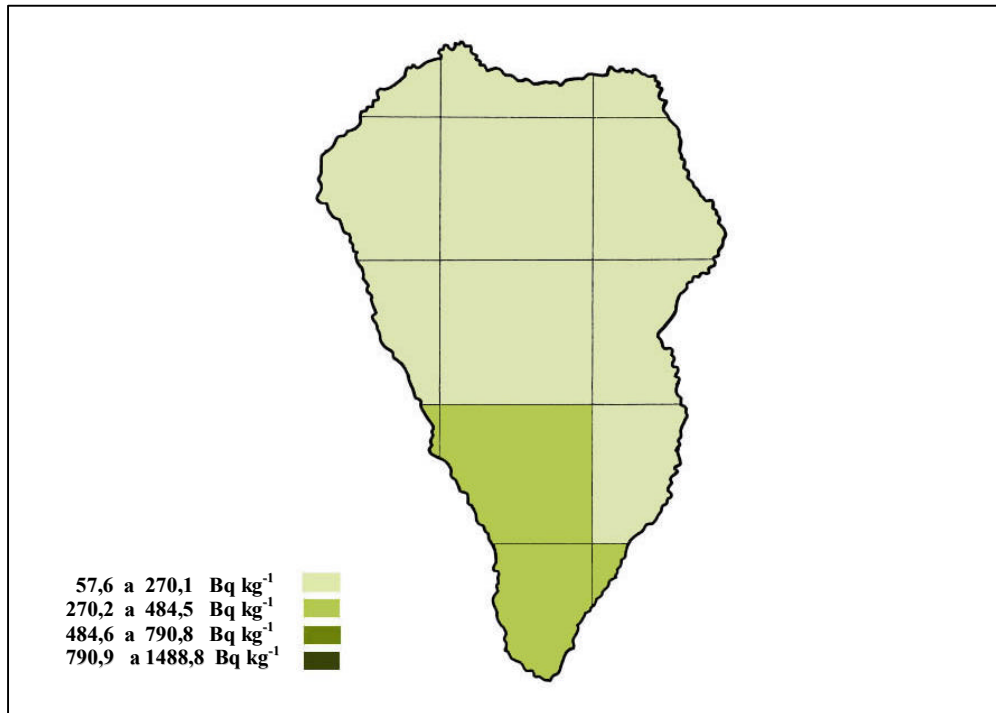
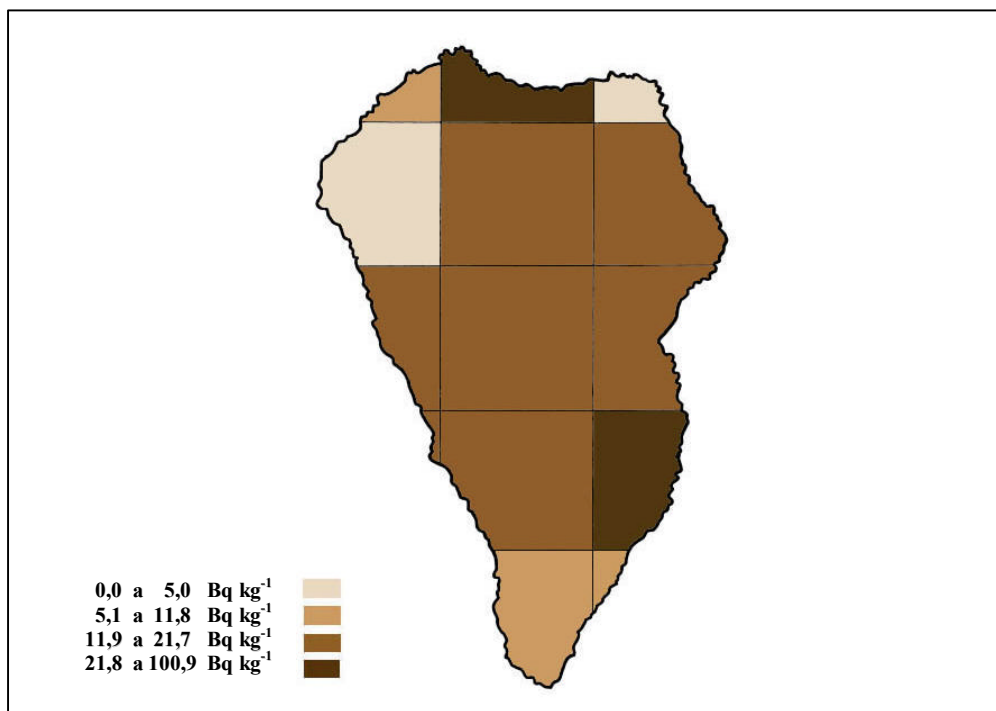


Figura III.22.- Mapa de valores de actividad específica de ^{137}Cs medidos en los diferentes lugares de La Palma.



Los valores medios resultantes en la isla de La Palma son inferiores a los obtenidos en Tenerife (**Tabla 3.40**). Es de destacar el valor obtenido en La Palma para la concentración de ^{40}K ($227,6 \text{ Bq kg}^{-1}$), notablemente el más bajo de todas las islas ($658,5 \text{ Bq kg}^{-1}$ en Tenerife, $317,4 \text{ Bq kg}^{-1}$ en La Gomera y $262,4 \text{ Bq kg}^{-1}$ en El Hierro).

Tabla 3.40.- Valores estadísticos asociados a las medidas de la concentración de radionúclidos gamma presentes en los suelos de la isla de La Palma.

La Palma	[Ra-226] (Bq kg ⁻¹)	s	[Th-232] (Bq kg ⁻¹)	s	[K-40] (Bq kg ⁻¹)	s	[Cs-137] (Bq kg ⁻¹)	s	[Cs-134] (Bq kg ⁻¹)	s
MEDIA ARITM.	32,6	2,1	36,3	3,1	227,6	22,9	16,0	0,7	0,1	0,0
MEDIA GEOM.	28,8	2,0	33,4	2,9	193,5	21,9	-	-	-	-
MÁXIMO	55,4	3,3	57,4	4,7	484,5	38,0	52,4	2,1	1,8	0,3
MÍNIMO	6,1	0,7	9,3	1,1	57,6	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DESV. STD.	14,2	0,7	13,4	1,0	124,2	7,2	14,0	0,5	0,5	0,0
MEDIANA	34,8	2,2	35,1	3,0	222,9	21,5	18,3	0,7	0,0	0,0

Comparando estos resultados con los valores para toda España o con la media mundial, también destaca el bajo nivel de ^{40}K que se ha medido en los suelos de esta isla.

En la **Tabla 3.41** se añaden datos complementarios a estas medidas, como son la identificación del lugar de muestreo, el tiempo de recolección en el detector de germanio, el peso y la densidad de la muestra una vez procesada, etc.

Tabla 3.41.- Otros datos relativos a las medidas de radionúclidos gamma en los suelos de la isla de La Palma.

Cua- dro (²)	Ma- pa	Lugar	Tiempo med. (s)	Peso (g)	Densidad (kg m ⁻³)
1	1	Las Cabezadas (Barlovento)	27000	132.5	1152
2	2	El Corcho (Puntallana)	50000	136.1	1184
3	2	Miranda	50000	144.7	1259
4	3	San Juan de Belmaco	27000	133.4	1160
5	1	Franceses	27000	122.8	1068
6	2	Borde Caldera de Taburiente	50000	196.2	1706
7	2	Llanos del Paso	27000	139.4	1212
8	2	Los Campanarios	27000	194.1	1688
9	3	Volcán de San Antonio	27000	214.5	1865
10	1	Llano Negro (Garafía)	50000	135.6	1179
11	2	Llanos de Lance (Tijarafe)	27000	160.3	1394
12	2	Las Angustias	50000	165.8	1441
13	4	Borde Cráter Volcán Teneguía	50000	190.8	1659

(²) Referidos a los cuadros indicados en el **Anexo II**.

Las muestras analizadas procedentes de esta isla, en cuanto a su peso y densidad, se pudieron caracterizar estadísticamente tal como se indica en la **Tabla 3.42** siguiente.

Tabla 3.42.- Valores estadísticos de las muestras medidas de los suelos de la isla de La Palma.

La Palma	Peso (g)	Densidad (kg m ⁻³)
MEDIA ARITMÉTICA	158,9	1382,1
MED. GEOMÉTRICA	156,4	1359,9
MÁXIMO	214,5	1865,0
MÍNIMO	122,8	1068,0
DESV. ESTÁNDAR	30,4	264,2
MEDIANA	144,7	1259,0

De la misma manera, simultáneamente a la medida de los niveles de radiación gamma en aire, se recolectó suelo en los lugares de muestreo en toda la geografía de la isla de La Gomera. Se obtuvieron 10 muestras que fueron caracterizadas, por espectrometría gamma, de forma similar a las anteriores. La **Tabla 3.43**, resume los resultados de estas medidas, presentando las actividades específicas (Bq kg⁻¹) de los radionúclidos emisores gamma naturales y artificiales analizados.

Tabla 3.43.- Concentraciones de radionúclidos emisores gamma en los suelos de la isla de La Gomera.

Cua- dro (³)	[Ra-226] (Bq kg ⁻¹)	s	[Th-232] (Bq kg ⁻¹)	s	[K-40] (Bq kg ⁻¹)	s	[Cs-137] (Bq kg ⁻¹)	s	[Cs-134] (Bq kg ⁻¹)	s
1	6.6	.6	9.5	1.1	113.7	12.8	16.8	.4	0	0
2	15.7	1.5	21.5	2.3	334.7	28.1	8.9	.7	0	0
3	16.5	1.4	30.1	2.7	240.9	22.8	15	.8	0	0
4	42.9	2.7	50.8	4.1	778	56.7	14.3	.7	0	0
5	20.9	1.9	35.3	3.6	143.5	-	68.8	1.9	0	0
6	28.6	2	43.2	3.6	466.3	37.3	11.1	.9	0	0
7	16.2	1.2	24.2	2.1	274.5	24.2	5.3	.4	0	0
8	18.5	1.3	28.2	2.5	210.5	19.8	24.4	.7	0	0
9	16.6	1.5	30.4	2.7	440.5	36.3	2.7	2.1	0	0
10	22.2	1.8	32.9	3.4	171.5	-	29.6	1.3	0	0

(³) Indicados en el **Anexo III**.

En las siguientes figuras se realiza una representación gráfica del mapa de La Gomera, que ilustra los niveles medios de concentración de los radionúclidos ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K y ¹³⁷Cs obtenidos en cada cuadro de la isla.

Figura III.23.- Mapa de los niveles medios de concentración de ^{226}Ra existentes en los diferentes lugares de la isla de La Gomera.

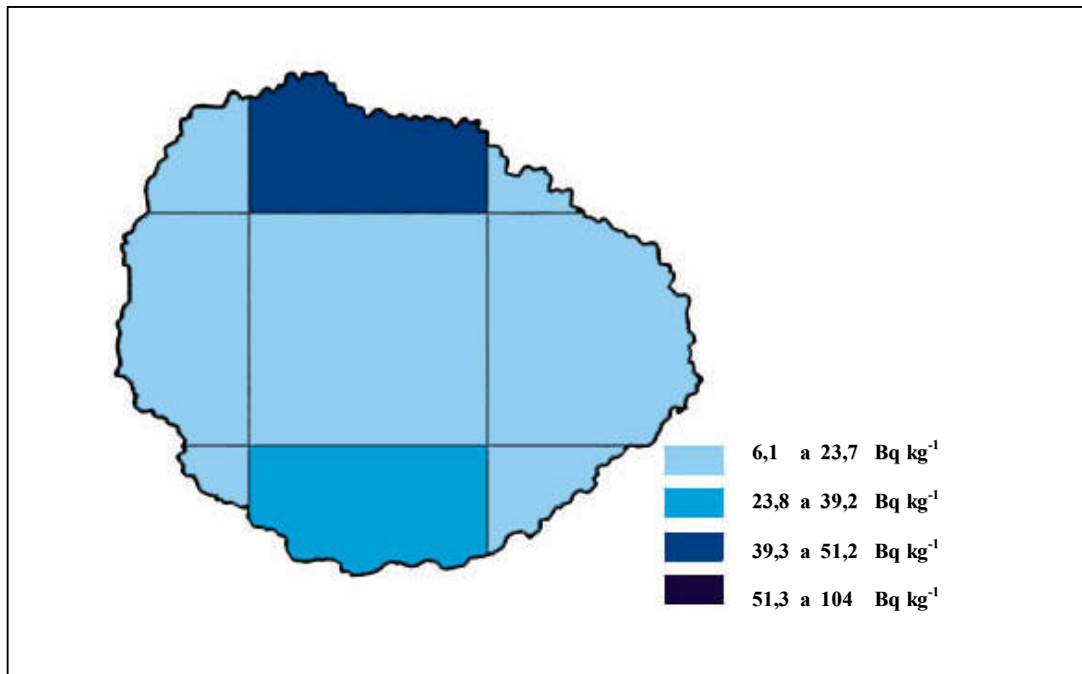


Figura III.24.- Mapa de los niveles medios de actividad específica medida de ^{232}Th en cada uno de los cuadrados de la isla de La Gomera.

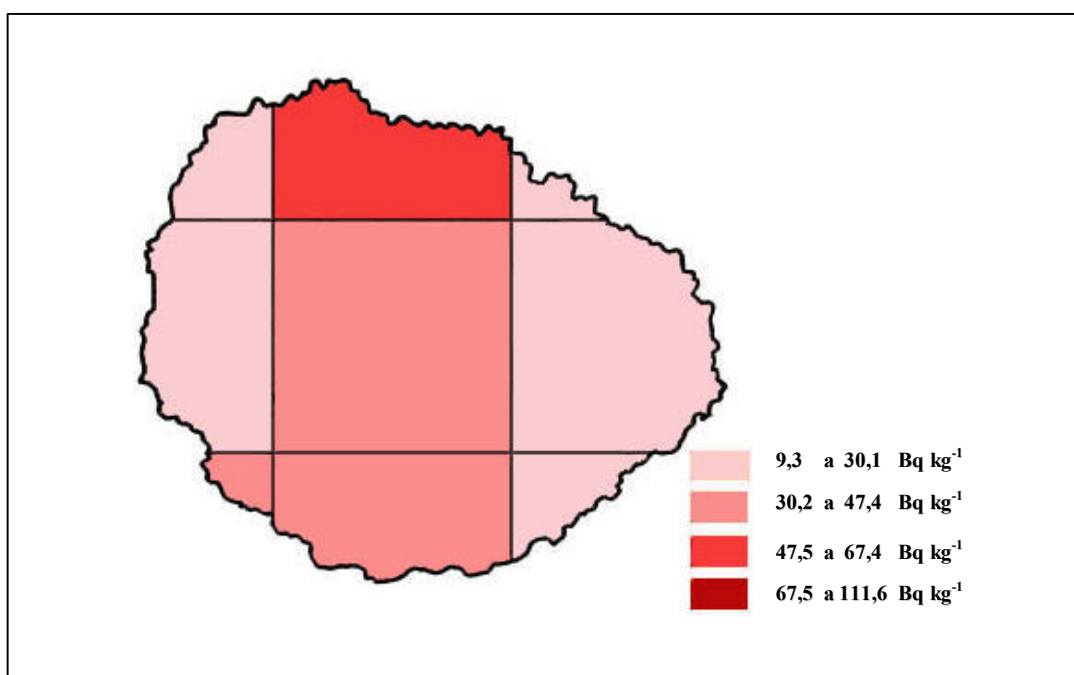


Figura III.25.- Mapa radiométrico de los niveles medios de concentración de ^{40}K en la isla de La Gomera.

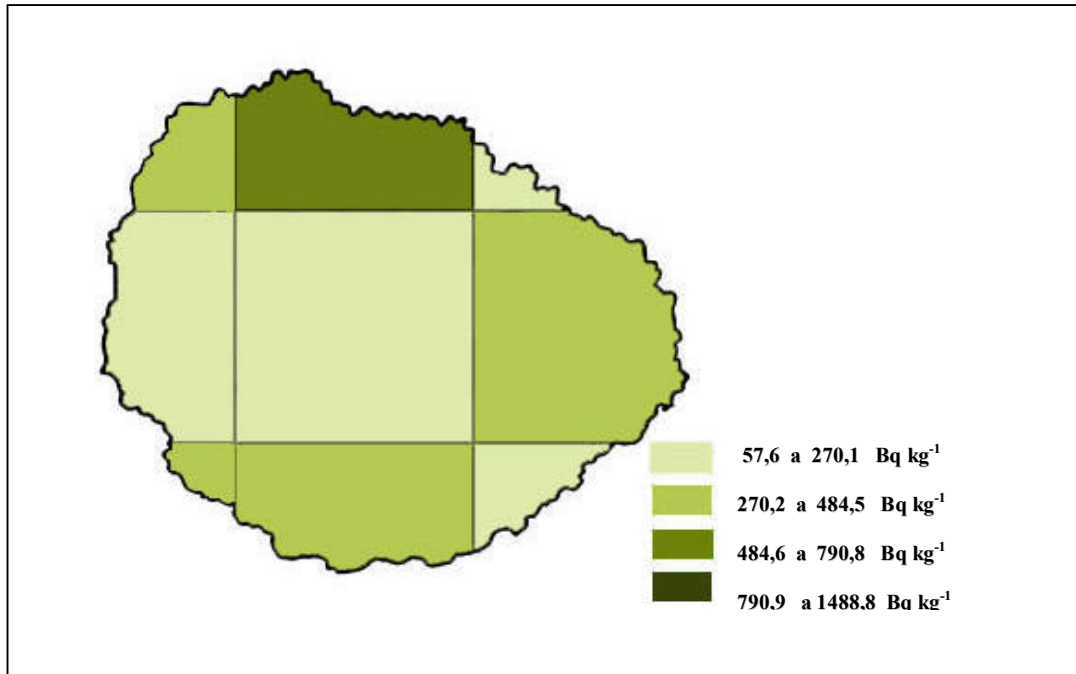
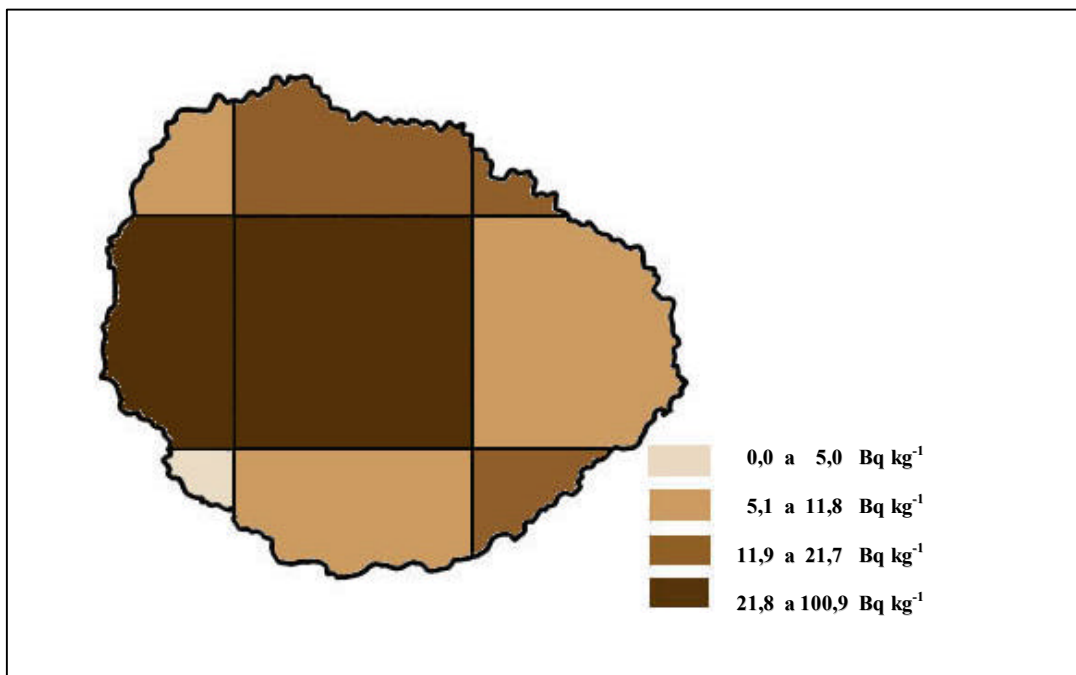


Figura III.26.- Mapa de valores de actividad específica de ^{137}Cs medidos en los diferentes lugares de La Gomera.



Los niveles de actividad específica de los radionúclidos naturales medidos en la isla de La Gomera son similares a los dados por UNSCEAR^{[1][2]} como media mundial e inferiores a los medidos en Tenerife, isla donde se encontraron los valores más altos de concentración de radionúclidos emisores gamma (**Tabla 3.44**).

Tabla 3.44.- Valores estadísticos asociados a las medidas de la concentración de radionúclidos gamma presentes en los suelos de la isla de La Gomera.

La Gomera	[Ra-226] (Bq kg ⁻¹)	s	[Th-232] (Bq kg ⁻¹)	s	[K-40] (Bq kg ⁻¹)	s	[Cs-137] (Bq kg ⁻¹)	s	[Cs-134] (Bq kg ⁻¹)	s
MEDIA ARITM.	20,5	1,6	30,6	2,8	317,4	29,8	19,7	1,0	0,0	0,0
MED. GEOM.	18,6	1,5	28,3	2,7	270,3	27,2	13,8	0,9	-	-
MÁXIMO	42,9	2,7	50,8	4,1	778,0	56,7	68,8	2,1	0,0	0,0
MÍNIMO	6,6	0,6	9,5	1,1	113,7	12,8	2,7	0,4	0,0	0,0
DESV. STD.	9,7	0,6	11,4	0,9	200,5	13,6	19,1	0,6	0,0	0,0
MEDIANA	17,6	1,5	30,3	2,7	257,7	26,2	14,7	0,8	0,0	0,0

Destaca que en La Gomera se midieron las concentraciones de ¹³⁷Cs más elevadas de todas las islas Canarias occidentales, detectando este radionúclido artificial en todas las muestras medidas (única isla donde ocurrió esto), con un promedio de 19,7 Bq kg⁻¹ y un rango que va desde 2,7 Bq kg⁻¹ a 68,8 Bq kg⁻¹.

A continuación se detallan otros aspectos de las medidas llevadas a cabo en esta isla, que hacen referencia al lugar donde se recogió el suelo y a las características de la muestra sometida a determinación espectrométrica gamma, tales como el tiempo de la medida, el peso y la densidad de la muestra (**Tabla 3.45**).

Tabla 3.45.- Datos adicionales correspondientes a las medidas de radionúclidos gamma en los suelos de la isla de La Gomera.

Cua- dro (³)	Ma- pa	Lugar	Tiempo med. (s)	Peso (g)	Densidad (kg m ⁻³)
1	4	Casas El Moralito (Hermigua)	100000	184.9	1608
2	1	Las Casetas (San Sebastián)	27000	169.9	1478
3	2	Los Revolcaderos (S. Sebastián)	27000	163.8	1425
4	3	Tamargada (Vallermoso)	27000	177.8	1546
5	4	Monte del Cedro	27000	98.2	854
6	5	Alajeró	27000	153.4	1333
7	3	Tazo	50000	175.3	1525
8	4	Arure	50000	160.6	1396
9	5	La Mejora (La Dama)	27000	156.5	1361
10	4	Laguna Grande	27000	101.9	886

(³) Referidos a los números de cuadro del mapa de la isla del Anexo III.

Las características físicas, peso y densidad, de las muestras analizadas en la isla de La Gomera, presentaron los valores estadísticos que se indican en la **Tabla 3.46** siguiente.

Tabla 3.46.- Valores medios, extremos y desviación estándar del peso y densidad de las muestras procedentes de los suelos de la isla de La Gomera.

La Gomera	Peso (g)	Densidad (kg m ⁻³)
MEDIA ARITMÉTICA	154,2	1341,2
MED. GEOMÉTRICA	151,1	1313,6
MÁXIMO	184,9	1608,0
MÍNIMO	98,2	854,0
DESV. ESTÁNDAR	30,2	262,6
MEDIANA	162,2	1410,5

De igual forma, en las muestras de suelo recogidas en los 6 lugares previamente seleccionados de la isla del Hierro, se consiguieron los valores de actividad específica que figuran en la **Tabla** siguiente.

Tabla 3.47.- Concentraciones de radionúclidos emisores gamma en los suelos de la isla de El Hierro

Cua- dro ⁽⁴⁾	[Ra-226] (Bq kg ⁻¹)	s	[Th-232] (Bq kg ⁻¹)	s	[K-40] (Bq kg ⁻¹)	s	[Cs-137] (Bq kg ⁻¹)	s	[Cs-134] (Bq kg ⁻¹)	s
1	19.8	1.8	29.7	2.7	324.5	28.8	0	0	0	0
2	16.5	1.4	24.3	2.2	130.5	17.5	14.0	.7	0	0
3	16.9	1.5	20.1	2.2	210.7	20.2	11.2	.7	0	0
4	29	1.8	25.8	2.2	347.1	28.3	10.5	.7	0	0
5	14.3	1	13.3	1.4	240.8	21.7	16.0	.3	1.1	.2
6	30.5	1.8	28.2	2.4	320.5	26.3	0	0	0	0

⁽⁴⁾ Referidos a los indicados en el **Anexo IV**.

Las **Figura III.27**, **Figura III.28**, **Figura III.29** y **Figura III.30** representan el mapa de la isla de El Hierro coloreado en sus diferentes cuadros de acuerdo con el convenio establecido anteriormente para representar los niveles de actividad específica del ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K y ¹³⁷Cs.

Figura III.27.- Mapa de los niveles medios de concentración de ^{226}Ra existentes en los diferentes lugares de la isla de El Hierro.

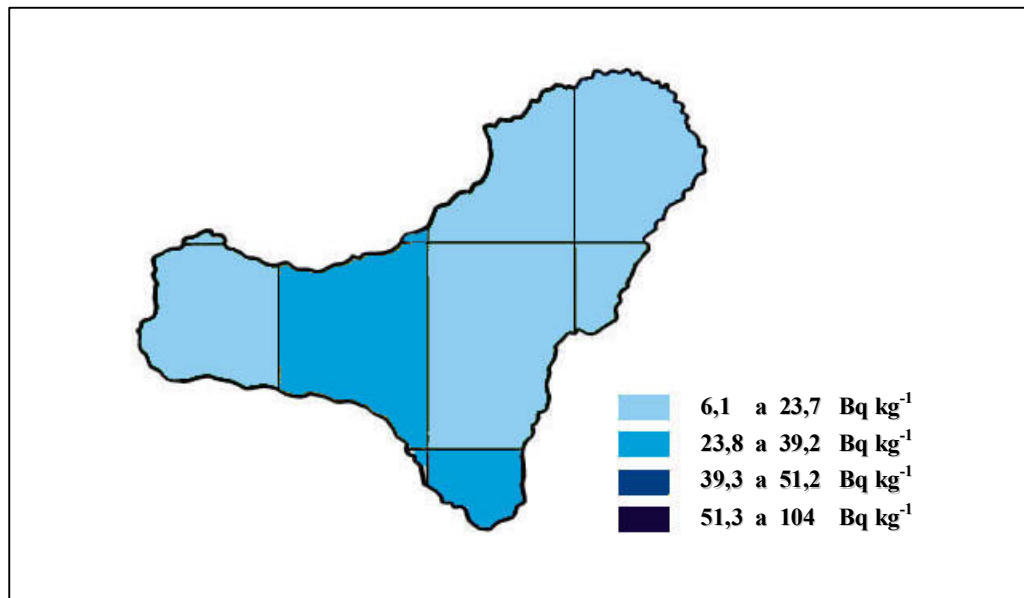


Figura III.28.- Mapa de los niveles medios de actividad específica medida de ^{232}Th en cada uno de los cuadrados de la isla de El Hierro.

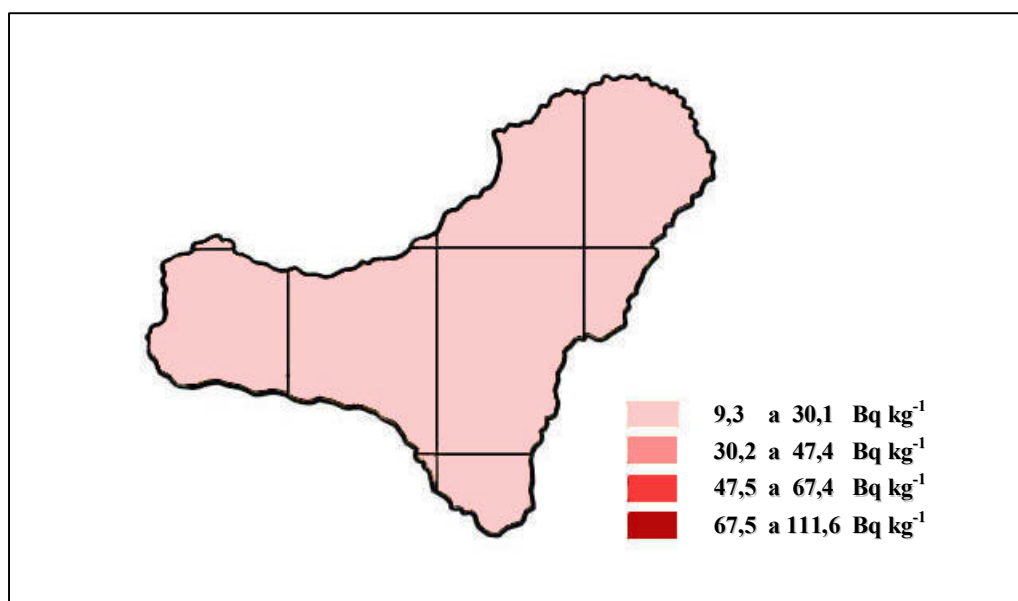


Figura III.29.- Mapa radiométrico de los niveles medios de concentración de ^{40}K en la isla de El Hierro.

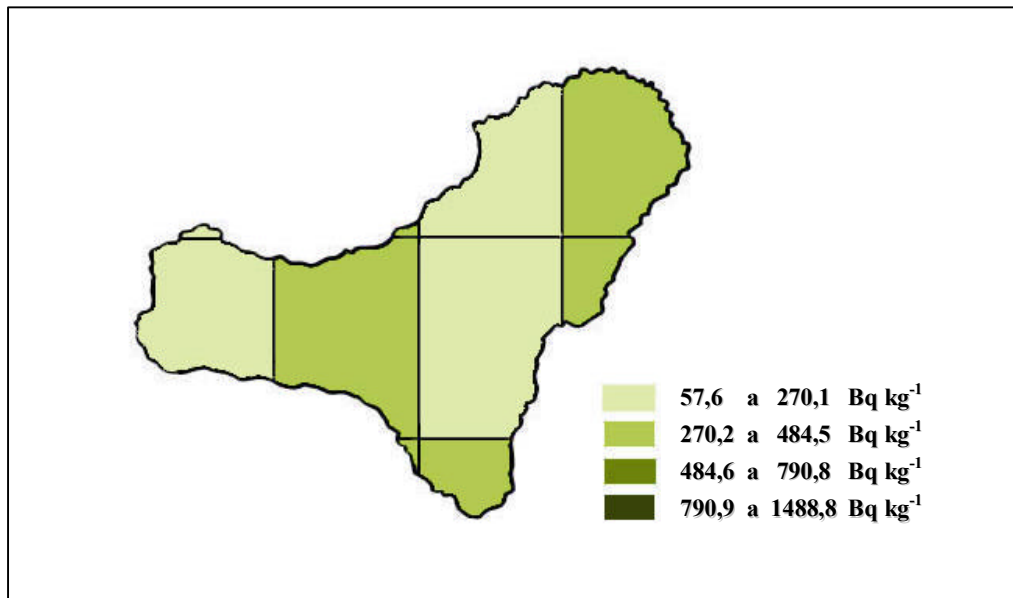
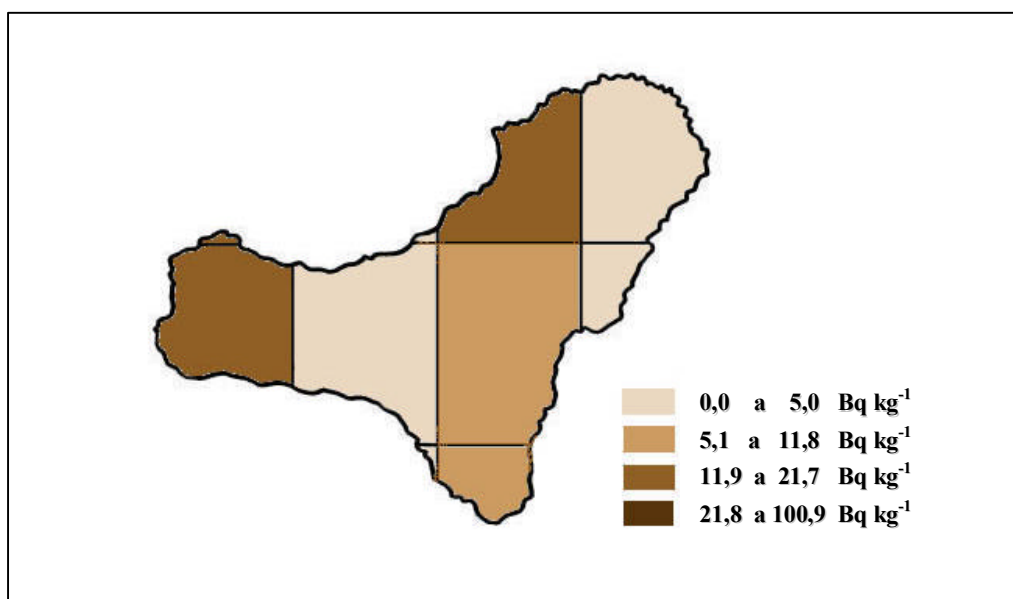


Figura III.30.- Mapa de valores de actividad específica de ^{137}Cs medidos en los diferentes lugares de El Hierro.



En la **Tabla 3.48** se presentan los valores medios (media aritmética, geométrica y mediana), los extremos (máximo y mínimo) y la desviación estándar de los valores obtenidos en las medidas realizadas en la isla, para cada uno de los radionúclidos.

Tabla 3.48.- Valores estadísticos asociados a las medidas de la concentración de radionúclidos gamma presentes en los suelos de la isla de El Hierro.

El Hierro	[Ra-226] (Bq kg ⁻¹)	s	[Th-232] (Bq kg ⁻¹)	s	[K-40] (Bq kg ⁻¹)	s	[Cs-137] (Bq kg ⁻¹)	s	[Cs-134] (Bq kg ⁻¹)	s
MEDIA ARITM.	21,2	1,6	23,6	2,2	262,4	23,8	8,6	0,4	0,2	0,0
MEDIA GEOM.	20,3	1,5	22,8	2,1	249,1	23,4	-	-	-	-
MÁXIMO	30,5	1,8	29,7	2,7	347,1	28,8	16,0	0,7	1,1	0,2
MÍNIMO	14,3	1,0	13,3	1,4	130,5	17,5	0,0	0,0	0,0	0,0
DESV. STD.	6,9	0,3	6,0	0,4	83,6	4,7	7,0	0,3	0,4	0,1
MEDIANA	18,4	1,7	25,1	2,2	280,7	24,0	10,9	0,5	0,0	0,0

Se puede observar que los valores medios obtenidos son bastante bajos en relación con el resto de las islas, dando los niveles de concentración de ²³²Th y ¹³⁷Cs menores en promedio de todas ellas y los segundos más bajos para el ²²⁶Ra (después de La Gomera: 20,5 Bq kg⁻¹) y el ⁴⁰K (detrás de La Palma: 227,6 Bq kg⁻¹)

En la **Tabla 3.49** se hace referencia a otros datos que pueden destacarse en la campaña de medida de radionúclidos gamma en esta isla.

Tabla 3.49.- Otros datos correspondientes a los puntos de medida y los análisis por espectrometría gamma de los suelos en la isla de El Hierro.

Cua- dro ⁽⁴⁾	Ma- pa	Lugar	Tiempo med. (s)	Peso (g)	Densidad (kg m ⁻³)
1	1	Valverde	27000	148.9	1295
2	1	Las Montañetas (Guarazoca)	27000	154.3	1342
3	2	Gorona de los Difuntos	27000	167.9	1460
4	5	Gorona del Lajial (La Restinga)	50000	188.6	1640
5	4	Montaña de la Virgen (Sabinosa)	231391	131.9	-
6	4	Chorro del Jable (Frontera)	50000	169.2	1471

⁽⁴⁾ Indicados en el **Anexo IV**.

En la **Tabla 3.50** se presentan los valores medios, rango y desviación estándar de las magnitudes peso y densidad, de las muestras analizadas en la isla.

Tabla 3.50.- Valores estadísticos de las muestras medidas de los suelos de la isla de El Hierro.

El Hierro	Peso (g)	Densidad (kg m⁻³)
MEDIA ARITMÉTICA	160,1	1441,6
MED. GEOMÉTRICA	159,1	1436,7
MÁXIMO	188,6	1640,0
MÍNIMO	131,9	1295,0
DESV. ESTÁNDAR	19,5	134,1
MEDIANA	161,1	1460,0

III.3.4.- COMPARATIVO DE LA PRESENCIA DE RADIO-NÚCLIDOS EMISORES GAMMA EN LOS SUELOS DE LAS ISLAS CANARIAS OCCIDENTALES

En la **Tabla 3.51** se resumen los estadísticos descriptivos básicos correspondientes al conjunto de valores obtenidos de la actividad específica de los radionúclidos ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs y ^{134}Cs , en las muestras de suelo recogidas en las cuatro islas Canarias más occidentales del archipiélago.

Tabla 3.51.- Promedio, mediana, máximo, mínimo y desviación estándar del conjunto de valores obtenidos de concentración de radionúclidos emisores gamma, en el conjunto de suelos recogidos en Tenerife, La Palma, La Gomera y El Hierro.

Todas las islas	[Ra-226] (Bq kg⁻¹)	[Th-232] (Bq kg⁻¹)	[K-40] (Bq kg⁻¹)	[Cs-137] (Bq kg⁻¹)	[Cs-134] (Bq kg⁻¹)
MEDIA ARITM.	39,6	49,6	572,9	15,6	1,0
MÁXIMO	104	111,6	1488,8	100,9	7,8
MÍNIMO	6,1	9,3	57,6	0,0	0,0
DESV. STD.	19,6	24,4	351,7	16,2	1,9
MEDIANA	39,2	47,4	484,5	11,8	0,0
Nº muestras	133	133	133	115	115

Los valores promedio obtenidos para las concentraciones de los radionúclidos naturales emisores gamma analizados, son bastante superiores a los que se presentan en los *Informes UNSCEAR-82*^[2] y *UNSCEAR-88*^[1] como media mundial (25 Bq kg⁻¹, 25 Bq kg⁻¹ y 370 Bq kg⁻¹): 158% para el ^{226}Ra , 198% para el ^{232}Th y 155% para el ^{40}K .

Los valores promedios centrales dados en el *Informe UNSCEAR-93*^[3] para China, resultan ser prácticamente iguales a los obtenidos como media aritmética de las 133 determinaciones hechas en las islas, mientras que son claramente inferiores los indicados para Estados Unidos en el mismo informe de la ONU: 370, 35 y 40 Bq kg⁻¹, respectivamente, para ^{40}K , ^{232}Th y ^{226}Ra , frente a 573, 50 y 40 como media de las islas.

Del análisis de los resultados presentados en la **Tabla 3.51** anterior, también se observa que los valores de concentración presentados como media para toda España por Quindós y colaboradores^[66] (39, 41 y 578 Bq kg⁻¹, respectivamente, para ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K) son muy similares a los obtenidos para las Canarias occidentales.

Es meramente anecdótico comparar nuestras determinaciones en las islas con los elevados niveles de concentración de radionúclidos en suelos encontrados en ciertos lugares del planeta, como en el municipio de Sertao^[102], en Brasil, con promedios de 98,5 ± 12 Bq kg⁻¹ para el ²²⁶Ra, 1533 ± 169 Bq kg⁻¹ para el ⁴⁰K y, sobre todo, los 252,5 ± 47 Bq kg⁻¹ para el ²³²Th, que se aproximan e incluso superan a los valores máximos encontrados en las islas donde se han llevado a cabo estas medidas.

En la **Tabla 3.52** se presenta un resumen comparativo de los resultados de las medidas en las islas y en las publicaciones citadas.

Tabla 3.52.- Valores promedio de la concentración de los radionúclidos naturales presentes en los suelos de las islas Canarias occidentales, comparados con los obtenidos para el conjunto de España y del mundo.

	[Ra-226] (Bq kg ⁻¹)		[Th-232] (Bq kg ⁻¹)		[K-40] (Bq kg ⁻¹)	
	MEDIA	RANGO	MEDIA	RANGO	MEDIA	RANGO
ISLAS CANARIAS OCCIDENTALES	40	6-104	50	9-112	573	58-1489
ESPAÑA^[66]	39	8-310	41	5-258	578	31-2040
MUNDO^{[1][2]}	25	10-50	25	7-50	370	100-700
CHINA^[3]	37±22	2-430	49±28	2-440	580±220	12-2190
USA^[3]	40	8-160	35	4-130	370	100-700

III.4.- PRESENCIA DE ^{134}Cs Y ^{137}Cs EN LOS SUELOS DE LA ISLA DE TENERIFE

III.4.1.- INTRODUCCIÓN

Una vez construido el mapa de los niveles de radiactividad natural de las islas Canarias Occidentales, tanto en lo que se refiere a la radiación gamma en el aire como a la presencia de radionúclidos emisores gamma en los suelos, se podrá usar esta información como referencia para establecer la incidencia de cualquier cambio en el nivel de radiactividad natural.

De entre los radionúclidos detectados hay que destacar el ^{137}Cs y el ^{134}Cs , isótopos cuya presencia en la naturaleza del archipiélago canario no tiene una clara explicación si se tiene en cuenta la lejanía de las islas a los posibles centros productores de estas sustancias, no habiéndose comunicado nunca el transporte atmosférico desde lugares donde se han producido en los últimos años emisiones incontroladas (por ejemplo Chernobyl). Con ánimo de tratar de encontrar alguna relación entre sus concentraciones y procesos de depósito desde la atmósfera (*fall-out*), se decidió llevar a cabo la determinación de las actividades específicas de ambos radionúclidos a distintas profundidades en los mismos lugares en que fueron detectados en la superficie del suelo en el estudio inicial.

III.4.2.- VARIACIÓN CON LA PROFUNDIDAD DE LA CONCENTRACIÓN DE ^{134}Cs Y ^{137}Cs EN LOS SUELOS DE LA ISLA DE TENERIFE

En los suelos de la isla de Tenerife donde se midieron los mayores niveles de concentración de ^{134}Cs y ^{137}Cs durante la primera campaña de medidas de radioemisores gamma, se realizó en los mismos lugares una segunda recogida de muestras 4 años más tarde para, mediante análisis espectrométrico, poder comprobar la evolución de la presencia de estos radionúclidos artificiales en Canarias.

Para la recogida de las nuevas muestras de suelo se seleccionaron, de entre los 103 puntos en que se dividió la isla de Tenerife en la primera campaña, aquellos puntos donde los niveles de concentración de ^{137}Cs superaron los 30 Bq kg^{-1} (13 lugares: **Tabla 3.53**) y/o aquéllos donde la concentración de ^{134}Cs resultó mayor de 5 Bq kg^{-1} (7 lugares: **Tabla 3.54**). En un solo caso se habían superado ambos valores simultáneamente, y fue en el lugar denominado: “*El Cabezón*” (*El Portillo/Las Cañadas*), correspondiente al cuadro C58-M11.

Tabla 3.53.- Lugares donde en la primera campaña, se obtuvo $[^{137}\text{Cs}] > 30 \text{ Bq kg}^{-1}$.

Cuadro	Lugar	$[^{137}\text{Cs}]$ en la 1ª campaña (Bq kg^{-1})	s
24	Las Lagunetas (La Esperanza)	100,9	2,5
12	El Bronco (La Laguna)	70,3	2,2
40	La Caldera (La Orotava)	52,9	0,9
18	Barranco Hondo	50,4	1,9
38	La Quinta (Santa Ursula)	43,4	1,6
31	Lomo Mesetas (Sta. Ursula)	41,6	1,1
2	Iguste de San Andrés	39,8	1,2
23	Jara (Agua García)	35	0,8
29	El Sauzal	35	1
75	San Marcos-Riquer (Icod)	34,1	1,7
96	Era del Llano (Alcalá)	32,3	1,6
58	<i>El Cabezón (Portillo/Cañadas)</i>	31,2	1,2
85	San Juan del Reparo (Garachico)	30,8	1

Tabla 3.54.- Lugares donde en la primera campaña, se obtuvo [¹³⁴Cs] > 5 Bq kg⁻¹.

Cuadro	Lugar	[¹³⁴ Cs] en la 1ª campaña (Bq kg ⁻¹)	s
36	Arico El Viejo	7,8	0,7
51	Fuente Madre del Agua (Izaña)	6,9	0,8
17	La Esperanza	6,5	1,2
58	<i>El Cabezón (Portillo/Cañadas)</i>	6,5	0,9
62	Cruz de Tea (Vilafior/Granadilla)	6	0,8
44	Los Gavilanes (Lomo de Arico)	5,6	0,6
57	Fuente del Bardo (Icod El Alto)	5,6	0,8

En el estudio también se incluyó, como punto de referencia, otro lugar localizado en el Cuadro 22 (C22-M5: “*Tacoronte-Los Naranjeros*”), en cuyo suelo se encontraron, en la primera campaña, unos valores de concentración de los radionúclidos medidos del orden de los promedios encontrados para todas las islas. Con ello, las determinaciones se circunscribieron a un total de 20 lugares repartidos por toda la isla de Tenerife.

Con el objetivo de analizar la difusión en profundidad del ¹³⁷Cs y del ¹³⁴Cs desde la capa más externa del suelo hacia zonas más profundas, se tomaron muestras en tres diferentes niveles: en la superficie del terreno, a 30 cm y a 60 cm de profundidad.

El tratamiento dado a las porciones de suelo recolectadas (de volumen 25 x 25 x 5 cm³) fue ya descrito anteriormente: Se llevaron a cabo los habituales procesos de limpieza, secado, molido y tamizado, hasta conseguir muestras que fueron analizadas en geometría Marinelli de 1 litro, por espectrometría gamma, en el detector de germanio intrínseco del Laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental de la Universidad de La Laguna.

Además de las actividades específicas del ¹³⁴Cs y del ¹³⁷Cs, se determinaron las concentraciones del ²²⁶Ra, ⁴⁰K, ²³²Th y ²³⁸U de todas las muestras. En todas las medidas realizadas en el equipo de germanio, el tiempo de recolección fue de 8 horas y se seleccionaron 2.048 canales en el analizador multicanal. El nivel de confianza fue del 95% y el margen de error considerado de $\pm 2\sigma$.

El conjunto de resultados obtenidos se detallan en las Tablas que se presentan a continuación.

Tabla 3.55.- Concentraciones medidas de ^{134}Cs a diferentes profundidades.

Cuadro	Lugar	0 cm		30 cm		60 cm	
		^{134}Cs (Bq kg ⁻¹)	2S	^{134}Cs (Bq kg ⁻¹)	2S	^{134}Cs (Bq kg ⁻¹)	2S
36	Arico El Viejo	LID<1,0	-	LID<0,8	-	LID<0,8	-
51	Fuente Madre del Agua (Izaña)	LID<0,9	-	LID<0,8	-	LID<0,7	-
17	La Esperanza	LID<1,2	-	LID<1,4	-	LID<1,2	-
58	El Cabezón (Portillo/Cañadas)	LID<1,4	-	LID<1,5	-	LID<1,4	-
62	Cruz de Tea (Vilafior/Granadilla)	LID<1,2	-	LID<1,2	-	LID<1,1	-
44	Los Gavilanes (Lomo de Arico)	LID<1,0	-	LID<1,0	-	LID<1,0	-
57	Fuente del Bardo (Icod El Alto)	LID<1,1	-	LID<1,0	-	LID<1,1	-
24	Las Lagunetas (La Esperanza)	LID<0,4	-	LID<0,3	-	LID<0,3	-
12	El Bronco (La Laguna)	LID<0,5	-	LID<0,6	-	LID<0,5	-
40	La Caldera (La Orotava)	LID<1,1	-	LID<1	-	LID<0,8	-
18	Barranco Hondo	LID<0,6	-	LID<0,6	-	LID<0,7	-
38	La Quinta (Santa Ursula)	LID<0,9	-	LID<0,8	-	LID<0,8	-
31	Lomo Mesetas (Sta. Ursula)	LID<0,6	-	LID<0,4	-	LID<0,5	-
2	Iguste de San Andrés	LID<0,5	-	LID<0,5	-	LID<0,5	-
23	Jara (Agua García)	LID<1,0	-	LID<1,0	-	LID<1,1	-
29	El Sauzal	LID<0,7	-	LID<0,7	-	LID<0,7	-
75	San Marcos-Riquer (Icod)	LID<1,2	-	LID<1,2	-	LID<1,2	-
96	Era del Llano (Alcalá)	LID<0,8	-	LID<0,8	-	LID<0,8	-
58	El Cabezón (Portillo/Cañadas)	LID<1,4	-	LID<1,5	-	LID<1,4	-
85	S. Juan del Reparó (Garachico)	LID<0,9	-	LID<0,9	-	LID<0,8	-
22	Tacoronte - Los Naranjeros	LID<0,9	-	LID<0,8	-	LID<0,9	-

En la **Tabla 3.55** anterior se observa que la concentración de ^{134}Cs detectada en la campaña inicial, ha decrecido en unos pocos años hasta valores que han sido en todos los casos inferiores a los límites de detección (LID), lo que demuestra que no ha habido nuevos aportes de este radionúclido artificial en los últimos años.

De todas formas se aprecia, en la mayoría de los casos, que los valores de actividad medidos son superiores en la superficie del terreno (0 cm), disminuyendo ligeramente a medida que vamos alcanzando capas más profundas (30 y 60 cm).

Tabla 3.56.- Concentraciones medidas a distintas profundidades de ^{137}Cs .

Cuadro	Lugar	0 cm		30 cm		60 cm	
		^{137}Cs (Bq kg ⁻¹)	2S	^{137}Cs (Bq kg ⁻¹)	2S	^{137}Cs (Bq kg ⁻¹)	2S
36	Arico El Viejo	LID<0,5	-	LID<0,5	-	LID<0,5	-
51	Fuente Madre del Agua (Izaña)	15,5	0,75	LID<0,5	-	LID<0,5	-
17	La Esperanza	14,6	0,85	LID<0,6	-	LID<0,5	-
58	El Cabezón (Portillo/Cañadas)	29,0	1,27	LID<0,7	-	LID<0,7	-
62	Cruz de Tea (Vilafior/Granadilla)	9,4	0,82	LID<0,6	-	LID<0,5	-
44	Los Gavilanes (Lomo de Arico)	25,2	1,10	1,7	0,42	LID<0,5	-
57	Fuente del Bardo (Icod El Alto)	25,8	1,13	LID<0,5	-	LID<0,5	-
24	Las Lagunetas (La Esperanza)	19,3	0,81	1,0	0,15	LID<0,2	-
12	El Bronco (La Laguna)	10,3	0,52	0,3	0,18	LID<0,3	-
40	La Caldera (La Orotava)	41,5	1,72	2,7	0,45	LID<0,4	-
18	Barranco Hondo	22,4	0,99	0,6	0,26	0,4	0,28
38	La Quinta (Santa Ursula)	12,7	0,65	5,5	0,40	2,4	0,31
31	Lomo Mesetas (Sta. Ursula)	56,0	2,20	2,5	0,27	1,4	0,22
2	Iguste de San Andrés	18,3	0,79	0,6	0,16	0,3	0,16
23	Jara (Agua García)	23,8	1,06	0,8	0,33	0,6	0,32
29	El Sauzal	11,5	0,58	LID<0,4	-	LID<0,4	-
75	San Marcos-Riquer (Icod)	13,5	0,69	LID<0,5	-	LID<0,6	-
96	Era del Llano (Alcalá)	4,2	0,45	LID<0,4	-	LID<0,4	-
58	El Cabezón (Portillo/Cañadas)	29,0	1,27	LID<0,7	-	LID<0,7	-
85	S. Juan del Reparó (Garachico)	27,9	1,22	LID<0,4	-	LID<0,5	-
22	Tacoronte - Los Naranjeros	7,8	0,48	4,2	0,53	1,1	0,36

Como los puntos en los que se presentaron los mayores valores de actividad de ^{137}Cs corresponden a algunas de las zonas más lluviosas y situadas al norte de Tenerife, podría considerarse que factores meteorológicos y geológicos son los que han influido en los procesos de posible *fall-out* que ha producido el depósito y fijación de estas sustancias en el suelo, apreciación ésta en la que se coincide con otros autores que han realizado un estudio similar en otras zonas del mundo^[84].

En general las medidas ponen de relieve que el depósito de Cesio en los suelos de Tenerife se produjo con anterioridad a 1.990 y que desde entonces no se han producido nuevos aportes de este elemento, como indica la disminución en la actividad del ^{137}Cs y la no detección de ^{134}Cs en esta segunda campaña.

También se observa una fuerte disminución de la concentración con la profundidad a la que se extrae la muestra a medir, lo que parece indicar que los suelos analizados no presentan las características típicas de los minerales que tienen una gran capacidad para fijar Cesio. Únicamente en 10 lugares se comprobó la existencia de pequeñas concentraciones de ^{137}Cs a 30 cm de profundidad y en 6 su presencia a 60 cm, con valores máximos de concentración de 5,5 y 2,4 Bq kg⁻¹, respectivamente. Asimismo se observa que la concentración en las zonas más profundas (capas situadas a 30 y 60 cm de la superficie) es siempre inferior a la medida en las capas inmediatamente superiores (0 y 30 cm de profundidad, respectivamente).

No se ha podido encontrar ninguna relación matemática que sea representativa de la difusión del ^{137}Cs desde la superficie hacia capas más internas de la corteza terrestre. En los 10 puntos donde se ha detectado este radionúclido a 30 cm, la concentración medida a esta profundidad se relaciona con la encontrada en la superficie de ese mismo lugar mediante factores que van, en nuestro estudio, desde 40 (“*Barranco Hondo*”) a 1,8 (“*Tacoronte - Los Naranjeros*”) y 2,3 (“*La Quinta - Santa Úrsula*”). En estos dos últimos lugares, donde la cantidad encontrada de ^{137}Cs en capas más profundas del suelo alcanza una cierta significación con relación a la medida en la superficie, es probable que el suelo hubiera sido removido de forma no natural en los últimos años, ya que se trata de un terreno cercano a solares en edificación.

El factor correspondiente a la posible relación entre las concentraciones medidas de ^{137}Cs a 30 y 60 cm de profundidad, tampoco es constante y varía en nuestras muestras entre 1,4 y 4.

A partir de los resultados obtenidos, por lo tanto, no hemos encontrado ninguna relación matemática que explique la difusión de estos dos isótopos del Cesio en capas más profundas del terreno, aunque todo parece indicar que la migración hacia el interior del suelo, depende de las características del suelo y de las condiciones meteorológicas de la zona, sobre todo de su régimen de lluvias.

Las actividades específicas del ^{226}Ra encontradas en las muestras de suelo obtenidas en los 20 lugares seleccionados, se presentan en la **Tabla 3.57**.

Tabla 3.57.- Concentraciones medidas de Ra-226 en muestras de suelo recogidas en la superficie, a 30 cm y a 60 cm de profundidad.

Cua- dro	Lugar	0 cm		30 cm		60 cm	
		^{226}Ra (Bq kg ⁻¹)	2s	^{226}Ra (Bq kg ⁻¹)	2s	^{226}Ra (Bq kg ⁻¹)	2s
36	Arico El Viejo	44,5	6,83	32,8	6,76	30,1	6,17
51	Fuente Madre del Agua (Izaña)	41,4	6,34	37,6	6,83	43,1	7,62
17	La Esperanza	77,2	10,9	100,0	13,9	84,8	11,8
58	El Cabezón (Portillo/Cañadas)	70,3	10,2	78,3	11,2	75,5	10,8
62	Cruz de Tea (Vilaflor/Granadilla)	67,9	11,1	66,6	9,55	66,9	9,59
44	Los Gavilanes (Lomo de Arico)	47,9	7,17	45,5	8,03	45,9	6,93
57	Fuente del Bardo (Icod El Alto)	48,3	7,21	51,0	8,34	47,6	7,10
24	Las Lagunetas (La Esperanza)	7,31	1,72	7,38	1,64	5,07	1,42
12	El Bronco (La Laguna)	16,7	2,98	17	3,06	15,8	2,93
40	La Caldera (La Orotava)	40	7,97	42,8	6,41	24,5	3,97
18	Barranco Hondo	21,6	3,66	24,1	4,1	23,1	4,1
38	La Quinta (Santa Ursula)	40	7,17	39,7	5,93	38,3	6,55
31	Lomo Mesetas (Sta. Ursula)	18	3,52	16,7	3,03	15,1	2,84
2	Iguste de San Andrés	15,4	2,77	11,5	2,32	14,8	3,48
23	Jara (Agua García)	85,9	11,9	66,6	9,52	68,6	9,83
29	El Sauzal	23,7	3,93	26,1	5,1	27,8	5,34
75	San Marcos-Riquer (Icod)	66,6	9,52	67,6	9,59	65,9	9,41
96	Era del Llano (Alcalá)	32,5	5	30,4	4,66	26,4	4,24
58	El Cabezón (Portillo/Cañadas)	70,3	10,2	78,3	11,2	75,5	10,8
85	S. Juan del Reparó (Garachico)	35,5	6,72	27,2	4,41	31,3	4,93
22	Tacoronte - Los Naranjeros	38,6	5,86	36,6	5,52	43,1	6,34

Los valores medios, extremos y desviación estándar de los valores encontrados de concentración de ^{226}Ra en los tres diferentes niveles, en cada lugar de medida, se indican en la **Tabla 3.58** siguiente.

Tabla 3.58.- Medias aritmética y geométrica, mediana, máximo, mínimo y desviación estándar de los valores de ^{226}Ra medidos a diferentes profundidades en los diferentes lugares de la isla de Tenerife.

Ra-226	0 cm (Bq kg⁻¹)	2s	30 cm (Bq kg⁻¹)	2s	60 cm (Bq kg⁻¹)	2s
MEDIA ARITMÉTICA	43,3	6,8	43,0	6,7	41,4	6,5
MEDIA GEOMÉTRICA	36,8	6	35,7	5,9	34	5,7
MÁXIMO	85,9	11,9	100,0	13,9	84,8	11,8
MÍNIMO	7,3	1,7	7,4	1,6	5,1	1,4
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	22,5	3	24,9	3,3	23	3
MEDIANA	40,0	6,8	37,6	6,4	38,3	6,3

Estos valores se mantienen en los órdenes de magnitud de los obtenidos como media para el conjunto de las islas Canarias Occidentales, con una media aritmética de 40 Bq kg⁻¹ y un rango de 6 a 104 Bq kg⁻¹.

En general, la ligera variación de la concentración de ^{226}Ra en cada una de las capas más profundas del terreno no mantiene una distribución determinada, permaneciendo prácticamente constante si se tienen en consideración los márgenes de error con los que fue realizada la medida ($\pm 2\sigma$).

Los valores encontrados de concentración de ^{40}K en las muestras recogidas en los distintos niveles del suelo, en los puntos indicados de la isla de Tenerife, fueron los que aparecen en la siguiente **Tabla 3.59**.

Tabla 3.59.- Concentraciones de K-40 medidas a diferentes profundidades.

Cua- dro	Lugar	0 cm		30 cm		60 cm	
		$[\text{}^{40}\text{K}]$ (Bq kg $^{-1}$)	2s	$[\text{}^{40}\text{K}]$ (Bq kg $^{-1}$)	2s	$[\text{}^{40}\text{K}]$ (Bq kg $^{-1}$)	2s
36	Arico El Viejo	1007	63,4	796	50,1	730	46,3
51	Fuente Madre del Agua (Izaña)	861	53,9	1168	72,8	1175	73,7
17	La Esperanza	518	33,4	511	33	436	28,2
58	El Cabezón (Portillo/Cañadas)	1131	71	1219	76,6	1226	76,6
62	Cruz de Tea (Vilaflor/Granadilla)	1000	62,8	927	58	905	56,6
44	Los Gavilanes (Lomo de Arico)	710	45	663	42,1	654	41,7
57	Fuente del Bardo (Icod El Alto)	419	27,4	464	30,1	500	32,2
24	Las Lagunetas (La Esperanza)	39,6	3,53	30,4	3,04	21,3	2,8
12	El Bronco (La Laguna)	79,6	6,54	47,2	4,5	46	4,84
40	La Caldera (La Orotava)	259	18,6	169	12,3	77,4	6,41
18	Barranco Hondo	209	14,1	306	20,1	321	21,1
38	La Quinta (Santa Ursula)	635	40,2	558	35,5	543	34,7
31	Lomo Mesetas (Sta. Ursula)	82,5	6,9	92,7	7,3	97,1	7,52
2	Iguste de San Andrés	241	16	231	15,4	258	17,1
23	Jara (Agua García)	176	12,7	218	15,3	239	16,6
29	El Sauzal	398	25,7	422	27,2	386	24,9
75	San Marcos-Riquer (Icod)	1212	75,2	1226	75,9	1255	78,1
96	Era del Llano (Alcalá)	639	40,3	555	35,1	571	36,1
58	El Cabezón (Portillo/Cañadas)	1131	71	1219	76,6	1226	76,6
85	S. Juan del Reparó (Garachico)	423	27,4	379	24,7	420	27,3
22	Tacoronte - Los Naranjeros	481	30,9	464	29,7	569	36,2

La variación de la concentración de ^{40}K a diferentes profundidades no mantiene una distribución que pueda ser representada por una relación matemática manejable, presentando alteraciones que, en algunos casos, superan los márgenes de error con los que fue realizada la medida ($\pm 2\sigma$).

En la siguiente **Tabla 3.60** se presentan los estadísticos básicos correspondientes a las medidas de ^{40}K en los distintos lugares y a las diferentes profundidades.

Tabla 3.60.- Valores medios, extremos y desviación estándar de la concentración de ^{40}K medida a distintas profundidades.

K-40	0 cm (Bq kg⁻¹)	2s	30 cm (Bq kg⁻¹)	2s	60 cm (Bq kg⁻¹)	2s
MEDIA ARITMÉTICA	532,2	34,1	543,6	34,8	546,4	35,0
MEDIA GEOMÉTRICA	380,4	25,7	371,3	25,28	358	24,95
MÁXIMO	1211,7	75,2	1226,3	76,6	1255,5	78,1
MÍNIMO	39,6	3,5	30,4	3,0	21,3	2,8
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	373,2	22,78	403,8	24,71	410,1	25,06
MEDIANA	451,8	29,2	464,2	29,9	467,9	30,2

Los resultados obtenidos se encuentran dentro de los promedios y rango de los valores encontrados para el conjunto de las medidas realizadas en todas las islas (ver **Tabla 3.52**) para este radionúclido.

En la **Tabla 3.61** se presentan los resultados de las medidas de concentración de ^{232}Th en las diferentes muestras recolectadas en los tres distintos niveles.

Tabla 3.61.- Concentraciones medidas de Th-232 a distintas profundidades del suelo.

Cua- dro	Lugar	0 cm		30 cm		60 cm	
		^{232}Th (Bq kg ⁻¹)	2S	^{232}Th (Bq kg ⁻¹)	2S	^{232}Th (Bq kg ⁻¹)	2S
36	Arico El Viejo	81,1	6,36	88,2	6,34	86,6	6,19
51	Fuente Madre del Agua (Izaña)	72,8	5,33	56,5	4,1	65,5	4,67
17	La Esperanza	86,6	6,24	114	8,03	81,9	5,93
58	El Cabezón (Portillo/Cañadas)	96,9	7,13	106	7,63	96,9	6,86
62	Cruz de Tea (Vilafior/Granadilla)	94,5	6,76	92,9	6,48	105	7,6
44	Los Gavilanes (Lomo de Arico)	72	5,14	76,8	5,58	78,4	5,72
57	Fuente del Bardo (Icod El Alto)	58,8	4,32	63,1	4,56	64,8	5,03
24	Las Lagunetas (La Esperanza)	11,2	1,11	11,8	1,08	10,2	1,07
12	El Bronco (La Laguna)	30,5	2,55	29,8	2,33	29,6	2,42
40	La Caldera (La Orotava)	42,6	3,37	49,4	3,96	30	2,36
18	Barranco Hondo	38	2,95	74,6	5,31	79,5	5,77
38	La Quinta (Santa Ursula)	60,3	4,5	57,4	4,46	52,4	3,82
31	Lomo Mesetas (Sta. Ursula)	26,9	2,21	28,2	2,39	29,1	2,38
2	Iguste de San Andrés	19,4	1,62	20	1,97	20,1	1,69
23	Jara (Agua García)	81,1	5,91	81,1	6,06	77,6	5,57
29	El Sauzal	35,7	2,7	44,4	3,43	40,9	3,24
75	San Marcos-Riquer (Icod)	81,1	5,91	89,8	6,43	85,8	6,26
96	Era del Llano (Alcalá)	37,6	2,85	37,4	2,79	36,6	2,76
58	El Cabezón (Portillo/Cañadas)	96,9	7,13	106	7,63	96,9	6,86
85	S. Juan del Reparó (Garachico)	38,6	3,27	34,5	2,69	37,4	2,92
22	Tacoronte - Los Naranjeros	48	3,54	46,4	3,4	52,5	3,97

Los estadísticos que se presentan en la **Tabla 3.62** indican que los valores encontrados a las diferentes profundidades de concentración de ^{232}Th , son ligeramente más altos que los obtenidos para el conjunto de las cuatro islas occidentales del archipiélago (promedio de 50 Bq kg^{-1} , en un rango de 9 a 112 Bq kg^{-1}).

Tabla 3.62.- Medias, rango y desviación estándar de los valores de concentración de ^{232}Th en las diferentes medidas realizadas en esta parte del estudio.

Th-232	0 cm (Bq kg⁻¹)	2s	30 cm (Bq kg⁻¹)	2s	60 cm (Bq kg⁻¹)	2s
MEDIA ARITMÉTICA	57,6	4,3	62,3	4,6	59,9	4,4
MEDIA GEOMÉTRICA	50,3	3,88	53,9	4,1	51,8	3,95
MÁXIMO	96,9	7,1	114,2	8,0	104,7	7,6
MÍNIMO	11,2	1,1	11,8	1,1	10,2	1,1
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	27	1,88	30,2	2,04	28,3	1,92
MEDIANA	58,8	4,3	57,4	4,5	64,8	4,7

Las medidas de la actividad específica del ^{232}Th a diferentes profundidades presenta en general diferencias fácilmente achacables a los márgenes de error con los que fue realizada la medida ($\pm 2\sigma$). No obstante, en ciertos casos, aparecen variaciones importantes en los valores obtenidos, los cuales aumentan con la profundidad en unos casos disminuyendo en otros.

En este análisis de los suelos de la isla de Tenerife, también se determinaron las concentraciones de ^{238}U , cosa que hasta ese momento no se había considerado. Los resultados obtenidos aparecen resumidos en la **Tabla 3.63** siguiente.

Tabla 3.63.- Variación con la profundidad de las concentraciones medidas de U-238.

Cuadro	Lugar	0 cm		30 cm		60 cm	
		[²³⁸ U] (Bq kg ⁻¹)	2S	[²³⁸ U] (Bq kg ⁻¹)	2S	[²³⁸ U] (Bq kg ⁻¹)	2S
36	Arico El Viejo	LID<11,9	-	LID<11,2	-	LID<10,8	-
51	Fuente Madre del Agua (Izaña)	LID<11	-	155	26,7	165	24,1
17	La Esperanza	LID<12,1	-	LID<13,6	-	LID<11,7	-
58	El Cabezón (Portillo/Cañadas)	LID<14,1	-	LID<14,9	-	LID<14,5	-
62	Cruz de Tea (Vilafior/Granadilla)	LID<12,6	-	LID<12,5	-	LID<12,4	-
44	Los Gavilanes (Lomo de Arico)	LID<11,5	-	LID<11,3	-	LID<11,4	-
57	Fuente del Bardo (Icod El Alto)	LID<11,2	-	LID<10,9	-	LID<11,1	-
24	Las Lagunetas (La Esperanza)	30,7	6,76	34	8,7	33,6	6,11
12	El Bronco (La Laguna)	76,7	13,3	86,3	13,7	93,4	13,9
40	La Caldera (La Orotava)	LID<11,7	-	LID<10,4	-	LID<7,9	-
18	Barranco Hondo	LID<7,8	-	LID<9,3	-	LID<10	-
38	La Quinta (Santa Ursula)	LID<10	-	LID<9,5	-	LID<9,3	-
31	Lomo Mesetas (Sta. Ursula)	71,9	15,4	50,3	14,7	68,6	13,1
2	Iguste de San Andrés	49,3	11,5	49,4	12,7	54,9	11,5
23	Jara (Agua García)	203	26,9	192	26,1	LID<12,5	-
29	El Sauzal	LID<8,1	-	LID<8,6	-	106	16,7
75	San Marcos-Riquer (Icod)	LID<12,2	-	LID<11,9	-	LID<12,1	-
96	Era del Llano (Alcalá)	LID<8,6	-	LID<8,0	-	LID<8,1	-
58	El Cabezón (Portillo/Cañadas)	LID<14,1	-	LID<14,9	-	LID<14,5	-
85	S. Juan del Reparó (Garachico)	LID<9,2	-	LID<8,7	-	LID<9,4	-
22	Tacoronte - Los Naranjeros	LID<9,6	-	LID<8,9	-	LID<9,5	-

Las características geológicas del suelo de Tenerife parece que pueden explicar las bajísimas actividades encontradas para la serie del ²³⁸U, que en la mayoría de los casos han sido inferiores a los límites de detección (LID). No obstante, en los suelos de cinco localizaciones donde se tomaron muestras en este último estudio, se apreciaron en la superficie concentraciones medibles de este radionúclido con valores que oscilaron entre 30 y 203 Bq kg⁻¹, con una presencia variable en las capas inferiores del terreno de estos lugares.

III.5.- TASA DE DOSIS ABSORBIDA EN AIRE Y COMPOSICIÓN GEOLÓGICA DEL SUELO

III.5.1.- INTRODUCCIÓN

El origen volcánico de las Islas Canarias determina las peculiares características de sus suelos. Parte de ellos se han conformado a partir de erupciones volcánicas relativamente recientes, como las últimas ocurridas en Tenerife (Teide y Volcán de Güimar) o en la isla de La Palma, donde se han dado dos erupciones en los últimos años, la más reciente en 1.973 (Volcán de Teneguía).

Por el contrario, otros suelos, los más antiguos, datan de periodos geológicos anteriores al Mioceno en la Era Terciaria. Esta clase de terrenos se localizan, sobre todo, en Tenerife, en la Cordillera de Anaga y en las formaciones montañosas de Masca y el Acantilado de los Gigantes (costas noreste y suroeste de la isla, respectivamente), y en determinadas zonas de las islas de La Gomera y de El Hierro^[103].

Se trató de encontrar la relación entre la composición geológica del terreno y la medida de la tasa de dosis debida a la radiación gamma ambiental detectada en aire a 1 metro de la superficie del suelo la cual, una vez deducida la componente de radiación cósmica, vendrá únicamente determinada por la concentración de los radionúclidos emisores gamma componentes del mismo^[104].

III.5.2.- RELACIÓN ENTRE LA TASA DE DOSIS ABSORBIDA EN AIRE POR RADIACIÓN GAMMA AMBIENTAL Y LA COMPOSICIÓN GEOLÓGICA DEL SUELO

Las características geológicas del suelo que se consideraron, al ser las que previsiblemente van a tener mayor influencia en el valor de la tasa de dosis absorbida en aire, han sido: la composición química originaria (lavas básicas o ácidas, de tipo alcalino o silíceo), el tipo de rocas ígneas que lo constituye (coladas basálticas, piroclastos, traquibasaltos, traquiandesitas, andesitas, traquitas, fonolitas, etc.) y la edad geológica del sustrato (Series I, II, III ó IV) ^[105].

Las determinaciones se realizaron en la isla de Tenerife (la más extensa del archipiélago) debido, por un lado, a sus peculiaridades geológicas dentro de la geografía canaria, con una gran diversidad de suelos de todos los tipos y edades, y por otro, porque la densidad de puntos de medida disponibles era muy superior a la de cualquier otra isla.

Las características geológicas de cada lugar de medida se obtuvieron identificando cada punto concreto en los mapas correspondientes a la isla de Tenerife dentro del conjunto de los **Mapas Edafológicos de Canarias**^[73].

Las medidas de la tasa de dosis absorbida en aire debida a radiación gamma se realizaron utilizando el aparato, descrito en el Capítulo de "**Material y Método**" (II.1.2.7.- *Equipo detector Geiger-Müller*), de la marca Mini-Instrument, modelo 6-80, dotado de una sonda Geiger-Müller compensada en energía, modelo MC-71. Las medidas se llevaron a cabo según el procedimiento indicado anteriormente en esta misma Memoria (II.2.2.1.- *Dosis en aire debida a radiación gamma natural: Procedimiento general de medida*). Con objeto de obtener los valores netos de la tasa de dosis en aire se le restaron, a los valores obtenidos, los correspondientes a la radiación cósmica en cada punto (ver **Tabla 3.2**) y al valor de fondo del aparato de medida (II.2.2.2.- *Determinación del "Fondo" de los equipos de medida de radiación gamma en aire*).

Para simplificar la comparación entre la tasa de dosis medida en aire y el tipo de terreno, se realizó una agrupación que contempló únicamente dos clases de suelos diferentes: Los que denominamos "**tipo A**", corresponden a los de composición química básica y ultrabásica, con bajos porcentajes en peso en óxidos de metales alcalinos, y formados por rocas ígneas de basaltos, traquibasaltos y piroclastos, y los suelos de "**tipo B**", agrupados por tener una composición química intermedia o ácida, con mayor presencia de óxidos de metales alcalinos, y constituidos por rocas ígneas traquiandesitas, traquitas, fonolitas (pumitas) y sálicas. La antigüedad relativa permite clasificar los suelos dentro de las series I y II (antiguos: de la era terciaria; predominantemente, suelos tipo A) y de las series III y IV (modernos: de la era cuaternaria; predominantemente, suelos tipo B).

La siguiente **Tabla 3.64** presenta, de forma esquemática, las características más importantes para cada uno de los dos grupos indicados^[105].

Tabla 3.64.- Características de los suelos tipo A y tipo B.

Tipo de suelo	Composición química	SiO ₂ (% en peso)	Na ₂ O + K ₂ O (% en peso)	Tipo de rocas ígneas	Antigüedad geológica predominante
<i>A</i>	Ultrabásica y básica	41 – 52	1 - 7	Basaltos, traquibasaltos y piroclastos	Series I y II
<i>B</i>	Neutra y ácida	53 – 69	8 - 15	Tarquiandesitas, traquitas, fonolitas	Series III y IV

En algunas zonas resultó complicado catalogar su suelo dentro de uno de los dos tipos anteriores, ya sea porque sus características no se adaptaban específicamente a ninguno de ellos o porque presentaban propiedades de ambos. A estos suelos se les englobó en la denominación general: “*tipo A-B*”. Siendo consecuentes con la hipótesis planteada, tendrían que corresponder a zonas con niveles de tasa de dosis gamma ambiental con valores intermedios.

A partir de estas premisas se construyó una tabla en la que se colocaron los lugares de medida según el orden creciente de los valores obtenidos de la tasa de dosis gamma absorbida en aire (descontada la radiación cósmica y el *fondo* del detector), frente al tipo de suelo asignado (atendiendo a sus características geológicas y la clasificación anterior), tratando de encontrar la relación entre ambos.

En la **Tabla 3.65** se trasladan tales resultados, con indicación del valor de la tasa de dosis neta, en nGy h⁻¹, la composición geológica del suelo en donde se realizó la medida y la tipología asociada a la configuración del mismo.

Tabla 3.65.- Tasa de dosis neta absorbida en aire y tipo de suelo volcánico del lugar de medida.

Cua- dro	Tasa dosis neta (ngyh⁻¹)	Lugar	Composición geológica del suelo	Tipo de suelo
-	0	Alta Mar (2 Km de Playa de Masca)	-	-
12	18,4	El Bronco (La Laguna)	Coladas basálticas Serie I superior (moderna)	A
2	18,7	Igüeste de San Andrés	Piroclastos Serie I media	A
31	20,6	Lomo Mesetas (Santa Úrsula)	Coladas basálticas Serie II	A
101	21,8	Masca	Basaltos plagioclásicos. Basaltos piroxénicos y ankaramitas. Serie I (antigua)	A
7	23,9	Afur	Piroclastos Serie I media	A
8	25,6	Barrio La Alegría (S/C de Tenerife)	Piroclastos Serie I media / Coladas basálticas Serie I media	A
4	25,8	El Bailadero	Piroclastos Serie I media / Pitón sálico (extrusivos)	A
20	27,2	Montaña Grande (Güimar)	Coladas basálticas Serie IV	A
5	27,3	San Andrés (S/C de Tenerife)	Piroclastos Serie I media	A
40	27,6	La Caldera (La Orotava)	Coladas basálticas Serie III	A
24	27,8	Las Lagunetas (La Esperanza)	Coladas basálticas Serie II / Coladas basálticas Serie III	A
80	28,0	Montaña Teresme (Adeje / Vilaflor)	Basaltos Serie III / Piroclastos Serie III	A
41	29,5	Izaña	Piroclastos basálticos finos Serie III	A
18	29,5	Barranco Hondo	Coladas basálticas Serie III	A
30	29,9	La Matanza	Coladas basálticas Serie III	A
15	31,2	Tejina	Coladas basálticas Serie III	A
103	31,5	Punta de Teno	Coladas basálticas Serie II	A
10	33,2	Roque Dos Hnos. (Punta Hidalgo)	Piroclastos Serie I media	A
42	34,3	Barranco Palmero (Izaña)	Coladas basálticas Serie III	A
102	34,7	Acantilado de Los Gigantes	Alternancias de basaltos olivínicos plagioclásicos y traquibasaltos Serie I (antigua)	A
87	35,1	Altos de Chio	Coladas de basaltos y traquibasaltos Serie IV	A
39	35,2	Cuesta de La Villa (La Orotava)	Coladas basálticas Serie III	A
11	37,8	Moquinal - El Batán	Coladas basálticas Serie I superior (moderna)	A
33	38,0	Barranco de Agua (Güimar)	Coladas basálticas Serie III	A
56	38,1	Mirador Grimona (Realejos)	Coladas basálticas y traquibasálticas con intercalaciones sálicas subordinadas Serie II	A
94	39,4	Santiago del Teide	Coladas basálticas con intercalaciones de escorias Serie I	A
93	39,5	Roque Moradas (Los Silos)	Coladas basálticas y traquibasálticas subordinadas Serie III / Derrubios de ladera Serie IV / Diques básicos	A

100	39,7	Cumbre La Molina (Buenavista)	Derrubios de ladera Periodos históricos Serie IV / Depósitos sedimentarios indeferenciados Periodos históricos Serie IV	A-B
74	40,4	Las Galletas – Ten Bel	Coladas basálticas Serie IV	A
6	40,7	Roque Taborno (Anaga)	Piroclastos Serie I media	A
72	40,7	Valle de San Lorenzo	Coladas basálticas Serie III	A
29	40,8	El Sauzal	Coladas basálticas Serie III	A
22	41,1	Tacoronte – Los Naranjeros	Coladas basálticas Serie III	A
13	43,1	Taco	Coladas basálticas Serie III / Tobas pumíticas Serie III	A-B
23	43,3	Jara (Agua García)	Coladas basálticas Serie III	A
73	44,0	Cañada Verde (Las Galletas)	Coladas basálticas Serie IV	A
84	44,7	Vértice de Rasca (Palm-Mar)	Coladas basálticas Serie III	A
25	46,0	Cuevecitas de Candelaria	Coladas basálticas Serie III	A
14	46,4	Santa María del Mar	Coladas basálticas Serie III	A
90	47,7	Armeñime	Aglomerado poligénico Serie II	A-B
38	47,9	La Quinta (Santa Úrsula)	Coladas basálticas Serie III	A
49	48,6	Montaña del Alto (El Portillo)	Piroclastos de Montaña Guamasa y Montaña Roja Serie III	A
85	48,7	San Juan Reparó (Garachico)	Coladas de traquibasaltos y traquito-fonolíticas máficas (basaltos subordinados) Serie IV	A-B
54	48,9	San Isidro	Coladas basálticas Serie III	A
47	49,6	La Vera (Puerto Cruz)	Coladas traquibasálticas de los conos históricos Serie IV	A
26	49,7	Güimar	Depósitos de barranco Edades radiométricas / Toba pumítica Serie III / Colada basáltica Serie IV	A-B
9	49,9	Santa Cruz de Tenerife	Coladas basálticas Serie III	A
3	51,5	Almáciga	Coladas y piroclastos basálticos del Arco de Taganana Serie I inferior (antigua)	A
32	52,5	Ayosa	Coladas basálticas Serie II / Piroclastos basálticos Serie II	A
81	53,0	Barranco Infierno (Adeje)	Coladas de traquibasaltos Serie II	A
19	54,1	Candelaria	Coladas de traquibasaltos y fonolitas máficas / Tobas pumíticas Series II y III	A-B
82	55,9	Chayofa (Los Cristianos)	Coladas basálticas Serie III	A
16	56,3	El Portezuelo	Coladas basálticas Serie III	A
76	59,1	El Amparo (Icod)	Coladas de basaltos plagioclásicos Series III y IV	A
91	59,1	La Caleta (Adeje)	Coladas de traquibasaltos Serie II	A
95	59,2	Tamaimo	Coladas de basaltos y traquibasálticas Serie IV	A
21	63,4	Valle Guerra	Coladas basálticas Serie III	A
52	63,6	Morro de las Arbejas (Izaña)	Eutaxitas y fonolitas superiores Serie II	B
43	67,0	Morra Ramos – El Bueno (Arico)	Coladas sálicas Serie II	B
78	69,7	Cruz de Tea (Boca Tauce)	Piroclastos basálticos y pirobasálticos Serie IV / Coladas traquibasálticas máficas Montaña Reventada Serie IV	A-B

99	70,1	Buenavista del Norte	Coladas de Montaña de Taco con recubrimientos pumíticos Ser. III / Coladas basálticas con traquibasaltos subordinados Serie III	A-B
28	70,7	La Cardonera (Fasnia)	Coladas basálticas Serie III	A
63	71,5	Las Zocas (San Miguel)	Tobas pumíticas Serie III / Coladas basálticas Serie III	A-B
61	73,1	Madre del Agua (Vilaflor)	Coladas de basaltos y traquibasálticas Serie IV	A
83	75,3	Mesas de Guaza (Los Cristianos)	Coladas traquíticas y/o fonolíticas Serie III	B
96	76,3	Era del Llano (Alcalá)	Coladas recientes Montaña Reventada y otros. Predominio basaltos plagioclásicos Serie IV	A-B
89	77,1	Vera de Erque	Coladas de traquibasaltos Serie II (moderna)	A
92	78,6	Los Silos	Coladas de la Montaña de Taco con recubrimientos pumíticos Serie III	A-B
68	79,0	Pico del Teide	Coladas de la erupción central del Teide Serie IV	A-B
88	79,1	Chirche	Traquibasaltos predominantes y basaltos Serie II	A
17	79,9	La Esperanza	Coladas basálticas Serie III	A
48	80,3	Palo Blanco (Orotava/Realejos)	Coladas traquibasálticas del Portillo Serie IV	A
71	83,4	Los Quemados (Vilaflor)	Coladas basálticas Serie III	A
97	84,3	Playa de San Juan	Traquibasaltos predominantes y basaltos Serie II	A
98	85,8	Marazul (Playa de S.Juan)	Coladas de traquibasaltos Serie II / Coladas de traquibasaltos Serie II (moderna)	A
64	86,9	Los Abrigos – El Guincho	Tobas pumíticas Serie III	B
44	88,4	Los Gavilanes (Lomo de Arico)	Coladas sálicas Serie II / Fonolitas hauynicas Series II y III	B
86	88,9	Vuelta Grande (Boca de Tauce)	Coladas traquíticas máficas de Montaña Reventada Serie IV / Coladas traquibasálticas traquíticas máficas Serie IV	B
1	89,2	Chamorga	Piroclastos Serie I media / Aglomerados volcánicos Serie I superior (moderna)	A-B
55	91,6	Aeropuerto del Sur–Las Tejitas	Tobas pumíticas Serie III	B
57	92,6	Fuente del Bardo (Icod El Alto)	Coladas traquibasálticas con intercalaciones de basaltos y fonolitas subordinadas Serie II	A-B
45	96,8	El Río	Toba pumítica traquítica y/o fonolítica Series II y III	B
66	97,0	La Guancha	Coladas traquítico-fonolíticas de Montaña Avejera Serie IV	B
53	97,1	Los Blanquitos (Granadilla)	Coladas fonolíticas hauynicas Serie II	B
27	97,1	La Medida (Güimar)	Tobas pumíticas Serie III	B
34	98,6	Cno. Arrastradero (El Escobonal)	Coladas basálticas Serie III / Tobas pumíticas Serie III	A-B
69	99,2	Llano de Ucanca	Lavas "aa". Emisiones sálicas del estrato Volcán del Pico Viejo Serie IV	B
70	103,9	Lomo Tabladillo (Boca Tauce)	Fonolitas Serie II	B
37	108,4	Abades	Tobas pumíticas traquíticas y/o fonolíticas Series II y III	B
79	109,8	Montaña Cedro (Ucanca)	Fonolitas Serie II	B
46	112,3	Parque Eólico de Granadilla	Toba pumítica traquítica y/o fonolítica Series II y III	B
36	116,6	Arico El Viejo	Tobas pumíticas Series II y III	B
51	119,6	Fuente Madre del Agua (Izaña)	Eutaxitas y fonolitas superiores Serie II	B

58	120,0	El Cabezón (Portillo/Cañadas)	Lavas de Montaña Blanca (traquitas) y Montaña Rajada SerieIV	B
60	126,5	Montaña Guajara (Las Cañadas)	Derrubios de ladera y pie de monte Serie IV	A-B
35	127,9	La Sombrera (Fasnia)	Tobas pumíticas Serie III	B
62	131,1	Cruz de Tea (Vilaflor)	Domos sálicos (extrusiones) / Coladas de traquibasaltos Serie II	A-B
65	144,2	Santa Catalina (S. Juan Rambla)	Coladas traquítico-fonolíticas de Montaña Avejera Serie IV	B
50	146,1	Cañada Las Pilas (Las Cañadas)	Lavas de Montaña Blanca (traquitas) y Montaña Rajada SerieIV	B
75	152,2	San Marcos-Riquer (Icod)	Coladas traquítico-fonolíticas de los Roques Blancos Serie IV	B
59	155,4	Montaña Blanca (Teide)	Lavas de Montaña Blanca (traquitas) y Montaña Rajada Serie IV / Piroclastos de Montaña Blanca Serie IV	B
67	158,7	Cruz de la Vieja (FaldaNorteTeide)	Coladas de la erupción central del Teide Serie IV	B
77	162,7	Hoya Negra (Teide Viejo)	Coladas traquítico-fonolíticas de Roques Blancos / Traquibasaltos del estrato Volcán del Pico Viejo Serie IV	B

Analizando la **Tabla 3.65** anterior, se verificó que ciertamente existe una relación entre la constitución geológica del suelo y la tasa de dosis medida, comprobándose que los lugares con menores niveles de radiación gamma ambiental corresponden a las zonas con suelos que aquí denominamos del tipo A, es decir aquéllos que, normalmente, son más antiguos (Series I y II), que están formados por rocas ígneas procedentes de coladas basálticas, traquibasaltos y piroclastos y cuya composición química es predominantemente básica. En este grupo se encontraron todos aquellos puntos donde la tasa de dosis absorbida en aire, descontada la radiación cósmica, estuvo entre 18 nGy h⁻¹ (Cuadro 12: “*El Bronco*” - *La Laguna* con 18,7 nGy h⁻¹) y 63 nGy h⁻¹ (Cuadro 21: “*Valle Guerra*” con 63,4 nGy h⁻¹).

Los lugares en los que se detectaron los mayores niveles de tasa de dosis gamma en aire tienen suelos constituidos por traquitas, andesitas y fonolitas (tipo B), predominando sustratos con una antigüedad geológica menor (Series III y IV) y de composición química de tipo ácido. Aquí figuraron aquellos lugares en los que se midieron niveles netos de radiación gamma comprendidos entre 87 nGy h⁻¹ (Cuadro 64: “*Los Abrigos – El Guincho*” con 86,9 nGy h⁻¹) y el valor máximo de 162,7 nGy h⁻¹ medido en el Cuadro 77 (“*Hoya Negra*” – *Boca Tauce – Vilaflor*).

En el grupo de puntos que, en esta ordenación creciente de la tasa de dosis, resultan situarse en una zona intermedia (valores de tasa de dosis entre 64 y 86 nGy h⁻¹) predominan los lugares con suelos cuyas características no resultan completamente asimilables a uno de los dos tipos prefijados.

En la **Tabla 3.66** se resumen los resultados anteriores, presentando los valores medios y los rangos de tasa de dosis neta.

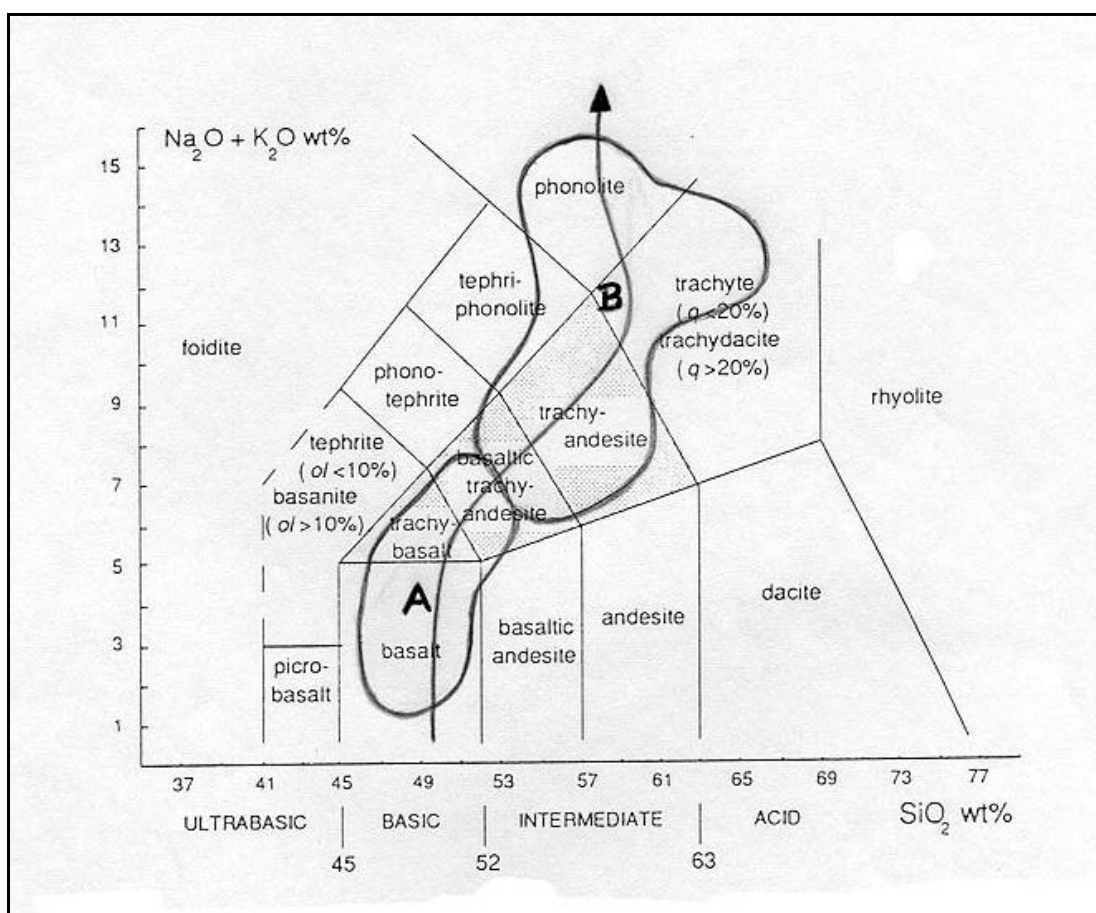
Tabla 3.66.- Valores máximos, mínimos y medios de la tasa de dosis neta medida en los suelos de tipo A y tipo B.

Número de medidas	Tipo de suelo	Tasa de dosis neta (nGy h ⁻¹)			
		Rango	Media aritmética	Media geométrica	Desviación estándar
57	A	18,4 – 63,4	40,0	38,2	11,4
18	A-B	63,6 – 85,8	75,9	75,6	6,2
28	B	86,9 – 162,7	115,0	112,7	24,0

Los resultados anteriores ponen de manifiesto la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de la tasa de dosis obtenida en los 57 lugares con características de suelos de tipo A, en los 18 de tipo A-B y en los 28 con suelos de tipo B, ya que siempre se cumple, comparándolos dos a dos, que: $p < 0,001$.

En la **Figura III.31**, extraída de la publicación “*A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*”^[105], se representan, en el sentido de la flecha, los tipos de terrenos donde se midieron valores crecientes de tasa de dosis absorbida en aire debida a radiación gamma, así como el criterio establecido para distinguir los suelos tipo A (tasas de dosis bajas) de los de tipo B (tasas de dosis más elevadas).

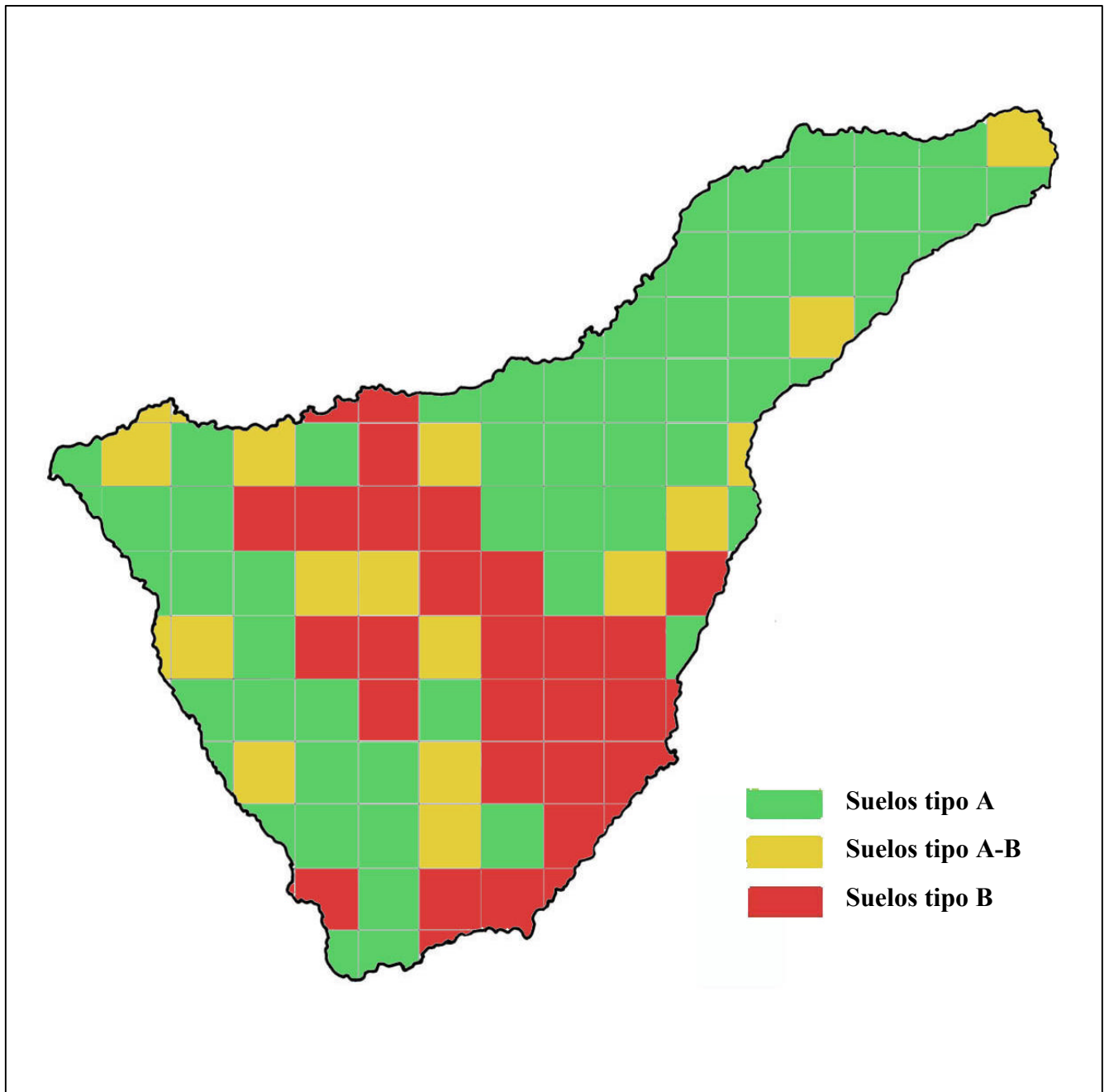
Figura III.31.- Clasificación química y nomenclatura de las rocas volcánicas usando el diagrama de contenido alcalino total frente a contenido silíceo.



En esta **Figura III.31** se han delimitado, de forma aproximada, las áreas correspondientes a los tipos de suelo que llevaron a la clasificación, de acuerdo con su composición geológica, alcanzada en la **Tabla 3.65** anterior. La flecha va indicando el sentido de los valores crecientes de tasa de dosis de origen terrestre, desde zonas con suelos ultrabásicos y básicos y con bajos porcentajes de $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (tipo A) hacia otras con suelos progresivamente más ácidos y con mayores proporciones en peso de $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (tipo B).

En la **Figura III.32** se representa el mapa de la isla de Tenerife coloreado en consonancia con los tres grupos o clases de suelos diferentes considerados.

Figura III.32.- Distribución de tipos de suelo en la isla de Tenerife.



La distribución encontrada permite asegurar un buen cumplimiento de la hipótesis planteada en esta parte de la Memoria. Basta para ello comparar esta figura con la **Figura III.4** anterior, que representaba los niveles de tasa de dosis absorbida en aire en los diferentes lugares de la isla de Tenerife.

III.6.- RELACIÓN ENTRE LAS CONCENTRACIONES DE RADIOEMISORES GAMMA EN EL SUELO Y LA TASA DE DOSIS GAMMA AMBIENTAL EN AIRE

III.6.1.- GENERALIDADES

La relación entre la concentración de radionúclidos en los suelos y la dosis gamma medioambiental tiene un gran interés práctico para predecir en qué punto, de entre varios lugares, puede existir un nivel más elevado de radiación ambiental a partir del conocimiento de la composición geológica de sus respectivos terrenos, y pronosticar los valores cuantitativos de esos niveles, conocidas las concentraciones de los materiales radiactivos concretos existentes en el suelo del lugar considerado. Eso permitiría también, al comparar los valores medidos con los calculados, conocer las posibles contribuciones a los niveles de radiación ambiental de otras emisiones de origen no natural, así como detectar y evaluar las modificaciones que pudieran producirse por causas artificiales a lo largo del tiempo.

Con el fin de encontrar alguna expresión o fórmula matemática que permitiera calcular el valor de la tasa de dosis gamma absorbida en aire, a partir de la concentración medida de los más significativos radionúclidos emisores gamma presentes en el suelo de un lugar, se realizó una revisión de la bibliografía sobre este tema que permitió considerar las expresiones propuestas por diferentes autores, a partir de las investigaciones llevadas a cabo en países como Grecia^{[87][88]}, Egipto^[84], España^{[66][85]}, Italia^{[80][106]}, Brasil^{[76][89]}, India^{[57][79][107]}, Eslovenia^[108], Bélgica^[70], Nigeria^[109], Pakistán^[110], Kenia^[111] o Japón y Alemania^[112].

Se comprobó que unas fórmulas se diferencian de otras en razón a los distintos factores que ponderan la influencia, en la tasa de dosis absorbida global, de la actividad específica de cada uno de los emisores gamma tenidos en cuenta en un lugar determinado.

Los radionúclidos naturales habitualmente considerados para estos cálculos son: ^{238}U ó ^{226}Ra y/ó ^{214}Pb y ^{214}Bi para la serie del ^{238}U ; ^{228}Ac ó ^{232}Th y/ó ^{212}Pb , ^{212}Bi y ^{208}Tl en la serie del ^{232}Th y el ^{40}K . Algunos autores a veces también ponderan la contribución de los radionúclidos artificiales ^{137}Cs y ^{134}Cs .

En todos los casos se trata de una expresión general del tipo:

$$\begin{aligned} & \text{Tasa de dosis equivalente (nSv h}^{-1}\text{) ó Tasa de dosis absorbida en aire (pGy h}^{-1}\text{)} = \\ & = a \cdot [^{40}\text{K}] + b \cdot [^{238}\text{U}] + c \cdot [^{226}\text{Ra}] + d \cdot [^{232}\text{Th}] + \dots + n \cdot [^{137}\text{Cs}] + m \cdot [^{134}\text{Cs}] \end{aligned}$$

donde los factores de ponderación *a, b, c, d, ..., m y n*, que alcanzan diferentes valores numéricos según los autores revisados, vienen expresados en $n\text{Sv h}^{-1} (\text{Bq kg}^{-1})^{-1}$ ó en $p\text{Gy h}^{-1} (\text{Bq kg}^{-1})^{-1}$, según se trate de calcular la tasa de dosis equivalente o la tasa de dosis absorbida.

Estos coeficientes se suelen denominar **Factores de conversión a tasa de dosis** y se abrevian mediante las siglas **DRF** (del inglés: “Dose Rate conversion Factors”). En alguna publicación también se refieren a ellos como **DCF** (“Dose Conversion Factors”). Se definen como la tasa de dosis absorbida a 1 metro de la superficie del suelo, por unidad de concentración de actividad del radionúclido considerado.

Se expresan en unidades tales como $\text{Gy año}^{-1} (\text{Bq cm}^{-3})^{-1}$, $n\text{Gy h}^{-1} (\text{Bq cm}^{-3})^{-1}$, $p\text{Gy h}^{-1} (\text{Bq kg}^{-1})^{-1}$, $n\text{Sv h}^{-1} (\text{Bq kg}^{-1})^{-1}$, $m\text{R h}^{-1} (\text{Bq g}^{-1})^{-1}$ ó $n\text{R h}^{-1} (\text{Bq kg}^{-1})^{-1}$.

En la práctica, algunos de estos coeficientes o factores de conversión se consideran nulos: más asiduamente los que afectan a los radioisótopos del cesio (“*m*” y “*n*”), que con frecuencia no se tienen en cuenta, o alguno de los que ponderan elementos alternativos de una misma serie, como por ejemplo el ^{238}U o el ^{226}Ra (“*b*” ó “*c*”, respectivamente), según cual de ellos se haya analizado en el trabajo concreto estudiado.

Es decir, los diferentes autores utilizan distintos radionúclidos como representante o representantes de cada una de las series radioactivas del ^{238}U , ^{232}Th ó ^{235}U , alcanzando sus respectivos *Factores de Conversión* un peso diferente dependiendo de la alternativa elegida.

III.6.2.- LAS DIFERENTES RELACIONES UTILIZADAS

El Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas utiliza, para el cálculo de la tasa de dosis absorbida en aire debida a radiación gamma de origen terrestre, las concentraciones del ^{40}K , del ^{238}U y del ^{232}Th y propone unos factores de conversión que han variado ligeramente a lo largo de los años.

Así, en los *Informes UNSCEAR-82*^[21] y *UNSCEAR-88*^[11], se calcula la tasa de dosis absorbida en el aire a 1 metro sobre la superficie del terreno por unidad de concentración de actividad en el suelo, mediante la igualdad:

$$\text{nGy h}^{-1} = 0,043 [^{40}\text{K}] + 0,427 [^{238}\text{U}] + 0,662 [^{232}\text{Th}]$$

Sin embargo, en el *Informe UNSCEAR-93*^[31] se utilizan unos DRF por los que se les concede, respecto a los dos Informes anteriores, menor peso a las concentraciones de ^{40}K y de ^{232}Th y mayor a los elementos de la serie del ^{238}U . Estos coeficientes, propuestos por Petoussi, N. *et al*^[56], dan origen a la expresión:

$$\text{nGy h}^{-1} = 0,0414 [^{40}\text{K}] + 0,461 [^{226}\text{Ra}] + 0,623 [^{232}\text{Th}]$$

La fórmula empleada por J.P. Deworm *et al*^[70] y por A. Melanco *et al*^[89], basada en los factores de conversión calculados por Beck, H.L., De Campo, J. and Gogolak, C.^[113] y publicados en el informe HASL-258, sirvió para comprobar la relación existente entre las concentraciones de los radionúclidos presentes con la tasa de dosis equivalente, a partir de las medidas realizadas mediante dosimetría termoluminiscente, con una cámara de ionización de alta presión RSS-111 y con un detector de NaI(Tl), en 35 puntos del territorio de Bélgica. La fórmula que se propuso fue:

$$\text{nSv h}^{-1} = 0,048 C_{\text{K}} + 0,49 C_{\text{Ra}} + 0,76 C_{\text{Th}}$$

expresión en la que C representa la concentración de los diferentes radionúclidos naturales en mBq g^{-1} y en la que no se tuvo en cuenta la contribución del ^{137}Cs debido a los valores relativamente pequeños encontrados.

Por el contrario, Quindós y colaboradores^[66] proponen utilizar la fórmula dada por Leung *et al*^[114] ya que, según los autores, era la que mejor se adaptaba a la comparación de las medidas realizadas por este equipo de trabajo en el estudio realizado a lo largo de toda la geografía española durante el periodo 1.988-1.992. Los

valores de las actividades específicas de los radionúclidos (en $Bq\ kg^{-1}$) vienen afectadas por coeficientes DRF con valores diferentes a los anteriores. A saber:

$$pGy\ h^{-1} = 43,1 [^{40}K] + 421 [^{226}Ra] + 587 [^{232}Th]$$

A partir de esta expresión y ponderando la tasa de dosis media calculada para las diferentes provincias de España, concluyen que la relación entre esta tasa de dosis calculada a partir de las concentraciones de los radionúclidos en suelo y la obtenida directamente a través de las más de 1.000 medidas *outdoor* en aire realizadas, fue:

$$\text{Tasa dosis calculada (nGy h}^{-1}\text{)} = 1,09 * \text{Tasa dosis medida} + 3,04 \text{ (con } r = 0,979\text{)}$$

Dos grupos de investigadores italianos, encabezados ambos por M. Brai, en sus trabajos sobre la medida de radiación gamma en aire y en suelo de la isla volcánica de Pantellaria^{[80][106]}, utilizaron una expresión basada en los coeficientes propuestos en el **Informe UNSCEAR-93**^[31]:

$$pGy\ h^{-1} = 43 [^{40}K] + 427 [^{238}U] + 662 [^{232}Th]$$

Las medidas de tasa de dosis absorbida en aire se midieron por dosimetría TL durante 1 año, en periodos de muestreo de 4 meses, en 87 lugares de esta isla (cada km^2). Las 20 muestras de suelo que se recogieron se procesaron de forma similar a como se ha indicado para el caso de nuestro Laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental de la Universidad de La Laguna, analizándolas, igualmente, mediante espectrometría gamma en un detector de Germanio intrínseco.

En el trabajo que sobre la presencia de radionúclidos naturales y artificiales en las playas de Cataluña realizaron Rosell, J.R, Ortega, X. y Dies, X.^[85], se propone un modelo, desarrollado por los autores, para el cálculo de la dosis en aire a partir de la composición radiactiva de los suelos, basado en los trabajos de D.C. Kocher y A.L. Sjoeren^[115] y de Susumu Minato^[116].

Comprueban que los resultados de las medidas realizadas de tasa de dosis en aire con una cámara de ionización de alta presión y los valores calculados, utilizando el programa propuesto, a partir de la concentración de radionúclidos presentes en las muestras de arena de las playas, presentan unos valores muy similares.

Asimismo concluyen que la contribución a la tasa de dosis absorbida, de origen terrestre, en el aire a 1 metro del suelo, es de un 64,7% debida al ^{40}K , del 24,8% por el ^{232}Th y sus descendientes, del 10,2% debido a los elementos de la serie del ^{238}U y con una contribución media del 0,3% para el ^{137}Cs .

Este grupo de trabajo, perteneciente al Institut de Tècniques Energètiques de la Universitat Politècnica de Catalunya, también ha manejado^[117] los *Factores de conversión a tasa de dosis* expuestos por Beck y colaboradores, en el informe HASL-258^[113]. Estos valores se proponen aceptando las hipótesis de considerar que se trata de radionúclidos naturales, que existe equilibrio secular entre todos los integrantes de una misma cadena de desintegración y que se encuentran distribuidos uniformemente en todo el terreno. Bajo estos supuestos, los factores de conversión más significativos de entre los citados son:

⁴⁰ K:	0,0048
²³⁸ U + descendientes:	0,051
²³² Th + descendientes:	0,076

Estos coeficientes *DRF* vienen dados en $mR h^{-1} (Bq kg^{-1})^{-1}$. Si transformamos los valores a tasa de dosis absorbida en aire, en $pGy h^{-1}$ (1 R \equiv 0,877 rad; 1 rad = 0,01 Gy; 1 μ R \equiv 8770 pGy), resulta que la fórmula que permitiría calcular la tasa de dosis por radiación gamma natural a un metro sobre el suelo, conociendo las concentraciones de estos tres radionúclidos en $Bq kg^{-1}$, sería:

$$pGy h^{-1} = 42 [^{40}K] + 447 [^{238}U] + 667 [^{232}Th]$$

Los italianos Melanco, Pessina, y Dallara publicaron, basados en los trabajos de medida de radioactividad natural que llevaron a cabo en el estado brasileño de *Rio Grande do Norte*^[76], un artículo en el que indican que también se apoyan en la fórmula de Beck para hallar la tasa kerma aire, en $nGy h^{-1}$, a partir de las concentraciones de los emisores naturales gamma presentes en la corteza terrestre. Proponen una expresión en la que, para que fuera coherente con su fuente bibliográfica, los factores de conversión tendrían que venir dados en $mR h^{-1} (Bq kg^{-1})^{-1}$ y no en $nGy h^{-1} (Bq kg^{-1})^{-1}$ como aparece en la publicación. Por eso, si queremos mantener los valores de los *DRF* que sugieren, la fórmula daría como resultado la tasa de exposición, en μ R h^{-1} , y no la tasa de dosis absorbida, en $nGy h^{-1}$, es decir:

$$\mu R h^{-1} = 0,0048 C(^{40}K) + 0,051 C(^{226}Ra) + 0,076 C(^{232}Th)$$

con las actividades específicas de los diferentes radionúclidos, representadas genéricamente como $C(^nR)$, expresadas en $(Bq kg^{-1})$. Las medidas de la tasa de dosis gamma en aire las realizaron con un detector de centelleo portátil y el análisis de las muestras de suelo mediante espectrometría gamma con un detector de germanio.

Investigadores de la Universidad de Ljubljana, en Eslovenia, (D. Brajnik, U. Miklavzic y J. Tomsic)^[108] también trataron de obtener los valores de la tasa de dosis en aire de origen terrestre, a partir de la actividad específica del suelo medida por

espectrometría de campo, usando un detector de centelleo de NaI (TI), y por medida en el laboratorio con un HPGe de las muestras de suelo recogidas. Para ello utilizaron los factores de conversión publicados por Beck^[118].

Igualmente, N.M. Ibrahiem y colaboradores usaron la fórmula propuesta por Beck *et al*^[113], en el informe HASL-258, para calcular la tasa de dosis en aire a partir de los resultados de las medidas de las concentraciones del ⁴⁰K, ²³²Th, ²³⁸U y ¹³⁷Cs, mediante espectrometría gamma con un detector de Germanio coaxial, en 162 muestras de suelo recogidas en las regiones del Delta del Nilo y del Medio Egipto^[84].

Como consecuencia de las medidas de radiación gamma y de tasas de dosis en las costas de la isla volcánica de Milos del archipiélago griego de Cyclades, los autores Florou y Kritidis^[87] concluyeron que se puede utilizar una expresión del tipo:

$$\mu\text{Sv y}^{-1} = 0,276 A(^{40}\text{K}) + 3,10 A(^{226}\text{Ra}) + 2,58 A(^{228}\text{Th})$$

para obtener directamente la tasa de dosis equivalente en aire anual una vez conocida la actividad específica A (ⁿR) de los tres radionúclidos (en Bq kg⁻¹). O también:

$$\text{nSv h}^{-1} = 0,032 A(^{40}\text{K}) + 0,354 A(^{226}\text{Ra}) + 0,295 A(^{228}\text{Th})$$

Los investigadores Probonas y Kritidis del mismo centro (Laboratorio de Radioactividad Ambiental del Instituto de Tecnología Nuclear y Protección Radiológica de Atenas) trataron de asignar la dosis equivalente anual a la población en Grecia a partir de los datos obtenidos en el análisis de diversos radionúclidos que se encuentran en los suelos de este país^[88]. Tomaron un total de 552 muestras, que fueron secadas, pulverizadas, cernidas hasta un tamaño de grano de 2 mm de diámetro, almacenadas durante 25 días y analizadas en un espectrómetro gamma provisto de detector de Ge intrínseco. La expresión matemática utilizada para calcular en primer lugar la tasa de dosis absorbida en aire fue:

$$\text{nGy h}^{-1} = 0,045[^{40}\text{K}] + 0,010 [^{238}\text{U}] + 0,506[^{226}\text{Ra}] + 0,284[^{228}\text{Ra}] + 0,421[^{228}\text{Th}]$$

donde las concentraciones de los diferentes radioisótopos vienen en Bq kg⁻¹.

La dosis equivalente fue evaluada de acuerdo con la ecuación:

$$H (\text{Sv}) = 0,7 (\text{Gy en aire})$$

Mientras que la tasa de dosis equivalente anual viene dada por:

$$\mu\text{Sv y}^{-1} = 6,13 \text{ nGy h}^{-1}$$

Los coeficientes usados por Butt, K.A. *et al*^[110] en las determinaciones de radiación gamma externa en Pakistán, son los propuestos por la **UNSCEAR**^[112], los cuales son también empleados en la India por Narayana, Y. *et al*^[79] en el estudio que realizaron sobre los niveles de radiación gamma medioambiental en la costa de Karnata y por Selvasekarapandian, S. *et al*^[107] en los cálculos llevados a cabo en Udagamandalam para obtener la tasa de dosis absorbida en aire en ese lugar.

En este mismo país, en el estado de Rajasthan, se midieron mediante espectrometría gamma con detector de centelleo de NaI (Tl) (Nageswara Rao, M.V. *et al*^[57]), los valores de concentración de los radionúclidos ⁴⁰K, ²²⁶Ra y ²³²Th presentes en sus suelos, estimando los valores de tasa de dosis natural de origen terrestre a partir de los *DRF* propuestos en el **Informe UNSCEAR-93**^[3].

En la investigación publicada por Jibri, N.N. and Farai, I.P.^[109] sobre la medida de radiación natural en la ciudad de Lagos (Nigeria), para calcular la tasa de dosis en aire *outdoor*, se midieron las actividades específicas de los radionúclidos habituales (⁴⁰K, ²²⁶Ra y ²³²Th), con un detector de centelleo portátil, y se aplicó la expresión (basada en Beck *et al*^[113]):

$$\text{pGy h}^{-1} = 42 [^{40}\text{K}] + 429 [^{238}\text{U}] + 666 [^{232}\text{Th}]$$

También se ha revisado el estudio llevado a cabo en Kenia por Mustapha, A.O. *et al*^[111] en el que se analizan 115 muestras de terreno y de diferentes materiales de construcción (rocas, suelo, ladrillos y hormigón) para obtener los valores de tasa de dosis en aire *indoor* y *outdoor*, utilizando unos *DRF* específicos, que se comparan con los propuestos en el **Informe UNSCEAR-93**. Estos factores de conversión se calculan mediante modelizaciones y métodos de análisis matemático y se justifican en base a que se trata de muestras con densidades de 1,4 g cm⁻³. La relación a la que dan origen se expresa como:

$$\text{pGy h}^{-1} = 39,5 [^{40}\text{K}] + 391 [^{238}\text{U}] + 533 [^{232}\text{Th}]$$

En el trabajo publicado por Ajayi, I.R. and Ajayi, O.S.^[119] sobre las medidas llevadas a cabo en el Suroeste de Nigeria de las concentraciones de radionúclidos existentes en las 186 muestras de suelo analizadas, se vuelven a usar los factores propuestos por Beck (42, 429 y 666 pGy h⁻¹ (Bq kg⁻¹)⁻¹ para aplicar, respectivamente, a ⁴⁰K, ²³⁸U y ²³²Th).

Por último, tenemos que citar al grupo investigador que sobre Radioactividad Ambiental trabaja en la Universidad de Gante en el Laboratorium voor Kernfysica, dirigido por el profesor André Poffijn, que utiliza factores de conversión^[120] que permiten el cálculo de la tasa de dosis equivalente a partir de la siguiente expresión:

$$nSv\ h^{-1} = 0,048 C_{K-40} + 0,49 C_{Ra-226} + 0,76 C_{Th-232} + 0,2 C_{Cs-137} + 4 C_{Cs-134}$$

Esta expresión, que utiliza factores *DRF* comunes a otros autores para el caso del ^{40}K , ^{226}Ra y ^{232}Th , presenta la originalidad de que tiene en consideración la contribución de los dos isótopos del Cs, los cuales habitualmente se desprecian.

En la siguiente **Tabla 3.67** se hace un resumen de los coeficientes o factores de conversión a tasa de dosis absorbida en aire, a partir de las concentraciones de radionúclidos en suelos, utilizados por los diferentes autores citados y cuya bibliografía ha sido revisada.

Tabla 3.67.- Coeficientes DRF propuestos por diferentes autores.

Autor Principal	Ref. Publ	nSv h ⁻¹ / Bq kg ⁻¹						pGy h ⁻¹ / Bq kg ⁻¹						nR h ⁻¹ / Bq kg ⁻¹			
		⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	²²⁸ Th	¹³⁷ Cs	¹³⁴ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	²³⁸ U	²³² Th	²²⁸ Th	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³⁸ U	²³² Th
Unsear-82/88	[2]/[1]							43			427	662					
Unsear-93	[3]							41,4	461			623					
Petoussi	[56]							41,4	461			623					
Deworm	[70]	0,048	0,49	0,76													
Melanco	[89]	0,048	0,49	0,76													
Quindós	[66]							43,1	421			587					
Brai	[80]							43			427	662					
Rosell	[85]							Modelo propio (Programa de cálculo)									
Rosell	[117]													4,8		51	76
Beck	[113]							42			430	666					
Melanco	[76]													4,8	51		76
Florou	[87]	0,032	0,354		0,295												
Probonas	[88]							45	506	284	10		421				
Butt	[110]							43			427	662					
Narayana	[79]							43			427	662					
Selvasekarap.	[107]							43			427	662					
Nageswara	[57]							41,4	461			623					
Jibri	[109]							42			429	666					
Mustapha	[111]							39,5	391			533					
Ajayi	[119]							42			429	666					
Poffijn	[120]	0,048	0,49	0,76		0,2	4										

Merece una especial mención el trabajo de K. Saito y P. Jacob^[112] en el que, además de otras interesantes aportaciones, se utiliza el método de Monte Carlo para calcular la tasa kerma aire a una altura de 1 metro sobre el nivel de la superficie del terreno, a partir de la medida de la concentración de los principales componentes de las series de radionúclidos naturales, supuestos uniformemente distribuidos en el suelo. Los factores de conversión de tasa kerma por unidad de actividad (*DRF*), fueron calculados considerando todas las líneas de emisión contenidas en las últimas tablas de datos nucleares^[137].

En el trabajo se comparan los factores de conversión obtenidos en este estudio con los que propusieron Beck *et al*^[113] en sus publicaciones, y que han sido utilizados ampliamente por multitud de investigadores^[121]. Los valores totales de los coeficientes correspondientes a las series del ²³⁸U, ²³²Th son muy similares, aunque el número de radionúclidos que considera Beck como representantes de las mismas, es mucho menor que los tenidos en cuenta por Saito y Jacob. También son muy similares los *DRF* aplicados para el ⁴⁰K, si bien Beck desprecia la aportación de los radionúclidos de la serie del ²³⁵U.

La utilización por Beck del ²¹⁴Pb y del ²¹⁴Bi como únicos representantes de la serie del ²³⁸U se justifica en base a que estos dos radionúclidos contribuyen en un 98% a la tasa kerma aire correspondiente a todos los elementos de la serie. Lo mismo ocurre en el caso del ²³²Th, donde el ²⁰⁸Tl y el ²²⁸Ac aportan el 90% del total de la tasa kerma-aire correspondiente al conjunto de la serie.

En la **Tabla 3.68** se pueden observar los valores de *DRF* dados por Saito^[112] en el trabajo citado, así como los correspondientes utilizados por Beck^[113].

Tabla 3.68.- Tasa kerma aire a 1 de metro de altura, debida a la desintegración de fuentes naturales uniformemente distribuidas en el suelo, por unidad de actividad específica (en nGy h⁻¹ por Bq kg⁻¹).

SERIE	NÚCLIDO	Tasa kerma por unidad de actividad nGy h ⁻¹ (Bq kg ⁻¹) ⁻¹	
		Saito ^[112]	Beck ^[113]
Serie ²³⁸U			
	²³⁸ U	4,33 x 10 ⁻⁵	
	²³⁴ Th	9,47 x 10 ⁻⁴	
	²³⁴ Pa ^m	4,30 x 10 ⁻³	
	²³⁴ Pa	4,49 x 10 ⁻⁴	
	²³⁴ U	5,14 x 10 ⁻⁵	
	²³⁰ Th	6,90 x 10 ⁻⁵	
	²²⁶ Ra	1,25 x 10 ⁻³	
	²²² Rn	8,78 x 10 ⁻⁵	
	²¹⁴ Pb	5,46 x 10 ⁻²	4,72 x 10 ⁻²
	²¹⁴ Bi	4,01 x 10 ⁻¹	3,78 x 10 ⁻¹
	²¹⁰ Tl	1,51 x 10 ⁻⁴	
	²¹⁰ Pb	2,07 x 10 ⁻⁴	
Total		4,63 x 10⁻¹	4,30 x 10⁻¹
Serie ²³²Th			
	²³² Th	4,78 x 10 ⁻⁵	
	²²⁸ Ra	5,45 x 10 ⁻⁵	
	²²⁸ Ac	2,21 x 10 ⁻¹	2,78 x 10 ⁻¹
	²²⁸ Th	3,44 x 10 ⁻⁴	
	²²⁴ Ra	2,14 x 10 ⁻³	
	²²⁰ Rn	1,73 x 10 ⁻⁴	
	²¹² Pb	2,77 x 10 ⁻²	2,12 x 10 ⁻²
	²¹² Bi	2,72 x 10 ⁻²	2,12 x 10 ⁻²
	²⁰⁸ Tl	3,26 x 10 ⁻¹	3,21 x 10 ⁻¹
Total		6,04 x 10⁻¹	6,66 x 10⁻¹
Serie ²³⁵U			
	²³⁵ U	3,06 x 10 ⁻²	
	²³¹ Th	1,80 x 10 ⁻³	
	²³¹ Pa	6,89 x 10 ⁻³	
	²²⁷ Ac	3,54 x 10 ⁻⁵	
	²²⁷ Th	2,10 x 10 ⁻²	
	²²³ Fr	1,15 x 10 ⁻⁴	
	²²³ Ra	2,39 x 10 ⁻²	
	²¹⁹ Rn	1,25 x 10 ⁻²	
	²¹⁵ Po	5,11 x 10 ⁻⁵	
	²¹¹ Pb	1,70 x 10 ⁻²	
	²¹¹ Bi	1,08 x 10 ⁻²	
	²⁰⁷ Tl	5,67 x 10 ⁻⁴	
Total		1,25 x 10⁻¹	0
⁴⁰K		4,17 x 10⁻²	4,22 x 10⁻²

III.6.3.- CÁLCULO DE LA TASA DE DOSIS EQUIVALENTE A PARTIR DE LAS MEDIDAS DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS RADIONÚCLIDOS EN LOS SUELOS DE LAS ISLAS CANARIAS OCCIDENTALES

Una vez conocidos los valores de las medidas de las concentraciones de los radioemisores gamma que se analizaron en las muestras de suelo recogidas en las cuatro islas occidentales del archipiélago canario, es posible realizar una previsión del valor de la tasa de dosis equivalente que se puede encontrar a 1 metro del suelo en cada uno de los lugares de medida.

Así, en la **Tabla 3.70** se presentan los resultados correspondientes a la isla de Tenerife. Los *factores de conversión DRF* utilizados para obtener los valores de la tasa de dosis equivalente en todos los puntos de las cuatro islas, son los propuestos por el Laboratorium voor Kernfysica de la Universidad de Gante^[120] y se indican en la **Tabla 3.69**.

Tabla 3.69.- Coeficientes DRF utilizados para calcular la tasa de dosis equivalente en aire.

Radionúclido:	DRF: $nSv h^{-1} (Bq kg^{-1})^{-1}$
⁴⁰ K	0,048
²²⁶ Ra	0,49
²³² Th	0,76
¹³⁷ Cs	0,2
¹³⁴ Cs	4

La columna encabezada por $nSv h^{-1}$ de la **Tabla 3.70** siguiente, expresa el valor calculado de la tasa de dosis equivalente a partir de las concentraciones del ⁴⁰K, ²²⁶Ra y ²³²Th, mientras que en la que columna: $nSv h^{-1} + Cs$, se tiene en cuenta además la contribución del ¹³⁷Cs y del ¹³⁴Cs, en aquellos lugares donde se pudo conocer su concentración.

Tabla 3.70.- Valores de tasa de dosis equivalente *calculada* a partir de los valores de las concentraciones de los radionúclidos presentes en los suelos de la isla de Tenerife.

Cuadro	Ra-226 (Bq kg⁻¹)	Th-232 (Bq kg⁻¹)	K-40 (Bq kg⁻¹)	Cs-137 (Bq kg⁻¹)	Cs-134 (Bq kg⁻¹)	nSv h⁻¹	nSv h⁻¹ + Cs
1	43.4	52.8	924.9	11.3	0	105.79	108.05
2	16.7	20	308.5	39.8	0	38.19	46.15
3	23.1	32.9	736.5	13.2	0	71.68	74.32
4	7.3	14.8	239.4	1.9	0	26.32	26.70
5	17.7	20.7	191.1	15.9	0	33.58	36.76
6	35.7	53.5	239.3	22.5	0	69.64	74.14
7	20.9	23.5	181	8.6	0	36.79	38.51
8	9.0	11.9	214.7	2.4	0	23.76	24.24
9	61.3	71.8	531.7	0	0	110.13	110.13
10	17.7	24.1	383.4	-	-	45.39	-
11	51.5	60.4	313.3	4.6	0	86.18	87.10
12	13.0	26.5	141.6	70.3	0	33.31	47.37
13	40.7	50.9	389.5	8.4	3.1	77.32	91.40
14	41.5	52.1	456.8	0	0	81.86	81.86
15	24.1	28.8	370.5	4.2	0	51.48	52.32
16	53.3	59.9	663.7	15.2	0	103.50	106.54
17	104.0	100.1	579.2	12.2	6.5	154.84	183.28
18	25.3	33	232.7	50.4	0	48.65	58.73
19	54.3	79.9	867	-	-	128.95	-
20	12.4	15.5	243.7	3.2	0	29.55	30.19
21	52.0	67.4	456.1	-	-	98.60	-
22	50.1	55.3	511.8	13.1	0	91.14	93.76
23	74.4	71.3	200.4	35	3.8	100.26	122.46
24	21.7	25.4	209	100.9	0	39.97	60.15
25	36.6	60.5	380.4	-	-	82.17	-
26	31.1	33.8	430	0	0	61.57	61.57
27	51.2	69.6	776	-	-	115.23	-
28	47.7	63.7	724.4	5.9	4.6	106.56	126.14
29	36.2	41.6	496.6	35	2	73.19	88.19
30	37.6	30.3	190.6	22.5	0	50.60	55.10
31	20.2	28	224.2	41.6	0	41.94	50.26
32	39.3	52.9	652.8	15.5	0	90.80	93.90
33	22.1	32.3	306	-	-	50.07	-
34	62.7	73.9	952.9	10.4	4	132.63	150.71
35	67.4	84.3	853.1	-	-	138.04	-
36	64.1	111.6	1410.3	1.5	7.8	183.92	215.42
37	55.4	75.8	1176.8	0	0	141.24	141.24
38	40.7	54.5	543.5	43.4	0	87.45	96.13
39	32.8	37.3	302.8	4.7	2.5	58.95	69.89
40	43.1	40.6	290.2	52.9	2.8	65.90	87.68
41	35.3	38.1	212.6	14.9	0	56.46	59.44

42	23.7	28.8	335.4	5	0	49.60	50.60
43	31.4	45.1	438.7	9.5	0	70.72	72.62
44	49.5	80.7	835.6	6.4	5.6	125.70	149.38
45	40.8	67.9	1003.1	-	-	119.74	-
46	41.8	73.8	1251.2	6.5	0	136.63	137.93
47	61.1	32.2	523.3	28.5	2.4	79.53	94.83
48	61.3	67.4	1044.2	0	0	131.38	131.38
49	28.5	30.8	417.2	0	0	57.40	57.40
49B	59.4	75.6	787	7.7	3.6	124.34	140.28
50	78.5	110.5	1233.7	18.5	0	181.66	185.36
51	48.9	94.8	1090.6	10.7	6.9	148.36	178.10
52	54.7	77.6	703.3	15.3	0	119.54	122.60
53	56.0	86.9	1084.1	0	4.8	145.52	164.72
54	40.3	55.7	550	0	0	88.48	88.48
55	52.3	67.6	1098.9	8.2	3.7	129.75	146.19
56	26.0	36.5	484.2	2.3	2.6	63.72	74.58
57	56.7	78.9	918.9	10.8	5.6	131.85	156.41
58	82.3	105.5	1296.6	31.2	6.5	182.74	214.98
59	73.2	91.4	1146.3	-	-	160.35	-
60	45.8	86.6	1488.8	6.9	0	159.72	161.10
61	45.8	65.3	553.5	-	-	98.64	-
62	89.7	107.9	1195.1	9.1	6	183.32	209.14
63	49.3	69.2	767.2	9.6	3.1	113.57	127.89
64	46.4	71.2	955.5	7.4	4.2	122.71	140.99
65	49.4	71.2	973.2	-	-	125.03	-
66	76.2	67	885.3	23.1	0	130.75	135.37
67	80.9	79.2	1407.3	15.1	4.7	167.38	189.20
68	92.0	90.1	1379.4	0	0	179.77	179.77
69	58.5	63.8	899.1	-	-	120.31	-
70	36.8	63.3	1211.1	17.1	0	124.27	127.69
71	67.3	87.1	790.8	6.5	3.7	137.13	153.23
72	50.6	55.6	623.8	20.6	3.8	96.99	116.31
73	23.1	33.3	456.1	-	-	58.52	-
74	48.8	52.6	822.6	11.8	3.7	103.37	120.53
75	83.7	93.6	1313.5	34.1	0	175.20	182.02
76	55.2	50.7	464.9	22.5	0	87.90	92.40
77	63.3	92.7	1027.2	-	-	150.77	-
78	50.0	38.2	730.7	24.5	0	88.61	93.51
79	51.5	70.1	781.8	-	-	116.04	-
80	12.5	14.4	236.9	3.2	0	28.44	29.08
81	32.0	47.4	737.9	12.4	0	87.12	89.60
82	39.9	57.2	1030.8	0	0	112.50	112.50
83	39.5	64.8	811	0	0	107.53	107.53
84	27.0	23.9	620.2	-	-	61.16	-
85	42.0	37.9	397.8	30.8	0	68.48	74.64
86	32.9	28.1	606.5	21.7	0	66.59	70.93
87	31.3	30	517.9	27.7	0	63.00	68.54
88	42.2	63	738.4	16.9	0	104.00	107.38

89	40.1	58.3	705.4	21.6	0	97.82	102.14
90	33.9	47.1	666.1	5	0	84.38	85.38
91	36.8	51.8	696.6	0	0	90.84	90.84
92	50.4	68.5	949.1	6.2	0	122.31	123.55
93	24.2	37.6	276.7	26.1	0	53.72	58.94
94	17.6	19	296	12.7	0	37.27	39.81
95	36.8	31.7	603.9	15.5	0	71.11	74.21
96	44.6	44.9	698.1	32.3	0	89.49	95.95
97	47.3	52.1	737.1	5.7	3.3	98.15	112.49
98	46.6	55.5	845.8	6.2	0	105.61	106.85
99	32.3	51.3	586.3	-	-	82.96	-
100	22.8	30.8	378.3	-	-	52.74	-
101	11.5	15.4	163.8	17	0	25.20	28.60
102	24.2	21	439.1	0	0	48.89	48.89
103	23.3	25.3	270.1	23	0	43.61	48.21

En la **Tabla 3.71** se dan los valores de la tasa de dosis equivalente calculados en la isla de La Palma, a partir de las concentraciones medidas de los radionúclidos integrantes de sus suelos.

Tabla 3.71.- Tasa de dosis equivalente *calculada* en la isla de La Palma.

Cuadro	K-40 (Bq kg ⁻¹)	Ra-226 (Bq kg ⁻¹)	Th-232 (Bq kg ⁻¹)	Cs-137 (Bq kg ⁻¹)	Cs-134 (Bq kg ⁻¹)	nSv h ⁻¹	nSv h ⁻¹ + Cs
1	185.2	36.6	57.3	0.0	0.0	70.4	70.4
2	131.4	35.2	57.4	21.7	0.0	67.2	71.5
3	159.4	34.8	35.3	19.3	0.0	51.5	55.4
4	228.2	29.5	34.9	25.5	0.0	51.9	57.0
5	60.0	25.6	35.0	52.4	0.0	42.0	52.5
6	57.6	6.1	9.3	19.2	0.0	12.8	16.7
7	227.3	27.8	35.4	20.1	0.0	51.4	55.5
8	484.5	55.4	36.6	18.3	0.0	78.2	81.9
9	404.0	53.8	33.9	8.0	0.0	71.5	73.1
10	222.9	17.7	25.1	6.5	0.0	38.4	39.7
11	224.3	39.2	52.4	0.0	0.0	69.8	69.8
12	222.9	17.7	35.1	15.2	1.8	46.0	56.3
13	351.0	44.4	24.2	1.5	0.0	57.0	57.3

Como en la isla de Tenerife se diferencian los resultados del cálculo de la tasa de dosis equivalente en aire, para el caso de considerar únicamente los tres radionúclidos naturales (columna: **nSv h⁻¹**) o cuando se incluyen también los artificiales ¹³⁷Cs y ¹³⁴Cs (columna: **nSv h⁻¹ + Cs**).

De igual manera, para la isla de La Gomera, se pueden obtener los valores de la tasa de dosis equivalente una vez conocidas las actividades específicas de los cinco radionúclidos emisores gamma que se están teniendo en cuenta. Los resultados se presentan en la **Tabla 3.72**, diferenciando los valores obtenidos cuando se tiene o no se tiene en cuenta la contribución de los dos radioisótopos del Cs.

Tabla 3.72.- Tasa de dosis equivalente *calculada* en la isla de La Gomera.

Cuadro	K-40 (Bq kg ⁻¹)	Ra-226 (Bq kg ⁻¹)	Th-232 (Bq kg ⁻¹)	Cs-137 (Bq kg ⁻¹)	Cs-134 (Bq kg ⁻¹)	nSv h ⁻¹	nSv h ⁻¹ + Cs
1	113.7	6.6	9.5	16.8	0.0	15.9	19.3
2	334.7	15.7	21.5	8.9	0.0	40.1	41.9
3	240.9	16.5	30.1	15.0	0.0	42.5	45.5
4	778.0	42.9	50.8	14.3	0.0	97.0	99.8
5	143.5	20.9	35.3	68.8	0.0	44.0	57.7
6	466.3	28.6	43.2	11.1	0.0	69.2	71.4
7	274.5	16.2	24.2	5.3	0.0	39.5	40.6
8	210.5	18.5	28.2	24.4	0.0	40.6	45.5
9	440.5	16.6	30.4	2.7	0.0	52.4	52.9
10	171.5	22.2	32.9	29.6	0.0	44.1	50.0

En la **Tabla 3.73** siguiente se presentan los valores calculados de la tasa de dosis equivalente, en **nSv h⁻¹**, ponderando, mediante la misma fórmula propuesta por el profesor Poffijn del Laboratorium voor Kernfysica de la Universidad de Gante^[163], los valores medidos de concentración de los radionúclidos emisores gamma que se detectaron en las muestras recogidas en la isla de El Hierro (sin tener en cuenta o considerando el Cs).

Tabla 3.73.- Tasa de dosis equivalente *calculada* en la isla de El Hierro.

Cuadro	K-40 (Bq kg ⁻¹)	Ra-226 (Bq kg ⁻¹)	Th-232 (Bq kg ⁻¹)	Cs-137 (Bq kg ⁻¹)	Cs-134 (Bq kg ⁻¹)	nSv h ⁻¹	nSv h ⁻¹ + Cs
1	324.5	19.8	29.7	0.0	0.0	47.9	47.9
2	130.5	16.5	24.3	14.0	0.0	32.8	35.6
3	210.7	16.9	20.1	11.2	0.0	33.7	35.9
4	347.1	29.0	25.8	10.5	0.0	50.5	52.6
5	240.8	14.3	13.3	16.0	1.1	28.7	36.3
6	320.5	30.5	28.2	0.0	0.0	51.8	51.8

III.6.4.- COMPARACIÓN DE RESULTADOS AL UTILIZAR LOS DIFERENTES DRF ANALIZADOS

Aplicando los distintos *Factores de Conversión a Tasa de Dosis (DRF)* que se expusieron en el *Apartado III.6.2.* anterior y que se resumen en la **Tabla 3.67**, se obtendrían, para los valores medidos de concentraciones de radionúclidos en suelos en las Islas Canarias Occidentales, un conjunto de resultados que se presentan en las cuatro Tablas que aparecen a continuación.

La primera de las Tablas corresponde a Tenerife (**Tabla 3.74**) y las siguientes, respectivamente, a las islas de La Palma (**Tabla 3.76**), La Gomera (**Tabla 3.78**) y El Hierro (**Tabla 3.80**).

Cada una de las columnas viene encabezada por la referencia bibliográfica (número "[N]" entre corchetes) que corresponde a la publicación de la que se han extraído los *DRF* aplicados. También se indica la magnitud calculada: tasa de dosis absorbida, tasa de dosis equivalente o tasa de exposición, y las unidades en las que se presenta el resultado: $nGy h^{-1}$, $nSv h^{-1}$, ó $mR h^{-1}$.

Las columnas 2ª y 3ª muestran, respectivamente, los valores de tasa de dosis absorbida en aire (en $nGy h^{-1}$) obtenidos con el detector Geiger-Müller dotado de sonda MC-71 (1ª campaña) y con la cámara de ionización de alta presión RSS-112 (2ª campaña), en aquellos lugares donde se realizaron estas segundas medidas.

Tabla 3.74.- Valores de tasa de dosis medida en aire (valor neto) y resultados de la tasa de dosis absorbida, tasa de dosis equivalente y tasa de exposición calculados para la isla de Tenerife.

Cuadro	Tasa de dosis neta MC-71 ($nGy h^{-1}$)	Tasa de dosis neta RSS-112 ($nGy h^{-1}$)	Tasa dosis equivalente ($nSv h^{-1}$) [70][120]	Tasa dosis equivalente ($nSv h^{-1}+Cs$) [120]	Tasa de dosis abs. ($nGy h^{-1}$) [1][2] et al	Tasa de dosis abs. ($nGy h^{-1}$) [3] et al	Tasa de Dosis abs. ($nGy h^{-1}$) [113] et al	Tasa de dosis abs ($nGy h^{-1}$) [66]	Tasa de exposición ($mR h^{-1}$) [76][117]
1	89.2	95.0	105.8	108.0	93,3	91,2	92,6	89,1	10,7
2	18.7		38.2	46.2	33,6	32,9	33,4	32,1	3,9
3	51.5		71.7	74.3	63,3	61,6	62,8	60,8	7,2
4	25.8		26.3	26.7	23,2	22,5	23,0	22,1	2,6
5	27.4		33.6	36.8	29,5	29,0	29,4	27,8	3,4
6	40.7		69.6	74.1	61,0	59,7	61,0	56,7	7,0
7	24.0		36.8	38.5	32,3	31,8	32,2	30,4	3,7
8	25.6		23.8	24.2	21,0	20,5	20,8	20,0	2,4
9	49.9	52.0	110.1	110.1	96,6	95,0	96,4	90,9	11,1

10	33.3		45.4	-	40,0	39,0	39,7	38,1	4,6
11	37.8	37.0	86.2	87.1	75,4	74,3	75,5	70,6	8,7
12	22.0	25.0	33.3	47.4	29,2	28,4	29,2	27,1	3,4
13	43.1		77.3	91.4	67,8	66,6	67,7	63,8	7,8
14	46.4		81.9	81.9	71,9	70,5	71,7	67,7	8,3
15	31.3		51.5	52.3	45,3	44,4	45,1	43,0	5,2
16	66.1	73.0	103.5	106.5	91,0	89,4	90,6	86,2	10,5
17	80.0	81.0	154.8	183.3	135,6	134,3	135,6	127,5	15,7
18	33.1	36.0	48.6	58.7	42,7	41,9	42,6	40,1	4,9
19	64.6	69.0	128.9	-	113,4	110,7	112,9	107,1	13,0
20	27.2		29.6	30.2	26,0	25,5	25,9	24,8	3,0
21	63.5		98.6	-	86,4	84,8	86,4	81,1	10,0
22	41.1		91.1	93.8	80,0	78,7	79,8	75,6	9,2
23	43.3		100.3	122.5	87,6	87,0	87,8	81,8	10,2
24*	27.8		40.0	60.1	35,1	34,5	35,0	33,1	4,0
25	46.0		82.2	-	72,0	70,3	72,0	67,3	8,3
26	49.8		61.6	61.6	54,1	53,2	53,9	51,5	6,2
27	97.2		115.2	-	101,3	99,1	100,9	95,9	11,6
28	70.7		106.6	126.1	93,7	91,7	93,3	88,7	10,8
29	40.9		73.2	88.2	64,4	63,2	64,1	61,1	7,4
30	29.9		50.6	55.1	44,3	44,1	44,3	41,8	5,1
31	20.6		41.9	50.3	36,8	36,0	36,7	34,6	4,2
32	52.6		90.8	93.9	79,9	78,1	79,5	75,7	9,2
33	38.0		50.1	-	44,0	43,0	43,8	41,5	5,1
34	98.7		132.6	150.7	116,7	114,4	116,1	110,8	13,4
35	127.9		138.0	-	121,3	118,9	120,9	114,6	13,9
36	116.6		183.9	215.4	161,9	157,5	161,1	153,3	18,5
37	108.4	115.0	141.2	141.2	124,4	121,5	123,7	118,5	14,2
38	47.9		87.5	96.1	76,8	75,2	76,6	72,6	8,8
39	48.9	49.0	59.0	69.9	51,7	50,9	51,6	48,8	6,0
40	27.7		65.9	87.7	57,8	57,2	57,7	54,5	6,7
41	29.5		56.5	59.4	49,4	48,8	49,4	46,4	5,7
42	34.4		49.6	50.6	43,6	42,8	43,4	41,3	5,0
43	67.1		70.7	72.6	62,1	60,7	61,9	58,6	7,1
44	88.5		125.7	149.4	110,5	107,7	110,1	104,2	12,7
45	96.8		119.7	-	105,5	102,6	104,9	100,3	12,1
46	112.4	116.0	136.6	137.9	120,5	117,0	119,6	114,8	13,7
47	53.5	57.0	79.5	94.8	69,9	69,9	69,6	67,2	8,1
48	80.3		131.4	131.4	115,7	113,5	115,0	110,4	13,3
49	48.6		57.4	57.4	50,5	49,6	50,3	48,1	5,8
49B	81.5	95.0	124.3	140.3	109,3	107,1	108,9	103,3	12,6
50	146.2		181.7	185.4	159,7	156,1	159,1	151,1	18,3
51	119.6		148.4	178.1	130,5	126,8	129,9	123,2	14,9
52	63.6		119.5	122.6	105,0	102,7	104,7	98,9	12,1
53	97.1		145.5	164.7	128,1	124,8	127,4	121,3	14,7
54	48.9		88.5	88.5	77,7	76,0	77,5	73,4	8,9
55	91.7		129.8	146.2	114,3	111,7	113,6	109,1	13,1
56	38.1		63.7	74.6	56,1	54,8	55,8	53,2	6,4
57	92.6		131.9	156.4	116,0	113,3	115,5	109,8	13,3

58	120.1		182.7	215.0	160,7	157,3	160,0	152,5	18,4
59	157.1	179.0	160.4	-	141,1	138,1	140,4	133,9	16,2
60	126.5		159.7	161.1	140,9	136,7	139,9	134,3	16,1
61	73.1		98.6	-	86,6	84,7	86,4	81,5	10,0
62	131.2		183.3	209.1	161,1	158,1	160,5	152,6	18,5
63	71.5		113.6	127.9	99,9	97,6	99,5	94,4	11,5
64	87.0		122.7	141.0	108,0	105,3	107,5	102,5	12,4
65	153.6	167.0	125.0	-	110,1	107,4	109,5	104,5	12,6
66	97.1		130.8	135.4	115,0	113,5	114,5	109,6	13,2
67	158.8		167.4	189.2	147,5	144,9	146,6	141,2	16,9
68	79.1		179.8	179.8	158,2	155,7	157,4	151,1	18,2
69	99.2	116.0	120.3	-	105,9	103,9	105,3	100,8	12,1
70	104.0		124.3	127.7	109,7	106,5	108,8	104,8	12,5
71	83.4		137.1	153.2	120,4	118,0	120,1	113,5	13,8
72	40.8		97.0	116.3	85,2	83,8	84,9	80,8	9,8
73	44.0		58.5	-	51,5	50,3	51,2	48,9	5,9
74	40.5		103.4	120.5	91,0	89,3	90,5	86,9	10,4
75	152.3		175.2	182.0	154,2	151,3	153,4	146,8	17,7
76	59.1		87.9	92.4	77,1	76,3	77,0	73,0	8,9
77	162.8		150.8	-	132,6	129,5	132,0	125,3	15,2
78	69.7		88.6	93.5	78,1	77,1	77,6	75,0	9,0
79	109.8		116.0	-	102,0	99,8	101,6	96,5	11,7
80	28.0		28.4	29.1	25,1	24,5	24,9	23,9	2,9
81	53.1		87.1	89.6	76,8	74,8	76,3	73,1	8,8
82	55.9		112.5	112.5	99,2	96,7	98,5	94,8	11,3
83	75.4		107.5	107.5	94,6	92,2	94,2	89,6	10,8
84	44.8		61.2	-	54,0	53,0	53,5	52,1	6,2
85	48.7		68.5	74.6	60,1	59,4	60,0	57,1	6,9
86	89.0		66.6	70.9	58,7	57,8	58,3	56,5	6,7
87	39.5	39.0	63.0	68.5	55,5	54,6	55,2	53,1	6,4
88	79.1		104.0	107.4	91,5	89,3	91,1	86,6	10,5
89	77.2		97.8	102.1	86,0	84,0	85,7	81,5	9,9
90	47.8		84.4	85.4	74,3	72,5	73,9	70,6	8,5
91	59.2		90.8	90.8	80,0	78,1	79,5	75,9	9,2
92	78.6		122.3	123.6	107,7	105,2	107,1	102,3	12,3
93	39.5		53.7	58.9	47,1	46,0	47,0	44,2	5,4
94	39.4		37.3	39.8	32,8	32,2	32,6	31,3	3,8
95	59.3		71.1	74.2	62,7	61,7	62,3	60,1	7,2
96	76.3		89.5	95.9	78,8	77,4	78,4	75,2	9,0
97	84.4		98.2	112.5	86,4	84,8	85,9	82,3	9,9
98	85.9		105.6	106.9	93,0	91,1	92,5	88,7	10,7
99	70.1		83.0	-	73,0	71,1	72,6	69,0	8,4
100	39.7		52.7	-	46,4	45,4	46,2	44,0	5,3
101	21.9		25.2	28.6	22,1	21,7	22,1	20,9	2,5
102	34.8		48.9	48.9	43,1	42,4	42,8	41,4	4,9
103	31.5		43.6	48.2	38,3	37,7	38,2	36,3	4,4

En la Tabla anterior, como en las siguientes referidas al resto de las islas, se calculan los valores de tasa de dosis equivalente (columnas 4ª y 5ª) a partir de las expresiones propuestas por Poffijn y colaboradores^[120]. Esta fórmula es la que se ha adoptado como referencia, en nuestro Laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental de la Universidad de La Laguna, para obtener la tasa de dosis equivalente a partir de las concentraciones de los radionúclidos presentes en el suelo (*DRF* de la **Tabla 3.69**).

Para conseguir los diferentes valores en cada uno de los 103 lugares de la isla de Tenerife, de la tasa de dosis absorbida en aire de origen terrestre (en nGy h⁻¹), que se presentan en las columnas 6ª, 7ª, 8ª y 9ª de la **Tabla 3.74** anterior, se han elegido los *Factores de Conversión a Tasa de Dosis* más comúnmente aceptados por la mayoría de los investigadores revisados:

- *Columna 6ª* : **[1], [2] et al**: Resultado obtenido utilizando los *DRF* propuestos en los *Informes UNSCEAR-82*^[2], *UNSCEAR-88*^[1] y que también figuran en las publicaciones de otros muchos autores.
- *Columna 7ª* : **[3] et al**: Valores calculados usando los *DRF* recogidos en el *Informe UNSCEAR-93*^[3], que son adoptados por otra importante cantidad de investigadores.
- *Columna 8ª* : **[113] et al**: Resultado del cálculo de la tasa de dosis absorbida en aire a partir de la fórmula de Beck *et al*^[113], que ha sido la base de multitud de estudios sobre este tema.
- *Columna 9ª* : **[66]**: Se aplican los *Factores de conversión* propuestos por Quindós y colaboradores en la publicación "*Natural Radioactivity in Spanish Soils*"^[66], que corresponde al estudio más amplio realizado en todo el territorio español hasta el momento.

En la **Tabla 3.75** siguiente se comparan los valores estadísticos básicos obtenidos a partir de las 104 medidas realizadas en la isla de Tenerife y de los valores calculados de la tasa de dosis neta en aire utilizando las cuatro diferentes fórmulas reseñadas.

Tabla 3.75.- Comparación entre los valores medidos en la isla de Tenerife de tasa de dosis absorbida en aire de origen terrestre y los valores *calculados* a partir de las concentraciones de los radionúclidos de sus suelos, aplicando las diferentes expresiones propuestas.

Tasa de dosis neta (nGy h ⁻¹)		Media aritmética	Media geométrica	Desviación estándar
MEDIDA		67,4	58,7	35,7
CALCULADA	[1][2] et al	83,0	74,1	36,7
	[3] et al	81,3	72,6	35,9
	[113] et al	82,6	73,8	36,5
	[66]	78,7	70,3	34,8

Como para el caso de Tenerife, en la Tabla correspondiente a la isla de La Palma (**Tabla 3.76**), cada una de las columnas viene encabezada por la referencia bibliográfica (número entre corchetes "[N]") que corresponde a la publicación de la que se han extraídos los *DRF* aplicados. En la 2ª columna se presentan los valores de la tasa de dosis absorbida en aire (en nGy h⁻¹), medida a 1 metro del suelo con la cámara de ionización de alta presión RSS-112, en esta isla.

Tabla 3.76.- Resultados de la tasa de dosis medida en aire y de las tasas de dosis absorbida, equivalente y de exposición *calculados*, para la isla de La Palma.

Cuadro	Tasa de dosis neta RSS-112 (nGy h ⁻¹)	Tasa dosis equivalente (nSv h ⁻¹) [70][120]	Tasa dosis equivalente (nSv h ⁻¹ +Cs) [120]	Tasa de dosis abs. (nGy h ⁻¹) [1][2] et al	Tasa de dosis abs. (nGy h ⁻¹) [3] et al	Tasa de Dosis abs. (nGy h ⁻¹) [113] et al	Tasa de dosis abs (nGy h ⁻¹) [66]	Tasa de exposición (mR h ⁻¹) [76][117]
1	52	70,4	70,4	61,5	60,2	61,6	57,0	7,1
2	44	67,2	71,5	58,7	57,4	58,8	54,2	6,8
3	44	51,5	55,4	45,1	44,6	45,1	42,2	5,2
4	60	51,9	57,0	45,5	44,8	45,5	42,7	5,3
5	27	42,0	52,5	36,7	36,1	36,8	33,9	4,3
6	11	12,8	16,7	11,2	11,0	11,2	10,5	1,3
7	56	51,4	55,5	45,1	44,3	45,0	42,3	5,2
8	73	78,2	81,9	68,7	68,4	68,5	65,7	7,9
9	68	71,5	73,1	62,8	62,6	62,6	60,0	7,3
10	27	38,4	-	33,8	33,0	33,7	31,8	3,9
11	41	69,8	69,8	61,1	60,0	61,1	56,9	7,1
12	33	46,0	56,3	40,4	39,3	40,3	37,7	4,6
13	52	57,0	57,3	50,1	50,1	49,9	48,0	5,8

El resultado de la comparación estadística entre los valores medidos, con la HPIC RSS-112, de tasa de dosis absorbida neta (descontando la contribución de la radiación cósmica) y los calculados para La Palma, se presentan en la **Tabla 3.77**.

Tabla 3.77.- Comparación entre los valores medidos en la isla de La Palma (13 lugares) y los valores *calculados* de la tasa de dosis absorbida de origen terrestre.

Tasa de dosis neta (nGy h ⁻¹)		Media aritmética	Media geométrica	Desviación estándar
MEDIDA		45,2	41,1	17,6
CALCULADA	[1][2] et al	47,7	44,2	15,5
	[3] et al	47,1	43,6	15,4
	[113] et al	47,7	44,2	15,5
	[66]	44,8	41,5	14,7

La **Tabla 3.78** presenta de forma comparativa los diferentes resultados obtenidos al aplicar las cuatro fórmulas estudiadas para La Gomera, isla donde se midieron los valores de tasa de dosis en aire (valores netos en nGy h⁻¹) con el detector MC-71 (columna 2ª) y con la cámara RSS-112 (columna 3ª). Como en las Tablas anteriores, cada una de las columnas viene encabezada por la referencia bibliográfica de la publicación de la que se han extraídos los *DRF* utilizados en cada caso, y que son los mismos que para las islas de Tenerife y La Palma.

Tabla 3.78.- Resultados de las medidas de tasa de dosis en aire y de los valores *calculados* de las tasas de dosis absorbida, equivalente y de exposición, para la isla de La Gomera.

Cuadro	Tasa de dosis neta MC-71 (nGy h ⁻¹)	Tasa de dosis neta RSS-112 (nGy h ⁻¹)	Tasa dosis equivalente (nSv h ⁻¹) [70][120]	Tasa dosis equivalente (nSv h ⁻¹ +Cs) [120]	Tasa de dosis abs. (nGy h ⁻¹) [1][2] et al	Tasa de dosis abs. (nGy h ⁻¹) [3] et al	Tasa de Dosis abs. (nGy h ⁻¹) [113] et al	Tasa de dosis abs. (nGy h ⁻¹) [66]	Tasa de exposición (mR h ⁻¹) [76][117]
1	21,3	24	15,9	19,3	14,0	13,7	13,9	13,3	1,6
2	35,7	44	40,1	41,9	35,3	34,5	35,1	33,7	4,0
3	29,8	33	42,5	45,5	37,3	36,3	37,2	35,0	4,3
4	104,7	118	97,0	99,8	85,4	83,6	84,9	81,4	9,8
5	23,4	26	44,0	57,7	38,5	37,6	38,5	35,7	4,4
6	49,3	55	69,2	71,4	60,9	59,4	60,6	57,5	7,0
7	31,2	31	39,5	40,6	34,7	33,9	34,6	32,9	4,0
8	29,4	34	40,6	45,5	35,6	34,8	35,6	33,4	4,1
9	39,9	42	52,4	52,9	46,2	44,8	45,9	43,8	5,3
10	30,0	32	44,1	50,0	38,6	37,8	38,6	36,1	4,5

En la **Tabla 3.79** se expresa el resultado de comparar los valores medidos de tasa de dosis neta en aire en la isla de La Gomera, con la RSS-112, y los calculados aplicando los diferentes *DRF* seleccionados, a los valores de actividad específica de los radionúclidos encontrados en los suelos donde se realizó la medida.

Tabla 3.79.- Relación entre los valores medidos (con RSS-112) y los valores calculados de la tasa de dosis absorbida de origen terrestre en la isla de La Gomera.

Tasa de dosis neta (nGy h ⁻¹)		Media aritmética	Media geométrica	Desviación estándar
MEDIDA		43,9	39,1	27,6
CALCULADA	[1][2] et al	42,7	39,0	18,9
	[3] et al	41,6	38,1	18,5
	[113] et al	42,5	38,9	18,8
	[66]	40,3	36,8	18,1

Para la isla de El Hierro, se presentan en la **Tabla 3.80** los resultados de las medidas y los valores calculados aplicando las diferentes fórmulas estudiadas, a partir de las concentraciones de los radionúclidos existentes. Esta Tabla tiene el mismo formato y las mismas peculiaridades que las anteriores.

Tabla 3.80.- Resultados de las medidas de tasa de dosis en aire (valor neto) en la isla de El Hierro, y valores calculados de la tasa de dosis absorbida, tasa de dosis equivalente y tasa de exposición, aplicando las diferentes fórmulas analizadas.

Cuadro	Tasa de dosis neta MC-71 (nGy h ⁻¹)	Tasa de dosis neta RSS-112 (nGy h ⁻¹)	Tasa dosis equivalente (nSv h ⁻¹) [70][120]	Tasa dosis equivalente (nSv h ⁻¹ +Cs) [120]	Tasa de dosis abs. (nGy h ⁻¹) [1][2] et al	Tasa de dosis abs. (nGy h ⁻¹) [3] et al	Tasa de Dosis abs. (nGy h ⁻¹) [113] et al	Tasa de dosis abs (nGy h ⁻¹) [66]	Tasa de exposición (mR h ⁻¹) [76][117]
1	33.3	37	47,9	47,9	42,1	41,1	41,9	39,8	4,8
2	25.2	28	32,8	35,6	28,7	28,1	28,7	26,8	3,3
3	29.7	30	33,7	35,9	29,6	29,0	29,5	28,0	3,4
4	41.2	39	50,5	52,6	44,4	43,8	44,2	42,3	5,1
5*	20.5	26	28,7	36,3	25,3	24,8	25,1	24,2	2,9
6	39.2	41	51,8	51,8	45,5	44,9	45,3	43,2	5,2

La relación entre los valores medidos (tasa de dosis absorbida neta) con la cámara de ionización RSS-112 y los calculados aplicando las cuatro diferentes fórmulas para la isla de El Hierro, se presentan en la **Tabla 3.81** siguiente.

Tabla 3.81.- Comparación entre los valores medidos (con RSS-112) en la isla de El Hierro de tasa de dosis absorbida en aire de origen terrestre y los valores calculados a partir de las concentraciones de los radionúclidos de sus suelos.

Tasa de dosis neta (nGy h ⁻¹)		Media aritmética	Media geométrica	Desviación estándar
MEDIDA		33,5	33,0	6,3
CALCULADA	[1][2] et al	35,9	35,0	9,0
	[3] et al	35,3	34,3	8,9
	[113] et al	35,8	34,8	9,0
	[66]	34,1	33,1	8,6

Finalmente, comparando el conjunto de los 133 valores obtenidos mediante medida directa a 1 metro del suelo de la tasa de dosis absorbida debida a la radiación gamma de origen terrestre, se observa que existe relación con los obtenidos mediante la aplicación de las cuatro fórmulas que se proponen más comúnmente por los diferentes autores revisados (**Tabla 3.82**), ya que en todos los casos: $p < 0,001$.

En este análisis de conjunto se confirma que son los valores calculados con la expresión formulada por Quindós y colaboradores^[66] los que mejor se adaptan a las medidas realizadas en las cuatro islas occidentales de Canarias, para calcular la tasa de dosis absorbida en aire de origen terrestre, a partir de los valores encontrados de concentración de los radionúclidos emisores gamma presentes en los suelos de los lugares donde se realizaron las medidas.

Tabla 3.82.- Comparación entre los valores medidos en las islas de Tenerife, La Palma, La Gomera y El Hierro (133 medidas) de tasa de dosis absorbida en aire de origen terrestre y los valores *calculados* a partir de las concentraciones de los radionúclidos de sus suelos, aplicando las diferentes expresiones propuestas.

Tasa de dosis neta (nGy h⁻¹)	Media aritmética	Media geométrica	Desviación estándar	r ²	p
Medida	61,9	53,5	34,5	0,7726	< 0,001
Calculada: [1][2] et al	74,4	64,9	37,0		
Medida	61,9	53,5	34,5	0,7709	< 0,001
Calculada: [3] et al	72,9	63,6	36,2		
Medida	61,9	53,5	34,5	0,7709	< 0,001
Calculada: [113] et al	74,1	64,7	36,8		
Medida	61,9	53,5	34,5	0,7762	< 0,001
Calculada: [66]	70,5	61,5	35,2		

III.7.- ANÁLISIS DE LA POSIBLE INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE LA MUESTRA EN LA EFICIENCIA DEL DETECTOR DE GERMANIO

III.7.1.- INTRODUCCIÓN

En sentido estricto, la curva de eficiencia de un detector de germanio obtenida con una determinada fuente de referencia no podrá usarse para la medida de otras muestras a menos que éstas tengan la misma forma, la misma composición química y las mismas características físicas^[122]. Normalmente no es problemático conseguir formas similares, pero las composiciones químicas y las características físicas normalmente serán diferentes y, antes de obtener los resultados, debe comprobarse si esas diferencias son significativas para alcanzar la deseada exactitud de las medidas.

Cuando se realizaron, en el detector de germanio de nuestro Laboratorio, las determinaciones conducentes a obtener la concentración de los diferentes radionúclidos emisores gamma en las muestras de suelo, podemos garantizar que la geometría y el tamaño de la muestra siempre ha sido tenida en cuenta implícitamente, al asegurar que el detector se ha calibrado, y se ha calculado su fondo, con patrones cuyos tamaños y contenidos dispusieron de geometrías idénticas a las que luego se usaron en las medidas

Una adecuada utilización del sistema, sin embargo, debe tener en cuenta las correcciones necesarias para que sea considerada la influencia de otras características físicas, tales como la densidad, en los valores de actividad específica de los emisores gamma contenidos en los suelos; sobre todo porque los resultados de las medidas proporcionadas por los detectores de germanio están condicionados por la eficiencia de los mismos, la cual a su vez va a venir modificada por la autoatenuación de la emisión en la propia muestra, y por tanto por su densidad^[123].

Sería posible entonces usar curvas de eficiencia calibradas con una única muestra patrón de densidad fija. En caso contrario, se necesitarían varias fuentes patrón certificadas de diferentes densidades, lo cual sería extremadamente costoso y su uso muy tedioso. Actualmente sólo están disponibles algunos materiales estándar de referencia en diferentes laboratorios de metrología europeos y en servicios de control de calidad, que producen fuentes de referencia de distintas densidades.

También pueden conseguirse fuentes de calibración suministradas por ciertas firmas comerciales, constituidas por materiales plásticos, de densidad variable entre 700 y 2.500 kg m⁻³, que incorporan la sustancia radiactiva de tal manera que puede asumirse que las propiedades de atenuación de estos plásticos son similares a las del material de la muestra de igual densidad^[124].

III.7.2.- DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA EFICIENCIA POR LA DENSIDAD

En el Laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental de la Universidad de La Laguna, la curva de eficiencia del detector de germanio utilizado para las medidas de radiactividad gamma en suelos se obtuvo a partir de un patrón de densidad 1 ($\text{g cm}^{-3} \equiv 1.000 \text{ kg m}^{-3}$), por lo que se trató de conseguir el factor de corrección a introducir en el proceso de análisis cuando se midieran muestras de otra densidad. Este factor de corrección se utilizaría refiriendo todos los valores de concentración de los diferentes radionúclidos en cada una de las muestras, a la de densidad 1, valor coincidente con la de nuestro patrón.

La idea motriz para llevar a cabo el estudio fue considerar que la actividad específica de los radionúclidos presentes en una porción de suelo determinada es siempre la misma y que la actividad total depende de su peso. El factor corrector de la eficiencia del detector de germanio, para cada energía, es proporcional al cociente entre el área neta del fotopico correspondiente y el peso de la muestra, y por tanto de la densidad para un volumen constante. En esa línea, se ha tratado de encontrar una relación funcional, de inmediata aplicación práctica, entre la densidad de la muestra y la eficiencia del detector de Germanio intrínseco de alta pureza del que disponemos en nuestro Laboratorio.

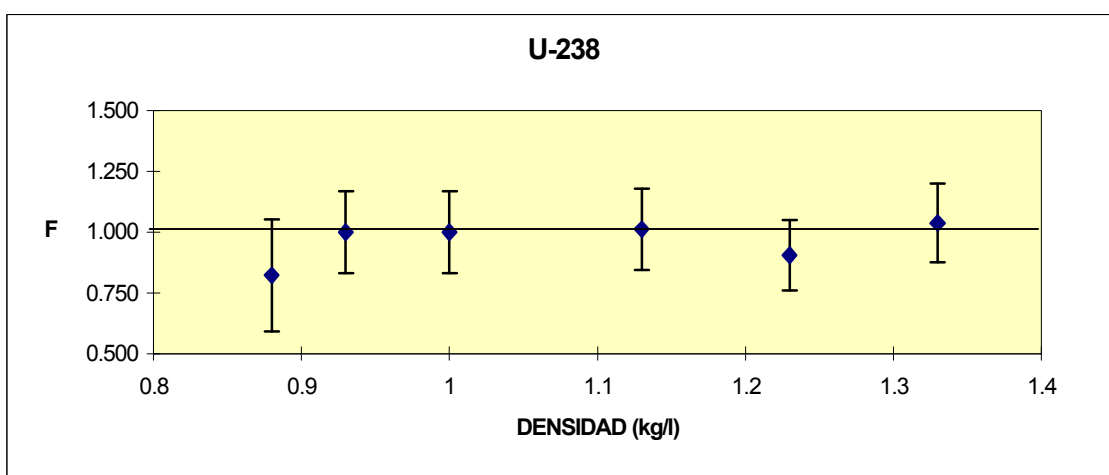
El suelo utilizado en este análisis fue un tipo de piedra pómez ligera y de gran porosidad recogida en la zona de Las Cañadas del Teide. Se usó esta clase de suelo por la posibilidad de obtener fácilmente muestras de referencia que, para un mismo volumen, tuvieran diferente peso, lo que se consiguió produciendo porciones de este material con tamaños de grano cada vez más pequeños mediante un proceso de sucesivas molturaciones y tamizados. Se obtuvieron así 6 muestras de densidades comprendidas entre 800 y 1.400 kg m^{-3} , que se analizaron en el detector de Germanio.

Los valores de concentraciones en Bq kg^{-1} de cada uno de los radionúclidos medidos en estas 6 muestras, se presentan en el conjunto de tablas que van de la **Tabla 3.83** a la **Tabla 3.88**. También se han obtenido los gráficos correspondientes a la relación buscada entre el factor de corrección calculado y la densidad de la muestra para cada uno de los isótopos analizados (**Figura III.33** a **Figura III.38**).

**Tabla 3.83.- Variación de la concentración con la densidad para el U-238:
Factor de corrección F.**

Muestra	Densidad (kg m ⁻³)	Concentración (Bq kg ⁻¹)	± 2 s	F	± 2 s
1	880	216	60,8	0,821	0,231
2	930	263	44,4	1,000	0,169
3	1.000	263	44,4	1,000	0,169
4	1.130	266	44,2	1,011	0,168
5	1.230	238	38,0	0,905	0,144
6	1.330	273	42,1	1,038	0,160

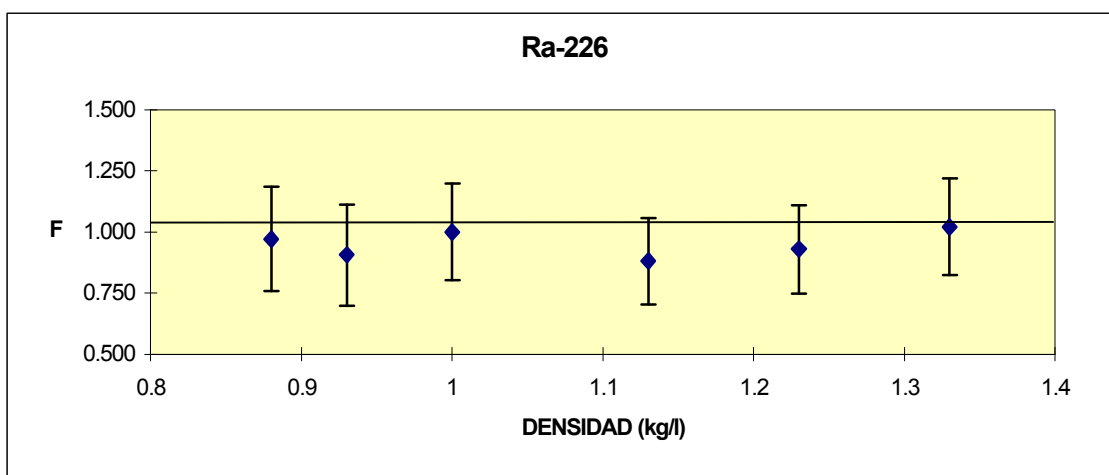
Figura III.33.- Factor de corrección para distintas densidades de la muestra: U-238.



**Tabla 3.84.- Variación de la concentración con la densidad para el Ra-226:
Factor de corrección F.**

Muestra	Densidad (kg m ⁻³)	Concentración (Bq kg ⁻¹)	± 2 s	F	± 2 s
1	880	371	81,9	0,971	0,214
2	930	346	78,8	0,906	0,206
3	1.000	382	75,8	1,000	0,198
4	1.130	336	67,6	0,880	0,177
5	1.230	355	69,4	0,929	0,182
6	1.330	390	75,1	1,021	0,197

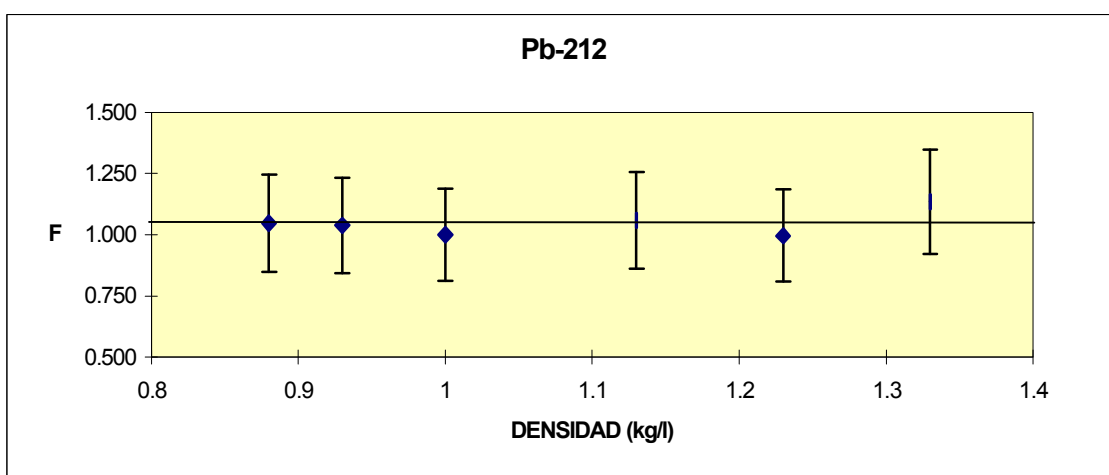
**Figura III.34.- Factor de corrección para distintas densidades de la muestra:
Ra-226.**



**Tabla 3.85.- Variación de la concentración con la densidad para el Pb-212:
Factor de corrección F.**

Muestra	Densidad (kg m ⁻³)	Concentración (Bq kg ⁻¹)	± 2 s	F	± 2 s
1	880	248	46,9	1,046	0,198
2	930	246	46,4	1,038	0,196
3	1.000	237	44,6	1,000	0,188
4	1.130	251	47,0	1,059	0,198
5	1.230	236	44,4	0,996	0,187
6	1.330	269	50,2	1,135	0,212

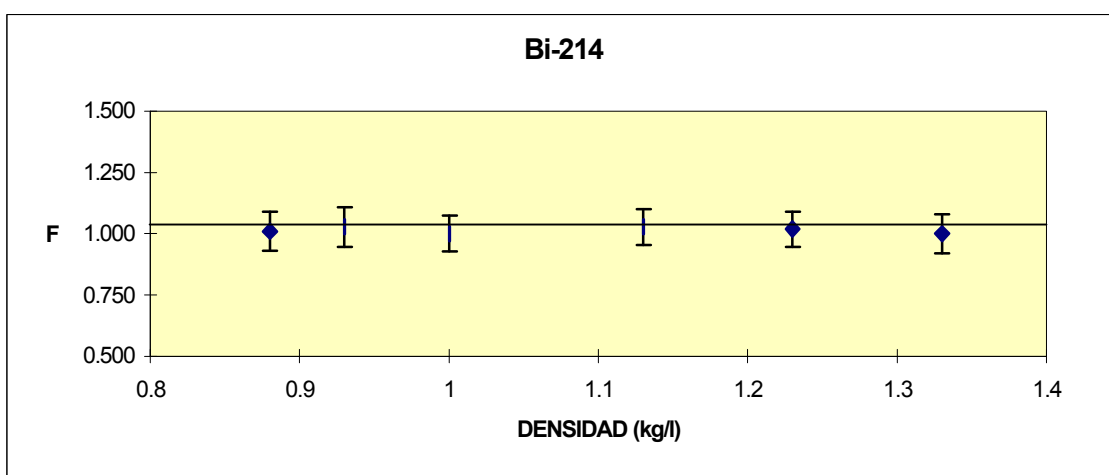
**Figura III.35.- Factor de corrección para distintas densidades de la muestra:
Pb-212.**



**Tabla 3.86.- Variación de la concentración con la densidad para el Bi-214:
Factor de corrección F.**

Muestra	Densidad (kg m ⁻³)	Concentración (Bq kg ⁻¹)	± 2 s	F	± 2 s
1	880	112	8,9	1,009	0,080
2	930	114	9,0	1,027	0,081
3	1.000	111	8,2	1,000	0,074
4	1.130	114	8,1	1,027	0,073
5	1.230	113	8,0	1,018	0,072
6	1.330	111	8,8	1,000	0,079

Figura III.36.- Factor de corrección para distintas densidades de la muestra: Bi-214.



**Tabla 3.87.- Variación de la concentración con la densidad para el Th-232:
Factor de corrección F.**

Muestra	Densidad (kg m ⁻³)	Concentración (Bq kg ⁻¹)	± 2 s	F	± 2 s
1	880	212	15,6	1,060	0,078
2	930	206	15,7	1,030	0,079
3	1.000	200	13,8	1,000	0,069
4	1.130	207	14,4	1,035	0,072
5	1.230	207	14,1	1,035	0,071
6	1.330	227	15,9	1,135	0,080

**Figura III.37.- Factor de corrección para distintas densidades de la muestra:
Th-232.**

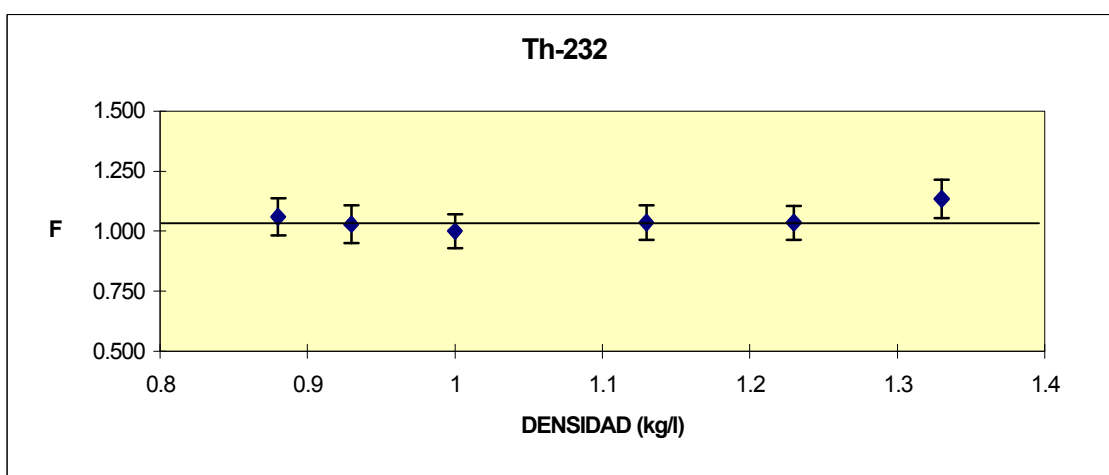
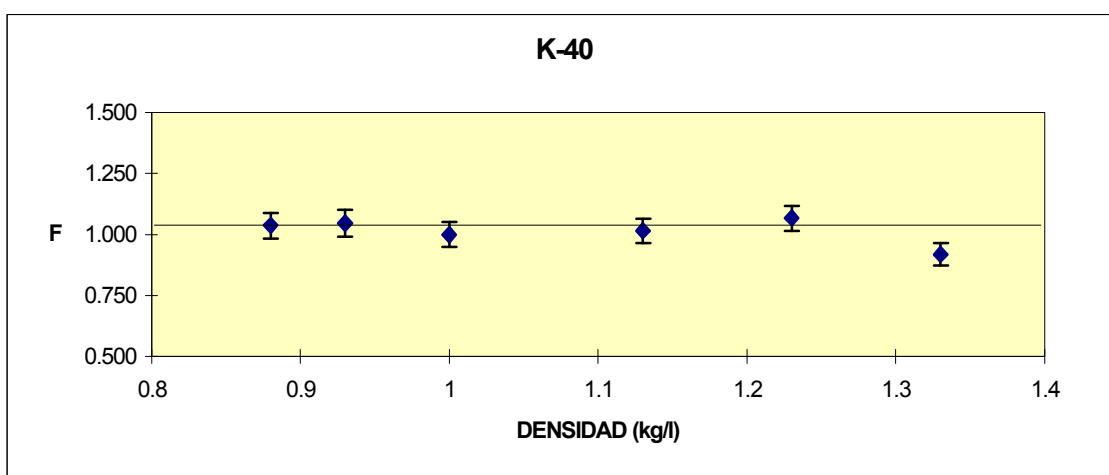


Tabla 3.88.- Variación de la concentración con la densidad para el K-40: Factor de corrección F.

Muestra	Densidad (kg m ⁻³)	Concentración (Bq kg ⁻¹)	± 2 s	F	± 2 s
1	880	2030	105,0	1,036	0,054
2	930	2050	105,0	1,046	0,054
3	1.000	1960	99,4	1,000	0,051
4	1.130	1990	98,0	1,015	0,050
5	1.230	2090	100,2	1,066	0,051
6	1.330	1800	87,2	0,918	0,044

Figura III.38.- Factor de corrección para distintas densidades de la muestra: K-40.



En estas medidas, como en cualquier otra de radiactividad gamma de muestras medioambientales, existe una incertidumbre que se expresa habitualmente mediante la desviación estándar. La incertidumbre total debe incluir todas las incertidumbres originadas a partir de las siguientes magnitudes o efectos^[125]: preparación de la fuente, geometría fuente-detector, área del pico, área del pico de fondo, variaciones en la atenuación de la muestra, período del radionúclido, probabilidades de emisión de rayos gamma y eficiencia.

La observación de los valores obtenidos y su representación gráfica indica claramente que la esperada dependencia entre concentración y densidad, debida a la existencia del fenómeno de autoatenuación en la fuente, no se refleja en los resultados encontrados. Las rectas son decrecientes solamente para el ²¹⁴Bi y el ⁴⁰K, siendo el valor del coeficiente de correlación siempre inferior a 0,3.

Este resultado no coincide con los trabajos de diferentes autores que, si bien no concuerdan en sus conclusiones, comunican la existencia de esta dependencia funcional. Así, en uno de estos trabajos^[126] se concluye que para cada energía existe un factor de corrección por autoabsorción que disminuye exponencialmente con la densidad de la muestra. Por el contrario otro grupo de trabajo que ha investigado sobre estos temas^[127] ha puesto a punto un procedimiento experimental que les permitió concluir que la eficiencia de su detector de Germanio debería ser modificada con la densidad de la muestra mediante la introducción de factores de corrección para cada radionúclido, cuya dependencia con la densidad de la muestra es decreciente y aproximadamente lineal. No obstante, debe señalarse que la variación encontrada en el rango de densidades comprendido entre 400 kg m⁻³ y 1.100 kg m⁻³ introduce modificaciones, mediante la utilización del correspondiente factor de corrección, que únicamente son del orden del 0,4 al 0,6%.

Los resultados que nosotros presentamos corresponden a muestras cuyo diámetro de partículas siempre era superior a 400 μ, correspondiente a la muestra de mayor densidad. Esta consideración es especialmente interesante ya que está referenciado la escasa o nula dependencia entre la concentración de sustancias radiactivas en una muestra de suelo y el tamaño del grano que constituye la muestra cuando el mismo es superior a 50 μ.

Todos los estudios llevados a cabo a este respecto indican que la actividad específica de los diferentes radionúclidos de una muestra está relacionada con la densidad de la misma, la cual a su vez viene determinada por dos factores: la naturaleza del material y el tamaño de grano constitutivo de la muestra a medir. Para un suelo de unas determinadas características, los resultados de la bibliografía señalan la influencia en el tamaño del grano, si bien esta influencia sólo se manifiesta de manera clara para tamaños de grano inferiores a 400 μ, para unos autores, o de 50 μ para otros.

Así, está publicado un estudio^[128] sobre la relación que existe entre la concentración de radionúclidos y el tamaño de las partículas en que una misma muestra se distribuye en diferentes fracciones granulométricas, variando en el rango desde valores menores de 53 μ a superiores a 1.250 μ . Este trabajo se realizó usando un detector de Germanio y las muestras se colocaron en cápsulas Petri de 170 cm^3 . Los autores concluyen como consecuencia de sus medidas que la actividad específica de las sustancias radiactivas ^{226}Ra y ^{232}Th disminuye de forma clara a medida que aumenta el tamaño del grano de la muestra, observándose una dependencia que es aproximadamente exponencial decreciente, mientras que para el caso del ^{40}K no parece haber variación significativa con el tamaño del grano de la muestra hasta valores menores de 425 μ de diámetro, mientras que para valores mayores se observa una ligera tendencia indicadora de disminución de la actividad con el aumento del tamaño de las partículas.

En otro trabajo publicado^[129], investigadores holandeses analizaron la relación existente entre los tamaños de grano de las muestras de suelo y la actividad medida en las mismas. Realizaron las determinaciones en muestras contenidas en recipientes Marinelli de 1,2 litros usando un detector de Germanio. Concluyeron, entre otros resultados, que la diferencia en el contenido en radionúclidos emisores gamma viene principalmente fijada por la presencia de fracciones de muestra con partículas de diámetro inferior a 50 μ .

A la vista de los resultados obtenidos y teniendo en cuenta las observaciones comentadas, parece que no se pueda establecer, en las condiciones de medida de nuestro laboratorio, una relación funcional entre la actividad de la muestra y la densidad de la misma que recomiende el uso de un factor de corrección para modificar los resultados primarios.

En los gráficos que se presentan en las **Figura III.33** a la **Figura III.38**, se puede observar que, teniendo en cuenta los niveles de incertidumbre considerados habitualmente en este tipo de medidas para nuestro sistema de detección y análisis, la curva de eficiencia obtenida para un patrón de densidad 1 ($\text{g cm}^{-3} \equiv 1.000 \text{ kg m}^{-3}$) es representativa para cualquiera de las muestras de densidades comprendidas entre 800 y 1.400 kg m^{-3} , para las condiciones en que se realizó el estudio, con muestras obtenidas mediante la molturación de una muestra inicial de piedra pómez volcánica.

Con ello se puede concluir que en las condiciones anteriores, para los radionúclidos considerados y las concentraciones medidas, no ha sido posible establecer ningún tipo de dependencia entre la concentración medida de las sustancias radiactivas y las variaciones de densidad de las muestras.

Por tanto, en nuestro Laboratorio, la curva de eficiencia del detector de Germanio que venimos utilizando actualmente y que se ha obtenido a partir de una disolución patrón de densidad 1 (1.000 kg m^{-3}), es aplicable al análisis de las muestras de suelo de densidades comprendidas en el rango indicado.

III.8.- ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS DE LAS MEDIDAS OBTENIDAS CON LOS DETECTORES MC-71 Y RSS-112

III.8.1.- INTRODUCCIÓN

La medida de tasa de dosis de radiación gamma ambiental es particularmente necesaria en situaciones de emergencia o accidentes que impliquen emisiones radiactivas^[62]. Tanto el público como las autoridades demandan medidas con garantía suficiente, que proporcionen valores fiables y que justifiquen la adopción, si procediera, de contramedidas ante cualquier eventualidad.

Todos los organismos con responsabilidades en estos temas han optado por la utilización de instrumentos que midan directamente tasas de dosis de radiación gamma^[63], por la inmediatez del resultado, al contrario de la lentitud que caracteriza el proceso consistente en la toma de muestras y su análisis posterior en un laboratorio.

Asimismo, en gran parte del trabajo que realiza un laboratorio de radiactividad ambiental, se necesita disponer de aparatos de medida de radiación gamma con un alto grado de fiabilidad, tanto para caracterizar un medio ambiente desde el punto de vista radiológico, como para la asignación de dosis, debidas a la radiación natural, a las personas que habiten en tales entornos. En base a ello, la elección de uno de estos equipos es una decisión importante.

Para la medida directa de los niveles de radiación gamma ambiental en aire^[71], y consecuentemente para el conocimiento de las dosis a la población desde el medio natural por radiación gamma, se han utilizado en nuestro laboratorio dos métodos y tipos de equipos: dosímetros termoluminiscentes que realizan una medida integrada de la radiación que les alcanza durante un periodo de tiempo relativamente largo (varios meses)^{[80][106]}, y medida directa puntual, mediante detectores de ionización gaseosa, ya sea con Geiger-Müller compensados en energía^[64] o utilizando cámaras de ionización de alta presión^[70].

El objetivo perseguido en esta parte de la memoria es comparar las prestaciones ofrecidas, para la medida de radiación gamma ambiental, por dos equipos diferentes con detectores basados en la ionización gaseosa, analizando los resultados obtenidos con vistas a recomendar posibles usos de los mismos, a la hora de alcanzar los propósitos de caracterización radiológica ambiental y de dosimetría debida a este tipo de radiación.

III.8.2.- COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL DETECTOR GEIGER-MÜLLER MC-71 Y DE LA CÁMARA DE IONIZACIÓN DE ALTA PRESIÓN RSS-112

Los dos equipos de medida de radiación gamma ambiental en aire usados en este estudio ya han sido descritos en el Apartado de "*Material y Método*". Se trata del medidor de radiación ambiental gamma modelo 6-80, marca Mini Instruments, y n° de serie 002232, con detector Geiger-Müller (G-M) compensado en energía, tipo MC-71, y número de serie 1170; y de la cámara de ionización de alta presión (HPIC), de la marca Reuter-Stokes, modelo RSS-112-100mR, con número de serie K-1117.

El medidor G-M es de cómodo transporte, ya que viene colocado en una maleta de dimensiones 46 x 37 x 15 cm, y con un peso aproximado de 4 kg. El montaje del equipo en situación de medida se realiza mediante un trípode de aluminio de bajo peso, en el que se posiciona verticalmente el detector MC-71, cilindro muy ligero de unos 4 cm de diámetro y 30 cm de longitud. El medidor que presenta, de forma digital, el número de cuentas en diferentes períodos de tiempo y, en un indicador de aguja, el nivel de la tasa de dosis gamma ambiental, también es de pequeño tamaño (24 x 12 x 10 cm) y se cuelga del trípode durante la medida. Como término medio, el tiempo necesario para la preparación del equipo y la realización de una medida es de unos 15 minutos.

El transporte de la HPIC es mucho más dificultoso, al estar constituida por la propia cámara esférica de alta presión protegida en el interior de un cubo metálico (30 cm de lado y 12 kg de peso), por el equipo asociado (dimensiones: 42 x 28 x 12 cm; peso: 9 kg) que presenta externamente forma de maleta metálica, donde se pueden guardar los cartuchos de memoria que sirven para almacenar los datos, el trípode para colocar la cámara (también mucho más pesado al tener que ser más robusto y resistente que el que sostiene el MC-71) y el grueso y poco flexible cable de conexión entre cámara y equipo. La dificultad en el transporte radica, no sólo en el tamaño y el peso del conjunto de elementos constitutivos del equipo, sino en la incomodidad para la carga de todos estos dispositivos por una sola persona, sobre todo, cuando se va a realizar la medida en algún lugar no accesible con un vehículo. El tiempo mínimo de preparación y realización de una medida con este equipo se evalúa en unos 30 minutos.

La medida en cada uno de los 34 puntos seleccionados se realizó colocando el centro geométrico del detector de los dos equipos, ya sea el cilindro que constituye el G-M modelo MC-71, que se posiciona verticalmente, o el cubo que contiene la cámara

esférica de ionización RSS-112, a 1 metro del suelo, mediante el correspondiente trípode, siguiendo los protocolos de medida descritos en "*Material y Método*".

Con el MC-71 se ha medido dos veces consecutivas durante 600 segundos, tiempo que es la mitad del periodo de adquisición del otro equipo. Cada vez se toma el valor del número de cuentas acumuladas y el valor medio aproximado indicado por la aguja del instrumento como tasa de dosis (medida analógica).

Como resultado de las medidas con la HPIC se obtienen los valores medio, máximo, mínimo y desviación estándar de la tasa de dosis gamma ambiental medidas en el periodo de los 20 minutos que dura la toma de datos.

III.8.3.- COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS MEDIDAS CON AMBOS EQUIPOS

Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 3.89**. En ella figuran los valores de la tasa de dosis ambiental gamma medida en diferentes puntos de las islas de Tenerife, La Gomera y El Hierro (Islas Canarias Occidentales).

En Tenerife se realizaron medidas simultáneas con ambos equipos en 18 puntos situados en diversos lugares de la isla, diferenciados tanto por su orientación geográfica como por su altitud respecto al nivel del mar. Estos puntos de muestreo se eligieron entre los que presentaban los niveles de radiación gamma ambiental más elevados, intermedios y menores de todos los considerados en la primera campaña de medidas de radiación natural llevada a cabo en Tenerife^[72]. En La Gomera y El Hierro se midió con los dos aparatos en todos y cada uno de los puntos de medida que se establecieron en el centro geométrico de los cuadrados resultantes de la división en cuadrículas de las islas (10 en La Gomera y 6 en El Hierro).

En la **Tabla 3.89**, se muestran y comparan los valores finales calculados de la tasa de dosis absorbida en aire debida a la radiación gamma ambiental, incluida la radiación cósmica. Los resultados se obtuvieron descontando a la medida obtenida, únicamente el fondo de cada uno de los equipos. Para el caso del detector Geiger-Müller MC-71, el valor presentado es la media aritmética del resultado obtenido en las dos medidas consecutivas realizadas. También se presenta el cociente entre la tasa de dosis obtenida con el MC-71 y la medida en el mismo lugar con la RSS-112. Esta relación se mantiene en todos los casos en el rango de 0,89 a 1,03, con un valor promedio de 0,95, una media geométrica de 0,94 y una desviación estándar de 0,04.

Tabla 3.89.- Tasas de dosis ambiental en aire debida a radiación gamma (incluida radiación cósmica), usando dos detectores distintos.

LUGAR	MC - 71				RSS - 112					Relación entre las Tasas de Dosis medidas (MC-71 / RSS-112)
	Cuentas en 600 s	TASA DE DOSIS			TASA DE DOSIS					
		Calcul. (x2)	Calcul. (Media)	Medida analógic	Media	Media Neta	Máx.	Mín.	D.std	
	nGyh ⁻¹		mGyh ⁻¹	nGyh ⁻¹						
TENERIFE										
Moquinal-Batán	961	72	70	0,09	81	78	92	70	4	0,90
	917	68		0,09						
Chamorga	1587	124	121	0,15	136	133	148	125	4	0,91
	1505	118		0,13						
Barranco Hondo	918	68	68	0,08	74	71	96	63	4	0,96
	918	68		0,09						
Candelaria	1243	95	98	0,13	105	102	118	93	4	0,96
	1294	100		0,11						
Abades	1790	142	138	0,16	151	148	166	139	4	0,93
	1701	134		0,16						
Loma Camello	1717	135	138	0,16	152	149	163	140	4	0,92
	1774	140		0,17						
El Bronco	856	63	61	0,08	67	64	77	49	4	0,95
	810	59		0,07						
Portezuelo	1383	107	104	0,12	114	111	120	100	4	0,94
	1310	101		0,12						
Cuesta la Villa	1116	85	84	0,09	87	84	118	74	4	1,00
	1096	83		0,10						
La Vera	1162	89	87	0,10	94	91	111	82	4	0,96
	1134	86		0,11						
Santa Catalina	2372	191	187	0,20	203	200	220	192	5	0,93
	2280	183		0,21						
Altos de Chío	1152	88	89	0,10	91	88	108	81	4	1,01
	1169	89		0,10						
Llano Ucanca	1979	157	156	0,19	179	176	196	82	11	0,89
	1950	155		0,18						
Montaña Blanca	2804	227	227	0,28	252	249	276	234	7	0,91
	2811	227		0,24						
La Esperanza	1452	113	111	0,14	125	122	142	111	5	0,91
	1412	110		0,13						
Montaña el Alto	1776	140	143	0,17	159	156	175	145	5	0,91
	1829	145		0,16						
Llano de Ucanca	1993	159	158	0,18	180	177	195	164	6	0,89
	1971	157		0,19						
Santa Cruz Tfe.	1070	81	80	0,10	88	85	98	77	4	0,95
	1057	80		0,10						

LA GOMERA										
Las Casetas	973	73	72	0,09	84	81	97	70	4	0,89
	962	72								
Casas Moralito	774	56	55	0,06	61	58	76	50	4	0,95
	758	55								
Tamargada	1806	143	141	0,15	157	154	168	144	4	0,91
	1756	139								
Tazo	908	67	66	0,08	69	66	83	59	3	1,00
	883	65								
Arure	935	70	71	0,08	79	76	93	65	4	0,94
	980	73								
La Mejora	1015	76	74	0,09	79	76	93	70	4	0,97
	959	72								
Laguna Grande	1047	79	77	0,10	82	79	94	70	4	0,97
	1000	75								
Monte El Cedro	946	70	68	0,09	74	71	89	64	4	0,96
	897	66								
Revolcaderos	878	65	66	0,08	72	69	89	62	4	0,95
	903	67								
Alajeró	1174	90	90	0,10	99	96	115	88	4	0,94
	1189	91								
EL HIERRO										
Gorona Difuntos	961	72	74	0,09	77	74	89	64	4	1,00
	1008	76		0,10						
Gorona del Lajial	977	73	76	0,09	77	74	89	33	5	1,03
	1053	79		0,08						
Valverde	975	73	70	0,09	77	74	9	68	4	0,95
	912	68		0,08						
Las Montañetas	875	64	66	0,08	72	69	183	65	12	0,96
	917	68		0,08						
Chorro del Jable	1196	92	89	0,11	94	91	106	83	4	0,98
	1141	87		0,10						
Montaña Cuevas	839	61	60	0,08	69	66	82	59	4	0,92
	816	60								

Los resultados obtenidos con ambos equipos no son estadísticamente diferentes, por lo que se puede aceptar que son intercambiables con un margen de error comparable al que puede introducirse por las propias circunstancias de la medida o por la falta de precisión intrínseca al funcionamiento de los equipos (**Tabla 3.90**).

Si bien la cámara de ionización RSS-112 es el detector tomado habitualmente como de referencia en las medidas de radiación gamma ambiental, su coste es elevado. Por otra parte, es un equipo de difícil transporte, especialmente si se quiere llegar con él a zonas no accesibles con vehículos. El detector dotado de sonda Geiger-Müller modelo MC-71, por el contrario, no presenta ninguno de estos inconvenientes ya que

es ligero, robusto, de medida rápida y, relativamente, barato. Su mayor inconveniente es que el resultado de las medidas se obtiene en unidades que no son utilizables directamente^[62].

Tabla 3.90.- Comparación estadística entre el resultado de las medidas de tasa de dosis gamma en aire (terrestre y cósmica), realizadas en los mismos lugares de las islas de Tenerife, La Gomera y El Hierro, con los detectores MC-71 y RSS-112.

ISLA (Nº Medidas)	EQUIPO	MEDIDA (nGy h ⁻¹)		
		Media aritmética	Media geométrica	Desviación estándar
TENERIFE (18)	<i>MC-71</i>	117,8	110,4	44,9
	<i>RSS-112</i>	126,9	118,1	50,7
LA GOMERA (10)	<i>MC-71</i>	78,0	75,5	23,9
	<i>RSS-112</i>	82,6	79,6	27,0
EL HIERRO (6)	<i>MC-71</i>	72,5	72,0	9,9
	<i>RSS-112</i>	74,7	74,3	8,7

Por ende, el estudio realizado en los 34 distintos puntos de medida indicados, permite afirmar que no hay diferencias significativas ($p < 0,001$) entre los valores de radiación gamma ambiental obtenidos con este equipo y con la cámara RSS-112.

Si se tiene en cuenta que el precio del MC-71 es la décima parte de la RSS-112, el resultado anterior aconseja el uso del detector tipo G-M.

En la **Tabla 3.91** se comparan globalmente las 34 medidas realizadas simultáneamente con los dos detectores diferentes, indicándose los valores de los estadísticos básicos correspondientes a ambas determinaciones.

Tabla 3.91.- Comparación entre los valores totales (incluida radiación cósmica) de la tasa de dosis absorbida gamma ambiental, obtenidos con el detector Geiger-Müller MC-71 y con la cámara de ionización de alta presión RSS-112, en los 34 lugares de medida.

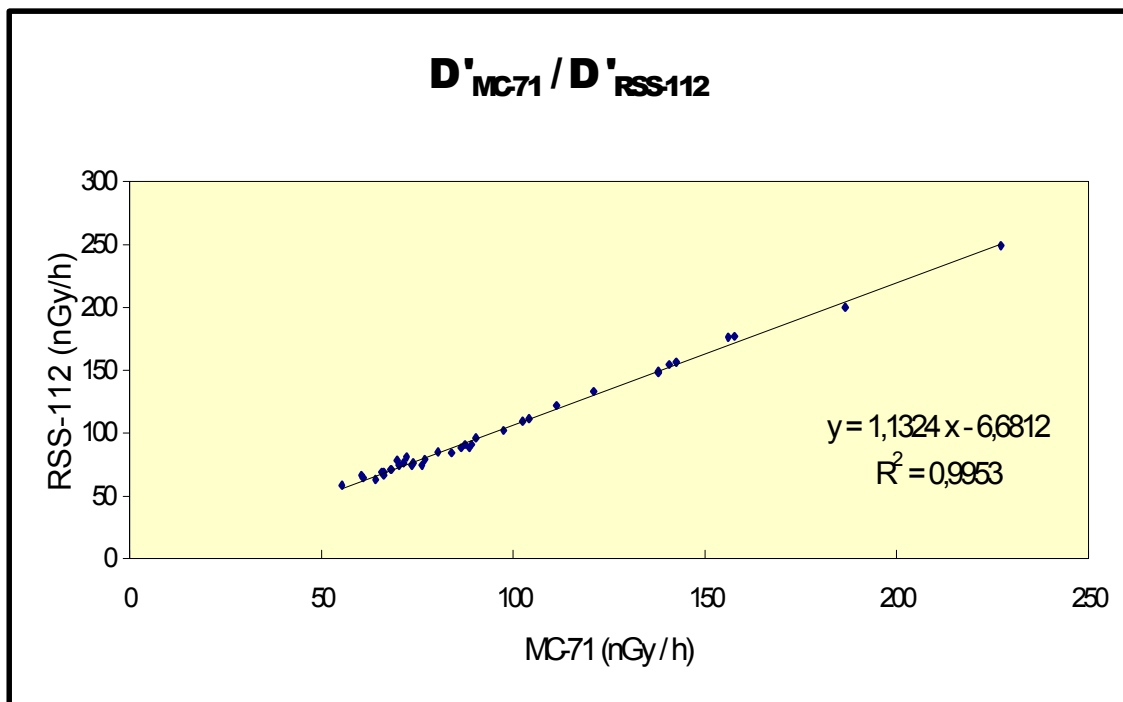
EQUIPO	MEDIDA (nGy h ⁻¹)			r ²	p
	Media aritmética	Media geométrica	Desviación estándar		
<i>MC-71</i>	98,1	91,5	40,7	0,9960	< 0,001
<i>RSS-112</i>	104,6	96,9	46,0		

Hay que remarcar que la situación encontrada pudiera ser específica de los equipos concretos con que se ha abordado este estudio, por lo que, siempre que sea posible, convendrá realizar algún control comparativo, utilizando la Cámara de Ionización de Alta Presión (HPIC) RSS-112 como instrumento de referencia, especialmente en el caso de que las medidas tengan finalidad dosimétrica de la población.

También será conveniente el uso de la HPIC cuando sea preciso contar con una estación fija para la medida en continuo de los niveles de radiación ambiental en aire en una región determinada, dada la disponibilidad que posee de acumular datos a lo largo de extensos periodos de tiempo, así como de la transmisión a distancia, en forma digital, de dicha información.

En la **Figura III.39** siguiente se comparan gráficamente los valores de las determinaciones realizadas con los dos equipos diferentes, simultáneamente y en los mismos lugares de medida.

Figura III.39.- Relación entre las tasas de dosis en aire por radiación gamma ambiental, medidas con MC-71 y con RSS-112.



III.9.- TASA DE DOSIS EFECTIVA A LA POBLACIÓN EN LOS PUNTOS DE MEDIDA

Una vez construido el mapa de los niveles de radiactividad natural gamma de las Islas Canarias Occidentales, en base a las medidas de la tasa de dosis absorbida en aire a 1 metro del suelo, se pudo estimar la correspondiente dosis efectiva a la población.

En la **Tablas 3.92, 3.94, 3.96 y 3.98** se presentan, respectivamente, los valores de la tasa de dosis efectiva en las islas de Tenerife, La Palma, La Gomera y El Hierro, calculados a partir de los valores netos de la tasa de dosis medioambiental que se han obtenido restando el fondo del equipo detector al valor resultante de cada una de las medidas. En estas Tablas se indican, para cada lugar geográfico, las tasas de dosis efectiva correspondiente a la radiación terrestre y a la radiación cósmica, así como el valor total de dosis efectiva a la población una vez sumadas ambas contribuciones.

De entre las diferentes propuestas encontradas para obtener la tasa de dosis efectiva a partir de los valores de la tasa de dosis absorbida en aire (por ejemplo, Clark y colaboradores^[62] plantean un valor de $0,86 \text{ Sv Gy}^{-1}$), se ha optado por utilizar el factor $0,7 \text{ Sv Gy}^{-1}$, tal como se propone en los diferentes informes del Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica (**Informe UNSCEAR-82**^[2] y posteriores) para exposiciones medioambientales a los rayos gamma de energías moderadas.

Para calcular la dosis efectiva anual debida a radiación gamma en el exterior (*outdoor*), se toma como factor de ocupación medio para la población de las islas Canarias el valor de 0,7 (30% de permanencia en el exterior de los edificios), teniendo en cuenta la benignidad del clima del archipiélago. Como el número de horas totales por año son 8.760, la conversión de tasa de dosis absorbida en aire (nGy h^{-1}) a dosis efectiva anual *outdoor* a la población se realiza, según el **Informe UNSCEAR-93**^[3], aplicando:

$$(\mu\text{Sv año}^{-1}) = (\text{nGy h}^{-1}) \times 10^{-3} \times 0,7 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 0,3 \times 8.760 \text{ h año}^{-1}$$

En la **Tabla 3.92** se muestran los valores medidos de tasa de dosis absorbida en aire (valores netos) y los calculados de tasa de dosis efectiva de origen terrestre y cósmico, así como el valor total, para cada uno de los lugares de la isla de Tenerife que se seleccionaron.

Tabla 3.92.- Tasa de dosis efectiva *outdoor*, debida a radiación gamma ambiental, en cada uno de los lugares de medida de la isla de Tenerife.

Cua- Dro (¹)	LUGAR	RADIAC. CÓSMICA		RAD. TERRESTRE		TASA DOSIS EFECTIVA TOTAL (nSv h ⁻¹)	TASA DOSIS EFECTIVA ANUAL <i>OUTDOOR</i> (mSv año ⁻¹)
		Tasa dosis absorbida (nGyh ⁻¹)	Tasa dosis efectiva (nSv h ⁻¹)	Tasa dosis absorbida (nGyh ⁻¹)	Tasa dosis efectiva (nSv h ⁻¹)		
1	Chamorga	38	26.6	89.2	62.4	89.0	233.9
2	Iguste de San Andrés	33	23.1	18.7	13.1	36.2	95.0
3	Almáciga	33	23.1	51.5	36.0	59.1	155.4
4	El Bailadero	36	25.2	25.8	18.0	43.2	113.6
5	San Andrés (S/C de Tfe.)	34	23.8	27.3	19.1	42.9	112.8
6	Roque de Taborno (Anaga)	37	25.9	40.7	28.5	54.4	142.9
7	Afur	38	26.6	23.9	16.7	43.3	113.9
8	Barrio Alegría (S/C de Tfe.)	33	23.1	25.6	17.9	41.0	107.7
9	Santa Cruz de Tenerife	33	23.1	49.9	34.9	58.0	152.5
10	Roque Dos Hermanos	32	22.4	33.2	23.2	45.6	120.0
11	Moquinal-El Batán	41	28.7	37.8	26.4	55.1	144.9
12	El Bronco (La Laguna)	39	27.3	18.4	12.9	40.2	105.6
13	Taco	36	25.2	43.1	30.2	55.4	145.5
14	Santa María del Mar	34	23.8	46.4	32.5	56.3	147.8
15	Tejina	34	23.8	31.2	21.8	45.6	120.0
16	El Portezuelo	38	26.6	56.3	39.4	66.0	173.5
17	La Esperanza	41	28.7	79.9	56.0	84.7	222.5
18	Barranco Hondo	35	24.5	29.5	20.7	45.2	118.7
19	Candelaria	33	23.1	54.1	37.9	61.0	160.2
20	Montaña Grande (Güimar)	33	23.1	27.2	19.0	42.1	110.7
21	Valle Guerra	33	23.1	63.4	44.4	67.5	177.4
22	Tacoronte-Los Naranjeros	37	25.9	41.1	28.8	54.7	143.7
23	Jara (Agua García)	44	30.8	43.3	30.3	61.1	160.5
24	Las Lagunetas	44	30.8	27.8	19.4	50.2	132.0
25	Cuevecitas de Candelaria	36	25.2	46.0	32.2	57.4	150.8
26	Güimar	34	23.8	49.7	34.8	58.6	154.0
27	La Medida (Güimar)	36	25.2	97.1	68.0	93.2	244.9
28	La Cardonera (Fasnia)	32	22.4	70.7	49.5	71.9	188.9
29	El Sauzal	35	24.5	40.8	28.6	53.1	139.5
30	La Matanza	38	26.6	29.9	20.9	47.5	124.9
31	Lomo Mesetas (Sta. Ursula)	50	35	20.6	14.4	49.4	129.9
32	Ayosa	59	41.3	52.5	36.8	78.1	205.1
33	Barranco del Agua (Güimar)	44	30.8	38.0	26.6	57.4	150.8
34	C. Arrastradero (Escobonal)	43	30.1	98.6	69.0	99.1	260.6
35	La Sombrera (Fasnia)	37	25.9	127.9	89.5	115.4	303.3
36	Arico El Viejo	33	23.1	116.6	81.6	104.7	275.1
37	Abades	33	23.1	108.4	75.9	99.0	260.1
38	La Quinta (Santa Úrsula)	34	23.8	47.9	33.5	57.3	150.6

39	Cuesta La Villa (La Orotava)	35	24.5	35.2	24.6	49.1	129.1
40	La Caldera (La Orotava)	45	31.5	27.6	19.3	50.8	133.6
41	Izaña	63	44.1	29.5	20.6	64.7	170.1
42	Barranco El Palmero (Izaña)	59	41.3	34.3	24.0	65.3	171.7
43	Morra Ramos- Bueno (Arico)	45	31.5	67.0	46.9	78.4	206.1
44	Los Gavilanes (Lomo Arico)	38	26.6	88.4	61.9	88.5	232.5
45	El Río	34	23.8	96.8	67.7	91.5	240.6
46	Parque Eólico de Granadilla	33	23.1	112.3	78.6	101.7	267.4
47	La Vera (Puerto de la Cruz)	34	23.8	49.6	34.8	58.6	153.9
48	Palo Blanco (Orotava)	43	30.1	80.3	56.2	86.3	226.8
49	Montaña Alto-A (El Portillo)	63	44.1	48.6	34.0	78.1	205.3
49B	Montaña Alto-B (El Portillo)	61	42.7	80.7	56.5	99.2	260.7
50	Cañada Las Pilas (Cañadas)	61	42.7	146.1	102.3	145.0	381.0
51	Fuente Madre Agua (Izaña)	55	38.5	119.6	83.7	122.2	321.1
52	Morro de las Arbejas (Izaña)	47	32.9	63.6	44.5	77.4	203.4
53	Los Blanquitos (Granadilla)	38	26.6	97.1	68.0	94.6	248.5
54	San Isidro	34	23.8	48.9	34.2	58.0	152.5
55	Aeropuerto del Sur	32	22.4	91.6	64.1	86.5	227.4
56	Mirador Grimona (Realejos)	33	23.1	38.1	26.7	49.8	130.8
57	Fuente del Bardo (Icod Alto)	42	29.4	92.6	64.8	94.2	247.6
58	El Cabezón (El Portillo)	61	42.7	120.0	84.0	126.7	333.0
59	Montaña Blanca (Teide)	70	49	155.4	108.8	157.8	414.6
60	Montaña Guajara (Cañadas)	65	45.5	126.5	88.5	134.0	352.2
61	Madre del Agua (Vilafior)	54	37.8	73.1	51.2	89.0	233.8
62	Cruz de Tea (Vilafior)	42	29.4	131.1	91.8	121.2	318.5
63	Las Zocas (San Miguel)	36	25.2	71.5	50.0	75.2	197.7
64	Los Abrigos-El Guincho	33	23.1	86.9	60.8	83.9	220.6
65	Sta Catalina (S.Juan Rambla)	33	23.1	144.2	100.9	124.0	325.9
66	La Guancha	40	28	97.0	67.9	95.9	252.0
67	Cruz de la Vieja (Teide)	51	35.7	158.7	111.1	146.8	385.8
68	Pico del Teide	117	81.9	79.0	55.3	137.2	360.6
69	Llano de Ucanca	61	42.7	99.2	69.4	112.1	294.6
70	Lomo Tabladillo (B. Tauce)	57	39.9	103.9	72.7	112.6	296.0
71	Los Quemados (Vilafior)	46	32.2	83.4	58.3	90.5	238.0
72	Valle de San Lorenzo	36	25.2	40.7	28.5	53.7	141.2
73	Cañada Verde (Las Galletas)	33	23.1	44.0	30.8	53.9	141.6
74	Las Galletas-Ten Bel	32	22.4	40.4	28.3	50.7	133.3
75	San Marcos-Riquer (Icod)	33	23.1	152.2	106.6	129.7	340.8
76	El Amparo (Icod)	37	25.9	59.1	41.4	67.3	176.8
77	Hoya Negra (B.Tauce/Teide)	52	36.4	162.7	113.9	150.3	395.0
78	Cruz de Tea (Boca Tauce)	61	42.7	69.7	48.8	91.5	240.4
79	Montaña Cedro (Ucanca)	60	42	109.8	76.8	118.8	312.3
80	Montaña Teresme (Adeje)	55	38.5	28.0	19.6	58.1	152.6
81	Barranco del Infierno (Adeje)	36	25.2	53.0	37.1	62.3	163.8
82	Chayofa (Los Cristianos)	34	23.8	55.9	39.1	62.9	165.3
83	Mesas de Guaza (Cristianos)	33	23.1	75.3	52.7	75.8	199.2
84	Rasca (Palm-Mar/Cristianos)	32	22.4	44.7	31.3	53.7	141.2
85	S. Juan Reparó (Garachico)	40	28	48.7	34.1	62.1	163.2
86	Vuelta Grande (Boca Tauce)	49	34.3	88.9	62.3	96.6	253.8
87	Altos de Chio	49	34.3	35.1	24.5	58.8	154.6

88	Chirche	42	29.4	79.1	55.4	84.8	222.8
89	Vera de Erque	38	26.6	77.1	54.0	80.6	211.8
90	Armeñime	34	23.8	47.7	33.4	57.2	150.3
91	La Caleta (Adeje)	33	23.1	59.1	41.4	64.5	169.5
92	Los Silos	32	22.4	78.6	55.0	77.4	203.4
93	Roque Moradas (Los Silos)	34	23.8	39.5	27.6	51.4	135.1
94	Santiago del Teide	44	30.8	39.4	27.6	58.4	153.4
95	Taimimo	39	27.3	59.2	41.4	68.7	180.7
96	Era del Llano (Alcalá)	35	24.5	76.3	53.4	77.9	204.7
97	Playa de San Juan	33	23.1	84.3	59.0	82.1	215.8
98	Marazul (Playa de San Juan)	33	23.1	85.8	60.1	83.2	218.6
99	Buenavista del Norte	33	23.1	70.1	49.1	72.2	189.6
100	Cumbre Molina (Buenavista)	33	23.1	39.7	27.8	50.9	133.7
101	Masca	40	28	21.8	15.3	43.3	113.8
102	Acantilado de los Gigantes	33	23.1	34.7	24.3	47.4	124.6
103	Punta de Teno	33	23.1	31.5	22.0	45.1	118.6
0	Alta Mar (2 Km PlayaMasca)	32	22.4	0.0	0.0	22.4	-

(¹) Estos cuadros del mapa de la isla de Tenerife se muestran en el **Anexo I**.

Los valores de tasa de dosis absorbida debida a la radiación cósmica en la isla de Tenerife se han trasladado desde la **Tabla 3.2**, mientras que los valores que figuran en la columna “*RADIAC. TERRESTRE Tasa de dosis absorbida (nGy h⁻¹)*” son los que aparecen en la última columna de la **Tabla 3.6** como “*Tasa dosis Neta MC-71 (nGy h⁻¹)*”.

Los valores medios, el rango y la desviación estándar de las anteriores magnitudes, para la isla de Tenerife, se resumen en la **Tabla 3.93**.

Tabla 3.93.- Medias, máximo, mínimo y desviación estándar de los valores de la tasa de dosis efectiva (componente cósmica, terrestre y valor total) y dosis efectiva anual outdoor, en la isla de Tenerife.

TENERIFE	RADIAC. CÓSMICA		RADIAC. TERRESTRE		TASA DOSIS EFECTIVA TOTAL (nSv h ⁻¹)	TASA DOSIS EFECTIVA ANUAL OUTDOOR (mSv año ⁻¹)
	Tasa dosis absorbida (nGyh ⁻¹)	Tasa dosis efectiva (nSv h ⁻¹)	Tasa dosis absorbida (nGyh ⁻¹)	Tasa dosis efectiva (nSv h ⁻¹)		
MEDIA ARITMÉTICA	41.5	29.0	66.7	46.7	75.8	199.1
MEDIA GEOMÉTRICA	40.2	28.1	57.9	40.6	71.0	186.7
DESVIAC. ESTÁNDAR	12.3	8.6	35.7	25.0	28.5	74.9
MÁXIMO	117.0	81.9	162.7	113.9	157.8	414.6
MÍNIMO	32.0	22.4	18.4	12.9	36.2	95.0

Cálculos similares a los llevados a cabo en Tenerife, se realizaron para las demás islas de la provincia occidental del archipiélago canario. Los datos de tasa de dosis absorbida en aire correspondientes a la isla de La Palma, necesarios para obtener la tasa de dosis efectiva en cada uno de los lugares de medida, se han trasladado de la **Tabla 3.3** (radiación cósmica) y desde la **Tabla 3.11** (columna "*Tasa dosis neta (nGy h⁻¹)*").

Tabla 3.94.- Tasa de dosis efectiva y dosis efectiva anual outdoor, debida a radiación gamma ambiental, en cada uno de los lugares de medida de la isla de La Palma.

Cuadro (²)	LUGAR	RADIAC. CÓSMICA		RAD. TERRESTRE		TASA DOSIS EFECTIVA TOTAL (nSv h ⁻¹)	TASA DOSIS EFECTIVA ANUAL OUTDOOR (mSv año ⁻¹)
		Tasa dosis absorbida (nGyh ⁻¹)	Tasa dosis efectiva (nSv h ⁻¹)	Tasa dosis absorbida (nGyh ⁻¹)	Tasa dosis efectiva (nSv h ⁻¹)		
1	Las Cabezadas Barlovento	37	25.9	52	36.4	62.3	163.7
2	El Corcho (Puntallana)	41	28.7	44	30.8	59.5	156.4
3	Miranda	35	24.5	44	30.8	55.3	145.3
4	S. Juan De Belmaco	36	25.2	60	42	67.2	176.6
5	Franceses	42	29.4	27	18.9	48.3	126.9
6	Borde Caldera Taburiente	68	47.6	11	7.7	55.3	145.3
7	Llanos Del Paso	41	28.7	56	39.2	67.9	178.4
8	Los Campanarios	51	35.7	73	51.1	86.8	228.1
9	Volcan S. Antonio	39	27.3	68	47.6	74.9	196.8
10	Llano Negro (Garafia)	41	28.7	27	18.9	47.6	125.1
11	Llanos De Lance (Tijarafe)	45	31.5	41	28.7	60.2	158.2
12	Las Angustias	35	24.5	33	23.1	47.6	125.1
13	Borde Crater Teneguia	36	25.2	52	36.4	61.6	161.9

(²) Estos cuadros del mapa de la isla de La Palma se muestran en el **Anexo II**.

Se han calculado los valores medios (media aritmética y geométrica), el rango y la desviación estándar de cada una de las anteriores magnitudes, para la isla de La Palma, los cuales se presentan en la **Tabla 3.95**.

Tabla 3.95.- Medias, máximo, mínimo y desviación estándar de los valores de la tasa de dosis efectiva (componente cósmica, terrestre y valor total) y dosis efectiva anual *outdoor*, en la isla de La Palma.

LA PALMA	RADIAC. CÓSMICA		RADIAC. TERRESTRE		TASA DOSIS EFECTIVA TOTAL (nSv h ⁻¹)	TASA DOSIS EFECTIVA ANUAL <i>OUTDOOR</i> (mSv año ⁻¹)
	Tasa dosis absorbida (nGyh ⁻¹)	Tasa dosis efectiva (nSv h ⁻¹)	Tasa dosis absorbida (nGyh ⁻¹)	Tasa dosis efectiva (nSv h ⁻¹)		
MEDIA ARITMÉTICA	42.1	29.5	45.2	31.7	61.1	160.6
MEDIA GEOMÉTRICA	41.4	28.9	41.1	28.8	60.2	158.2
DESVIAC. ESTÁNDAR	9.0	6.3	17.6	12.3	11.3	29.7
MÁXIMO	68.0	47.6	73.0	51.1	86.8	228.1
MÍNIMO	35.0	24.5	11.0	7.7	47.6	125.1

En la **Tabla 3.96** se muestran los valores obtenidos para las tasas de dosis efectiva, en sus componentes cósmica y terrestre, en cada uno de los lugares de medida de la isla de La Gomera. También se presenta el resultado del cálculo de la tasa de dosis efectiva por año a la población en el exterior, debido a la radiación gamma medioambiental en esta isla.

Los valores de partida para construir la tabla (tasa de dosis absorbida en aire en nGy h⁻¹), se expusieron en las **Tabla 3.4** (componente cósmica) y **Tabla 3.15** (componente neta de origen terrestre, medida con la cámara RSS-112).

Tabla 3.96.- Tasa de dosis efectiva (en nSv h-1) y tasa de dosis efectiva anual outdoor, debida a radiación gamma ambiental, en cada uno de los lugares de medida de la isla de La Gomera.

Cua-Dro (3)	LUGAR	RADIAC. CÓSMICA		RAD. TERRESTRE		TASA DOSIS EFECTIVA TOTAL (nSv h ⁻¹)	TASA DOSIS EFECTIVA ANUAL <i>OUTDOOR</i> (mSv año ⁻¹)
		Tasa dosis absorbida (nGyh ⁻¹)	Tasa dosis efectiva (nSv h ⁻¹)	Tasa dosis absorbida (nGyh ⁻¹)	Tasa dosis efectiva (nSv h ⁻¹)		
1	Casas Moralito (Hermigua)	34	23.8	24	16.8	40.6	106.7
2	Las Casetas (S. Sebastian)	37	25.9	44	30.8	56.7	149.0
3	Revolcaderos (S. Sebast.)	36	25.2	33	23.1	48.3	126.9
4	Tamargada (Vallermoso)	36	25.2	118	82.6	107.8	283.3
5	Monte Del Cedro	45	31.5	26	18.2	49.7	130.6
6	Alajero	41	28.7	55	38.5	67.2	176.6
7	Tazo	35	24.5	31	21.7	46.2	121.4
8	Arure	42	29.4	34	23.8	53.2	139.8
9	La Mejora (La Dama)	34	23.8	42	29.4	53.2	139.8
10	Laguna Grande	47	32.9	32	22.4	55.3	145.3

(3) Estos cuadros del mapa de la isla de La Gomera se muestran en el **Anexo III**.

En la **Tabla 3.97** se presentan, para la isla de La Gomera, los valores medios, el rango y la desviación estándar de las medidas anteriores, tanto para la componente cósmica como terrestre.

Tabla 3.97.- Media aritmética, geométrica, desviación estándar, máximo y mínimo de los valores de la tasa de dosis efectiva (componente cósmica, terrestre y valor total) y dosis efectiva anual *outdoor*, en la isla de La Gomera.

LA GOMERA	RADIAC. CÓSMICA		RADIAC. TERRESTRE		TASA DOSIS EFECTIVA TOTAL (nSv h ⁻¹)	TASA DOSIS EFECTIVA ANUAL <i>OUTDOOR</i> (mSv año ⁻¹)
	Tasa dosis absorbida (nGyh ⁻¹)	Tasa dosis efectiva (nSv h ⁻¹)	Tasa dosis absorbida (nGyh ⁻¹)	Tasa dosis efectiva (nSv h ⁻¹)		
MEDIA ARITMÉTICA	38.7	27.1	43.9	30.7	57.8	152.0
MEDIA GEOMÉTRICA	38.5	26.9	39.1	27.4	55.7	146.5
DESVIAC. ESTÁNDAR	4.7	3.3	27.6	19.3	18.9	49.7
MÁXIMO	47.0	32.9	118.0	82.6	107.8	283.3
MÍNIMO	34.0	23.8	24.0	16.8	40.6	106.7

De igual manera, se muestran en la **Tabla 3.98** los valores obtenidos, en los puntos de medida de la isla de El Hierro, de la tasa de dosis efectiva en sus componentes cósmica y terrestre, así como el resultado del cálculo de la tasa de dosis efectiva *outdoor* anual, debido a la radiación gamma medioambiental en esta isla.

Tabla 3.98.- Componentes de la tasa de dosis efectiva y valor anual de dosis efectiva *outdoor*, en cada uno de los lugares de medida de la isla de El Hierro, debida a radiación gamma ambiental.

Cuadro (4)	LUGAR	RADIAC. CÓSMICA		RAD. TERRESTRE		TASA DOSIS EFECTIVA TOTAL (nSv h ⁻¹)	TASA DOSIS EFECTIVA ANUAL <i>OUTDOOR</i> (mSv año ⁻¹)
		Tasa dosis absorbida (nGyh ⁻¹)	Tasa dosis efectiva (nSv h ⁻¹)	Tasa dosis absorbida (nGyh ⁻¹)	Tasa dosis efectiva (nSv h ⁻¹)		
1	Valverde	37	25.9	37	25.9	51.8	136.1
2	Montañetas (Guarazoca)	41	28.7	28	19.6	48.3	126.9
3	Gorona De Los Difuntos	44	30.8	30	21	51.8	136.1
4	Gorona Lajjal (Restinga)	35	24.5	39	27.3	51.8	136.1
5	Mtña. La Virgen (Sabinosa)	40	28	26	18.2	46.2	121.4
6	Chorro Jable (Frontera)	50	35	41	28.7	63.7	167.4

(4) Estos cuadros del mapa de la isla de El Hierro se muestran en el **Anexo IV**.

La tasa de dosis absorbida en aire (en nGy h⁻¹), a partir de la que se obtuvieron los valores de la dosis efectiva de la tabla anterior, provienen, respectivamente, de las **Tabla 3.5** y **Tabla 3.20** (columna "*Tasa dosis neta con RSS-112 (nGy h⁻¹)*") mostradas anteriormente en este mismo Capítulo de la Memoria.

Las medias aritmética y geométrica, desviación estándar, máximo y mínimo para cada conjunto de los valores anteriores, para la isla de El Hierro, aparecen en la **Tabla 3.99** siguiente.

Tabla 3.99.- Media aritmética, geométrica, desviación estándar, máximo y mínimo de los valores de la tasa de dosis efectiva (componente cósmica, terrestre y valor total) y dosis efectiva anual *outdoor*, en la isla de El Hierro.

EL HIERRO	RADIAC. CÓSMICA		RADIAC. TERRESTRE		TASA DOSIS EFECTIVA TOTAL (nSv h⁻¹)	TASA DOSIS EFECTIVA ANUAL <i>OUTDOOR</i> (mSv año⁻¹)
	Tasa dosis absorbida (nGyh⁻¹)	Tasa dosis efectiva (nSv h⁻¹)	Tasa dosis absorbida (nGyh⁻¹)	Tasa dosis efectiva (nSv h⁻¹)		
MEDIA ARITMÉTICA	41.2	28.8	33.5	23.5	52.3	137.4
MEDIA GEOMÉTRICA	40.9	28.6	33.0	23.1	52.0	136.6
DESVIAC. ESTÁNDAR	5.3	3.7	6.3	4.4	6.1	15.9
MÁXIMO	50.0	35.0	41.0	28.7	63.7	167.4
MÍNIMO	35.0	24.5	26.0	18.2	46.2	121.4

Por los resultados obtenidos, se puede asegurar que en El Hierro es, de todas las islas estudiadas, aquella donde se producen dosis efectivas a la población más bajas, con un valor medio aritmético de 52,3 nSv h⁻¹ y un valor máximo de 63,7 nSv h⁻¹ ("*Chorro del Jable: Frontera*"). En la isla de La Gomera también se han obtenido valores comparativamente bajos de tasa de dosis efectiva total, con medias muy similares a las medidas en El Hierro (aritmética: 57,8 nSv h⁻¹ y geométrica: 55,7 nSv h⁻¹), aunque con un punto singular en "*Tamargada (Vallermoso)*" donde se alcanzó el valor máximo de 107,8 nSv h⁻¹.

Los dos factores que determinan que en estas islas aparezcan valores de dosis efectivas a la población inferiores a las encontradas en las otras dos de la provincia occidental del archipiélago canario, son, por un lado, las menores altitudes que presentan en relación a La Palma y a Tenerife, con lo que los valores de radiación cósmica son inferiores (en La Gomera el valor promedio es 27,1 nSv h⁻¹), y por otro, la relativa mayor antigüedad geológica de La Gomera y El Hierro respecto a las otras dos islas más grandes, en las que se datan episodios volcánicos mucho más recientes,

lo que determina, tal como se concluyó en el *Apartado III.5* de este mismo Capítulo, que la contribución de la radiación terrestre también sea menor ($23,5 \text{ nSv h}^{-1}$ de media en El Hierro para la componente terrestre de la dosis efectiva, frente a un valor promedio de $46,7 \text{ nSv h}^{-1}$ en la isla de Tenerife).

En La Palma se calculó un valor medio aritmético de tasa de dosis efectiva de $61,1 \text{ nSv h}^{-1}$, con unas contribuciones de radiación cósmica ($29,5 \text{ nSv h}^{-1}$) y terrestre ($31,7 \text{ nSv h}^{-1}$) superiores ambas a las correspondientes a las otras dos islas de menor extensión. No obstante el valor máximo de tasa de dosis efectiva a la población, que se obtuvo en el Cuadro 8: "*Los Campanarios*", resultó ser bastante inferior ($86,8 \text{ nSv h}^{-1}$) al que se obtuvo, como ya se ha indicado, en "*Tamargada*" en la isla de La Gomera ($107,8 \text{ nSv h}^{-1}$).

Es en Tenerife donde se estimaron los valores de tasa de dosis efectiva total a la población más elevados. El promedio de los calculados en los 103 lugares de medida en esta isla, $75,8 \text{ nSv h}^{-1}$, es un 24%, un 31% y un 45% superior, respectivamente, que los obtenidos en La Palma ($61,1 \text{ nSv h}^{-1}$), La Gomera ($57,8 \text{ nSv h}^{-1}$) y El Hierro ($52,3 \text{ nSv h}^{-1}$).

El valor máximo alcanzado en todas las islas fue $157,8 \text{ nSv h}^{-1}$, y se obtuvo en "*Montaña Blanca*" (cráter volcánico en la falda del Teide, en Tenerife) donde la contribución de la componente cósmica, 49 nSv h^{-1} , fue la segunda en importancia después de la del propio "*Pico del Teide*" ($81,9 \text{ nSv h}^{-1}$), máxima altitud de toda la geografía del territorio español.

El punto de todas las islas Canarias Occidentales donde se consiguió el valor de tasa de dosis efectiva a la población más bajo, $36,2 \text{ nSv h}^{-1}$, se ubicó también en la isla de Tenerife, en la localidad de "*Iguete de San Andrés*", que combina su característica de ser una población situada a nivel del mar, y por tanto con los menores niveles de radiación cósmica, con estar situada en la Cordillera de Anaga, zona que corresponde a una de las regiones de mayor antigüedad geológica de todas las islas y, por consiguiente, con valores de tasa de dosis absorbida en aire, debido a la componente terrestre, de más bajo valor.

Esta diversidad en los valores obtenidos de tasa de dosis efectiva, determina que la desviación estándar calculada para la isla de Tenerife sea la mayor de todas las islas, dándose puntos de baja y moderada tasa de dosis y otros donde se midieron los valores más elevados.

De igual manera, en lo que respecta a la tasa de dosis efectiva anual *outdoor* (supuesta una permanencia de un 30% del tiempo en el exterior de las edificaciones), se hallaron valores promedios en orden creciente en las islas de El Hierro ($137,4 \mu\text{Sv año}^{-1}$), La Gomera ($152 \mu\text{Sv año}^{-1}$), La Palma ($160,6 \mu\text{Sv año}^{-1}$) y Tenerife ($199,1 \mu\text{Sv año}^{-1}$).

Los máximos obtenidos en cada una de las islas también siguen la misma tendencia, estando el mayor valor estimado en Tenerife ($414,6 \mu\text{Sv año}^{-1}$) un 148% por encima del máximo obtenido en la isla de El Hierro ($167,4 \mu\text{Sv año}^{-1}$). Asimismo se puede resaltar que, dentro de la isla de Tenerife, la dosis efectiva anual que recibiría una persona en "*Montaña Blanca*" ($414,6 \mu\text{Sv año}^{-1}$) es más de 4 veces superior que la de otra persona, situada en el exterior de su vivienda durante el mismo periodo de tiempo, en "*Igüeste de San Andrés*" ($95 \mu\text{Sv año}^{-1}$).

Si comparamos estos valores con los dados por diferentes autores para otros lugares del planeta, podemos concluir que los niveles de tasa de dosis efectiva a la población debidos a fuentes de radiación gamma, tanto de origen terrestre como cósmico, se encuentran en las islas Canarias Occidentales dentro de valores aceptables.

Así, por ejemplo, en la isla griega de Milos (situada en el mar Egeo), de origen volcánico como las islas Canarias, se estimó¹⁸⁷¹ que la contribución terrestre media a la tasa de dosis fue de 58 nSv h^{-1} , mientras que para toda Grecia¹⁸⁸¹, se indica un valor de $47,9 \text{ nSv h}^{-1}$ (los valores promedios van desde $23,5 \text{ nSv h}^{-1}$ en el Hierro a $46,7 \text{ nSv h}^{-1}$ para Tenerife).

Las medias para toda España de $49 \mu\text{Sv año}^{-1}$ (calculada) ó de $43,3 \mu\text{Sv año}^{-1}$ (medida en aire) que proponen Quindós y colaboradores¹⁶⁶¹, como contribución de la radiación terrestre a la tasa de dosis equivalente, se estimó considerando que la población consume únicamente un 15% de su tiempo en el exterior de las viviendas. Trasladando estos valores a lo estimado para Canarias (30% de permanencia *outdoor*), obtendríamos una tasa de dosis efectiva anual *outdoor* de origen terrestre de $98 \mu\text{Sv año}^{-1}$ ó de $86,6 \mu\text{Sv año}^{-1}$ (calculada o medida, respectivamente), que resultan equiparables a los valores promedio obtenidos para Tenerife ($122,7 \mu\text{Sv año}^{-1}$), La Palma ($83,3 \mu\text{Sv año}^{-1}$), La Gomera ($80,7 \mu\text{Sv año}^{-1}$) o El Hierro ($61,8 \mu\text{Sv año}^{-1}$).

IV. CONCLUSIONES

IV.- CONCLUSIONES

IV.1.- Interés de las determinaciones de radiactividad gamma ambiental (aire y suelos). Aplicación a las Islas Canarias Occidentales.

El interés básico de las medidas de radiación ambiental en una zona determinada, ha sido el poder disponer de un valor de referencia que permita conocer su posible alteración por causas naturales o artificiales y conocer las dosis a la población en dichos lugares. Estas investigaciones obligan a un trabajo tedioso sobre el terreno y a análisis precisos en laboratorios especializados, habida cuenta la variabilidad de los resultados según la situación geográfica y las características edafológicas y geológicas de la zona en que se realicen las determinaciones.

Hasta el momento no se habían hecho en las Islas Canarias Occidentales estas medidas de radiación ambiental, por lo que puede establecerse la originalidad de esta Tesis.

IV.2.- Calidad de las determinaciones realizadas. Comparación con las medidas hechas en otros laboratorios.

Dadas las características de las determinaciones llevadas a cabo en esta investigación, se ha prestado especial atención a su fiabilidad. Se han contrastado las características de los equipos de medida y se han realizado intercomparaciones con otros laboratorios nacionales e internacionales de radiactividad ambiental. Así, se ha podido concluir que:

a) Las medidas de radiactividad gamma ambiental realizadas utilizando los detectores Geiger- Müller MC-71 y Cámara de Ionización RSS-112, no presentaron diferencias significativas ($p < 0,001$), por lo que ambos equipos son intercambiables para los estudios de campo.

b) Se ha encontrado que la Cámara RSS-112 presenta una gran reproducibilidad (para 57.104 medidas, con un valor medio de $96,1 \text{ nGy h}^{-1}$, el error estándar poblacional fue de $0,039 \text{ nGy h}^{-1}$ y la desviación estándar de $3,6 \text{ nGy h}^{-1}$) independientemente de las condiciones meteorológicas o cambios horarios en el mismo lugar de muestreo.

c) Las determinaciones de las concentraciones de radionúclidos en las muestras de suelos utilizando el detector de GeHP del Laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental de la Universidad de La Laguna, resultaron ser totalmente comparables a las realizadas por el Laboratorio Voor Kernfysika de la Universidad de Gante.

IV.3.- Distribución de los valores de radiación gamma ambiental en aire en las Islas Canarias Occidentales.

Las determinaciones de radiación gamma ambiental realizadas en **133 lugares** geográficos distribuidos uniformemente en la superficie de las Islas Canarias Occidentales, ha permitido establecer los siguientes valores medios:

- Isla de Tenerife: 66,7 nGy h⁻¹.
- Isla de La Palma: 45,2 nGy h⁻¹.
- Isla de Gomera: 43,9 nGy h⁻¹.
- Isla de El Hierro: 33,5 nGy h⁻¹.

Estos resultados han permitido llegar a la conclusión de que es en la isla de Tenerife donde existen los niveles más altos de radiación gamma ambiental en aire y superiores al valor medio a nivel mundial (57 nGy h⁻¹), siendo inferiores los correspondientes a las otras tres islas. Su distribución geográfica indica que los valores más elevados se encuentran en las zonas central y sur de Tenerife y de La Palma.

En la isla de Tenerife se ha constatado que la radiación gamma ambiental en aire medida sobre los suelos de composición química básica, formados por basaltos, traquibasaltos y piroclastos, es significativamente inferior ($p < 0,001$) que la medida sobre suelos de carácter ácido constituidos por traquitas, fonolitas y rocas sálicas.

IV.4.- Concentraciones de radionúclidos en los suelos de las Islas Canarias Occidentales.

Las medidas realizadas en muestras de suelos de 25 x 25 x 5 cm³, obtenidas en **133 puntos** geográficos distribuidos uniformemente en la superficie de las Islas Canarias Occidentales, han permitido establecer los siguientes valores medios de las concentraciones (en Bq kg⁻¹) de radionúclidos en sus suelos:

- Isla de Tenerife: C_{Ra} = 43; C_{Th} = 55; C_K = 658.
- Isla de La Palma: C_{Ra} = 33; C_{Th} = 36; C_K = 228.
- Isla de Gomera: C_{Ra} = 20; C_{Th} = 31; C_K = 317.
- Isla de El Hierro: C_{Ra} = 21; C_{Th} = 24; C_K = 262.

La distribución de estos valores en cada una de las islas, ha permitido llegar a la conclusión de que en Tenerife las medias de las concentraciones de ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K medidas, son mayores que los valores dados como media mundial en los informes UNSCEAR (40, 35 y 370 Bq kg⁻¹, respectivamente). Por el contrario, en las otras tres islas son similares o inferiores a estos valores medios de referencia.

IV.5.- Relación entre concentración de radionúclidos en suelos y valores de radiación gamma en aire.

Con los datos obtenidos en esta Tesis, se ha podido comprobar la concordancia existente entre los resultados medidos de tasa de dosis absorbida en aire (en nGy h⁻¹) y los valores calculados a partir de las actividades específicas de radionúclidos en suelos (en Bq kg⁻¹), cuando se usan las cuatro expresiones matemáticas siguientes:

$$\begin{aligned}\bar{I} \text{ (nGy h}^{-1}\text{)} &= 0,043 [^{40}\text{K}] + 0,427 [^{238}\text{U}] + 0,662 [^{232}\text{Th}] \\ \bar{I} \text{ (nGy h}^{-1}\text{)} &= 0,041 [^{40}\text{K}] + 0,461 [^{226}\text{Ra}] + 0,623 [^{232}\text{Th}] \\ \bar{I} \text{ (nGy h}^{-1}\text{)} &= 0,042 [^{40}\text{K}] + 0,430 [^{238}\text{U}] + 0,666 [^{232}\text{Th}] \\ \bar{I} \text{ (nGy h}^{-1}\text{)} &= 0,043 [^{40}\text{K}] + 0,421 [^{226}\text{Ra}] + 0,587 [^{232}\text{Th}]\end{aligned}$$

Se puede así predecir, con un buen grado de aproximación ($p < 0,001$), los valores de la tasa de dosis debida a la radiación gamma en aire utilizando cualquiera de las cuatro fórmulas empíricas indicadas.

IV.6.- Influencia de diversos factores en los resultados de las medidas de concentraciones de radionúclidos en suelos de las Islas Canarias Occidentales.

Se ha podido concluir que:

a) No ha sido posible establecer ningún tipo de dependencia entre las concentraciones de radionúclidos medidas en suelos y las variaciones de densidad de las muestras, en el rango de valores comprendido entre 880 y 1.330 kg m⁻³ en el que se encuentra la densidad de la totalidad de las 194 muestras de suelos recogidas en esta investigación.

b) No se ha podido detectar que en aquellos lugares en que se midieron concentraciones de hasta 100 Bq kg⁻¹ de ¹³⁷Cs (valores medios, en Bq kg⁻¹, en: Tenerife: 15; La Palma: 16; La Gomera: 20; El Hierro: 9), se produjera una migración significativa de este radionúclido hacia capas de suelos situadas hasta 60 cm de profundidad desde la superficie. Las medidas realizadas permiten considerar que la aportación de este elemento artificial a los suelos de Canarias ha tenido lugar, probablemente, por “*fall-out*” ocurrido antes de 1.990.

IV.7.- Dosis a la población de las Islas Canarias Occidentales debidas a la radiación natural.

Las medidas realizadas han permitido determinar que los habitantes de las Islas Canarias Occidentales están expuestos a una radiación medioambiental que les ocasiona una tasa de dosis efectiva media total (incluida radiación cósmica), en cada isla, de:

- Isla de Tenerife: 76 nSv h⁻¹.
- Isla de La Palma: 61 nSv h⁻¹.
- Isla de Gomera: 58 nSv h⁻¹.
- Isla de El Hierro: 52 nSv h⁻¹.

El valor máximo fue de 158 nSv h⁻¹ en el lugar conocido como Montaña Blanca en las faldas del Teide y el mínimo de 36 nSv h⁻¹ en Igueste de San Andrés, ambos en la isla de Tenerife.

Por tanto, las tasas de dosis efectivas anuales “*outdoor*”, debidas a radiación gamma ambiental, supuesta una permanencia del 30% en el exterior de los edificios, son:

- Isla de Tenerife: 199 μSv año⁻¹.
- Isla de La Palma: 161 μSv año⁻¹.
- Isla de Gomera: 152 μSv año⁻¹.
- Isla de El Hierro: 137 μSv año⁻¹.

V. BIBLIOGRAFÍA

1. **United Nations. UNSCEAR-88.** *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation.* United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 1988 Report to the General Assembly, with annexes. New York: UNSCEAR Publications (1988).
2. **Naciones Unidas. UNSCEAR-82.** *La radiación ionizante: Fuentes y efectos biológicos.* Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas. Informe a la Asamblea General y anexos, 1982. New York: UNSCEAR Publications (1982).
3. **United Nations. UNSCEAR-93.** *Sources and Effects of Ionizing Radiation.* United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. New York: UNSCEAR Publications (1993).
4. **Cogné, F.** *L'énergie nucléaire dans notre environnement radioactif.* RGN; N° 2; pp. 97-103 (1993).
5. **Steinhäuser, F.** *The Natural Radiation Environment: Future Perspective.* Radiation Protection Dosimetry, Vol. 45; N° 1/4; pp. 19-23 (1992).
6. **Cigna, A.A.** *La radioattività naturale e artificiale.* ENEA. Comitato Nazionale per la ricerca e per lo sviluppo dell'Energia Nucleare e delle Energie Alternative. RT/PAS/86/24. (1986). [Estratto de: Atti del Convegno sulla Radioattività nell'Ambiente, Piacenza 27-28 giugno 1985, edizione Enea 1985].
7. **Cigna, A.A.** *Radiation in the global environment.* ENEA. Comitato Nazionale per la ricerca e per lo sviluppo dell'Energia Nucleare e delle Energie Alternative. RT/PAS/87/22. (1987). [Estratto de: Radiation Research (Fielden E.M. et al Eds.), Proc. 8th Int.Congr.of Radiation Research, Edinburgh, July 1987; Taylor & Francis, vol.2: 614/619].
8. **International Commission on Radiological Protection.** *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.* ICRP Publication 26. Annals of the ICRP. Pergamon Press, Oxford (1977).
9. **United Nations. UNSCEAR-77.** *Sources and Effets of Ionizing Radiation.* United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 1977 report to the General Assembly, with annexes. (United Nations publication). New York (1977).
10. **Consejo de Seguridad Nuclear.** *Radiación. Dosis, Efectos, Riesgos.* Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. CSN, Madrid (1989).

11. **Grapengiesser, S. and Leitz, W.** *Optimization of radiation protection in diagnostic radiology.* pp. 351-364 in: Radiation Protection Infrastructure. IAEA-SM-309/21. IAEA, Vienna (1990).
12. **World Health Organization.** *World Health Statistics Annual.* WHO, Geneva (1980).
13. **Huda, W., Sandison, G.A. and Lee, T.Y.** *Patient doses from computed tomography in Manitoba from 1977 to 1987.* Br. J. Radiol., Vol. 62; pp. 138-144 (1989), with corrections in Br.J.Radiol., Vol. 65; pp. 91 (1992).
14. **Benson, J.S.** *Patient and Physician radiation exposure during fluoroscopy.* Radiology, Vol. 186; pp. 286 (1992).
15. **National Council on Radiation Protection and Measurement.** *Nuclear Medicine Factor influencing the choice and Use of Radionuclides in Diagnosis and Therapy.* NCRP Report N° 70. Bethesda, Maryland (1992).
16. **Delgado Rodríguez, J.M. and Téllez de Cepeda, M.** *Criterios de calidad en Medicina Nuclear para garantizar la protección radiológica al paciente.* Informe solicitado por el Ministerio de Sanidad y Consumo a la Sociedad Española de Física Médica. SEFM, Madrid (1994).
17. **International Atomic Energy Agency.** *Nuclear Power Reactors in the World.* IAEA, Vienna (1988).
18. **Curtis, S.B., Atwell, W. Beaver, R. et al.** *Radiation environments and absorbed dose estimations on manned space missions.* Adv. Space Res., Vol. 6; pp. 269-274 (1986).
19. **Fry, R.J.M. and Natchwey, D.S.** *Radiation protection guidelines for space missions.* Health Phys., Vol. 55; pp. 159-164 (1988).
20. **O'Brien, K., Friedberg, W., Duke, F.E. et al.** *The exposure of aircraft crews to radiations of extraterrestrial origin.* Radiat. Prot. Dosim., Vol. 45; pp. 145-162 (1992).
21. **Reitz, G.** *Radiation Environment in the Stratosphere.* Radiation Protection Dosimetry., Vol. 48; N° 1; pp. 5-20 (1993).
22. **Paretzke, H.G. and Heinrich, W.** *Radiation Exposure and Radiation Risk in Civil Aircraft.* Radiat. Prot. Dosim., Vol. 48; N° 1; pp. 33-40 (1993).
23. **O'Brien, K., Friedberg, W., Duke, F.E., Snyder, L., Darden, E.B. and Sauer, H.H.** *The Exposure of Aircraft Crews to Radiations of Extraterrestrial Origin.* Radiat. Prot. Dosim., Vol 45; N°1/4; pp. 145-162 (1992).

24. **Bouville, A. and Lowder, W.M.** *Human Population Exposure to Cosmic Radiation*. (Presented at the 4th International Symposium on the Natural Radiation Environment. Lisbon, Portugal: Invited Paper). *Radiat. Prot. Dosim.*, Vol. 24; N° 1/4; pp. 293-299 (1988).
25. **Lantos, P.** *The Sun and its Effects on the Terrestrial Environment*. *Radiat. Prot. Dosim.*, Vol. 48; N° 1; pp. 27-32 (1993).
26. **International Commission on Radiation Units and Measurements.** *Basic aspects of high energy particle interactions and radiation dosimetry*. ICRU Report 28 (1978).
27. **Ginzburg, V.L. and Syrovatskii, S.I.** *The origin of cosmic rays*. Pergamon Press (1964).
28. **Allkofer, O.C. and Grieder, P.K.F.** *Cosmics Rays on Earth*. Physics Data. N° 25-1. Fachinformatioszentrum Energie, Physik, Mathematik. Karlsruhe, Germany (1984).
29. **United Nations. UNSCEAR-72.** *Ionizing Radiation: Levels and Effects*. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, with annexes. United Nations sales publication E.72.IX.17 and 18. United Nations, New York (1972).
30. **Lowder, W.M. and Miller, K.M.** *Cosmic and Terrestrial Gamma Radiation Measurement*. Presented at the 5th International Symposium on the Natural Radiation Environment: Tutorial Session. Salzburg, Austria (1991).
31. **National Council on Radiation Protection and Measurements.** *Exposure of the population in the United States and Canada from natural background radiation*. NCRP Report N° 94 (1987).
32. **Kyker, G.C. and Liboff, A.R.** *Absolute cosmic ray ionization measurements in a 900-liter chamber*. *J. Geophys. Res.*, Vol. 83; pp. 5539-5549 (1978).
33. **Lowder, W.M. and Beck, H.L.** *Cosmic ray ionization in the lower atmosphere*. *J. Geophys. Res.*, Vol. 71; pp. 4661-4669 (1966).
34. **O'Brien, K.** *The cosmic ray field at ground level*. pp.15-54; in: *The Natural Radiation Environment II*. Report CONF-720805-P1 (1975).
35. **National Council on Radiation Protection and Measurement.** *Environmental radiation measurements*. NCRP report N° 50 (1976).

36. **International Commission on Radiological Protection.** *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.* ICRP Publication 60. Annals of the ICRP. Pergamon Press, Oxford (1991).
37. **Hewitt, J.E., Hughes, L., McCaslin, J.B., Smith, A.R., Stephens, L.D., Syverston, C.A., Thomas, R.H. and Tucker, A.B.** *Exposure to Cosmic-ray Neutrons and Commercial Jet Aircraft Altitude.* Natural Radiation Environment III, CONF-780422, Vol. 2 (Technical Information Center/US Department of Energy) pp. 855-881. Washintong, DC, USA (1980).
38. **Miller, K.M. and Beck, H.L.** *Indoor gamma and cosmic ray exposure rate measurements using a Ge spectrometer and pressurised ionization chamber.* Radiat. Prot. Dosim., Vol. 7; pp. 185-189 (1984).
39. **Savun, O.I., Senchuro, I.N., Shavrin, P.I. et al.** *Distribution of radiation dose in the radiation belts of the earth in the year of maximum solar activity.* Kosm. Issled., Vol. 11; N° 1; pp. 119-123 (1973).
40. **Hajnal, F., McLaughlin, J.E., and Weinstein, M.S.** *1970 sea-level cosmic-ray neutron measurements.* HASL-241. (1971).
41. **Nakamura, T., Uwanimo, Y. Ohkubo, T. et al.** *Altitude variation of cosmic-ray neutrons.* Health Phys., Vol. 53; pp. 509-517 (1987).
42. **International Commission on Radiological Protection.** *Statement from the 1985 Paris meeting of the International Commission on Radiological Protection.* Radiat. Prot. Dosim., Vol. 11; pp. 134-135 (1985).
43. **International Commission on Radiological Protection.** *Data for protection against ionizing radiation from external sources: supplement to ICRP Publication 15. ICRP Publication 21.* Pergamon Press (1973).
44. **Hughes, J.S.** *1992 review of UK population exposure.* NRPB Report (1993).
45. **Schaefer, H.J.** *Public Health Aspects of Galactic Radiation Exposure at Supersonic Transport Altitudes.* Aerospace Med., Vol. 39; pp. 1298-1303 (1968).
46. **Nakashima, Y. and Fujisaka, S.** *On the Annual Variation of Photons Originating from Secondary Cosmic Ray Components at Sea Level at Nagoya, Japan.* Radiat. Prot. Dosim., Vol 45; N°1/4; pp. 387-390 (1992).
47. **Wallace, R.W. and Sondhaus, C.A.** *Cosmic radiation exposure in subsonic air transport.* Aviat. Space Environ. Med., Vol. 49; pp. 610-623 (1978).

48. **International Civil Aviation Organization.** Civil Aviation Statistics of the World. Doc 9180/15 (1990).
49. **Friedberg, W., Faulkner, D.N., Snyder, L., Darden, E.B. and O'Brien, K.** *Galactic Cosmic Radiation Exposure and Associated Health Risks for Air Carrier Crewmembers.* Aviat.Space Environ.Med., Vol 60; pp. 1104-1108 (1989)
50. **Davies, D.M.** *Cosmic Radiation in Concorde Operations and the Impact of New ICRP Recommendations on Commercial Aviation.* Radiat. Prot. Dosim., Vol. 48; N° 1; pp. 121-124 (1993).
51. **Montagne, C., Donne, J.P., Pelcot, D. et al.** *Inflight radiation measurements aboard French airliners.* Radiat. Prot. Dosim., Vol. 48; pp. 79-83 (1993).
52. **Regulla, D. and David, J.** *Measurements of Cosmic Radiation on Board Lufthansa Aircraft on the Major Intercontinental Flight Routes.* Radiat. Prot. Dosim., Vol. 48; N° 1; pp. 65-72 (1993).
53. **International Commission on Radiological Protection.** *Limits for intakes of radionuclides by workers.* ICRP Publication 30. Annals of the ICRP. Pergamon Press. (1979-1982).
54. **International Commission on Radiological Protection.** *Report of the Task Group on Reference Man.* ICRP Publication 23. Pergamon Press.(1975).
55. **Commission of the European Communities and National Radiological Protection Board (Green, B.M.R.; Hughes, J.S. and Lomas, P.R.).** *Radiation Atlas. Natural Sources of Ionising Radiation in Europe.* (1991).
56. **Petoussi, N., Zanke, N., Saito, K., et al.** *Organ doses to adults and children from environmental gamma rays.* pp: 372-377 in: The Radioecology of Natural and Artificial Radionuclides. (W.Feldt, ed.) Verlag TÜV Rheinland GmbH, Colonia, Alemania (1989).
57. **Nageswara Rao, M.V.; Bhati, S.S.; Rama Seshu, P. and Reddy, A.R.** *Natural Radioactivity in Soil and Radiation Levels of Rajasthan.* Radiation Protection Dosimetry, Vol. 63; N° 3; pp. 207-216 (1996).
58. **Nishikawa, T., Okabe, S. and Aoki, M.** *Monte Carlo calculation of gamma-ray flux density due to atmospheric radon daughters.* J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 26; pp. 525-529 (1989).
59. **Nuclear Energy Agency.** *Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials.* Report by NEA Group of Experts. OECD, Paris (1979).

60. **Miller, K.M. and George, A.C.** *External gamma-ray dose rates from radon-222 progeny indoors*. Health Phys., Vol. 54; pp. 203-206 (1998).
61. **United Nation.** *World Population Prospects 1988*. United Nations, New York. (1989).
62. **Clark, M.J., Burgess, P.H. and McClure D.R.** *Dose Quantities and Instrumentation for Measuring Environmental Gamma Radiation During Emergencies*. Health Phys., Vol. 64; N° 5; pp. 491-501 (1993).
63. **Botter-Jensen L. and Hedemann Jensen, P.** *Determination of Scattered Gamma Radiation in the Calibration of Environmental Dose Rate Meters*. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 42; N° 4; pp. 291-299 (1992).
64. **Green, B.M.R., Lomas, P.R., Bradley, E.J. and Wrixon, A.D.** *Gamma-Radiation Levels Outdoors in Great Britain*. NRPB-R191 (National Radiological Protection Board, Chilton). (1989).
65. **Amaral, E.M., Alves, J.G. and Carreiro, J.V.** *Doses to the Portuguese Population Due to Natural Gamma Radiation*. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 45; N° 1/4; pp. 541-543 (1992).
66. **Quindós, L.S., Fernández, P.L., Soto, J., Ródenas, C., and Gómez, J.** *Natural Radioactivity in Spanish Soils*. Health Phys., Vol. 66; N° 2; pp. 194-200 (1994).
67. **Quindós, L.S., Fernández, P.L., Ródenas, C. and Soto, J.** *Estimate of External Gamma Exposure Outdoors in Spain*. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 45; N° 1/4; pp. 527-529 (1992).
68. **Fernández-Aldecoa, J.C., Poffijn, A. and Hernández-Armas, J.** *Radiación medioambiental en las Islas Canarias Occidentales*. Proceedings book, European Congress of Medical Physics 93, Vol. 2; pp. 489-496 (1993).
69. **Fernández-Aldecoa, J.C. and Hernández-Armas, J.** *Dosimetría Gamma Ambiental: Comparación de detectores*. Radioprotección; N° Extraordinario - Mayo 1998; pp. 469-472 (1998).
70. **Deworm, J.P., Slegers, W., Gillard, J., Flemal, J.M. and Culst, J.P.** *Survey of the Natural Radiation of Belgian Territory as Determined by Different Methods*. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 24; N° 1-4; pp. 347-351 (1998).
71. **Benkrid, M., Mebhah, D., Djeflal, S. and Allalou, A.** *Environmental Gamma Radiation Monitoring by Means of TLD and Ionisation Chamber*. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 45; N° 1/4; pp. 77-80 (1992).

72. **Fernández-Aldecoa, J.C., Robayna, B., Allende, A., Poffjin, A., Hernández-Armas, J.** *Natural Radiation in Tenerife (Canary Islands)*. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 45; N° 1-4; pp. 545-548 (1992).
73. **Mapas Geológicos/Edafológicos de Canarias.** Isla de Tenerife.
74. **Carracedo, J.C.** *Geografía Física de Canarias*. En: Geografía de Canarias, Tomo I; Santa Cruz de Tenerife: Interinsular Canaria, S.A.; pp. 12-17 (1986).
75. **Baeza, A., del Río, M., Miró, C. and Paniagua, J.M.** *Natural Radioactivity in Soils of the Province of Cáceres (Spain)* Radiation Protection Dosimetry, Vol. 45; N° 1/4; pp. 261-263 (1992).
76. **Melanco, A., Pessina, V. and Dallara, G.** *Assessment of the Nature Radioactivity in the Brazilian State of Rio Grande do Norte*. Health Physics, Vol. 65; N° 3; pp. 298-302 (1993).
77. **Florou, H. and Kritidis, P.** *Natural Radioactivity in Environmental Samples from and Island of Volcanic Origin (Milos, Aegean Sea)*. Marine Pollution Bulletin, Vol. 22; N° 8; pp. 417-419 (1991).
78. **Le Brecque, J.J. and Rosales, P.A.** *External Natural Radiation Exposure Rates from Primordial Radionuclides in Northern Venezuela*. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 55; N° 4; pp. 305-308 (1994).
79. **Narayana, Y., Somashekarappa, H.M. et al.** *External Gamma Radiation Dose Rates in Coastal Karnata*. Journal of Radiological Protection, Vol. 14; N° 3; pp. 257-264 (1994).
80. **Brai, M., Bellia, S., Diliberto, R., Dongarra, G. et al.** *Environmental Gamma Radiation Measurements on the Island of Pantelleria*. Health Physics, Vol. 63; N° 3; pp. 356-359 (1992).
81. **Salvador, S., Navarro, T. and Alvarez, A.** *Determinación de U (natural), Th (natural) y ^{226}Ra en diversos materiales mediante espectrometría con INa(Tl)*. CIEMAT 664; pp. 1-21 (1990).
82. **Martínez Lobo, A.** *Determinación de ^{226}Ra por espectrometría gamma*. CIEMAT 618 (SP ISSN 0081-3397); pp. 0-36 (1988).
83. **Robayna Duque, B. and Fernández-Aldecoa, J.C.** *Rn-222 en viviendas y Ra-226 en suelos de las Islas Canarias Occidentales: Contribución a la dosis ambiental*. Libro de Comunicaciones, X Congreso Nacional de Física Médica, Vol. 1; pp. 719-728 (1995).

84. **Ibrahiem, N.M., Abd El Ghani, A.H., Shawky, S.M., Ashraf, E.M., Farouk, M.A.** *Measurement of Radioactivity Levels in Soil in the Nile Delta and Middle Egypt.* Health Physics, Vol. 64; N° 6; pp. 620-627 (1993).
85. **Rosell, J.R., Ortega, X. and Dies, X.** *Natural and Artificial Radionuclides on the Northeast Coast of Spain.* Health Physics, Vol. 60; N° 5; pp. 709-712 (1991).
86. **Chu T-C, Weng P-S and Lin Y-M.** *Distribution of Naturally Occurring Radionuclides in Taiwanese Rocks.* Radiation Protection Dosimetry, Vol. 45; N° 1/4; pp. 281-283 (1992).
87. **Florou, H. and Kritidis, P.** *Gamma Radiation Measurements and Dose Rate in the Coastal Areas of Volcanic Island, Aegean Sea, Greece.* Radiation Protection Dosimetry, Vol. 45; N° 1/4; pp. 277-279 (1992).
88. **Probonas, M. and Kritidis, P.** *The Exposure of the Greek Population to Natural Gamma Radiation of Terrestrial Origin.* Radiation Protection Dosimetry, Vol. 46; N° 2; pp. 123-126 (1993).
89. **Melanco, A., Pessina, V. and Dallara, G.** *Radionuclide content of building materials and gamma ray dose rates in dwellings of Rio Grande do Norte, Brazil.* Radiation Protection Dosimetry, Vol. 48; N° 2; pp. 199-203 (1993).
90. **Chamard, P., Velasco, R.H., et al.** *Caesium-137 and Strontium-90 Distribution in a Soil Profile.* The Science of the Total Environment, N° 136; pp. 251-58 (1993).
91. **Mitchell, P.I., Sánchez-Cabeza, J.A., et al.** *Preliminary Estimates of Cumulative Caesium and Plutonium Deposition in the Irish Terrestrial Environment.* Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 138; N° 2; pp. 241-256 (1990).
92. **Mitchell, P.I., Schell, W.R., Sánchez-Cabeza, J.A., et al.** *Studies of the Vertical Distribution of ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Pu , ^{241}Am and ^{210}Pb in Ombrogenous Mires at Mid-latitudes.* Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 156; N° 2; pp. 361-387 (1992).
93. **Papastefanou, C., Manolopoulou, M. y Ch.** *Cesium-137 in Soils from Chernobyl Fallout.* Health Physics, Vol. 55; N° 6; pp. 985-987 (1988).
94. **Seaward, M.R., Heslop, J.A., Green, D., Bylinske.** *Recent Levels of Radionuclides in Lichens from Southwest Poland with Particular Reference to ^{134}Cs and ^{137}Cs .* Journal Environmental Radioactivity; pp. 123-129 (1988).

95. **Fernández-Aldecoa, J.C., Poffjin, A. and Hernández-Armas, J.** *Cs-137 y Cs-134 en suelos de Tenerife*. Proceedings book, V Congreso de la SEPR y 1ª Jornadas Hispano-Lusas de Protección Radiológica; pp. 333-338 (1994).
96. **Oresegun, M.O., Decker, K.M. and Sanderson, C.G.** *Determination of Self-Absorption Corrections by Computation in Routine Gamma-Ray Spectrometry for Typical Environmental Samples*. Radioactivity & Radiochemistry, Vol. 4; N° 1; pp. 38-45 (1993).
97. **Galloway, R.B.** *Correction for Sample Thickness in Activity Determination by Gamma-Ray Spectrometry*. Radioactivity & Radiochemistry, Vol. 4; N° 3; pp. 32-41 (1993).
98. **Mc Farland R.C.** *Effects of Nonuniformities in Soil Samples that are Gamma-Ray Counted in Marinelli Beakers*. Radioactivity & Radiochemistry, Vol. 3; N° 2; pp. 6-10 (1992).
99. **Instituto Canario de Estadística. ISTAC.** *La Población en cifras*. Gobierno de Canarias. Consejería de Economía y Hacienda. (1996).
100. **Hernández Hernández, P. et al.** *Natura y Cultura de las Islas Canarias*. Santa Cruz de Tenerife. (1997).
101. **Robayna, B., Soler, V., Fdez-Aldecoa, J.C., Catalán, A., Carracedo, J.C., Hdez-Armas, J. and Poffjin, A.** *Radón en viviendas y naturaleza de los suelos en Tenerife (Islas Canarias)*. Proceedings book, European Congress of Medical Physics 93, Vol. 2; pp. 505-512 (1993).
102. **Malanca, A. and Gaidolfi, L.** *Natural Radiation Exposure in a Municipality of the Brazilian Sertao*. Environment International, Vol.22;N°2; pp.213-217 (1996)
103. **García Rodríguez, J.L., Hernández Hernández, J., Cabrera Armas, L.G., Díaz de la Paz, A. and Afonso Pérez, L.** *Atlas Interinsular de Canarias*. Santa Cruz de Tenerife: Interinsular Canaria, S.A. (1990).
104. **Fernández-Aldecoa, J.C. and Hernández-Armas, J.** *Características de suelos volcánicos y radiación gamma medioambiental*. Libro de Comunicaciones, XII Congreso Nacional de Física Médica; Póster 107 (1999)
105. **Le Maitre, R.W.** (Editor). *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*; Blackwell Science Inc; ISBN: 063202593X; pp. 28 (1989).
106. **Brai, M., Puccio, P., Bartolotta, A., Ferrara, G., Hauser, S. and Rizzo, S.** *Field Application of LiF:Mg,Cu,P (GR200A) and LiF:Mg,Ti (TLD-100) Thermoluminescent Materials in Environmental Dosimetry*. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 55; N° 2; pp. 107-111 (1994).

107. **Selvasekarapandian, S., Muguntha Manikandan, N., Sivakumar, R. and Blasubramanian, S.** *Gamma Radiation Dose from Radionuclides in Soil Samples of Udagamandalam (Ooty) in India.* Radiation Protection Dosimetry, Vol. 82; N° 3; pp. 225-228 (1999).
108. **Brajnik, D., Miklavzic, U. and Tomsic, J.** *Map of Natural Radioactivity in Slovenia and its Correlation to the Emanation of Radon.* Radiation Protection Dosimetry, Vol. 45; N° 1-4; pp. 273-276 (1992).
109. **Jibri, N.N. and Farai, I.P.** *Assessment of Dose Rate and Collective Effective Dose Equivalent Due to Terrestrial Gamma Radiation in the City of Lagos, Nigeria.* Radiation Protection Dosimetry, Vol. 76; N° 3; pp. 191-194 (1998).
110. **Butt, K.A., Ali, A. and Qureshi, A.A.** *Estimation of Environmental Gamma Background Radiation Levels in Pakistan.* Health Physics, Vol. 75; N° 1; pp. 63-66 (1998).
111. **Mustapha, A.O., Patel, J.P. and Rathore, I.V.S.** *Assessment of Human Exposure to Natural Sources of Radiation in Kenya.* Radiation Protection Dosimetry, Vol. 82; N° 4; pp. 285-292 (1999).
112. **Saito, K. and Jacob, P.** *Gamma Ray Fields in the Air due to Sources in the Ground.* Radiation Protection Dosimetry, Vol. 58; N° 1; pp. 29-45 (1995).
113. **Beck, H.L., De Campo, J. and Gogolak, C.** *In situ Ge(Li) and NaI(Tl) Gamma-ray Spectrometry.* Health and Safety Laboratory; U.S. Atomic Energy Commission. USAEC report HASL-258 (1972).
114. **Leung, K.C., Lau, S.Y., Poon, C.B.** *Gamma radiation dose from radionuclides in Hong Kong soil.* Journal Environmental Radioactivity, Vol. 11; pp. 279-290 (1990).
115. **Kocher, D.C. and Sjoreen, A.L.** *Dose-rate conversion factors for external exposure to photon emitters in soil.* Health Physics, Vol.48; N°42; pp.193-205 (1985)
116. **Minato, S.** *Terrestrial Gamma-Radiation Field in Natural Environment.* Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 8; N° 6; pp. 312-347 (1971).
117. **Rosell Polo, J.R.** Tesis doctoral: *Contribución al estudio de la radiactividad natural. Aplicación al litoral catalán.* Ediciones de la Universitat Politècnica de Catalunya; ISBN: 84-7653-063-3 (1989).
118. **Beck, H.L.** *The Radiation Field in Air due to the Distributed Gamma-Ray Sources in the Ground.* Health and Safety Laboratory; U.S. Atomic Energy Commission. USAEC report HASL-195 (1968).

119. **Ajayi, I.R. and Ajayi, O.S.** *Estimation of Absorbed Dose Rate and Collective Effective Dose Equivalent Due to Gamma Radiation from Selected Radionuclides in Soil in Ondo and Ekiti States, South-Western Nigeria.* Radiation Protection Dosimetry, Vol. 86; N° 3; pp. 221-224 (1999).
120. **Poffijn, A.** *Dose Rate Conversion Factors:* Comunicación personal. Laboratorium voor Kernfysica. Universidad de Gante (1992).
121. **Landeras, M.I., Fernández-Aldecoa, J.C., Catalán, A., García, M.J., Bencomo, M.C. and Hernández-Armas, J.** *Radionúclidos en suelos de Canarias.* Radioprotección; N° Extraordinario – Sept 2000; pp. 84-85 (2000).
122. **Debertain, K.** *Corrections in Gamma-ray Spectrometry with Germanium Detectors.* Proceedings of the Second International Summer School. Low-Level Measurements of Man-Made Radionuclides in the Environment. La Rábida, Huelva. Spain. Lectures and Invited Seminars: pp. 15 -29 (1990).
123. **Fernández-Aldecoa, J.C., Catalán Acosta, A. and Hernández-Armas, J.** *Influencia de la densidad de la muestra en la eficiencia de un detector de germanio.* Libro de Comunicaciones, X Congreso Nacional de Física Médica, Vol. 1; pp. 729-737 (1995).
124. **Debertain, K.** *Efficiency Calibration in Gamma-ray Spectrometry with Germanium Detectors.* Proceedings of the Second International Summer School. Low-Level Measurements of Man-made Radionuclides in the Environment. La Rábida, Huelva. Spain. Lectures and Invited Seminars: pp. 3 -14 (1990).
125. **Debertain, K.** *Quality Assurance in Gamma-ray Spectrometry with Germanium Detectors.* Proceedings of the Second International Summer School. Low-Level Measurements of Man-Made Radionuclides in the Environment. Lectures and Invited Seminars: pp. 30-37. La Rábida, Huelva. Spain (1990).
126. **Bolívar, J.P., García-Tenorio, R. and García-León, M.** *Gamma-efficiency Determinations in Soil Samples Including Self-Absorption Corrections.* Proceedings of the Third International Summer School. Low-Level Measurements of Radioactivity in the Environment. Techniques and Applications: pp. 533. La Rábida, Huelva. Spain (1990).
127. **Rizzo, S. and Puccio, P.** *Correzionni per densità nella calibrazione in efficienza di un HpGe.* Quaderni 1/92. Dipartimento di Ingegneria Nucleare dell'Università di Palermo (1992).
128. **Baeza, A., del Río, M., Miró, C. and Paniagua, J.M.** *Natural Radioactivity in Soils of the Province of Cáceres (Spain).* Radiation Protection Dosimetry, Vol. 45; N° 1-4; pp. 261-263 (1992).

129. **Köster, H.W., Keen, A., Pennders, R.M.J., Bannink, D.W. and de Winkel, J.H.** *Linear Regression Models for the Natural Radioactivity (U-238, Th-232 and K-40) in Dutch Soils: a key to anomalies.* Radiation Protection Dosimetry, Vol. 24; N° 1-4; pp. 63-68 (1988).
130. **Brosed, A.** *Radiological Quantities Measures and Assessed in Personnel Dosimetry.* Techniques and Management of Personnel Thermoluminescence Dosimetry Services. Commission of the European Communities Joint Research Centre. ISPRA, Italy. Madrid (1994).
131. **International Commission on Radiation Units and Measurements.** *Measurements of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations.* ICRU Report 47. ICRU, Bethesda, Maryland (1992).
132. **International Commission on Radiation Units and Measurements.** *Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry.* ICRU Report 51. ICRU, Bethesda, Maryland (1993).
133. **International Commission on Radiation Units and Measurements.** *The Quality Factor in Radiation Protection.* ICRU Report 40. ICRU, Bethesda, Maryland (1986).
134. **International Commission on Radiation Units and Measurements.** *Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources.* ICRU Report 39. ICRU, Bethesda, Maryland (1985).
135. **International Commission on Radiation Units and Measurements.** *Radiation Quantities and Units.* ICRU Report 33. ICRU, Bethesda, Maryland (1980).
136. **International Commission on Radiation Units and Measurements.** *Determination of Dose Equivalents from External Radiation Sources - Part 2.* ICRU Report 43. ICRU, Bethesda, Maryland (1988).
137. **Saito, K., Petoussi, N., Zankl, M. et al.** *Calculation of organ doses from environmental gamma rays using human phantoms and Monte Carlo methods.* Part 1. Monoenergetic sources of natural radionuclides in the ground. GSF-B2/90 (1990).

VI. ANEXOS

ANEXO I-A

Coordenadas en proyección UTM, elipsoide de Hayford (Cartografía Militar de España), de los cuadrados fijados en la isla de Tenerife. El “Datum” para todo el arcipléago es el “*Pico de las Nieves*”.

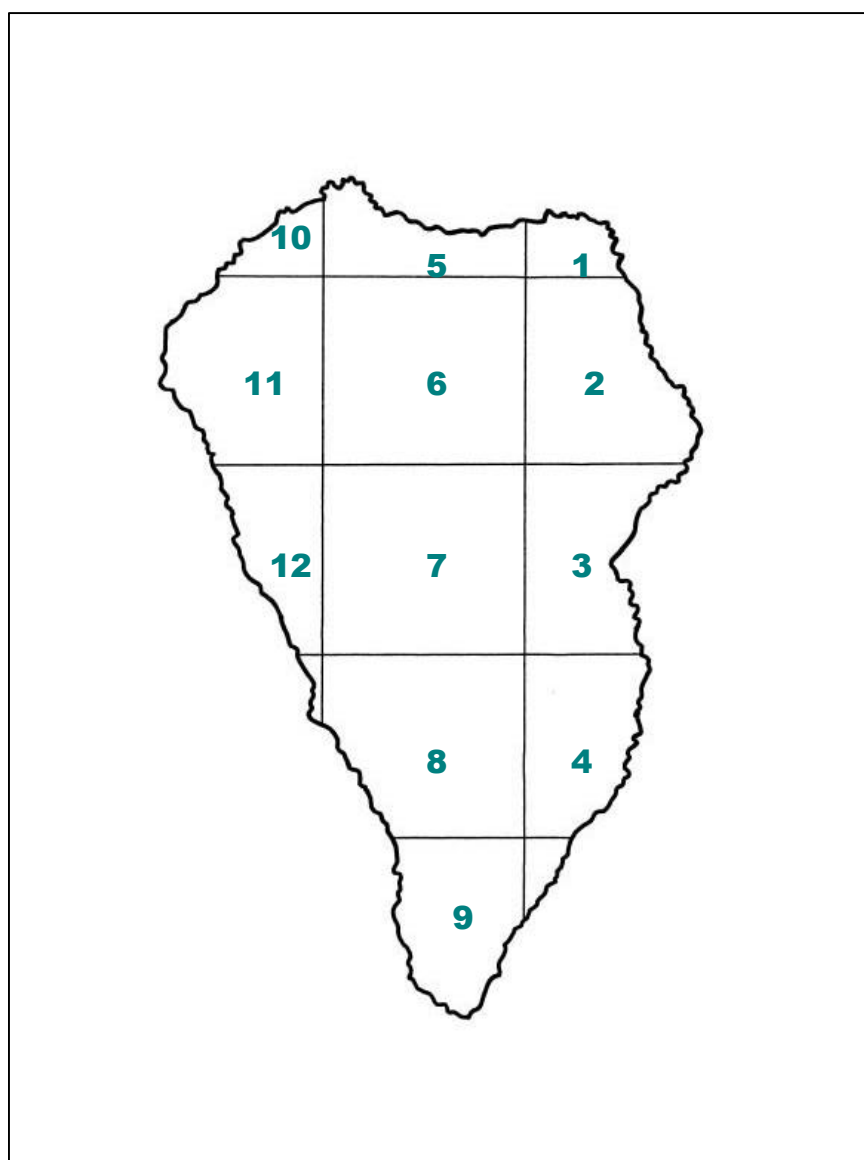
Cua- dro	Denominación del cuadro	Ma- pa	Nombre del Mapa	Coordenada X ₁ (x 10 ³)	Coordenada X ₂ (x 10 ³)	Coordenada Y ₁ (x 10 ³)	Coordenada Y ₂ (x 10 ³)
1	Chamorga	1	Punta de Anaga	385	390	3160	3165
2	Iguste de San Andrés	1	Punta de Anaga	385	390	3155	3160
3	Almáciga	2	Punta del Hidalgo	380	385	3160	3165
4	El Bailadero	2	Punta del Hidalgo	380	385	3155	3160
5	S.Andrés (Sta.Cruz Tfe)	2	Punta del Hidalgo	380	385	3150	3155
6	Roque de Taborno	2	Punta del Hidalgo	375	380	3160	3165
7	Afur	2	Punta del Hidalgo	375	380	3155	3160
8	Barrio Alegría (S/CTfe)	4	Santa Cruz de Tenerife	375	380	3150	3155
9	Santa Cruz de Tenerife	4	Santa Cruz de Tenerife	375	380	3145	3150
10	Punta del Hidalgo	2	Punta del Hidalgo	370	375	3160	3165
11	El Moquinal -El Batán	2	Punta del Hidalgo	370	375	3155	3160
12	El Bronco (La Laguna)	4	Santa Cruz de Tenerife	370	375	3150	3155
13	Taco	4	Santa Cruz de Tenerife	370	375	3145	3150
14	Santa María del Mar	4	Santa Cruz de Tenerife	370	375	3140	3145
15	Tejina	3	Tejina	365	370	3155	3160
16	El Portezuelo	5	Tacoronte	365	370	3150	3155
17	La Esperanza	5	Tacoronte	365	370	3145	3150
18	Barranco Hondo	6	Arafo	365	370	3140	3145
19	Candelaria	6	Arafo	365	370	3135	3140
20	Montaña Grande	10	Güímar	365	370	3130	3135
21	Valle Guerra	3	Tejina	360	365	3155	3160
22	Tacoronte - Naranjeros	5	Tacoronte	360	365	3150	3155
23	Jara – Agua García	5	Tacoronte	360	365	3145	3150
24	Las Lagunetas	6	Arafo	360	365	3140	3145
25	Cuevecitas Candelaria	6	Arafo	360	365	3135	3140
26	Güímar	10	Güímar	360	365	3130	3135
27	La Medida (Güímar)	10	Güímar	360	365	3125	3130
28	Fasnia	14	Fasnia	360	365	3120	3125

29	El Sauzal	5	Tacoronte	355	360	3150	3155
30	La Matanza	5	Tacoronte	355	360	3145	3150
31	Monte de Santa Úrsula	6	Arafo	355	360	3140	3145
32	Ayosa	6	Arafo	355	360	3135	3140
33	Barranco del Agua	10	Güimar	355	360	3130	3135
34	Camino Arrastradero	10	Güimar	355	360	3125	3130
35	La Sombrera - Fasnía	14	Fasnía	355	360	3120	3125
36	Arico El Viejo	14	Fasnía	355	360	3115	3120
37	Abades	17	Lomo de Arico	355	360	3110	3115
38	Santa Úrsula	5	Tacoronte	350	355	3145	3150
39	Cuesta La Villa	7	La Orotava	350	355	3140	3145
40	La Caldera (Orotava)	7	La Orotava	350	355	3135	3140
41	Izaña	11	Teide	350	355	3130	3135
42	Bco. Palmero - Izaña	11	Teide	350	355	3125	3130
43	El Bueno (Arico Viejo)	14	Fasnía	350	355	3120	3125
44	Gavilanes (Lomo Arico)	14	Fasnía	350	355	3115	3120
45	El Río	18	Granadilla de Abona	350	355	3110	3115
46	Loma del Camello	18	Granadilla de Abona	350	355	3115	3110
47	La Vera (Puerto Cruz)	7	La Orotava	345	350	3140	3145
48	Tres Pinos - La Orotava	7	La Orotava	345	350	3135	3140
49	Montaña Alto - Portillo	11	Teide	345	350	3130	3135
50	Cañada Las Pilas	11	Teide	345	350	3125	3130
51	Madre del Agua (Izaña)	15	Las Cañadas del Teide	345	350	3120	3125
52	Morro Arbejas - Izaña	15	Las Cañadas del Teide	345	350	3115	3120
53	Los Blanquitos	18	Granadilla de Abona	345	350	3110	3115
54	San Isidro	18	Granadilla de Abona	345	350	3105	3110
55	Aeropuerto Sur-Tejitas	20	Las Galletas	345	350	3100	3105
56	Mirador Gimena	7	La Orotava	340	345	3140	3145
57	Fuente Brando (Icod A.)	7	La Orotava	340	345	3135	3140
58	El Portillo-El Cabezón	11	Teide	340	345	3130	3135
59	Montaña Blanca	11	Teide	340	345	3125	3130
60	Montaña Guajara	15	Las Cañadas del Teide	340	345	3120	3125
61	Madre Agua (Vilafior)	15	Las Cañadas del Teide	340	345	3115	3120
62	Vilafior – Cruz de Tea	18	Granadilla de Abona	340	345	3110	3115
63	Las Zocas – San Miguel	18	Granadilla de Abona	340	345	3105	3110
64	Los Abrigos-El Guincho	20	Las Galletas	340	345	3100	3105
65	Santa Catalina	7	La Orotava	335	340	3140	3145
66	La Guancha	7	La Orotava	335	340	3135	3140
67	Cruz Vieja –Boca Tauce	11	Teide	335	340	3130	3135

68	Pico del Teide	11	Teide	335	340	3125	3130
69	Llano de Ucanca	15	Las Cañadas del Teide	335	340	3120	3125
70	Boca Tauce -Vilaflor	15	Las Cañadas del Teide	335	340	3115	3120
71	Vilaflor- La Escalona	18	Granadilla de Abona	335	340	3110	3115
72	Valle de San Lorenzo	20	Las Galletas	335	340	3105	3110
73	Las Galletas	20	Las Galletas	335	340	3100	3105
74	Las Galletas -Ten Bel	20	Las Galletas	335	340	3095	3100
75	San Marcos (Icod)	8	Icod de los Vinos	330	335	3140	3145
76	El Amparo (Icod)	8	Icod de los Vinos	330	335	3135	3140
77	Hoya Negra-BocaTauce	12	Santiago del Teide	330	335	3130	3135
78	Cruz de Tea-BocaTauce	12	Santiago del Teide	330	335	3125	3130
79	Montaña Cedro-Ucanca	16	Guía de Isora	330	335	3120	3125
80	Montaña Teresme	16	Guía de Isora	330	335	3115	3120
81	Barranco de El Infierno	19	Adeje	330	335	3110	3115
82	Los Cristianos	21	Los Cristianos	330	325	3105	3110
83	Mesas de Guaza	21	Los Cristianos	330	335	3100	3105
84	Rasca (Palm-Mar)	21	Los Cristianos	330	335	3095	3100
85	San Juan del Reparó	8	Icod de los Vinos	325	330	3135	3140
86	Vuelta Grande-B.Tauce	12	Santiago del Teide	325	330	3130	3135
87	Altos de Chío	12	Santiago del Teide	325	330	3125	3130
88	Chirche	16	Guía de Isora	325	330	3120	3125
89	Vera de Erques	16	Guía de Isora	325	330	3115	3120
90	Armeñime	19	Adeje	325	330	3110	3115
91	La Caleta	19	Adeje	325	330	3105	3110
92	Los Silos	8	Icod de los Vinos	320	325	3140	3145
93	Las Moradas (LosSilos)	8	Icod de los Vinos	320	325	3135	3140
94	Santiago del Teide	12	Santiago del Teide	320	325	3130	3135
95	Tamaimo	12	Santiago del Teide	320	325	3125	3130
96	Era del Llano (Alcalá)	16	Guía de Isora	320	325	3120	3125
97	Playa de San Juan	16	Guía de Isora	320	325	3115	3120
98	Marazul-Playa San Juan	19	Adeje	320	325	3110	3115
99	Buenavista del Norte	9	Buenavista del Norte	315	320	3140	3145
100	Cumbre Molina	9	Buenavista del Norte	315	320	3135	3140
101	Masca	13	Las Portelas	315	320	3130	3135
102	Acantilado Los Gigantes	13	Las Portelas	315	320	3125	3130
103	Punta de Teno	9	Buenavista del Norte	310	315	3135	3140

ANEXO II

Localización de los cuadrados fijados en la isla de La Palma (10 x 10 km²).



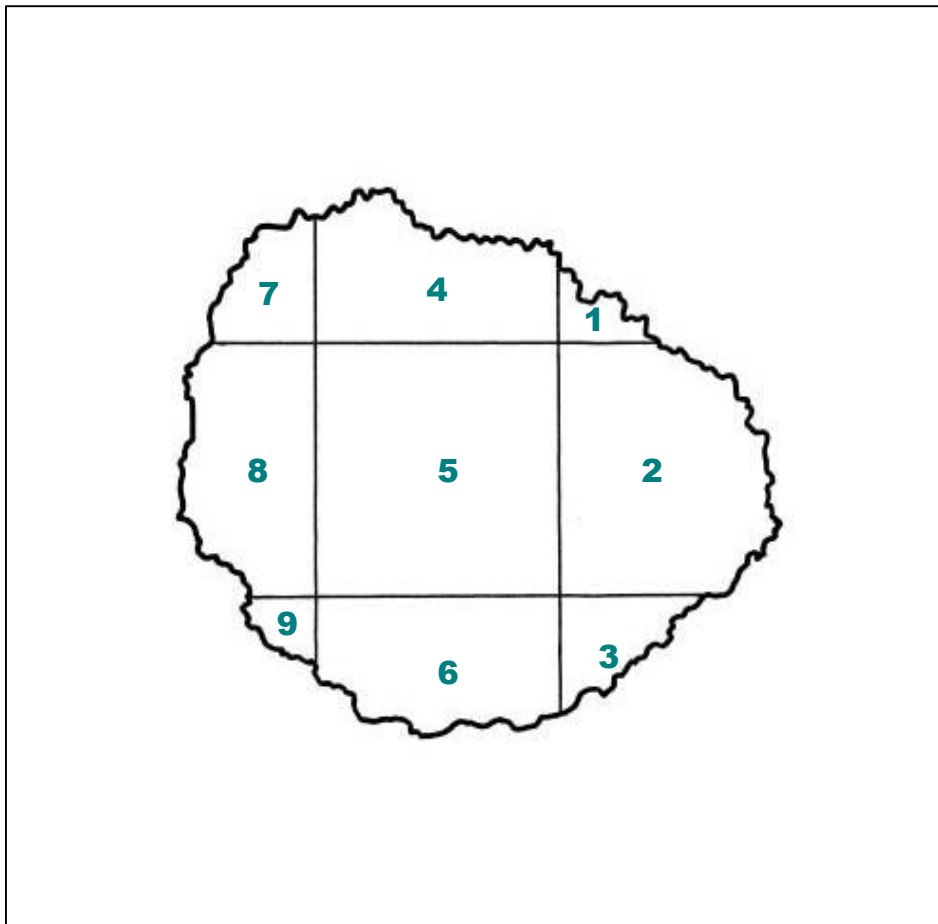
ANEXO II-A

Coordenadas en proyección UTM, elipsoide de Hayford (Cartografía Militar de España), de los cuadrados fijados en la isla de La Palma. El “Datum” para todo el arcipiélago es el “*Pico de las Nieves*”.

Cua- dro	Denominación Del cuadro	Ma- pa	Nombre del Mapa	Coordenada X ₁ (x 10 ³)	Coordenada X ₂ (x 10 ³)	Coordenada Y ₁ (x 10 ³)	Coordenada Y ₂ (x 10 ³)
1	Las Cabezas (Barlovento)	1	Los Sauces	225	235	3190	3200
2	El Corcho (Puntallana)	2	Santa Cruz de La Palma	225	235	3180	3190
3	Miranda	2	Santa Cruz de La Palma	225	235	3170	3180
4	San Juan de Belmaco	3	Fuencaliente de La Palma	225	235	3160	3170
5	Franceses	1	Los Sauces	215	225	3190	3200
6	Borde de la Caldera de Taburiente	2	Santa Cruz de La Palma	215	225	3180	3190
7	Llanos del Paso	2	Santa Cruz de La Palma	215	225	3170	3180
8	Los Campanarios	2	Santa Cruz de La Palma	215	225	3160	3170
9	Volcán de San Antonio	3	Fuencaliente de La Palma	215	225	3150	3160
10	Llano Negro (Garafia)	1	Los Sauces	205	215	3190	3200
11	Llanos Lance (Tijarafe)	2	Santa Cruz de La Palma	205	215	3180	3190
12	Las Angustias (Los Llanos)	2	Santa Cruz de La Palma	205	215	3170	3180
(*)	Borde del Cráter del Volcán Teneguía	3	Fuencaliente de La Palma	-	-	-	-

ANEXO III

Localización de los cuadrados fijados en la isla de La Gomera (10 x 10 km²).



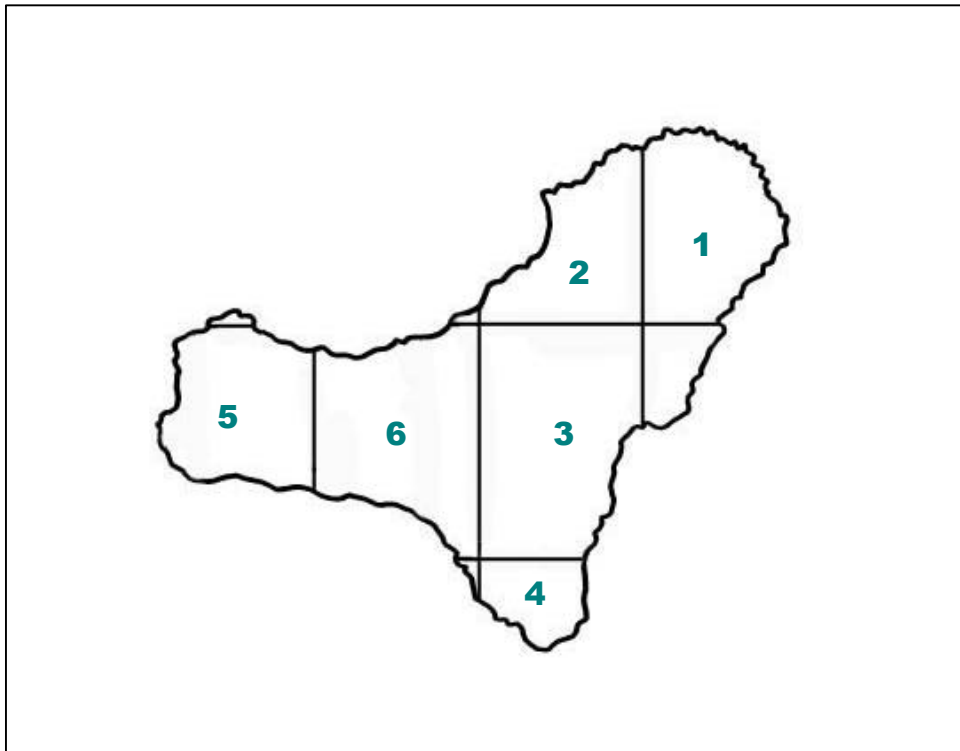
ANEXO III-A

Coordenadas en proyección UTM, elipsoide de Hayford (Cartografía Militar de España), de los cuadrados fijados en la isla de La Gomera. El “Datum” para todo el arcipiélago es el “Pico de las Nieves”.

Cua-dro	Denominación del cuadro	Ma-pa	Nombre del Mapa	Coordenada X ₁ (x 10 ³)	Coordenada X ₂ (x 10 ³)	Coordenada Y ₁ (x 10 ³)	Coordenada Y ₂ (x 10 ³)
1	Casas del Moralito (Hermigua)	4	Hermigua	285	295	3117	3127
2	Las Casetas (San Sebastián)	1	San Sebastián de La Gomera	285	295	3107	3117
3	Los Revolcaderos (San Sebastián)	2	Punta del Cabrito	285	295	3097	3107
4	Tamargada (Vallehermoso)	3	Agulo	275	285	3117	3127
5	Monte del Cedro	4	Hermigua	275	285	3107	3117
6	Alajeró	5	Alajeró	275	285	3097	3107
7	Tazo	3	Agulo	265	275	3117	3127
8	Arure	4	Hermigua	265	275	3107	3117
9	La Mejora (La Dama)	5	Alajeró	265	275	3097	3107
10	Laguna Grande	4	Hermigua	275	285	3107	3117

ANEXO IV

Localización de los cuadrados fijados en la isla de El Hierro (7 x 10 km²).



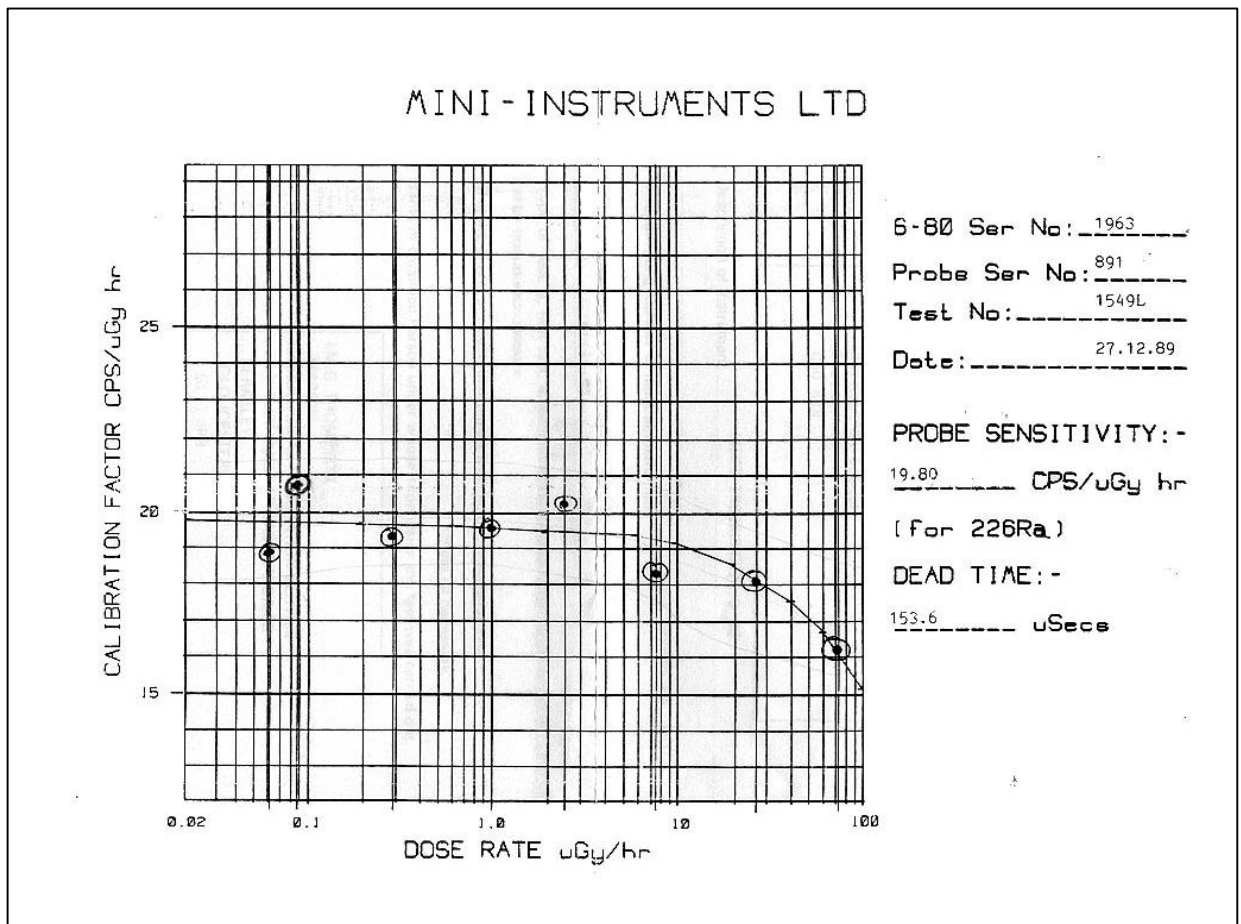
ANEXO IV-A

Coordenadas en proyección UTM, elipsoide de Hayford (Cartografía Militar de España), de los cuadrados fijados en la isla de El Hierro. El “Datum” para todo el archipiélago es el “*Pico de las Nieves*”.

Cua- dro	Denominación del cuadro	Ma- pa	Nombre del Mapa	Coordenada X ₁ (x 10 ³)	Coordenada X ₂ (x 10 ³)	Coordenada Y ₁ (x 10 ³)	Coordenada Y ₂ (x 10 ³)
1	Valverde	1	Valverde	210	217	3075	3085
2	Las Montañetas (Guarazoca)	1	Valverde	203	210	3075	3085
3	Gorona de Los Difuntos	2	Taibique	203	210	3065	3075
4	Gorona Lajial (La Restinga)	5	La Restinga	203	210	3055	3065
5	Montaña de la Virgen	4	Sabinosa	189	196	3065	3075
6	Chorro Jable (Frontera)	4	Sabinosa	196	203	3065	3075

ANEXO V

Certificado de Calibración del medidor Geiger-Müller, modelo MC-71



ANEXO VI

Medidas de tasa de dosis absorbida en aire en los 21 lugares donde se recogieron muestras para el estudio de la presencia de Cesio en los suelos de Tenerife y su difusión en profundidad.

Simultáneamente a la recogida de porciones de suelo a distintas profundidades, para establecer las características de la difusión del ^{134}Cs y del ^{137}Cs desde la superficie del terreno hacia capas más profundas, se llevaron a cabo un total de 21 medidas de la tasa de dosis absorbida en aire, a 1 metro del suelo. Los lugares de la isla de Tenerife elegidos fueron aquellos donde se habían encontrado mayores concentraciones de estos dos radioisótopos de cesio en una preliminar campaña de medidas.

Los valores de la tasa de dosis medioambiental neta obtenidos con la cámara RSS-112 en los puntos geográficos que se indican, se presentan en la **Tabla** siguiente donde se comparan con la magnitud correspondiente obtenida en la primera campaña de medidas con el detector Geiger-Müller MC-71. También se indican en dicha Tabla los datos meteorológicos de temperatura y humedad en el momento de las últimas medidas.

Tabla A-VI.1.- Valores netos de la tasa de dosis en aire y de la variación porcentual relativa, de las dos series de medidas tomadas en los puntos seleccionados para realizar el estudio de la difusión del ^{134}Cs y del ^{137}Cs en el suelo. Datos meteorológicos en el momento de las medidas.

Cua- dro	Lugar	1ªCamp:	2ªCamp:	Variación relativa (%)	Cond. meteorológic.	
		MC-71 (nGyh ⁻¹)	RSS-112 (nGyh ⁻¹)		Temper. (°C)	Humed. (%)
2	Igüeste de San Andrés	19	35	+ 46 %	24,5	39
12	El Bronco (La Laguna)	18	22	+18 %	10,1	88,6
17	La Esperanza	80	84	+ 5 %	11,1	84,5
18	Barranco Hondo	30	32	+ 6 %	24,3	41,2
22	Tacoronte - Los Naranjeros	41	53	+ 23 %	14,8	78,7
23	Jara (Agua García)	43	54	+ 20 %	14,6	76
24	Las Lagunetas (La Esperanza)	28	17	- 39 %	7,4	66
29	El Sauzal	41	45	+ 9 %	30	50,5
31	Lomo Mesetas (Santa Úrsula)	21	16	- 24 %	7,9	64
36	Arico El Viejo	117	118	+ 1 %	-	-
38	La Quinta (Santa Úrsula)	48	83	+ 42 %	21,5	43,5
40	La Caldera (La Orotava)	28	29	+ 3 %	9,2	97,4
44	Los Gavilanes (Lomo de Arico)	88	109	+ 19 %	18,2	51
51	Fuente Madre del Agua (Izaña)	120	137	+ 12 %	22,5	16
57	Fuente del Bardo (Icod El Alto)	93	71	- 24 %	14,2	81,1
58	El Cabezón (El Portillo / Las Cañadas)	120	130	+ 8 %	16,2	18,5
62	Cruz de Tea (Vilaflor / Granadilla)	131	150	+ 13 %	-	-
65	Santa Catalina (S. Juan de la Rambla)	144	158	+ 9 %	15,4	77,8
75	San Marcos- Riquer (Icod de los Vinos)	152	153	+ 1 %	15,5	74,7
85	S. Juan del Reparó (Garachico)	49	44	- 10 %	14,2	75,5
96	Era del Llano (Alcalá)	76	86	+ 12 %	-	-

ANEXO VII

MAGNITUDES Y UNIDADES PARA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA PERSONAL Y AMBIENTAL

A-VII.1.- INTRODUCCIÓN

En este apartado se presentan las magnitudes radiológicas relevantes para la Protección Radiológica personal y ambiental introducidas por la *Comisión Internacional para Unidades y Medidas de Radiación (ICRU)* y la *Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP)*^[130].

Estas magnitudes pueden utilizarse con un doble propósito. Por un lado se usan como valores numéricos que permiten caracterizar un determinado medio en el que existe algún campo de radiación. Por otro, pueden usarse como indicadores del daño potencial producido por una exposición a la radiación y, desde este punto de vista, se emplean como parámetros de referencia en las normas y regulaciones de Protección Radiológica.

Es necesario indicar que recientemente se han introducido nuevos conceptos y se han modificado los anteriormente existentes, lo que ha ocasionado algunos cambios en las magnitudes establecidas hace años tanto como magnitudes operacionales como en sus valores limitantes.

Las operacionales son magnitudes que se usan en la práctica de la Protección Radiológica para irradiación externa. Son medibles con instrumentos de monitorización y medida relativamente simples y, en general, proporcionan una sobreestimación de los valores de las magnitudes limitantes.

Se aceptan como aproximaciones razonables, bajo ciertas condiciones, de magnitudes para las que se han recomendado o expresado determinados valores límites tales como la dosis equivalente. Estas magnitudes limitantes tienen habitualmente la seria desventaja de ser esencialmente no medibles para un individuo concreto en un campo de irradiación arbitrario. Como consecuencia de ello, sólo pueden determinarse mediante valores estimativos.

En 1.991 la *Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP)* publicó sus *Recomendaciones 1.990*^[36] introduciendo una nueva formulación desde el punto de vista de los valores límites en Protección Radiológica. En ella la *ICRP* presentó dos nuevas magnitudes: *Dosis Equivalente* y *Dosis Efectiva*, basadas en *Factores de*

Ponderación en vez de en los *Factores de Calidad* que se habían utilizado anteriormente.

En 1.992, la *Comisión Internacional para Unidades y Medidas de Radiación (ICRU)* publicó el *Informe n° 47*^[131] en el que se contienen las normas sobre criterios para el diseño, calibración y uso de instrumentos, haciendo especial énfasis en su utilización para la medida de magnitudes operacionales.

En 1.993 *ICRU* publicó el *Informe n° 51*^[132] con el objetivo de proporcionar una presentación única y clara de un sistema coherente de magnitudes y unidades para uso en Dosimetría y Radioprotección. Las definiciones formales de las diferentes magnitudes que se presentan en este apartado de esta memoria se han tomado de este informe *ICRU*.

A-VII.2.- CONSIDERACIONES GENERALES

Las magnitudes usadas en Dosimetría y Radioprotección han de ser definidas de forma no ambigua y las posibles aproximaciones tienen que quedar claramente identificadas.

En el último *Informe ICRU* citado se establece: "*La determinación de magnitudes relevantes en Protección Radiológica implica generalmente incertidumbres significativas. Además deben usarse un conjunto de aproximaciones para relacionar medidas físicas con los efectos biológicos causados por la radiación. Aunque comparativamente con otras ramas del conocimiento los márgenes admisibles en Protección Radiológica suelen ser amplios, es esencial que las magnitudes empleadas se definan sin ambigüedades y que todas las aproximaciones estén claramente identificadas*".

La *ICRU* describe algunos atributos de las magnitudes físicas. Estas deben ser:

- **Generales:**
Ampliamente aplicables en situaciones prácticas.
- **Inequívocas:**
Sin ambigüedades y sin supuestos implicados en ellas. El nombre de una magnitud deberá ser suficientemente específico como para no dejar duda sobre su naturaleza.
- **Necesarias:**
No redundantes.
- **Accesibles a medida y cálculo:**
Una magnitud física puede considerarse medible si existe un método directo o indirecto de medida que permita obtener el valor de la magnitud a medir.

A-VII.3.- MAGNITUDES RADIOMÉTRICAS

A-VII.3.1.- FLUENCIA

Es una de las magnitudes radiométricas más útiles para caracterizar campos de radiación tanto en el espacio libre como en la materia.

La **Fluencia**, F , es el cociente entre dN y da , donde dN es el número de partículas incidentes sobre el área da de la sección transversal de una esfera:

$$\Phi = dN/da$$

Unidad: m^{-2}

A-VII.4.- MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS

Se introducen para proporcionar una medida física en un punto o en una región de interés que esté relacionada con los efectos reales o potenciales de las radiaciones ionizantes. La magnitud dosimétrica fundamental es la *Dosis Absorbida* D , juntamente con su variación con el tiempo o con la transferencia lineal de energía.

A-VII.4.1.- DOSIS ABSORBIDA

La **Dosis Absorbida**, D , es el cociente entre de y dm , siendo de la energía media impartida por la radiación ionizante a una cantidad de materia de masa dm :

$$D = de / da$$

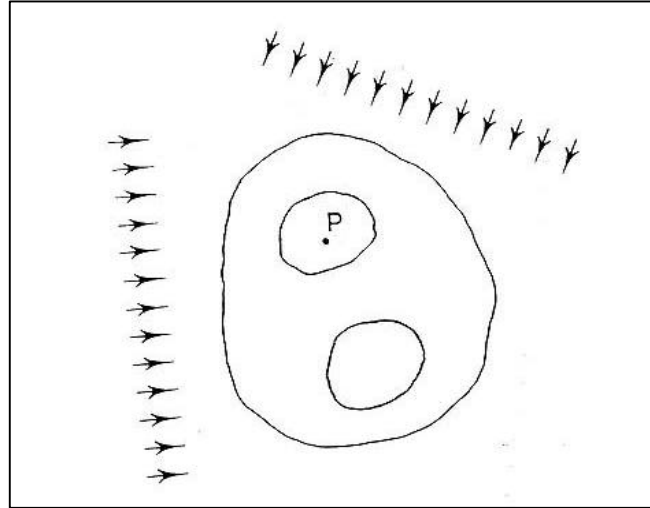
Unidad: $J kg^{-1} = \text{Gray (Gy)}$

La tasa de dosis absorbida D es el cociente entre dD y dt , siendo dD el incremento de dosis absorbida en el intervalo de tiempo dt .

$$D = dD/dt$$

Unidad: $Gy s^{-1}$

Figura A-VII.1.- Dosis absorbida en un punto P para una fuente de radiación externa.



Para fuentes de radiación externa, en un punto P, situado en un objeto irradiado, **D** depende de:

- El objeto irradiado.
- La localización de P en el objeto.
- El campo de radiación ambiental.
- La posición del objeto en el campo.

A-VII.4.2.- TRANSFERENCIA LINEAL DE ENERGIA

La **Transferencia Lineal de Energía, L**, o poder de parada por colisión lineal de un material para una partícula cargada, es el cociente entre dE y dl , siendo dE la energía media perdida por la partícula debido a colisiones con electrones cuando recorre la distancia dl .

$$L = dE/dl$$

Unidad: $J m^{-1}$

Cuando E se expresa en eV, L se expresará en $eV m^{-1}$ o en algún múltiplo o submúltiplo conveniente, tal como el $keV \mu m^{-1}$

A-VII.4.3.- ENERGÍA LINEAL

La **Energía Lineal, y**, es el cociente entre ϵ y l , siendo ϵ la energía impartida a la materia en un volumen de interés por un proceso que de lugar a un depósito de energía, y l la longitud media en ese volumen.

$$y = \epsilon / l$$

Unidad: J m⁻¹

Esta magnitud es similar a la anterior ya que ambas se definen como cociente entre energía y longitud. Sin embargo, mientras que la primera, *LET*, es una magnitud no estocástica, la *Energía Lineal* es una magnitud estocástica. Representa un depósito discreto de energía por lo que es más significativa que la *LET*, desde el punto de vista físico, para especificar la calidad de una radiación.

Aunque la *Energía Lineal* es directamente medible, se continúa usando la *Transferencia Lineal de Energía* para la mayor parte de cálculos prácticos en Protección Radiológica.

A-VII.4.4.- DISTRIBUCIÓN DE DOSIS ABSORBIDA EN TRANSFERENCIA LINEAL DE ENERGÍA

Es, D_L , el cociente entre dD y dL , siendo dD la dosis absorbida proporcionada por partículas cargadas que tienen transferencias lineales de energías comprendidas entre L y dL .

$$D_L = dD/dL$$

Unidad: m kg⁻¹

A-VII.5.- MAGNITUDES DOSIS-EQUIVALENTE

A-VII.5.1.- FACTOR DE CALIDAD Q Y RELACIÓN $Q-L$

El factor de calidad es un factor modificante convencional que se aplica a la dosis absorbida en un punto para tener en cuenta la eficacia biológica de las partículas cargadas que hayan producido aquella dosis absorbida.

El **Factor de Calidad Q** en un punto de un tejido viene dado por:

$$Q = 1/D \int_L Q(L) D_L dL$$

Siendo: D la dosis absorbida en ese punto, D_L la distribución de D en la transferencia lineal de energía L , y $Q(L)$ el correspondiente factor de calidad en el punto de interés.

La integración ha de extenderse sobre la distribución D_L debida a todas las partículas cargadas, excluyendo electrones secundarios.

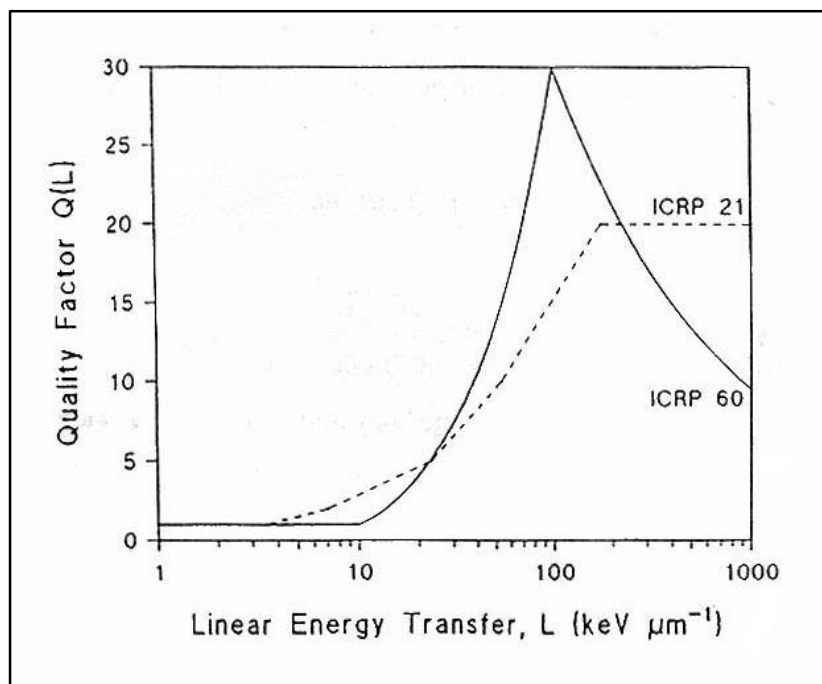
El factor de calidad depende de la localización del punto de interés en el cuerpo y de su orientación en el campo de radiación.

La *ICRP* establece por convención el valor numérico de $Q(L)$ como una función de la transferencia lineal de energía no restringida en agua.

Tabla A-VII.1.- Relación Q - L.

Transferencia lineal de energía no restrictiva, L, en agua (keV mm ⁻¹)	Q(L) (con L expresado en keV mm ⁻¹)
< 10	1
10 - 100	0,32 L - 2,2
> 100	300 / √ L

Figura A-VII.2.- Factor de Calidad en función de la Transferencia Lineal de Energía.



A-VII.5.2.- DOSIS EQUIVALENTE

La **Dosis Equivalente**, **H**, es el producto de Q por D en un punto de un tejido, siendo D la dosis absorbida y Q el factor de calidad en ese punto:

$$H = Q D$$

Unidad: $J\ kg^{-1} = \text{Sievert (Sv)}$

La **Tasa de Dosis Equivalente**, **H**, es dH dividido por dt , siendo dH la variación de dosis equivalente en el intervalo de tiempo dt .

$$H = dH/dt$$

Unidad: $Sv\ s^{-1}$

La dosis equivalente **H** en un punto viene dada por:

$$H = \int_L Q(L) D_L dL$$

Siendo $Q(L)$ el factor de calidad para partículas con transferencia lineal de energía L , y D_L la distribución espectral respecto de L de la dosis absorbida en ese punto.

En un punto en un cuerpo irradiado, **H** puede determinarse a partir de la magnitud medible D_L y de la relación funcional $Q(L)$.

A-VII.6.- VALORES MEDIOS DE MAGNITUDES Y DEL FACTOR DE CALIDAD

Los valores medios de magnitudes son generalmente suficientes y útiles en la práctica de la Protección Radiológica y se usan para establecer valores limitantes.

Tanto la dosis absorbida como el factor de calidad dependen de la localización en el cuerpo y de su orientación en el campo de radiación. Los valores medios de magnitudes promediados en una masa no puntual extensa deben, consecuentemente, formularse como integrales.

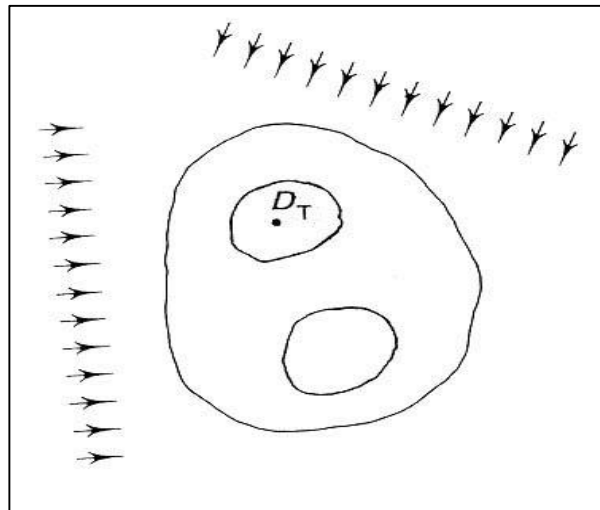
A-VII.6.1.- DOSIS MEDIA ABSORBIDA EN UN ÓRGANO (DOSIS ÓRGANO)

La **Dosis Media Absorbida**, **D_T**, en un **Órgano** o tejido especificado T , viene dada por:

$$D_T = 1/m_T \int_{m_T} D\ dm$$

Siendo m_T la masa del tejido u órgano y D la dosis absorbida en el elemento de masa dm .

Figura A-VII.3.- Dosis media absorbida en un tejido u órgano.



La magnitud D_T es especialmente significativa cuando las variaciones espaciales de D en el tejido u órgano son pequeñas.

La dosis media absorbida en un tejido u órgano especificado es igual a la relación entre la energía impartida, ϵ_T , al tejido u órgano y la masa m_T del tejido u órgano.

En el caso de irradiaciones ocasionadas por fuentes externas, la dosis media absorbida en un tejido u órgano específico depende del campo de radiación existente y del tamaño y la orientación del cuerpo en ese campo.

La dosis media absorbida en un órgano específico suele denominarse *Dosis Órgano*.

A-VII.6.2.- FACTOR DE CALIDAD MEDIO (FACTOR DE CALIDAD ÓRGANO)

El Factor de Calidad Medio, Q_T , en un Órgano o Tejido especificado T , viene dado por:

$$Q_T = 1/m_T D_T \int_{m_T} QD \, dm$$

Siendo: D_T la dosis media absorbida en el tejido u órgano, m_T su masa y Q y D el factor de calidad y la dosis absorbida en el elemento de masa dm , respectivamente.

La determinación de Q_T implica una doble integración extendida a la distribución de dosis absorbida en el punto en transferencia lineal de energía, D_L , y al tejido de interés.

Por tanto:

$$Q_T = 1/m_T D_T \int_{m_T} \int_L Q(L) D_L dL dm$$

A este valor de Q_T a veces se le denomina *Factor de Calidad en un Órgano Especificado*. Está basado en el tipo y energía de la radiación que alcanza al órgano de interés. Así en el caso de irradiaciones debidas a fuentes externas, Q_T en un órgano o tejido especificado, depende del campo de radiación ambiental, del tamaño y orientación del cuerpo en ese campo y del tejido u órgano.

En muchos casos, sin embargo, el espectro de energía de la radiación en las regiones de interés no es bien conocido; el factor de calidad en cualquier órgano puede entonces aproximarse a un *Factor de Calidad Medio Convencional Q*. En consecuencia es posible, en aplicaciones prácticas, relacionar Q al tipo y energía de la radiación, sin especificar las condiciones de irradiación. Esta aproximación no elimina la necesidad de definiciones precisas que se necesitan en procedimientos de estandarización y calibración.

La combinación de una definición exacta, con el uso de aproximaciones aceptables para radiaciones típicas, ha sido propuesta en el *Informe n° 40* de la *ICRU*¹³³¹ por un *Grupo Comité Conjunto* de la *ICRP* y de la *ICRU*.

A-VII.6.3.- DOSIS EQUIVALENTE MEDIA EN UN ÓRGANO (DOSIS ÓRGANO EQUIVALENTE)

La **Dosis Equivalente Media, H_T , en un Órgano** o tejido especificado, se obtiene a partir de la ecuación anterior de Q_T :

$$H_T = Q_T D_T = 1/m_T \int_{m_T} \int_L Q(L) D_L dL dm$$

A-VII.7.- MAGNITUDES LIMITANTES (ESTABLECIDAS POR ICRP)

La *ICRP* recomendó en 1.977 (*Informe n° 26*)^[8] que las magnitudes limitantes fuesen la **Dosis Equivalente Organo** y la **Dosis Equivalente Efectiva**.

Posteriormente, en 1.991 (*Informe n° 60 de ICRP*)^[36], introdujo dos nuevas magnitudes basadas en los factores de ponderación para la radiación en vez de en los factores de calidad, remplazando la *Dosis Equivalente Organo* y la *Dosis Equivalente Efectiva* por dos nuevas magnitudes que pasaron a denominarse: **Dosis Equivalente** y **Dosis Efectiva**, respectivamente.

A-VII.7.1.- DOSIS EQUIVALENTE EFECTIVA

La **Dosis Equivalente Efectiva**, H_E , cuya utilización estaba recomendada hasta el *Informe ICRP n° 60* (1.991)^[36], puede expresarse por la ecuación:

$$H_E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T Q_T D_T$$

con $\sum_T w_T = 1$;

donde w_T es el *Factor de Ponderación Tisular* para cada órgano o tejido. En el referido *Informe n° 26* (1.977) de la *ICRP*^[8] fueron especificados varios valores numéricos para este factor.

A-VII.7.2.- FACTOR DE PONDERACIÓN DE LA RADIACIÓN

En lugar de los **Factores de Calidad** aceptados hasta ese momento, la *ICRP* estableció en 1.991 (*ICRP 60*)^[36] los valores de los **Factores de Ponderación para la Radiación** basados en la revisión actualizada de la información radiobiológica, en las diferentes circunstancias de exposición y en la inspección de los resultados de los cálculos tradicionales de dosis equivalente ambiental.

Los valores establecidos para estos factores, que se refieren a la radiación incidente en todo el cuerpo o, para fuentes internas, a la radiación emitida desde la fuente, son los que se presentan en la **Tabla A-VII.3**.

Tabla A-VII.3.- Factores de ponderación de la radiación.

TIPO Y RANGO DE ENERGÍA	w_R
Fotones (todas las energías)	1
Electrones y muones (todas las energías)	1
Neutrones de energías :	
< 10 keV	5
10 keV a 100 keV	10
100 keV a 2 MeV	20
2 MeV a 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protones, excepto de retroceso (energía > 2MeV)	5
Partículas alfa, de fisión y núcleos pesados	20

Los valores w_R permiten no considerar modificación del campo de radiación debido a fuentes externas aunque se encuentre presente el cuerpo humano. Es decir, se refieren a la radiación incidente sobre el cuerpo y no depende de la orientación de éste o de la localización del mismo. Este intento de fijación de valores numéricos característicos de la radiación es evidentemente atractivo, aunque se ha indicado que conduce a ciertas incongruencias, por lo que su uso debe tomarse como una aproximación.

A-VII.7.3.- DOSIS EQUIVALENTE EN UN ÓRGANO (DOSIS EQUIVALENTE ÓRGANO)

La **Dosis Equivalente**, $H_{T,R}$, en un **Órgano** o tejido T debido a la radiación R viene dada por:

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R}$$

donde $D_{T,R}$ es la *Dosis Media Absorbida* debida a la radiación R en el órgano o tejido T, y w_R es el *Factor de Ponderación de la Radiación*.

Unidad: $J\ kg^{-1} = Sv$ (Sievert)

Cuando el campo de radiación está constituido por diferentes tipos y energías con distintos valores de w_R , la **Dosis Equivalente** se obtendrá mediante la expresión:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

A-VII.7.4.- DOSIS EFECTIVA

La **Dosis Efectiva**, derivada de la dosis equivalente, permite considerar la combinación de dosis distintas a diferentes tejidos de forma que pueda correlacionarse con los efectos estocásticos de la radiación en el cuerpo.

El factor con el cual se pondera la dosis equivalente en un órgano o tejido se denomina *Factor de Ponderación Tisular*, w_T . Los valores de estos factores se escogen de manera que una dosis equivalente uniforme en todo el cuerpo de una dosis efectiva numéricamente igual a dicha dosis equivalente uniforme. Consecuentemente, la suma de todos los factores de ponderación tisular es la unidad.

Esta dosis equivalente así ponderada se corresponde con la definida anteriormente como *Dosis Equivalente Efectiva*, H_E . Ahora la ICRP ha decidido usar el nombre más simple de **Dosis Efectiva**, **E**.

La expresión de la **Dosis Efectiva** es:

$$E = \sum_T w_T H_T$$

donde H_T es la *Dosis Equivalente en un Tejido u Organó* y w_T es el *Factor de Ponderación para el Tejido T*.

Unidad: $J\ kg^{-1} = Sv$ (Sievert)

En la **Tabla A-VII.4** se presentan los valores establecidos para los **Factores de Ponderación Tisular**.

Tabla A-VII.4.- Factores de ponderación en tejidos u órganos.

TEJIDO U ÓRGANO	FACTOR DE PONDERACION TISULAR w_T
Gónadas	0,20
Médula ósea (roja)	0,12
Colon	0,12
Pulmón	0,12
Estómago	0,12
Vejiga	0,05
Pecho	0,05
Hígado	0,05
Esófago	0,05
Tiroides	0,05
Piel	0,01
Superficie ósea	0,01
Resto	0,05

A efectos de medida, se usarán las magnitudes relacionadas a continuación, que están definidas en base al factor de calidad, Q:

- Dosis equivalente ambiental.
- Dosis equivalente direccional.
- Dosis equivalente personal.

A-VII.8.-MAGNITUDES OPERACIONALES PARA IRRADIACIÓN DESDE FUENTES EXTERNAS.

Estas magnitudes operacionales se introdujeron para conseguir la uniformidad del concepto de dosis equivalente para cualquier clase de radiación, ya sean fotones, neutrones o electrones.

En la práctica de la protección radiológica, estas magnitudes deberían dar aproximaciones adecuadas de las magnitudes limitantes, aún proporcionando sobreestimaciones razonables y siempre evitando subestimaciones inaceptables.

Deben ser magnitudes que puedan ser fácilmente medibles con los instrumentos habituales, tanto para monitorización de área como individual.

Se han definido unas magnitudes (*ICRU, 1985*)^[134] que enlazan la irradiación externa con la dosis equivalente efectiva y la dosis equivalente en piel y en cristalino. Sirven para monitorización de área y son la **Dosis Equivalente Ambiental, $H^*(d)$** , y la **Dosis Equivalente Direccional, $H'(d,W)$** . Para medidas sobre individuos se recomienda el uso de la **Dosis Equivalente Personal, $H_p(d)$** .

Las radiaciones también pueden caracterizarse por su poder de penetración (débil o fuertemente penetrantes), dependiendo de qué dosis equivalente es la apropiada para sus valores limitantes. Para la radiación poco penetrante, puede utilizarse la dosis equivalente en cristalino o en piel. Para la muy penetrante es más apropiado utilizar la dosis equivalente efectiva.

A-VII.8.1.- MONITORIZACIÓN DE ÁREA

Con propósitos rutinarios en las medidas de protección a las radiaciones, es deseable caracterizar la irradiación potencial de los individuos en términos de una magnitud *Dosis Equivalente Simple* que pueda establecerse en un fantomas de características aproximadas al cuerpo humano. El fantomas seleccionado recibe el nombre de *Esfera ICRU (ICRU, 1980)*^[135] y se trata de una esfera de 30 cm de diámetro de tejido equivalente, con una densidad de 1 g cm^{-3} y una composición másica de un 76,2 % de oxígeno, 11,1 % de carbono, 10,1 % de hidrógeno y 2,6 % de nitrógeno. En las medidas prácticas se usan a menudo materiales que, contando con composiciones y densidades ligeramente diferentes a las definidas por *ICRU*, aportan suficiente exactitud a las estimaciones obtenidas.

En monitorización de área es habitual referirse a términos tales como *expandido* y/o *alineado* para caracterizar los campos de radiación. Así, en el campo expandido la fluencia y sus distribuciones direccional y en energía tienen los mismos valores a través de todo el volumen de interés. En el campo expandido y alineado, la fluencia y su distribución de energía son las mismas que en el campo expandido, pero la fluencia es unidireccional.

A-VII.8.1.1.- Dosis Equivalente Ambiental:

La **Dosis Equivalente Ambiental, $H^*(d)$** , en un punto de un campo de radiación, es la dosis equivalente que se produciría debida al campo expandido y alineado, en la esfera ICRU, a una profundidad d , en el radio opuesto de la dirección del campo alineado.

Unidad: $\text{J kg}^{-1} = \text{Sv}$ (Sievert)

Cualquier indicación sobre la *Dosis Equivalente Ambiental*, debería siempre hacer referencia a la profundidad d , que por simplicidad se suele expresar en mm.

También se puede definir una magnitud análoga a la *Dosis Equivalente Ambiental* en términos de dosis absorbida. Se le llama **Dosis Absorbida Ambiental**, $D^*(d)$.

Para radiación fuertemente penetrante, se recomienda habitualmente utilizar una profundidad de 10 mm para estimar los valores de la *dosis equivalente ambiental*. En este caso se la suele denotar como $H^*(10)$.

Para radiación poco penetrante se emplean normalmente profundidades de 0,07 mm para la piel y de 3 mm para el ojo, con similares notaciones: $H^*(0,07)$ y $H^*(3)$, respectivamente.

La medida de $H^*(10)$ requiere generalmente que el campo de radiación sea uniforme en todas las dimensiones del instrumento de medida y que éste tenga una respuesta isotrópica.

A-VII.8.1.2.- Dosis Equivalente Direccional:

La **Dosis Equivalente Direccional**, $H'(d,W)$, en un punto de un campo de radiación, es la dosis equivalente que sería producida por el correspondiente campo expandido, en la esfera ICRU, a una profundidad d , en el radio de una dirección específica W .

Unidad: $J\ kg^{-1} = Sv$ (Sievert)

En este caso siempre será necesario especificar la profundidad d y la dirección W . Normalmente, y con propósitos de simplificar la notación, d se suele expresar en mm.

También es habitual definir una **Dosis Absorbida Direccional**, $D'(d,W)$, en términos análogos a la *Dosis Equivalente Direccional*.

Se suelen utilizar las notaciones $H'(0,07,W)$ y $H'(3,W)$ para expresar las *dosis equivalentes direccionales* de referencia que se obtienen, para radiaciones débilmente penetrantes, a 0,07 mm de profundidad en la piel y a 3 mm en el ojo.

Igual que ocurría para la *dosis equivalente ambiental*, es frecuente tomar una profundidad de 10 mm para las radiaciones fuertemente penetrantes, notándose entonces la *Dosis Equivalente Direccional* como $H'(10,W)$.

La medida de $H'(d,\Omega)$ requiere que el campo de radiación sea uniforme en todo el volumen útil del instrumento de medida y que el equipo tenga una respuesta direccional.

La especificación de la dirección Ω requiere establecer un sistema de coordenadas de referencia, el cual a menudo coincide con el del campo de radiación. En el caso particular de un campo de radiación unidireccional, la dirección puede expresarse en términos del ángulo α que forma el campo con la dirección citada. Cuando $\alpha = 0$, la magnitud $H'(d,0)$ puede escribirse $H'(d)$ y es igual a $H^*(d)$.

A-VII.8.2.- MONITORIZACIÓN INDIVIDUAL

Actualmente se han simplificado las dos magnitudes que caracterizaban la monitorización individual, en una sola que recibe el nombre de *Dosis Equivalente Personal* y que es apropiada para fuentes de radiación tanto débil como fuertemente penetrantes y que únicamente depende del valor de la profundidad d del punto de medida.

A-VII.8.2.1.- Dosis Equivalente Personal:

La **Dosis Equivalente Personal**, $H_p(d)$, es la dosis equivalente en tejido blando, a una apropiada profundidad d , por debajo de un determinado punto del cuerpo humano.

Unidad: $J\ kg^{-1} = Sv$ (Sievert)

Siempre será necesario especificar la profundidad d que, normalmente, suele expresarse en mm.

Es también usual utilizar el concepto de **Dosis Absorbida Personal**, $D_p(d)$, de forma análoga al de *Dosis Equivalente Personal*.

Es frecuente considerar una profundidad de 10 mm, en el caso de radiaciones fuertemente penetrantes, como referente de *Dosis Equivalente Personal*, $H_p(10)$.

Para las radiaciones de poco poder de penetración, como ocurría en el caso de las dosis equivalentes ambiental y direccional, se toman profundidades de 0,07 mm en la piel y 3 mm en el ojo para definir las *Dosis Equivalentes Personales* $H_p(0,07)$ y $H_p(3)$, respectivamente.

$H_p(d)$ puede medirse con un detector que se sujete a la superficie del cuerpo y que se cubra con un espesor apropiado de material equivalente a tejido.

A-VII.8.3.- NOTAS SOBRE ICRU, 1993^[132]

El **Informe N°43 (ICRU, 1988)**^[136] presenta los datos que justifican la selección de estas magnitudes operacionales para fuentes externas de radiación.

Sin embargo, los datos se basan en la relación Q(L) y los valores previamente especificados por la *ICRP (ICRP, 1977)*^[81] de W_T .

Un **Comité Conjunto ICRU-ICRP** examina actualmente la influencia en esas magnitudes operacionales de los nuevos valores de Q(L) y W_T , así como su pertinencia para las nuevas magnitudes limitantes definidas en las *Recomendaciones de 1.990 de la ICRP (ICRP, 1991)*^[36].