



Enrique SUÁREZ MAHOU es geólogo y farmacéutico, con 34 años de experiencia en el campo nuclear, fue profesor de Geología del Uranio en la Universidad Complutense de Madrid. Especializado en la exploración de uranio en la Junta de Energía Nuclear actuó como experto del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en varios proyectos. Pasó después al Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) donde ha trabajado en temas de emplazamiento de centrales nucleares (CC.NN) y de almacenamientos de residuos, participando como experto del OIEA en la elaboración de normas internacionales sobre emplazamiento de cc.nn y aa.rr. En la actualidad continúa su trabajo en el CSN sobre temas de emplazamiento y en la dirección técnica del Proyecto MARN.



José Angel FERNÁNDEZ AMIGOT es Doctor ingeniero de minas, con 34 años de experiencia, fue profesor de geología económica de la Universidad de Salamanca, especialista en exploración del uranio y evaluación de yacimientos en la Junta de Energía Nuclear. Pasó después a la Empresa Nacional del Uranio (ENUSA) desempeñando los puestos de Director adjunto del Plan Nacional de Exploración del Uranio, Jefe de Exploración y Director Adjunto de la División de exploración y minería de ENUSA. Participó en la evaluación de proyectos de exploración y/o minería en 24 países. Es experto en exploración de uranio del OIEA. En la actualidad lleva la dirección técnica del Proyecto MARN.

EL PROYECTO MARN MAPA DE RADIACIÓN GAMMA NATURAL

E. SUÁREZ - J. A. FERNÁNDEZ

CONCEPCIÓN DEL PROYECTO MARN

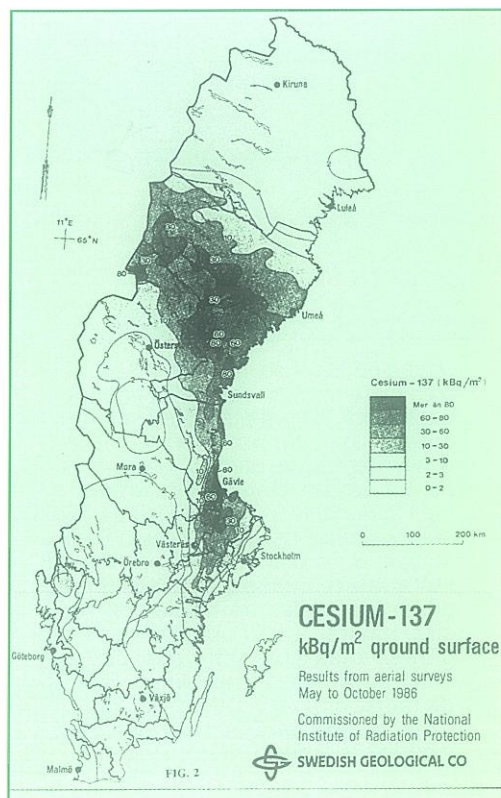
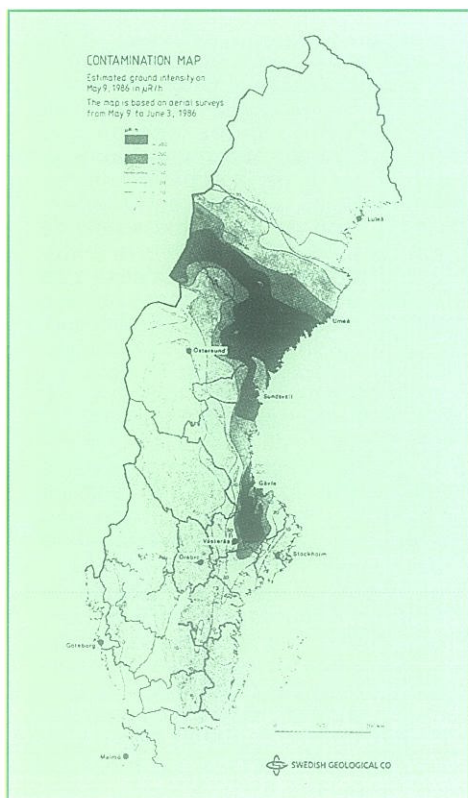
La confusión creada por el accidente producido en uno de los reactores de Chernobyl, en abril de 1986, concienció al público en general y a los gobiernos sobre la necesidad de conocer mejor los niveles de radiación ambiental. Los niveles de radiación gamma total o tasa de exposición gamma total alcanzan tan altos como 400 microRoentgen/hora ($\mu\text{R/h}$) y puntualmente excedieron los 1000 $\mu\text{R/h}$. La figura 1 muestra la distribución de los niveles de tasa de exposición ($\mu\text{R/h}$) principalmente debida al Cesio 137 (figura II) en Suecia en los días que siguieron al accidente. Debe tenerse en cuenta que según el tipo de formaciones geológicas los valores normales oscilan entre 5 y 30 $\mu\text{R/h}$.

En noviembre de 1986 el OIEA convocó una reunión de consultores para

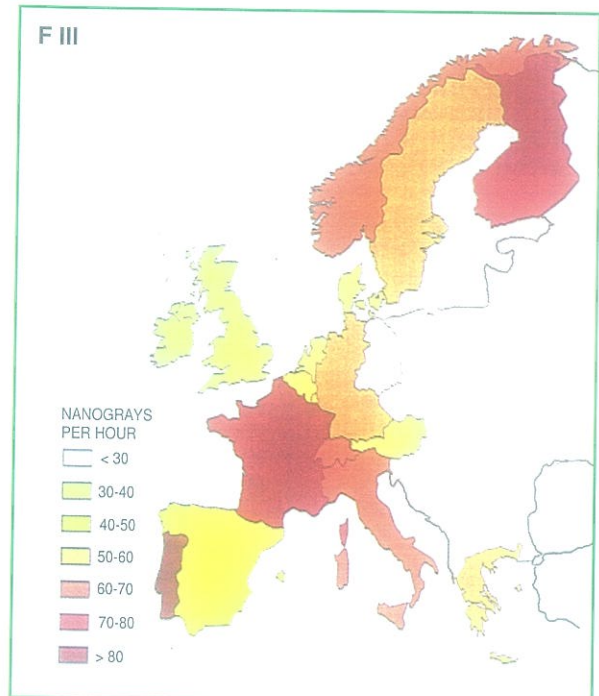
discutir la posible contribución de los organismos especializados en exploración de uranio al conocimiento de la radiación natural y para incrementar la eficacia de respuesta ante una emergencia en el caso de un accidente nuclear. El grupo de consultores recomendó al OIEA que se publicara una descripción de la actuación sueca ante la emergencia, por dos razones: la primera porque las acciones del Instituto Geológico Sueco sirvieran de ejemplo en cuanto a la contribución que supuso la utilización de personal experto y entrenado en la exploración de uranio; la segunda para que sirviera de ejemplo la rápida y fluida comunicación entre las autoridades del Instituto Geológico, las de Protección Radiológica y las Fuerzas Aéreas suecas.

Además recomendó el OIEA a todos los países la conveniencia de disponer de mapas de radiación gamma natural para poder evaluar los niveles de

FI y FII



F III



Protección Civil de la CCEE y la figura IV muestra el mapa del Reino Unido. La figura V corresponde al mapa de tasa de exposición de la entonces Alemania Federal, publicado por el Institut für Angewante Geodäsia.

Debe destacarse que los equipos de detección aérea utilizados en Suecia para evaluar los efectos de la contaminación procedente de Chernobyl eran de igual tipo, configuración y geometría que los empleados en España entre los años 1979 y 1981 por la entonces Junta de Energía Nuclear y por la Empresa Nacional del Uranio en los sucesivos Planes Nacionales de Exploración de Uranio. La metodología empleada fue también la misma y la única diferencia estuvo en el calado de las ventanas del espectrómetro gamma utilizado, ya que en lugar de emplearse las ventanas del potasio 40, uranio y torio que se utilizan en la prospección de minerales radiactivos se emplearon fundamentalmente la del Cs 137 así como las de otros elementos causantes de la contaminación radiactiva.

La Junta de Energía Nuclear y la Empresa Nacional del Uranio en el período 1968-1980 realizaron en España sucesivas campañas de prospección aérea de minerales radiactivos en las que se obtuvieron medidas de muy buena calidad, de radiación gamma total y de espectrometría gamma. Se disponía de datos aéreos que cubrían aproximadamente el 60 % de la superficie peninsular, además en la obtención de los datos se siguió fundamentalmente la metodología norteamericana que era junto a la canadiense la más avanzada del momento.

Además de la información sobre prospección aérea se disponía de abundantes medidas terrestres sobre una buena parte de España. En la figuras nº VI y VII se localizan las zonas cubiertas por cada uno de estos métodos. Se disponía por lo tanto de una buena información de base para iniciar un proyecto de evaluación de la radiación gamma natural en España.

Puestos en contacto el Consejo de Seguridad Nuclear y la Empresa Nacional del Uranio S.A., se estudió por un equipo técnico mixto la posible utilización de datos de sucesivos planes de investigación de uranio para la elaboración de un mapa de tasa de exposición natural que tuviera en

cuenta las recomendaciones internacionales en relación con la producción de mapas de radiación natural. Las conclusiones del grupo de trabajo se tradujeron en una propuesta de proyecto que contemplaba el costo, calendario y la metodología a seguir para la realización de los mapas piloto de radiación natural.

LA RADIACIÓN NATURAL

La radiación natural es la fuente de radiación más importante de exposición al público en general. La radiación natural procede de fuentes externas e internas.

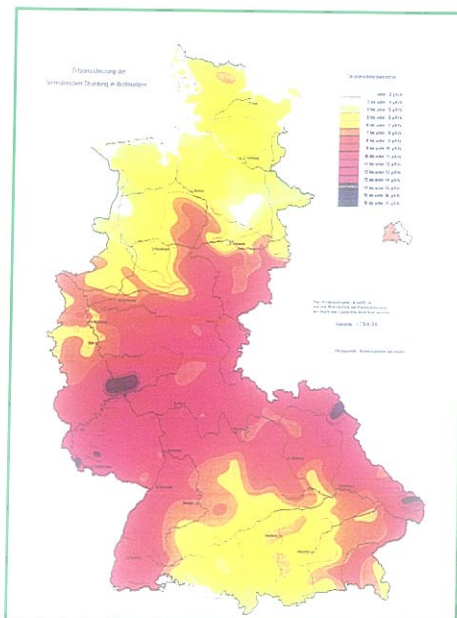
Las fuentes externas se deben a:

- la presencia de los elementos radiactivos naturales que se encuentran en el suelo, en los materiales de construcción, en el agua y en el aire.
- la existencia de la radiación cósmica.
- la formación de radionúclidos cósmogénicos que se producen por interacción de la radiación cósmica con los átomos presentes en la atmósfera. El más importante es el carbono-14.

Las fuentes internas corresponden a los elementos radiactivos naturales, fundamentalmente el potasio 40 y el carbono 14, que intervienen en la composición de los tejidos y en los procesos fisiológicos de los organismos vivos.

El Proyecto MARNA solamente se ocupa de las fuentes externas de radiación gamma, excluyendo el gas radón y la radiación cosmogénica, si bien el valor de esta última se ha estimado para nuestras latitudes. Existen diversos tipos de radiación natural:

radiación gamma natural y sus posibles incrementos, así como la preocupación por la normalización de la información y asimismo transmitió la conveniencia de utilizar datos procedentes de la exploración de uranio. La Comunidad Europea inició también en noviembre de 1986 un estudio piloto que demostró que no existían dificultades técnicas insalvables para producir un atlas de niveles de radiación natural. La figura III muestra el primer atlas obtenido, publicado en 1993 en el "Atlas radiológico. Fuentes de radiación ionizante en Europa" preparado para la Dirección de medio Ambiente, Seguridad Nuclear y



- **partículas alfa.** Son núcleos de helio, de escaso poder de penetración. Solamente son capaces de atravesar unos centímetros de aire y se absorben por la piel.

- **partículas beta.** Son electrones, capaces de atravesar un metro de aire aproximadamente. Se absorben por unos 2 cm de agua o tejidos biológicos.

- **radiación gamma** emitida por los elementos radiactivos del suelo. Tiene un poder penetrante de unos 200 metros de aire y de unos 40 cm de suelo.

- **radiación cósmica.** Tiene un gran poder de penetración y es capaz de atravesar la atmósfera terrestre y alcanzar el suelo.

La radiación gamma emitida por las rocas se debe a la presencia de los elementos siguientes: potasio, torio y uranio. Existen también otros elementos naturales radiactivos como el rubidio 87, samario 148 y lutecio 171, pero que se encuentran en tan pequeña proporción que su contribución a la radiación gamma total es despreciable. Los picos de energía significativos del espectro gamma que se emplean en la medida de radionucleosidos naturales son: 1,46 MeV correspondiente al potasio 40, que se utiliza para determinar el contenido en potasio natural; los de 1,1204 y 1,764 MeV correspondientes al bismuto 214, descendiente del uranio natural, que se emplean para estimar el contenido en uranio y el de 2,62 MeV, correspondiente al talio 208, descendiente del torio natural, que se emplea para determinar el contenido en torio natural.

En la tabla I se muestran los contenidos medios y el rango de variación del potasio, torio y uranio en rocas ígneas y sedimentarias.

El potasio químico contiene un 0.0119 % de potasio 40. (Adams J.A.S. y Colbs,

Tabla I
Contenidos de potasio, torio y uranio en rocas ígneas y sedimentarias

	Potasio (%)	Torio (ppm)	Uranio (ppm)
Rocas basálticas			
Valor medio	0.8	4.0	1.0
Rango	0.2 - 2.0	0.5 - 10.0	0.2 - 4.0
Rocas graníticas			
Valor medio	3.0	12.0	3.0
Rango	2.0 - 6.0	1.0 - 25.0	1.0 - 7.0
Rocas arcillosas			
Valor medio	2.7	12.0	3.7
Rango	1.6 - 4.2	8.0 - 18.0	1.5 - 5.5
Areniscas			
Valor medio	1.1	1.7	0.5
Rango	0.7 - 3.8	0.7 - 2.0	0.2 - 0.6
Rocas carbonatadas			
Valor medio	0.3	1.7	2.2
Rango	0.0 - 2.0	0.1 - 7.0	0.1 - 9.0

Physics and Chemistry of the Earth, Pergamon Press)

En cuanto a la contribución media terrestre de cada uno de ellos a la radiación gamma natural un 45 % proviene del potasio, un 45 % proviene del torio y un 10 % proviene del uranio natural.

Una concentración de 1% de potasio produce una tasa de exposición de 1,505 μ R/h, mientras que 1 ppm de torio da lugar a 0,310 μ R/h y por último 1 ppm de uranio a 0,625 μ R/h.

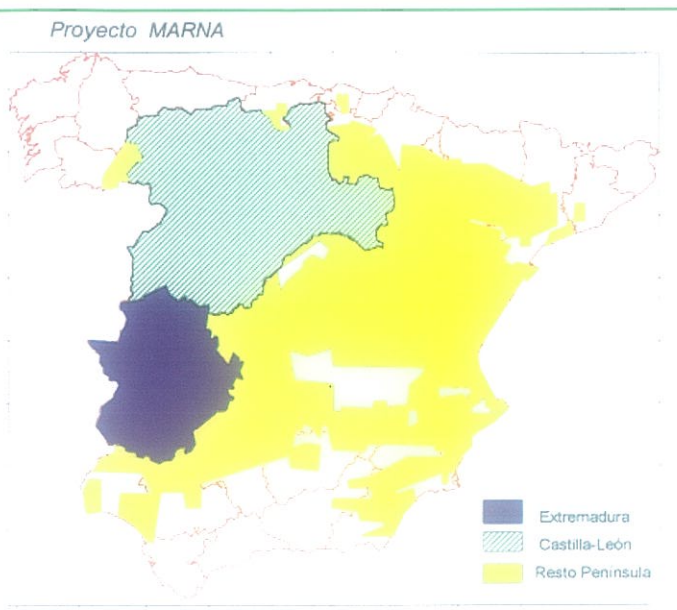
De los tres elementos antes citados el más difícil de medir es el uranio, puesto que el bismuto 214 se produce a partir del gas radón (Radón-222) que tiene una vida media de 3,5 días y escapa del suelo, pudiendo concentrarse en el aire fijándose en el polvo y aerosoles. La concentración de radón varía según las condiciones atmosféricas y sigue las leyes de difusión de los gases. Las concentraciones máximas se han medi-

do en condiciones de inversión atmosférica. Su contenido oscila entre máximos que suelen medirse a primeras horas del día, y mínimos que se miden hacia el medio día y comienzo de la tarde. La lluvia disminuye el contenido de radón del aire.

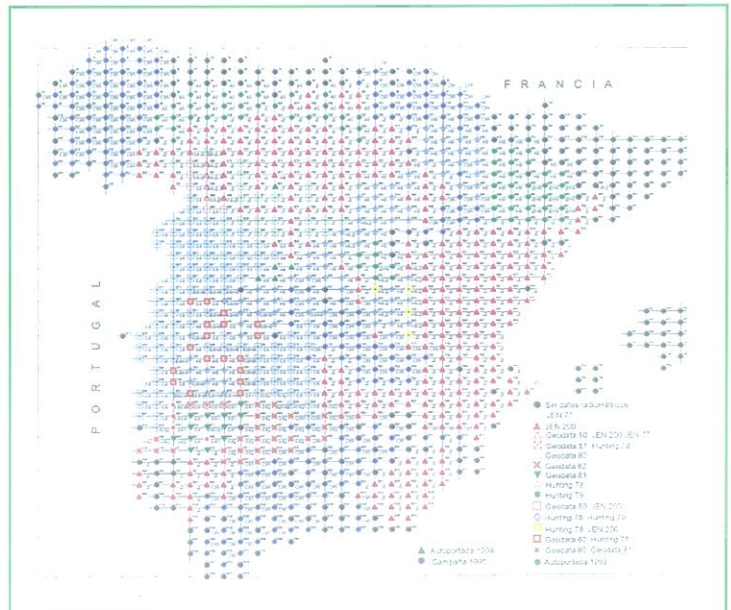
En cuanto a la radiación cósmica, la radiación cósmica primaria está integrada fundamentalmente por protones de alta energía que interaccionan con núcleos atómicos para producir radiación electromagnética y radiación cósmica secundaria. Su intensidad varía con la latitud y altura y es relativamente constante en cada lugar donde varía mas o menos un 5 % según las fases del ciclo solar. Su intensidad aproximadamente se dobla cada 2000 metros de altura y su energía es superior a 3 MeV. En nuestras latitudes la exposición debida a la radiación cósmica es de unos 4-5 μ R/h.

En los viajes comerciales en avión se

F VI - Mapa de España con cobertura aereoradiométrica



F VII - Inventario del mapa radiométrico nacional



recibe 30 veces más radiación que la recibida a nivel del suelo.

UNIDADES DE MEDIDA

La intensidad de radiación en un lugar se denomina exposición o tasa de exposición (E), midiéndose en Roentgens (R). Un Roentgen se define como la cantidad de radiación X o gamma que produce una unidad electrostática de carga de cualquier signo en un ml de aire a presión y temperatura standard. A partir de 1956 se utilizó una nueva unidad que se aplicó a cualquier forma de radiación ionizante; esta unidad se denominó dosis absorbida (A) cuya unidad fue el rad, que es la deposición de una energía de 100 ergios por gramo en un material absorbente. En las medidas de radiación ambiental se utilizaron indistintamente ambas unidades, el Roentgen y el rad, que corresponden respectivamente a la tasa de exposición y dosis absorbida en el aire. La relación entre ambas esta dada por:

$A = a E$ en la que $a = 0.869$ rad.

A efectos médicos o de la salud humana el medio absorbente que más interesa es el propio cuerpo humano y así, en 1978, O'Brien calculó el factor de conversión entre tasa de exposición y dosis al cuerpo entero medida en rads, que está dada por la fórmula $A = 0.6 E$. Como diferentes tipos de radiación causan diferentes efectos en los tejidos biológicos se definió otra unidad: el REM, que responde a las iniciales de Roentgen Equivalent Man. Un REM es la dosis producida por cualquier tipo de radiación que produzca efectos biológicos en el hombre equivalentes a un rad de rayos X. La dosis

T II Estimación de la dosis efectiva equivalente anual procedente de fuentes de radiación natural en áreas de fondo "normal"

Dosis efectiva equivalente anual (milisievert)

Fuente	Irradiación externa	Irradiación interna	Total
Radiación cósmica			
Componente ionizante	0.28		0.28
Componente neutrónica	0.02		0.02
Núclidos cosmogénicos		0.015	0.015
Núclidos primordiales			
Potasio-40	0.12	0.18	0.30
Rubidio-87		0.006	0.006
Uranio. Serie del U-238.	0.009	0.95	1.04
Torio. Serie del Th-232	0.14	0.19	0.33
Total (redondeado)	0.65	1.34	2.0

en REM es el producto de la dosis en rads por un factor de calidad que depende de la eficacia o susceptibilidad biológica relativa, RBE (Relative Biological Effectiveness) de la radiación considerada.

Hoy día a efectos de Protección Radiológica se utilizan dos unidades del Sistema Internacional: el Sievert (dosis equivalente) y el Gray (dosis absorbida).

El Sievert es la unidad de dosis equivalente correspondiente a un REM y su relación está dada por la fórmula $1 \text{ Sv} = 100 \text{ REM}$.

La *dosis equivalente* es el producto de la dosis absorbida (D) por el factor de calidad (Q) y el producto de los demás factores modificantes (N) que tienen en cuenta las características de la radiación y la distribución de los radionúclidos. Normalmente se considera $N=1$. Cuando se utiliza la palabra dosis se trata siempre de dosis equivalente.

Dosis absorbida es el coeficiente de por dm donde de es la energía media cedida por la radiación a la materia en un elemento de volumen y dm la masa de materia contenida en dicho volumen. $D = de/dm$. La unidad de dosis absorbida es el Gray.

El Gray es la unidad de dosis absorbida correspondiente al rad y es la energía comunicada por la radiación ionizante a un material correspondiente a un julio por kilogramo. La relación entre la antigua unidad de dosis absorbida (rad) y nueva unidad Gray está dada por:

$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rads} = 1 \text{ J. Kg}^{-1}$.

Los resultados del proyecto MARNA se refieren a tasa de exposición gamma y están expresados en R/h.

A partir de ellos es inmediato el cálculo de dosis absorbida y la dosis al cuerpo entero.

Las tablas II y III extraídas del ICRP-39 proporcionan información comparada de la exposición y dosis al hombre debidas a fuentes de radiación naturales.

En cuanto a la contribución de cada uno de los radioelementos naturales a la dosis a la dosis absorbida se han calculado las siguientes equivalencias:

1 % de potasio = 0.01310 micrograys/hora

1 ppm de torio en equilibrio = 0.00269 "

1 ppm de uranio en equilibrio = 0.00543 "

OBJETIVOS DEL PROYECTO MARNA

En diciembre de 1991, el Consejo de Seguridad Nuclear y la Empresa Nacional del Uranio S.A., suscribieron un Convenio para la realización del proyecto MARNA (Mapa de Radiación Natural) con los siguientes objetivos:

- Obtención de mapas de radiación gamma natural de 4 hojas del mapa topográfico nacional a escala 1/50.000, que presentaran elevado nivel de radiación natural. Las hojas seleccionadas fueron las 475, 476, 525 y 623 correspondientes a Lumbrerales, Villavieja de Yeltes, Ciudad Rodrigo y Malpartida de Plasencia.

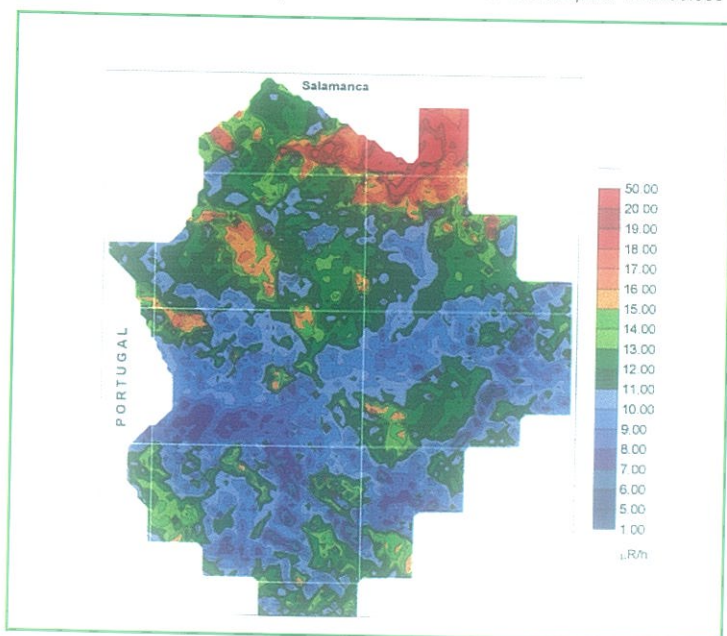
- Obtención de dos mapas a escala 1/200.000 de dos Comunidades Autónomas. Se seleccionaron Extremadura y Castilla-León. En total unos 130.000 kilómetros cuadrados.

- Obtención de un mapa de radiación natural a escala 1/1.000.000.

El proyecto técnico tenía una duración de cuatro años.

Los objetivos del proyecto eran ambiciosos y el alcanzarlos quedaba condicionado a que la estimación de la tasa

FVIII - Mapa radiométrico provisional de extremadura. Escala aprox. 1: 2.000.000



T III

Estimación de la exposición humana debida a fuentes de radiación natural

	D.M.E.E.A. (mSv)*	Fracción del total (%)	Rango de dosis **	Facilidad de control
Extraterrestre				
Exp. externa	0.3	15	medio	no***
Exp. interna	0.01	0.5	estrecho	no
Terrestre				
Exp. externa				
Outdoor	0.06	3	medio	no***
Indoor	0.29	14	amplio	si
Exp. interna				
K-40 y Rb-87	0.19	9	estrecho	no
Serie del U-238				
Inhal. outdoor	0.06	3	medio	no
Inhal. indoor	0.77	38	muy amplio	si
Ingestión	0.14	7	medio	si
Serie del Th-232				
Inhal. outdoor	0.03	1.5	desconocido	no
Inhal. indoor	0.17	9.0	amplio	no
Ingestión	0.02	1	medio	si

* D.M.E.E.A. Dosis media equivalente efectiva anual.

** *Muy amplia*, significa un factor de variación del orden de 1000 entre extremos. *Amplia*, un factor de variación del orden de 100. *Media*, del orden de 10 y *estrecha*, del orden de 5 o menor.

*** La reducción de este tipo de exposición significa movilidad geográfica. Esto puede ser posible pero frecuentemente es impracticable. Evitar nuevas situaciones causa normalmente menos dificultades.

de exposición pudiera determinarse al costo razonable previsto en el proyecto y por tanto a que pudiera utilizarse la información existente sobre radiometría aérea, y establecerse buenas correlaciones entre medidas obtenidas por diferentes equipos, así como entre medidas en tierra y en aire, puesto que la obtención de nuevos datos mediante trabajos intensivos de campo sobrepasaba claramente las previsiones económicas del proyecto y alargaba la duración del mismo.

Prácticamente el primer año de desarrollo del proyecto transcurrió con la selección del archivo de datos y el establecimiento de la metodología detallada para calcular las correlaciones entre las diferentes medidas obtenidas por distintos equipos.

BANCO DE DATOS DISPONIBLE PARA EL PROYECTO

Los datos radiométricos disponibles proceden de las campañas de exploración de yacimientos de uranio realizadas hasta 1980 por la antigua Junta de Energía Nuclear y posteriormente por ENUSA. En total comprenden información sobre más de 30 años de exploración de minerales radiactivos. Se dispone de medidas terrestres y aéreas que cubren la superficie representada en la figura VI.

Medidas terrestres. Comprenden datos procedentes de las campañas de prospección regional y general que se realizaban a mallas comprendidas entre 200 y 1000 m, y prospección detallada realizada a mallas comprendidas entre los 200 m y los 5 m, y en algunos casos menores. Las medidas corresponden a tasa de exposición y están expresados en microrentgen/hora, y en otros casos en cuentas/segundo.

Existen, además, numerosos informes de evaluación geológico-radiométrica de las zonas de anomalías y/o yacimientos. Se dispone además, de información detallada de las características de los equipos utilizados en las mediciones.

Además de estas medidas existen las correspondientes a prospecciones radiométricas autoportadas en las que los equipos de medida estaban instalados en coches todo terreno que realizaban medidas en los caminos practicables, obteniendo un registro continuo de medidas en diferentes tipos de cuentas/segundo o bien $\mu\text{R/h}$. También se dispone de información detallada de las características de los equipos utilizados en las mediciones.

Todas las medidas terrestres cubrían la banda de energía gamma comprendida entre 0,4 y 2,7 MeV que es la que se utiliza habitualmente para medir radionúclidos naturales.

Medidas aéreas. Comprenden medidas de radiación total y medidas espectrométricas.

Medidas de radiación total. Las primeras medidas aéreas se obtuvieron a partir de 1968 y concluyeron en 1975. Para su obtención se emplearon detectores de contaje total que cubrían la banda de energía gamma comprendida entre 0,4 y 2,7 MeV. Los vuelos se realizaban a altura inferior a 120 m y los registros se obtuvieron en

banda continua y se corrigieron por altura de vuelo para reducirlos a una altura patrón de 70 m. Se trata de vuelos realizados según líneas de vuelo separadas entre 600 y 1000 metros que cubrieron una superficie de unos 200.000 km. cuadrados. Las medidas están en cuentas/segundo referidas a equipos específicos, de los que se conservan sus características. Los equipos utilizados fueron los SPAT-2 y SPAT-3 de Saphimo SRAT. Existen mapas elaborados de cuentas totales y las medidas están corregidas por altura de vuelo.

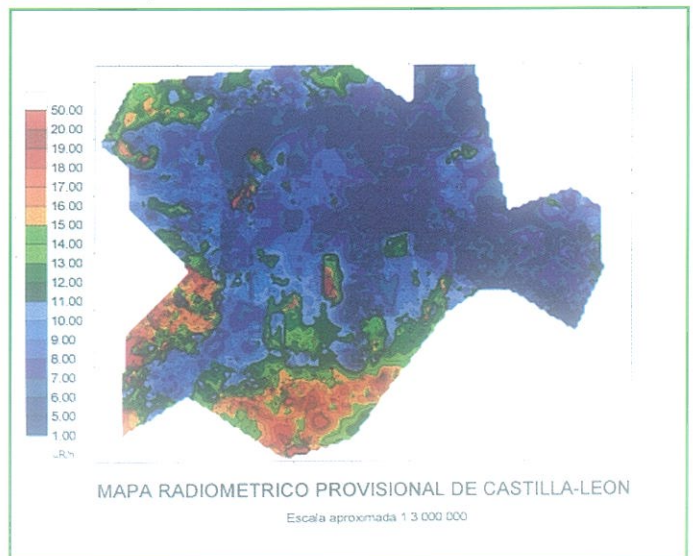
Medidas espectrométricas. Se obtuvieron a partir de 1979. Para su obtención se utilizaron espectrómetros multicanales de 256 y de 512 canales que cubrían la banda de radiación gamma de energía comprendida entre 0,4 y 2,7 MeV. Se obtuvieron medidas de radiación total representadas en cuentas por segundo: potasio equivalente (en % de potasio), torio equivalente (ppm de torio) y uranio equivalente (ppm de uranio). Las medidas están corregidas y normalizadas por altura de vuelo, fondo del sistema, radiación cósmica y contribución intercanal (dispersión por efecto Compton). Existen los correspondientes mapas a escala 1/50.000 de distribución de cada uno de los elementos. Los equipos utilizados fueron Geometrics Explorerium DiGRS y Geodata int, Lama4.

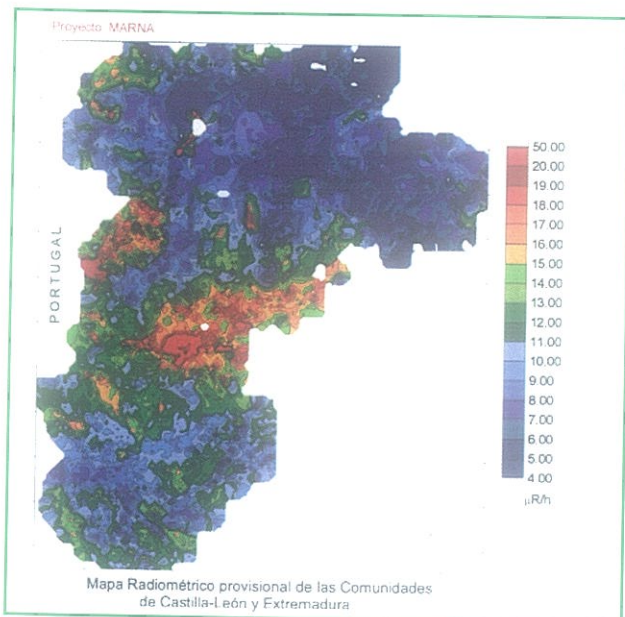
METODOLOGÍA DE TRABAJO

Los principales aspectos y problemas que ya se consideraron en el diseño del proyecto fueron:

- *La representatividad de las medidas aéreas.* Es evidente que la tasa de exposición medida en un punto sobre el suelo no coincide con la que se obtiene a 100 metros sobre el mismo puesto que la primera es puntual y en la

F IX - Mapa radiométrico provisional de Castilla-León.
Escala aprox. 1: 3.000.000





FX - Mapa radiométrico provisional de las Comunidades de Castilla-León y Extremadura (Resolución 1/16)

segunda se integra la radiación procedente de un círculo de radio dos veces la altura de vuelo. Se consideró que esta última medida es más representativa del entorno. Es decir, si una persona permaneciera inmóvil la medida terrestre sería exacta, pero como esto no sucede sino que una persona se mueve en su entorno, la medida aérea es más representativa. Por otra parte, el costo de un mapa basado en medidas puntuales era prohibitivo y requería muchas más medidas para obtener la representatividad del mapa aeroradiométrico.

- *La elección de la metodología.* Esto supuso esta disyuntiva: a) utilizar medidas de radiación total o b) partir de la información existente en los mapas a escala 1/50.000 sobre contenidos de potasio, uranio y torio producidos en la exploración aérea de minerales radiactivos. Se escogió la primera a) porque se disponía de datos de radiación total sobre aproximadamente un 75% de la superficie peninsular, procedentes unos de exploración terrestre y otros de exploración aérea, porque el coste era significativamente mas bajo, unas ocho veces inferior, y por último porque la estimación de los errores sobre radiometría total media para una superficie unitaria de un km. cuadrado era muy aceptable. La segunda b) se abandonó por varias razones: primero porque las incertidumbres derivadas de la forma de efectuar las calibraciones de los equipos en las losas de calibración no garantizaba que la información final sobre la tasa de exposición fuera mas precisa que la procedente de radiación total. El método de cálculo asume que el espectro gamma se mide bajo las condiciones de calibración. Si la distribución de los radioelementos varía mucho en las formaciones geológicas en el área "vista por el avión" pueden pro-

ducirse errores significativos en la estimación de los diferentes radioelementos.

Por otra parte, el coste del mapa de tasa de exposición obtenido mediante la segunda opción era muy elevado. Por último solamente se disponía de información con discriminación de energía sobre un 30 % de la superficie peninsular.

- *La reducción de datos:*

El número de medidas aéreas de los registros originales disponibles era de mas de 150.000 por cada hoja topográfica 1/50.000. El tratamiento de estos datos era complejo y muy costoso, por lo que se acudió a la información ya elaborada en los mapas radiométricos a escala 1/50.000 reduciendo la información a un dato por

km. cuadrado, es decir, aproximadamente unos 500 valores por cada hoja topográfica 1/50.000.

- *Correlaciones entre medidas aéreas obtenidas con diferentes equipos de medida.* Para el establecimiento de correlaciones, entre las medidas obtenidas en 1980 por Geodata (cps) y en 1978 y 1979 por Hunting (cps), se utilizaron las zonas de solape de vuelos, mereciendo destacarse la zona de Malpartida de Plasencia donde existía un solape de 250 km. cuadrados. Se extrajeron los valores coincidentes con los puntos de cruce de una malla cuadrada de 250 m de lado. Se obtuvo un coeficiente de correlación lineal de 0.7915. Al utilizar la media de nueve puntos la superficie representativa era de 0,5 km. cuadrado y el coeficiente de correlación lineal aumentó a 0.902, evidentemente válido para la cuadrícula unitaria prevista en el proyecto que era 1 km. cuadrado.

- *Correlaciones entre medidas de radiometría terrestre obtenidos por diferentes equipos.* Como equipos patrón se han utilizado aparatos ES-3 (micro-roentgen/hora) fabricados y calibrados por CIEMAT. Además se disponía de medidas de campo obtenidas por aparatos SPP-2 de Saphimo Srat y ES-4 utilizados por ENUSA y la antigua Junta de Energía Nuclear. Para establecer las correlaciones se ha utilizado el rango de variación del fondo geológico que cubre aproximadamente un intervalo comprendido entre 2 y 50 $\mu\text{R/h}$. Los coeficientes de correlación en todos los casos fueron superiores a 0.961.

- *Correlaciones entre medidas aéreas y terrestres.* Se intentó inicialmente una correlación punto a punto entre medidas aéreas y terrestres y se demostró que existía. No obstante se rechazó el procedimiento por la diferen-

te representatividad ya indicada de las medidas. Se acudió a determinar la correlación mediante "fuentes infinitas" terrestres o "mesetas" radiométricas, es decir zonas extensas de radiometría homogénea, seleccionándose diferentes zonas para cubrir todo el rango radiométrico de los fondos geológicos. En total se han tomado unos 7000 medidas terrestres alcanzándose unos coeficientes de correlación superiores a 0,92. El límite de confianza es inferior a 1 $\mu\text{R/h}$ para la radiometría media correspondiente a 1 km. cuadrado.

- *Correlaciones entre geología y radiometría.* Se han utilizado en las zonas donde existía poca información. La correlación entre formaciones geológicas y radiometría resulta evidente para cualquier prospector de minerales radiactivos. Como apoyo a la producción del mapa se han tomado medidas en unos 2000 puntos que han servido también como control de calidad de los mapas de tasa de exposición.

- *Informatización del banco de datos.*

Para la elaboración de los mapas a escala 1/200.000 se han extraído todos los datos correspondientes a la cobertura del Proyecto MARNA individualizándose la información radiométrica unitaria referente a cada hoja 1/50.000 del mapa geográfico nacional en ficheros DBASE. Se han utilizado en el control de datos y en la elaboración de los mapas los programas Symphony, StatGraf, Surviv, Golden, Rockware y metodología propia puesta a punto por el Departamento de Informática de la Universidad de Extremadura. Se han realizado controles de calidad numéricos que se han combinado con otros gráficos. De esta forma Extremadura ha quedado representada por unos 50.000 datos de tasa de exposición y Castilla-León por unos 80.000 datos, que corresponden aproximadamente a una cobertura radiométrica ya indicada de un dato por km cuadrado.

Para la elaboración del mapa a escala 1/1000.000 se ha utilizado valores radiométricos medios correspondientes a una cuadrícula de 7 por 5 km., es decir unos 16.000 datos. La representatividad ha sido muy buena en las zonas correspondientes a Extremadura y Castilla-León y buena en las zonas donde se ha dispuesto de información procedente de prospecciones aéreas y terrestres. En las zonas donde no se disponía de medidas se ha realizado una estimación por extrapolación geológica.

Todos los datos referentes a coordenadas geográficas se han normalizado a coordenadas UTM y los datos radiométricos a tasa de exposición en $\mu\text{R/h}$ en una base de datos generalizada. Por otra parte en las zonas carentes de cobertura radiométrica adecuada se han asignado valores teniendo en cuenta la geología de la

zona, la radiometría de formaciones geológicas similares y las medidas específicas realizadas durante la ejecución del proyecto para establecer las correlaciones entre geología y radiometría. Todos ellos figuran en una base de datos adicional.

Alguno de los problemas más importantes resuelto durante el último año de ejecución del proyecto han sido: el paso o conversión de los datos originales de posición geográfica a coordenadas geográficas UTM referidas al huso 30; la elaboración de mapas provinciales, autonómicos y peninsular (en conjunto y por separado) referidos también a coordenadas UTM del Huso 30 y por último la integración de la información radiométrica de cualquier zona o zonas geográficas en conjunto y por separado. Para resolver este problema se ha contado con la ayuda fundamental de D. Jesús Alegría del Área de Emplazamientos del CSN.

Las figuras VIII, IX, X y XI muestran a escala reducida los mapas de radiación gamma natural de la Comunidad de Extremadura, de Castilla-León, de ambas Comunidades y el mapa de la España peninsular.

BANCO DE DATOS GENERADO DURANTE EL DESARROLLO DEL PROYECTO

Comprende los nuevos datos que ha sido necesario obtener para poder realizar los mapas a escala 1/50.000, 1/200.000 y 1/1.000.000 previstos en el desarrollo del proyecto. Puede resumirse en los siguientes:

- datos originales de radiometría aérea total extraídos de los mapas a escala 1/50.000.
- datos utilizados para el establecimiento de correlaciones entre medidas aéreas obtenidas por diferentes equipos.
- mapas de radiometría aérea normalizada.
- datos originales de radiometría terrestre obtenidos por diferentes equipos.
- datos utilizados para el establecimiento de correlaciones entre medidas de radiometría terrestre obtenidos por diferentes equipos.
- extracción de datos ya existentes para el establecimiento de correlaciones entre medidas aéreas y terrestres.
- toma de datos para el establecimiento de correlaciones entre radiometría y geología.
- nuevas medidas obtenidas mediante prospección terrestre para cubrir zonas menores donde no existía una red suficiente de datos.
- nuevas medidas obtenidas mediante prospección autoportada de zonas de blancos radiométricos mayores (algo mas de 4.000 km. lineales)
- toma de datos sobre el terreno para

el establecimiento de correlaciones entre medidas aéreas y terrestres. Unos 7.000 datos.

PARTICIPACIÓN UNIVERSITARIA

Mediante acuerdos específicos participan en el desarrollo del Proyecto MARNA profesores y miembros de los Departamentos de: Física de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Extremadura dirigidos por el Profesor D. Antonio Baeza; Informática de la Universidad Politécnica dirigidos por el Profesor D. José Moreno del Pozo y de Geología de la Universidad de Salamanca dirigidos por la Profesora D^a María Candelas Moro. La colaboración con el Departamento de Física de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Extremadura dio lugar a la publicación del informe "Determinación de la tasa de exposición recibida por irradiación externa. Consideraciones geológicas en la optimización de esquemas de muestreo" en el que se evalúa la irradiación externa mediante dos técnicas diferentes: la utilizada en el Proyecto MARNA y la utilizada a partir de los emisores y presentes en el suelo en una zona de 20.000 km. cuadrados con una geología complicada. Los resultados obtenidos han permitido validar ambas técnicas y establecer criterios que, utilizando la geología como parámetro, permiten optimizar futuras campañas de muestreo al poderse determinar a priori el número de puntos a considerar y la localización mas adecuada de los mismos.

PARTICIPACIÓN EN REUNIONES DE COMITES TÉCNICOS DEL OIEA

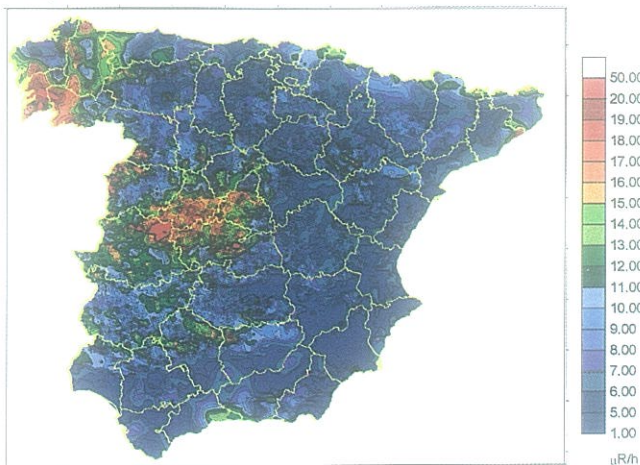
Se ha participado en tres reuniones de Comités Técnicos del OIEA en donde se ha informado sobre la metodología aplicada en el desarrollo del Proyecto MARNA. En total se han presentado cuatro informes que se refieren a empleo de los datos de prospección aérea en la preparación del mapa de radiación gamma natural de España.

COLABORACIÓN HISPANO PORTUGUESA

Se han mantenido reuniones con las autoridades portuguesas dentro del marco establecido en el "Protocolo Hispano-Portugués sobre cooperación

F XI

Proyecto MARNA



MAPA DE RADIACION NATURAL PROVISIONAL DE ESPAÑA

en el dominio de la Seguridad Nuclear" concretamente con la Direcção Geral do Ambiente y del Instituto Geológico e Mineiro, organismos responsables de la realización del mapa de radiación natural de Portugal. Las reuniones han tenido como objeto intercambiar información sobre la metodología utilizada, el intercambio de datos fronterizos y el asegurar que los datos sean coherentes a ambos lados de la frontera.

La base de datos portuguesa comprende fundamentalmente medidas en c/s que fueron obtenidas mediante prospección autoportada durante los años 50 y 60. Estos datos han servido para la elaboración de mapas de tasa de exposición en µR/h. También en algunas zonas donde disponían de medidas espectrométricas de prospección aérea han calculado la tasa de exposición a partir de las medidas de contenido equivalente de potasio, torio y uranio. Para el trazado de isonivelas han utilizado el programa SURVIEW puesto a punto por el Geological Survey canadiense.

Existe un mecanismo de intercambio de datos y hasta el momento no se han observado discrepancias significativas.

EL PROYECTO MARNA-2

En fecha 4-12-1995 se suscribió un nuevo contrato entre el CSN y ENUSA para la realización del Proyecto MARNA-2. El proyecto es una continuación del Proyecto MARNA con las siguientes características básicas: Duración de dos años.

Objetivos: 1º/ Extensión del Mapa de Radiación Natural a escala 1/200.000 en áreas exteriores a las comunidades de Extremadura y Castilla-León según indica la figura XII.

2º Actualización del mapa radiométrico nacional a escala 1/1.000.000 en función de los nuevos datos generados.

3º Actualización de los mapas producidos a escala 1/200.000 en función de los nuevos datos generados.

4º Ampliación de las bases informatizadas de datos que hayan servido de base para la obtención de los mapas a escala 1/200.000 y 1/1.000.000.

APLICACIONES DEL PROYECTO MARNA

El Proyecto MARNA es un proyecto de investigación a escala nacional de la intensidad de la radiación gamma natural cuyo alcance es coherente con los que tienen otros mapas nacionales p.e: mapa geológico, mapa de peligrosidad sísmica, mapa de suelos, mapa tectónico, etc, es decir es un documento básico de partida. Es como una "fotografía" de la intensidad de la radiación natural que tiene aplicaciones inmediatas como por ejemplo:

- Utilización en estudios epidemiológicos para conocer los efectos de bajas dosis de radiación recibidas durante un largo tiempo.
- Evaluación y control de cualquier incremento de la radiación debida a causas naturales o no naturales.
- Optimización de la selección del emplazamiento de equipos de medida de radiación.
- Evaluación de la representatividad de otros métodos de medida de la radiación.

OTRAS APLICACIONES DEL PROYECTO MARNA

Otra de las posibles aplicaciones del proyecto MARNA es la utilización de los mapas de tasa de exposición producidos para elaborar un mapa de distribución de radón. La metodología para estimar el contenido de radón ha sido puesta a punto por los canadienses partiendo de los contenidos de potasio 40, torio natural y uranio natural en el suelo medidos mediante espectrometría gamma aeroportada.

P. Cui en 1990, utilizando datos espectrométricos obtenidos mediante prospección aérea, en 1990, al estudiar la zona de Salt Lake, Utah. EE.UU indica que la concentración de radón que se incorpora al aire puede calcularse asumiendo que las unidades geológicas presentan uranio homogéneamente distribuido y que la concentración de radón que se incorpora a la atmósfera puede estimarse mediante la fórmula:

$$Q = Q(Ra) \rho \alpha \lambda(Rn) \cdot D/\eta = 3,4 \cdot 10^{-7} \cdot Q(U) \cdot \rho \alpha \lambda \cdot Rn \cdot D/\eta$$

En la que :

Q (Rn) = concentración de radón en la unidad geológica en Ci/cm³

Q (Ra) = concentración de radio en la unidad geológica expresado en g/g

Q (U) = concentración de uranio en la unidad geológica expresado en g/g.

ρ = densidad de la roca en g/cm³.

α = coeficiente de emanación.

$\lambda(Rn)$ = Constante de desintegración del radón en s⁻¹

D = Coeficiente de difusión en cm²/s.

η = porosidad de la roca

El equipo técnico del Proyecto MARNA tiene previsto realizar un estudio piloto sobre dos hojas a escala 1/50.000 sobre las que exista información geológica suficiente y se disponga de mediciones reales del contenido de radón en el aire aplicando las metodología descritas por los canadienses y por L.P. Cui.

En principio una de las hojas piloto se realizaría en la Comunidad de Extremadura y otra en la de Salamanca donde se dispone de buena información. Se partiría de los mapas de contenidos en potasio-40 (%), torio (ppm) y uranio (ppm) obtenidos a partir de medidas aéreas. Al mismo tiempo se realizaría una estimación del contenido de radón a partir de mapas de tasa de exposición ($\mu R/h$) partiendo de la hipótesis de que potasio y torio se presentan en el suelo según los contenidos medios correspondientes al medio geológico en que se encuentran, y que el resto de la radiación corresponde al uranio y realizándose una estimación del error cometido en las medidas obtenidas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo, directores técnicos del proyecto MARNA por parte del CSN y de ENUSA expresan su agradecimiento a todos aquellos que de una forma u otra han hecho posible la realización del Proyecto MARNA y especialmente a:

• *Junta de Energía Nuclear*

A todos los componentes de la División de Exploración de Uranio de la antigua Junta de Energía Nuclear que con su buen hacer han permitido que existan hoy datos de un valor inestimable.

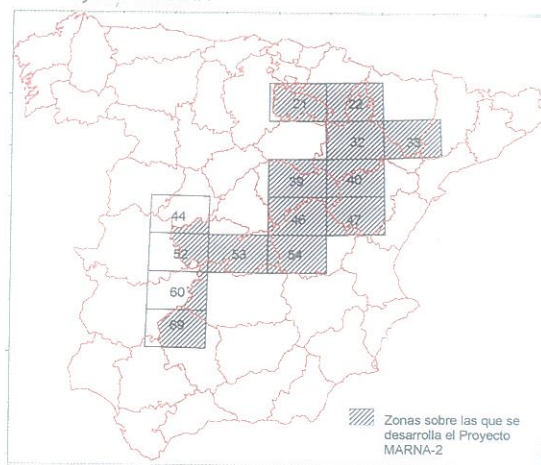
A D. Javier Cerrajero, Ingeniero de minas y D. Alfredo Crego, Químico, componentes del equipo de Prospección aérea de la antigua Junta de Energía Nuclear así como a D. Francisco de Pedro, Químico, que introdujo las técnicas de prospección aérea en España.

• *Consejo de Seguridad Nuclear*

D. Jesús Alegría Alonso, Físico y D. Enrique Velázquez, Físico.

F XII

Proyecto MARNA



DISTRIBUCION DE HOJAS 1:200.000

• *Empresa Nacional del Uranio, S.A.*

A todos los componentes de la División de Exploración de Uranio que con su buen hacer han permitido que existan hoy datos de un valor inestimable. Además participaron en el Proyecto MARNA:

D. Joaquín Botas, Ingeniero de Minas, D. José María Josa García, Doctor en Química, D. Teófilo Concha Sánchez, Ingeniero de Minas, D. Francisco Marín Blanco, Ingeniero de Minas, D. Mariano Durán Cabello, D. Pedro Garrido Ancos, D. Adolfo Domínguez Vega, D. Aitor Quintana y D^a Olga Gutiérrez Fernández.

• *Universidad de Extremadura.*

Departamento de Física. Profesores: D. Antonio Baeza, D. C. Miró, M. del Río y D. J.M. Paniagua.

Departamento de Informática. Profesores: D. José Moreno del Pozo, D. Manuel Cabello Requena y D. Tomás Berjoyo.

• *Universidad de Salamanca*

Departamento de Geología. Profesores: D^a María Candelas Moro Benito, D^a María Luisa Cembranos, D. Andrés García Luis y D^a Agustina Fernández Fernández.

Además: D. Vicente Alfageme, D. Jesús Cordero Zarza, D. Jesús Cruz Jiménez, D. Roberto Javier García Gil, D^a Margarita Gil Acero, D. Miguel Ángel Herrero González, D. José María Montero Gómez y D^a Elena Sánchez, D. Jesús Sánchez Sánchez y D^a María Susana Timón Sánchez.

• *Escuela Universitaria Politécnica de Mérida*

Topografía. Profesores: D^a María Eugenia Polo García y D. José Antonio Gutiérrez Gallego.

Todos ellos han participado de una forma u otra en la ejecución del Proyecto MARNA