

Capítulo 6

Discusión y conclusiones

Las conclusiones alcanzadas con el desarrollo de esta tesis se enumeran a continuación.

■ Estación ESCRA

- Se ha explotado la estación ESCRA ubicada en el Campus Nord de la *Universitat Politècnica de Catalunya* para obtener medidas experimentales de diversas variables meteorológicas y radiológicas.
- Las variables meteorológicas registradas en la estación ESCRA consisten en la temperatura ambiental, la humedad relativa, la presión atmosférica, la dirección y velocidad del viento, la radiación solar y la intensidad de lluvia.
- Las variables radiológicas registradas en la estación ESCRA consisten en la tasa de dosis ambiental (se ha empleado una cámara de ionización, un contador proporcional, y un conjunto de dosímetros de termoluminiscencia), la concentración de radón ambiental, la concentración de emisores alfa y beta artificiales en el aire, y la concentración de descendientes del radón en el agua de lluvia.
- Se han explotado los datos registrados con la estación ESCRA durante un periodo de cinco años (1995-1999).

■ Equipo SARAC

- Se ha diseñado, construido y puesto en funcionamiento un equipo, denominado equipo SARAC, para la medida *in situ* y en continuo de la concentración de radionucleidos de vida corta emisores de radiación gamma que se encuentran presentes en el agua de lluvia.
- El equipo SARAC es de gran utilidad como dispositivo de vigilancia de la presencia, en el agua de lluvia, de radionucleidos emisores de radiación gamma de vida corta, ya que es capaz de suministrar información referente al contenido radiactivo del agua de lluvia a intervalos de 10 minutos.
- El sistema de espectrometría gamma empleado por el equipo SARAC está basado en un detector de semiconductor de germanio intrínseco de alta pureza que mejora la resolución del espectro frente a otros sistemas existentes que utilizan detectores de centelleo (NaI). Ello permite discriminar gran cantidad de radionucleidos emisores gamma cuyas de transiciones se encuentran entre los 80 keV y los 2.5 MeV.
- El equipo SARAC se encuentra instalado en la estación ESCRA y se ha utilizado para la determinación de la concentración de los descendientes del radón ^{214}Bi y ^{214}Pb presentes en el agua de lluvia durante varios episodios de precipitación ocurridos durante el año 1999.
- Durante el periodo de operación del equipo SARAC no se observaron radionucleidos de origen artificial.

■ Simulación Monte Carlo

- Durante el desarrollo de esta tesis ha sido necesario recurrir al empleo de técnicas de Monte Carlo para la simulación del transporte de la radiación en aquellas situaciones en las que el cálculo analítico era prácticamente imposible dada la complejidad de la geometría de la fuente de radiación y otras estructuras. Dichas

técnicas se han aplicado para la optimización del diseño del equipo SARAC y para la determinación de factores de dosis en varias posiciones de la torre meteorológica de la estación ESCRA.

- La optimización del diseño del equipo SARAC ha consistido en determinar las dimensiones del recipiente de recuento (recipiente donde se ubica el agua de lluvia durante el proceso de recuento de la radiación gamma) que maximizan la eficiencia de detección del conjunto formado por el detector de germanio y dicho recipiente.
- Uno de los parámetros de interés para caracterizar radiológicamente un emplazamiento consiste en determinar el factor de dosis que relaciona la tasa de dosis medida en un punto con la concentración de radionucleidos en el terreno que lo rodea. En general la determinación analítica de este parámetro es de gran dificultad dada la complejidad geométrica de cada emplazamiento y en especial la estación ESCRA que esta ubicada en un entorno urbano con diversos edificios a su alrededor. Por este motivo ha sido necesario recurrir a técnicas de simulación Monte Carlo que permitan modelizar el transporte de la radiación desde la fuente de radiación (suelo) hasta el punto de medida (torre). Se han aplicado técnicas de reducción de varianza para reducir el tiempo de simulación e incrementar la precisión de los resultados. Estas técnicas se han basado en la aplicación del método de *detección forzada* lo que he reducido sensiblemente el tiempo de simulación.
- Para realizar las simulaciones ha sido necesario parametrizar geoméricamente el entorno de la estación ESCRA. Este trabajo será de gran utilidad para posteriores estudios, ya que permite determinar otras magnitudes con pequeñas modificaciones en el código fuente empleado en la simulación.
- Se ha determinado un conjunto de 22 funciones polinómicas de tercer grado que relacionan el factor de dosis en función del logaritmo decimal de la posición en la torre meteorológica para alturas comprendidas entre 50 cm y 300 cm, para partículas gamma cuya energía sea 30 keV, 50 keV, 100 keV y los siguientes múltiplos de 100 keV hasta 2000 keV. También se ha determinado un total de 6 funciones polinómicas de tercer grado (una función para cada posición: 50 cm, 100 cm, 150 cm, 200 cm, 250 cm, 300 cm) que relacionan el factor de dosis con la energía de la radiación gamma (entre 30 keV y 2000 keV).
- Mediante las funciones anteriormente señaladas se ha determinado el factor de dosis correspondiente a diversos radionucleidos que pudiesen depositarse en el terreno por acción de la lluvia. Se ha determinado una función polinómica de tercer grado que relaciona el factor de dosis de cada radionucleido con el logaritmo decimal de la posición en la torre meteorológica. Se ha calculado el factor de dosis para los descendientes del radón emisores gamma de vida corta ^{214}Bi y ^{214}Pb , y además se ha determinado el factor de dosis para otros radionucleidos de origen artificial que pudieran encontrarse en el agua de lluvia en caso de una emisión radiactiva accidental. Estos radionucleidos son el ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I y ^{132}I .
- El método de simulación presentado permite determinar el factor de dosis para cualquier radionucleido emisor gamma cuyas transiciones radiactivas esten comprendidas entre 30 keV y 2000 keV.
- El conocimiento de los factores de dosis para diversos radionucleidos junto a las medidas registradas con el equipo SARAC aporta información valiosa para discriminar si los incrementos de dosis ambiental observados han sido causados por la deposición de radionucleidos de origen natural o artificial en el terreno.

▪ Caracterización meteorológica y radiológica del emplazamiento

- Se ha realizado un análisis meteorológico del emplazamiento de la estación ESCRA con el fin de caracterizar las condiciones meteorológicas. Para el periodo comprendido entre el año 1995 y el año 1999 se han determinado los valores medios, máximos y mínimos de diversas variables meteorológicas como son la temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, intensidad de lluvia, radiación solar, y dirección y velocidad del viento.
- De los resultados obtenidos se comprueba que durante los cinco años analizados el comportamiento de las diversas variables meteorológicas ha sido bastante estable. Por lo que respecta a la pluviometría se ha observado que los episodios de precipitación son escasos estando siendo más frecuentes durante los meses de primavera y otoño (especialmente en septiembre).
- En lo que respecta al régimen de direcciones y velocidades del viento se ha comprobado corresponde a la de un emplazamiento costero con las típicas brisas marinas en las que por la mañana el viento sopla de mar a tierra y al ponerse el sol se invierte la dirección del viento soplando de tierra a mar.
- Se ha realizado un análisis radiológico del emplazamiento caracterizando las tasas de dosis medias y sus posibles oscilaciones registradas durante diversos intervalos de tiempo comprendidos entre el año 1995 y el año 1999 en función de la sonda. Ello ha permitido observar, entre otras cosas, que la cámara de ionización registra, de forma sistemática, una tasa de dosis media que es del orden de 70 nGy/h mientras que la tasa de dosis media registrada por el contador proporcional es de unos 100 nGy/h. Estos resultados hacen patente la distinta respuesta frente a la radiación cósmica y terrestre de ambas sondas y dosímetros de termoluminiscencia.
- También se han empleado sistemas pasivos para la medida de la dosis ambiental. Se ha observado que la dosis media registrada por el dosímetro TL más alejado del suelo ($\bar{D}_{TLD1}=72$ nGy/h) es inferior a la registrada por el dosímetro que se encuentra más cerca del suelo ($\bar{D}_{TLD2}=82$ nGy/h). La diferencia entre ambas posiciones es en término medio de un 14 %, valor que coincide con la diferencia observada en los factores de dosis obtenidos por simulación MC para dichas posiciones que oscilan entre un 12 % y un 14 %.

▪ Concentración del radón en la atmósfera

- En lo que se refiere al radón atmosférico se han realizado dos estudios. Por un lado se ha analizado la variación de la concentración de radón en función de la dirección y velocidad del viento y por otro se ha analizado su variación temporal en función de la hora del día.
- Para velocidades del viento superiores a 1 m/s se ha observado que la concentración del radón atmosférico depende de la procedencia del viento siendo mayor para vientos procedentes de tierra. Este resultado es lógico si tenemos en cuenta que para vientos moderados o elevados el radón que existe en un emplazamiento proviene de otras áreas geográficas al ser arrastrado por las masas de aire en movimiento.
- Se ha analizado la evolución temporal y estacional de la concentración de radón atmosférico. Para un periodo de tiempo de 5 años (entre 1995 y 1999) se ha observado que existe una notable diferencia entre la concentración de radón durante periodos diurnos y durante periodos nocturnos.

- El fenómeno descrito anteriormente y que se ha observado en la estación ESCRA se atribuye a la dependencia de la estabilidad atmosférica con la insolación. Durante la noche acostumbran a aparecer inversiones térmicas que favorecen la acumulación de radón en las capas más bajas de la atmósfera. Cuando el sol aparece se calienta el suelo y las corrientes convectivas rompen la capa de inversión favoreciéndose el incremento de la altura de la capa mezcla con lo que la concentración de radón disminuye.
- Durante los meses más calurosos (verano), en los que la radiación solar es más intensa y aparecen mayores diferencias de temperatura entre el día y la noche, la diferencia entre la concentración nocturna y diurna es más clara. En cambio durante los meses de invierno se observa poca diferencia entre el día y la noche.

■ Descendientes del radón en la lluvia

- Se ha utilizado el equipo SARAC para medir la concentración de descendientes del radón en la lluvia durante el año 1999. Los resultados obtenidos indican unos valores máximos de la concentración de descendientes del radón del orden de 1500 Bq/l para el ^{214}Bi y 400 Bq/l para el ^{214}Pb . En lo que se refiere a la concentración mínima se ha observado que es de 89 Bq/l para el ^{214}Bi y de 15 Bq/l para el ^{214}Pb .
- Se ha observado que la concentración de descendientes del radón no es constante durante un episodio de lluvia. En general al inicio y final del episodio de lluvia la concentración es inferior al valor medio de todo el episodio.
- También se ha comprobado que la concentración de descendientes en la lluvia es independiente de la intensidad de la misma y de su duración.
- Existe cierta dependencia entre la concentración de descendientes del radón y la procedencia de las nubes. Empleando secuencia de fotografías aéreas suministradas por la *National Oceanographic and Atmospheric Administration* (NOAA) y el satélite meteosat, junto con los mapas isobáricos se ha comprobado que cuando las nubes provienen o se forman sobre el Mediterráneo, la concentración de descendientes es inferior que cuando las nubes se forman sobre el terreno o atraviesan grandes zonas no cubiertas por el mar.

■ Modelización de la tasa de dosis ambiental

- Se ha modelizado la tasa de dosis ambiental en periodos secos (ausencia de lluvia) y en periodos húmedos (presencia de lluvia). Ambos modelos permiten reproducir las oscilaciones temporales de la tasa de dosis a partir de variables meteorológicas y radiológicas.
- Por lo que respecta a los periodos secos, se ha reproducido la tasa de dosis registrada con una cámara de ionización (sonda Reuter-Stokes) y la registrada con un contador proporcional (sonda FAG FHZ601A).
- Se ha comprobado que la tasa de dosis depositada en un punto durante los periodos secos es debida a tres términos. Un término constante que representa la tasa de dosis generada por los radionucleidos presentes en el terreno, cuya variación temporal es prácticamente nula; un segundo término que representa la tasa de dosis debida a la radiación cósmica y cuya variación que depende de la presión atmosférica; y un tercer término que es directamente proporcional a la concentración de radón ambiental.

- A partir de los datos registrados entre los años 1995 y 1998, para cada mes del año se ha obtenido un conjunto de tres parámetros, D'_{s0} , a'_c y a'_r , que corresponden a la componente terrestre, componente cósmica y componente de concentración de radón respectivamente.
- Los parámetros anteriormente mencionados se pueden utilizar para modelizar la tasa de dosis natural en periodos secos en cualquier mes de cualquier año anterior a 1995 o posterior a 1998.
- Se ha modelizado la tasa de dosis ambiental registrada con la sonda FAG FHZ601A durante el año 1999, con un gran grado de ajuste.
- Una de las aportaciones más significativas de este trabajo consiste en la modelización de la tasa de dosis durante episodios de lluvia. Para ello se ha desarrollado un modelo que reproduce la evolución de los descendientes del radón emisores gamma en el terreno una vez han sido depositados por la lluvia. Posteriormente, utilizando los factores de dosis del ^{214}Pb y ^{214}Bi , calculados mediante simulación MC, se calcula la tasa de dosis en un punto de la torre meteorológica.
- La disponibilidad del equipo SARAC ha sido de vital importancia para poder obtener unos resultados aceptables ya que ha suministrado la concentración de los descendientes del radón en el agua.
- Debido a las características del terreno de la estación ESCRA y su entorno, constituido por superficies enlosadas, el agua de lluvia que no se estanca es evacuada por un sistema de desagües. De esta forma se ha introducido en el modelo un factor denominado factor de escape, Q_j , (para $j=\text{Pb-214}$, Bi-214) que reproduce la tasa de desaparición de agua por desagües y otras vías de evacuación. La determinación de este factor es muy compleja y en general deberá ser obtenido de forma experimental.
- Se ha observado que el factor Q_j depende de la intensidad de lluvia, siendo $Q_j = 0$ para intensidades de lluvia bajas o moderadas —valores inferiores a $30 \text{ l}/(\text{m}^2\text{h})$ —. Durante el periodo de tiempo analizado (año 1999) sólo se registró un episodio con lluvias torrenciales con una intensidad de lluvia máxima de $130 \text{ l}/(\text{m}^2\text{h})$. En esta ocasión se ha observado que el factor Q_j es distinto de la unidad, siendo $Q_{\text{Bi-214}} = 30 \text{ Bq}/(\text{m}^2\text{s})$ para el ^{214}Bi y de $Q_{\text{Pb-214}} = 10 \text{ Bq}/(\text{m}^2\text{s})$ para el ^{214}Pb .
- La falta de un número de episodios de lluvia de características lo suficientemente variadas ha impedido determinar la relación que existe entre el factor de evacuación, Q_j , y la intensidad de lluvia. Esta tarea consistirá en uno de los temas que se deberán desarrollar en el futuro como continuación a esta tesis.
- La importancia de la modelización de la tasa de dosis de origen natural en periodos secos y húmedos presentada en esta tesis consiste en que permite discriminar, en continuo, los fenómenos naturales que contribuyen a incrementos de dosis frente a posibles fenómenos de origen artificial.

▪ Aplicación a redes de vigilancia ambiental

- De lo expuesto anteriormente se deduce que cada emplazamiento para el que se desee modelizar la tasa de dosis debería ser caracterizado de forma adecuada para determinar los factores del modelo que le corresponden.
- Esta caracterización implica la determinación de los factores de dosis mediante técnicas de MC. Es decir, parametrizar el entorno del punto de medida y realizar las simulaciones oportunas hasta tener caracterizadas las posiciones de las sondas.
- Por otro lado sería necesario realizar medidas durante un periodo no inferior a un año de la presión atmosférica, intensidad de lluvia, y concentración de radón. Con los datos registrados se determinarán los parámetros D'_{s0} , a'_c , y a'_r para periodos secos.
- Además podría registrarse la concentración de descendientes del radón en el agua de lluvia si se dispone de un dispositivo similar al equipo SARAC. Con los datos obtenidos se intentará determinar la relación entre el factor Q_j y la intensidad de lluvia.
- Una vez el modelo está parametrizado se podrá proceder a la explotación de la estación registrándose en continuo la tasa de dosis, la presión atmosférica, la concentración de radón y la concentración de descendientes del radon en el agua de lluvia.

