

Capítulo 5

Resultados

5.1. Análisis meteorológico del emplazamiento utilizado. Estación ESCRA

5.1.1. Introducción

En este apartado se presentan los valores medios de las diversas variables meteorológicas registradas en la Estación ESCRA durante un periodo comprendido entre el 1 de enero del año 1995 y hasta el 31 de diciembre de año 1999. Dichas variables han sido registradas con los equipos meteorológicos descritos en el apartado 3.1.2. En los subapartados siguientes se encuentran tabulados los valores máximos, mínimos y medios de las diversas variables. Además se han representado gráficamente los valores en las figuras correspondientes.

5.1.2. Variables meteorológicas

Temperatura ambiental

En la tabla 5.1 se presentan los valores máximo, mínimo y medio de las temperaturas registradas en la estación ESCRA durante el periodo comprendido entre el mes de enero del año 1995 hasta el mes de diciembre del año 1999. La temperatura mínima registrada en la estación ESCRA fué de $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el mes de Febrero del año 1996, y la temperatura máxima fué de $33.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se registró el mes de Julio del año 1996. Las temperaturas medias calculadas para el periodo de 5 años indican que se trata de un clima templado y con oscilaciones suaves, ya que la temperatura media varía entre $10.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ el mes de Enero y $25.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ el mes de Julio.

Además, en la figura 5.1 se presenta la evolución temporal de la temperatura media diaria durante el año 1995 hasta el año 1999 ambos incluidos.

Periodo Años 1995-99	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)		
	Máxima	Mínima	Media
Enero	20.7	1.3	10.7
Febrero	22.7	-0.3	12.9
Marzo	23.8	4.8	11.9
Abril	24.5	5.5	14.3
Mayo	27.7	6.9	17.5
Junio	31.1	12.0	20.3
Julio	33.5	14.9	25.2
Agosto	32.6	15.4	24.4
Septiembre	31.2	12.1	20.2
Octubre	32.0	9.4	19.4
Noviembre	23.8	0.6	14.7
Diciembre	20.5	3.1	12.2

Cuadro 5.1: Temperaturas mensuales máximas, mínimas y medias correspondientes a los años 1995, 1996, 1997, 1998 y 1999.

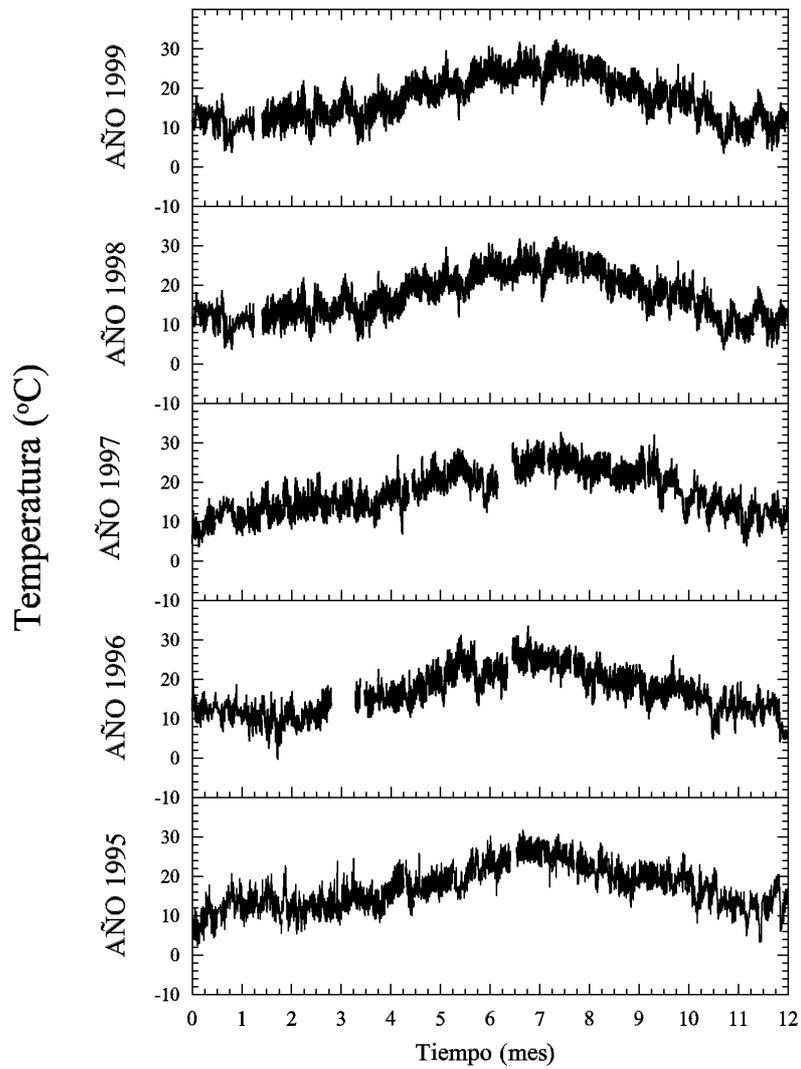


Figura 5.1: Evolución de la temperatura ambiental media diaria en la estación ESCRA durante los años 1995, 1996, 1997, 1998 y 1999.

Humedad relativa

En la tabla 5.2 se presentan los valores máximo, mínimo y medio de la humedad relativa registrada en la estación ESCRA durante el periodo comprendido entre el mes de enero del año 1995 hasta el mes de diciembre del año 1999. SE observa en dicha tabla que la humedad relativa máxima es constante los 12 meses del año, manteniéndose cerca del 99 %. En lo que respecta a la humedad relativa mínima, también es bastante constante los doce meses del año y se mantiene el 28 % y el 17 %. La humedad relativa media es del orden de un 65-70 % durante todos los meses del año, excepto el mes de octubre que sube hasta un 80 %.

En la figura 5.2 se presenta la evolución temporal de la humedad relativa media diaria durante el año 1995 hasta el año 1999 ambos incluidos.

Periodo Años 1995-99	Humedad relativa (%)		
	Máxima	Mínima	Media
Enero	98.9	28.4	55.9
Febrero	98.8	17.3	64.3
Marzo	98.9	24.8	66.7
Abril	98.9	24.4	67.9
Mayo	98.9	24.4	69.0
Junio	99.0	23.8	69.0
Julio	99.1	27.2	68.0
Agosto	99.1	21.2	70.7
Septiembre	99.1	23.14	67.7
Octubre	99.0	17.3	80.9
Noviembre	98.9	21.9	70.2
Diciembre	98.8	24.7	73.1

Cuadro 5.2: Humedad relativa mensual máxima, mínima y media correspondiente a los años 1995, 1996, 1997, 1998 y 1999.

Presión atmosférica

En la tabla 5.3 se presentan los valores máximo, mínimo y medio de la presión atmosférica registrada en la estación ESCRA durante el periodo comprendido entre el mes de enero del año 1995 hasta el mes de diciembre del año 1999. Se observa en dicha tabla que la presión atmosférica máxima oscila entre 1010 hPa y 1024 hPa. En lo que respecta a los valores mínimos oscila entre 977 hPa y 991 hPa.

En la figura 5.3 se presenta la evolución temporal de la presión atmosférica media diaria durante el año 1995 hasta el año 1999 ambos incluidos.

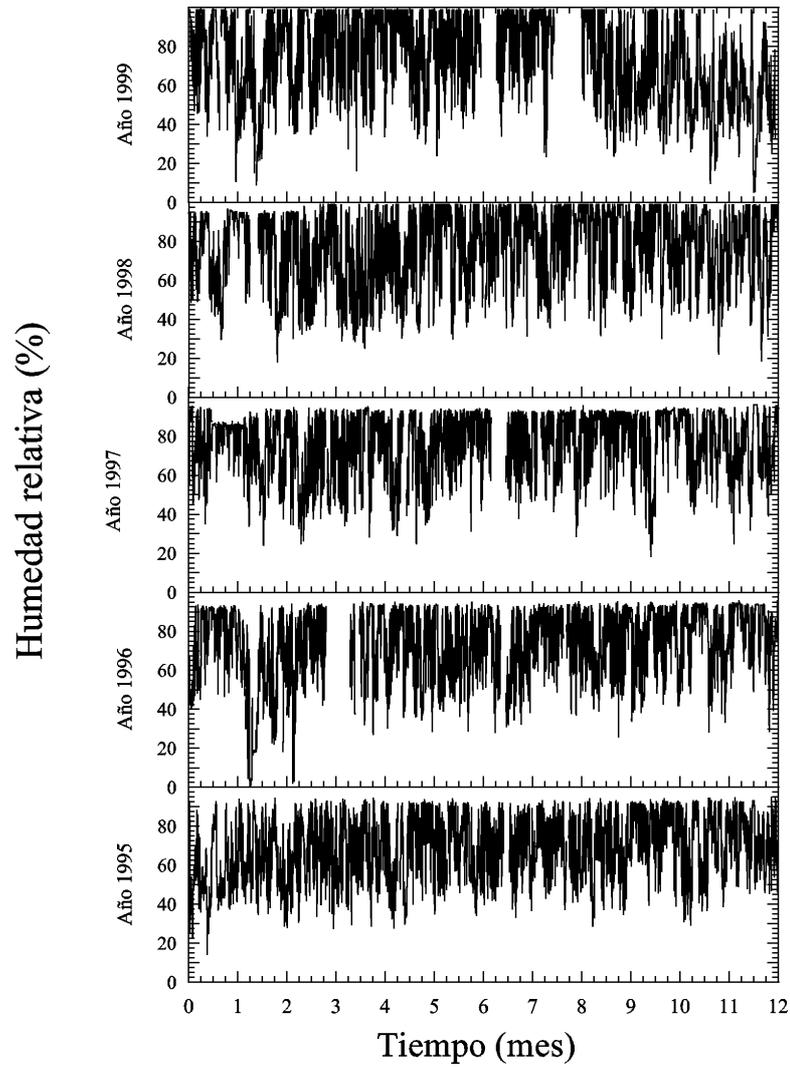


Figura 5.2: Evolución de la humedad relativa media diaria en la estación ESCRA durante los años 1995, 1996, 1997, 1998 y 1999.

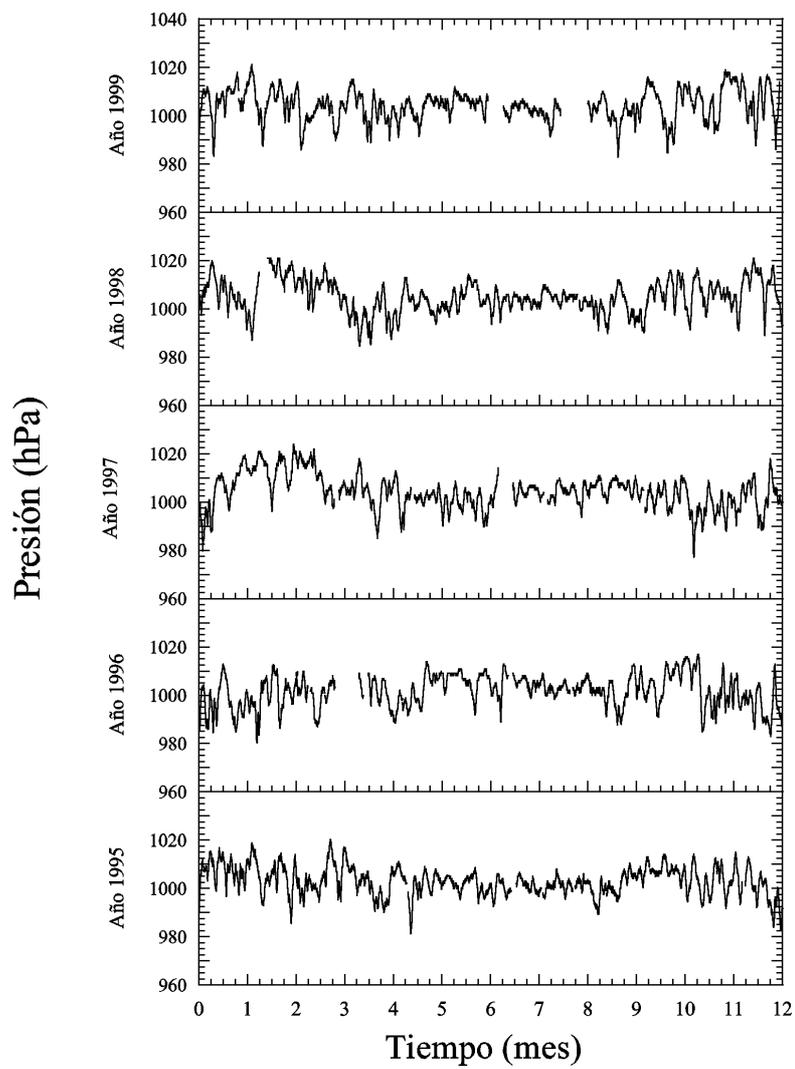


Figura 5.3: Evolución temporal de la presión atmosférica en la estación ESCRA durante los años 1995, 1996, 1997, 1998 y 1999.

Periodo Años 1995-99	Presión (hPa)		
	Máxima	Mínima	Media
Enero	1020	980	1007
Febrero	1024	980	1006
Marzo	1022	986	1005
Abril	1018	985	1002
Mayo	1014	981	1002
Junio	1015	989	1002
Julio	1014	989	1001
Agosto	1010	991	1001
Septiembre	1013	982	1001
Octubre	1016	985	1007
Noviembre	1019	977	1003
Diciembre	1021	983	1000

Cuadro 5.3: Presión atmosférica mensual máxima, mínima y media correspondiente a los años 1995, 1996, 1997, 1998 y 1999.

Dirección del viento

De especial interés en nuestro estudio será la caracterización de la dirección e intensidad del viento en los emplazamientos donde se ubican los sensores de medida de la concentración de radón y otras variables radiológicas, cuya variación depende de la procedencia de las masas de aire.

En la estación ESCRA, la dirección de procedencia del viento sigue un patrón diario de acuerdo con las características típicas de una zona costera. Se puede observar, figura 5.4, que durante el día (de 8 horas a 20 horas) las direcciones predominantes son aquellas en las que el viento proviene del mar, es decir del sector comprendido entre el ENE y el SSW, con una frecuencia de calmas de un 26 %. Por otro lado, durante los periodos nocturnos (de 20 horas a 8 horas del día siguiente), las direcciones predominantes son aquellas en las que el viento proviene del interior, abarcando un sector comprendido entre el WSW y el NE. En la figura 5.5 se ilustra este fenómeno.

En la confección de las rosas de vientos antes citadas sólo se han empleado aquellos datos en los que la velocidad del viento era superior a 0.8 m/s, ya que velocidades inferiores o iguales se consideran periodos de calma.

Velocidad del viento

Para evaluar la velocidad del viento se ha confeccionado la tabla 5.4 que contiene la frecuencia de velocidades del viento distribuida por sectores, y expresada en tanto por ciento. Para cada dirección del viento se han creado 10 clases de velocidad del viento. La primera clase (entre 0 m/s y 1 m/s) engloba las calmas, que representan un 38.5 % del total. Para el resto de velocidades del viento, las más frecuentes corresponden a las velocidades comprendidas entre

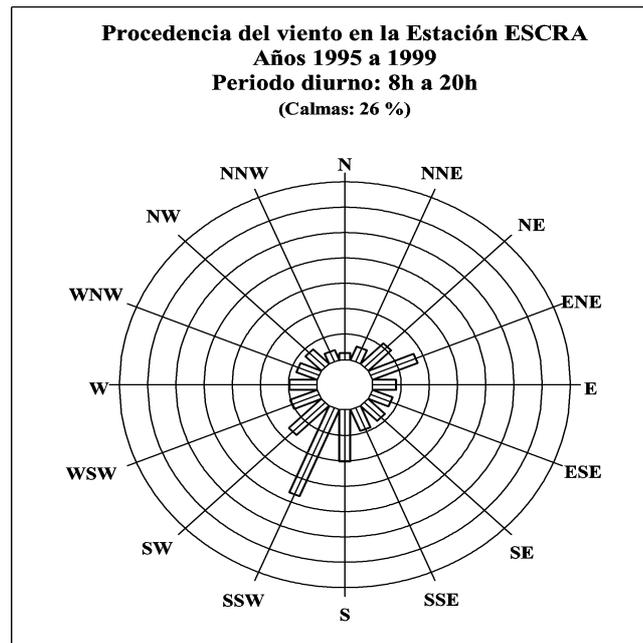


Figura 5.4: Rosa de vientos indicando la frecuencia de la dirección del viento diurna registrada en la Estación ESCRA entre los años 1995 y 1999

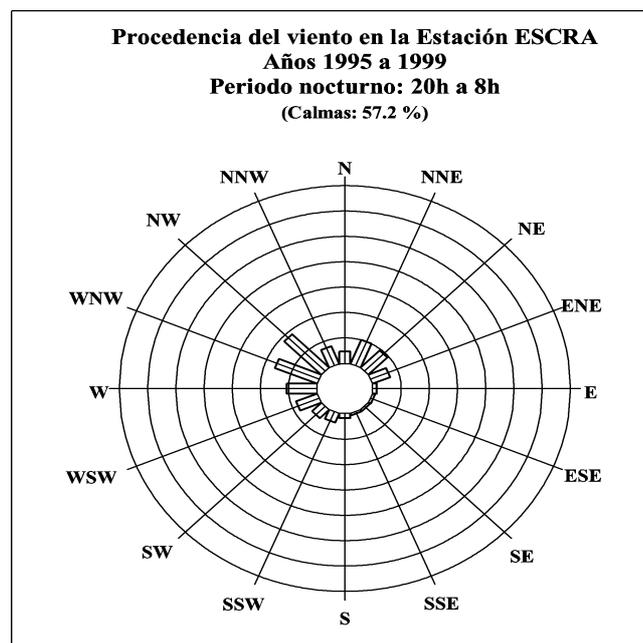


Figura 5.5: Rosa de vientos indicando la frecuencia de la dirección del viento nocturna registrada en la Estación ESCRA entre los años 1995 y 1999

1 m/s y 2 m/s con un 23 %, siendo las dirección más frecuentes el SSW, SW y S con un 2.2 %, un 2.0% y un 19% del total respectivamente. Velocidades del viento superiores a 12 m/s

son inapreciables

Años 1995-1999. Frecuencia de la distribución de vientos (%)											
Dirección	Velocidad del viento (m/s)										TOTAL
	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 9	9 - 12	> 12	
N	14.88	0.64	0.22	0.08	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	15.85
NNE	2.50	0.99	0.53	0.21	0.08	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	4.34
NE	2.13	1.02	0.87	0.53	0.29	0.09	0.03	0.04	0.02	0.00	5.01
ENE	2.29	1.32	1.20	0.76	0.33	0.16	0.05	0.03	0.02	0.01	6.17
E	1.62	0.93	0.60	0.15	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	3.37
ESE	1.51	0.88	0.42	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.85
SE	1.73	0.80	0.28	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.86
SSE	1.66	0.70	0.41	0.14	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.95
S	2.12	1.10	1.34	0.73	0.28	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	5.63
SSW	2.72	1.67	2.24	1.72	0.94	0.33	0.09	0.03	0.00	0.00	9.74
SW	2.52	1.38	1.06	0.54	0.30	0.06	0.02	0.01	0.00	0.00	5.89
WSW	2.74	1.16	0.83	0.46	0.29	0.15	0.05	0.03	0.00	0.00	5.71
W	2.57	1.23	0.96	0.57	0.40	0.17	0.10	0.05	0.00	0.00	6.04
WNW	2.72	1.23	1.27	1.01	0.53	0.30	0.17	0.06	0.01	0.00	7.30
NW	3.97	1.51	1.62	1.37	0.84	0.33	0.19	0.07	0.00	0.00	9.90
NNW	4.25	1.04	0.65	0.24	0.13	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	6.39
TOTAL	51.94	17.58	14.52	8.57	4.52	1.73	0.76	0.32	0.06	0.01	100.00

Cuadro 5.4: Distribución de velocidades y direcciones de vientos correspondiente a los años 1995, 1996, 1997, 1998 y 1999

Radiación solar

En la tabla 5.5 se presentan los valores de la radiación solar registrada en la estación ESCRA en forma de energía mensual total, promediada para cada uno de los doce meses del año correspondiente al periodo comprendido entre el año 1995 y el año 1999. Según dicha tabla, la máxima radiación se registra durante los meses de Mayo y Junio con 347.6 MJ/m^2 y 350.1 MJ/m^2 respectivamente, y la mínima radiación solar se registra durante los meses de invierno como son Noviembre y Diciembre con 120.2 MJ/m^2 y 85.1 MJ/m^2 respectivamente.

En la figura 5.6 se presenta la evolución temporal de la radiación solar registrada en la estación ESCRA para el periodo comprendido entre el año 1995 y el año 1999.

Precipitación

Con el fin de ilustrar la variabilidad en los episodios de lluvia la zona donde se encuentra ubicada la estación ESCRA, se presenta la tabla 5.6, con la precipitación total registrada en la estación ESCRA durante los años 1995, 1996, 1997, 1998 y 1999. En la figura 5.7 se presenta la evolución temporal de dicha precipitación para el periodo comprendido entre el año 1995 y el año 1999. De la tabla anterior se desprende que la incidencia de lluvias en Barcelona es

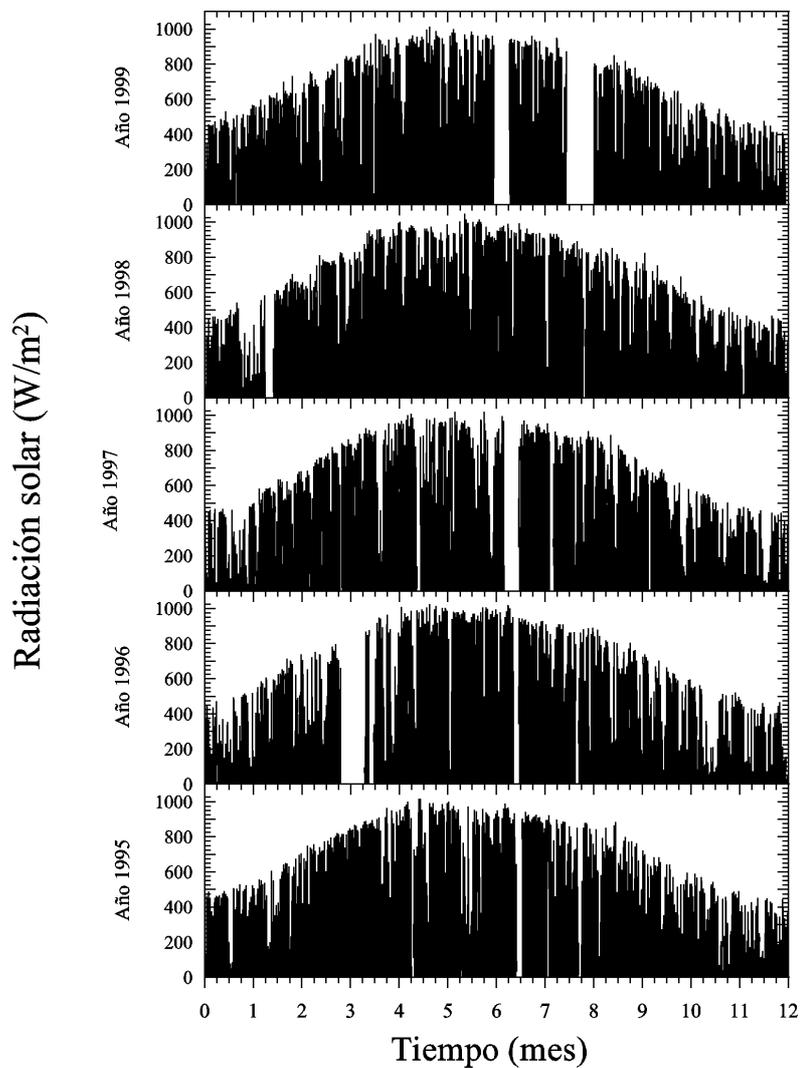


Figura 5.6: Evolución temporal de la radiación solar en la estación ESCRA durante los años 1995, 1996, 1997, 1998 y 1999.

Periodo Años 1995-99	Radiación solar Total (MJ/m ²)
Enero	121.797
Febrero	158.109
Marzo	258.473
Abril	316.250
Mayo	347.611
Junio	324.644
Julio	350.113
Agosto	278.041
Septiembre	226.859
Octubre	170.803
Noviembre	120.198
Diciembre	85.108

Cuadro 5.5: Radiación solar total mensual media registrada en la Estación ESCRA correspondiente los años 1995, 1996, 1997, 1998 y 1999.

bastante irregular, concentrándose las de mayor intensidad en los meses de otoño e invierno. De esta forma se puede observar que el año 1996 fué bastante lluvioso, con precipitaciones superiores a 100 l/m² los meses de enero, abril, octubre, noviembre y diciembre. En cambio, para el resto de años los únicos meses que superaron los 100 l/m² fueron enero de 1997 con 129.8 l/m², diciembre de 1998 con 119.6 l/m², y septiembre de 1999 con 144.7 l/m². Los meses menos lluviosos son febrero y julio con un valor máximo de 21.3 l/m² y 19.6 l/m² y mínimo de 0.35 l/m² y 0.77 l/m² respectivamente.

Mes	Precipitación Total (l/m ²)					Media
	Año 1995	Año 1996	Año 1997	Año 1998	Año 1999	
Enero	19.283	111.94	129.76	78.26	60.10	79.9
Febrero	11.47	21.27	1.60	3.98	0.35	7.7
Marzo	2.93	38.68	5.28	4.48	18.35	13.9
Abril	27.48	104.93	61.19	13.14	28.67	47.1
Mayo	17.48	60.96	6.55	19.35	30.56	27
Junio	22.14	84.37	57.55	10.68	9.23	36.8
Julio	11.36	0.77	19.64	1.93	7.87	8.3
Agosto	73.17	41.15	23.44	28.38	0.73	33.4
Septiembre	72.62	65.58	17.65	71.37	144.66	74.4
Octubre	46.32	111.17	37.62	55.42	96.29	69.4
Noviembre	49.10	123.17	41.98	12.25	57.27	56.8
Diciembre	75.67	120.13	98.12	119.56	7.51	84.2
Total	429.023	884.12	500.38	418.8	461.59	

Cuadro 5.6: Precipitación total registrada en la Estación ESCRA correspondiente los años 1995, 1996, 1997, 1998 y 1999.

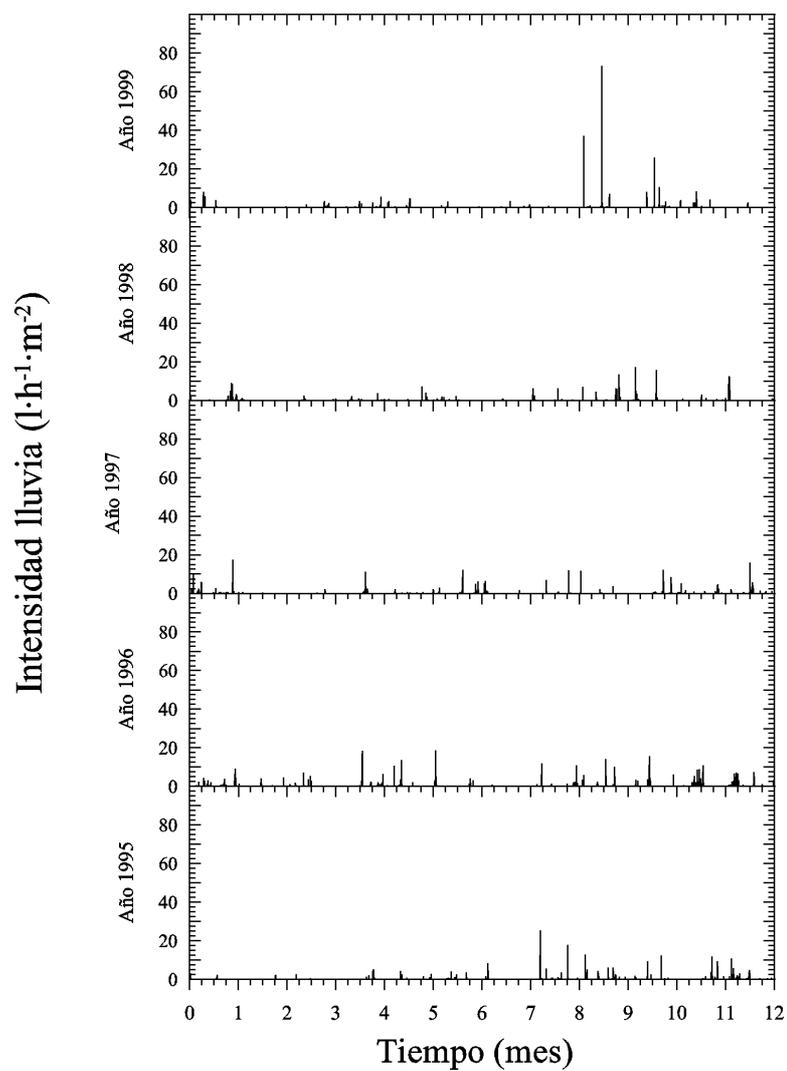


Figura 5.7: Evolución temporal de la precipitación en la estación ESCRA desde el año 1995 al 1999.

5.2. Variación de la concentración del radón atmosférico en función de las condiciones meteorológicas

5.2.1. Introducción

Con la finalidad de caracterizar radiológicamente el emplazamiento donde se ubica la estación ESCRA, en esta sección se analizan los resultados correspondientes a las medidas del radón ambiental realizadas durante el periodo comprendido entre los años 1995 y 1999. Para ello se analizan algunos de los elementos ambientales que afectan a la concentración del radón descritos en la sección 2.4. En dicha sección se hace referencia a los estudios realizados por diversos autores sobre la variabilidad de la concentración del radón en función de determinadas variables meteorológicas, como por ejemplo la dirección y velocidad del viento, la estación del año, la hora del día, la humedad relativa, la estabilidad atmosférica o la existencia o no de inversiones térmicas.

5.2.2. Concentración de radón en la atmósfera en función de la dirección y velocidad del viento

Con la finalidad de encontrar una correlación entre la concentración de radón y la dirección y velocidad del viento, se han comparado los valores de dichas variables obtenidos en la Estación ESCRA. En las figuras 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 se representa en un mismo gráfico la dirección y la velocidad del viento junto con la concentración de radón registrados. Las zonas más oscuras corresponden a las mayores concentraciones de radón. Para velocidades del viento superiores a 2 m/s, se observa que la concentración de radón más baja aparece cuando el viento proviene del sector comprendido entre las direcciones ENE y SW (en el sentido de las agujas del reloj). Este sector corresponde al viento que proviene del mar. Para el resto de direcciones (viento procedente de tierra) la concentración de radón será más elevada. Este fenómeno se puede explicar debido a que cuando el viento proviene del mar la concentración de radón es inferior a la concentración del viento proveniente de tierra, ya que las emanaciones de radón en el mar son inapreciables si se comparan con las emanaciones del terreno.

Por otro lado, también se observa una variación estacional. Durante los meses de otoño e invierno la concentración de radón es superior al resto de meses del año.

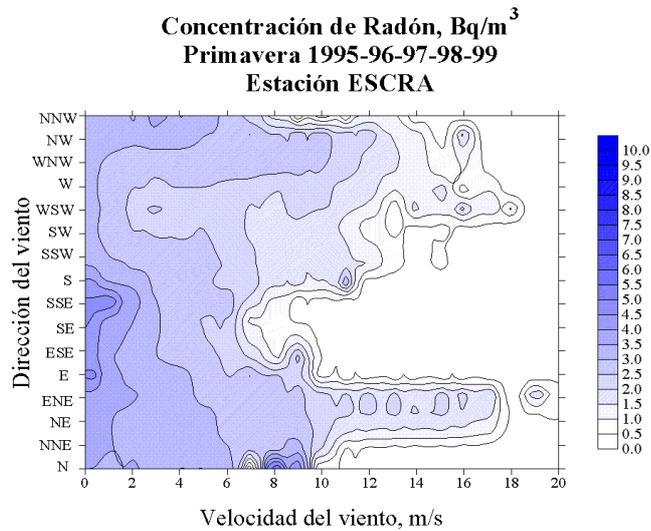


Figura 5.8: Concentración de radón en función de la velocidad y dirección del viento en la estación ESCRA durante los meses de marzo, abril, y mayo de los años 1995 hasta 1999, correspondiente a primavera.

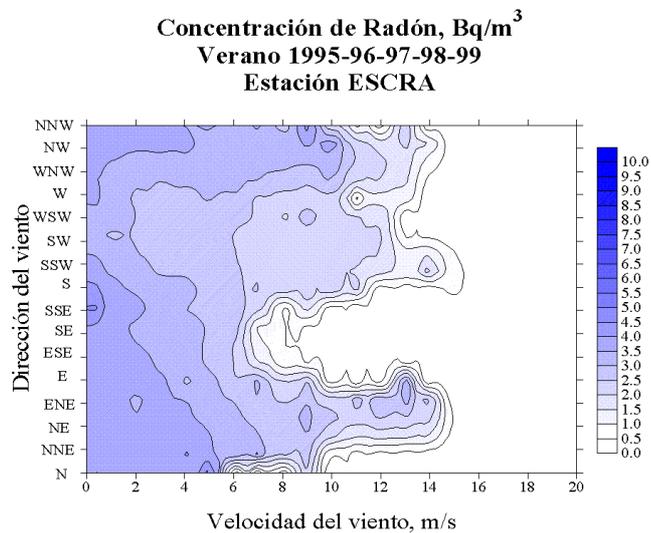


Figura 5.9: Concentración de radón en función de la velocidad y dirección del viento en la estación ESCRA durante los meses de junio, julio, y agosto de los años 1995 hasta 1999, correspondiente a verano.

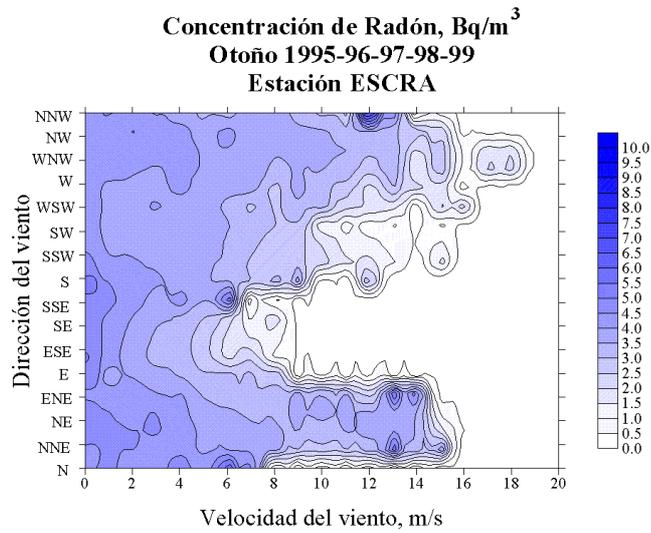


Figura 5.10: Concentración de radón en función de la velocidad y dirección del viento en la estación ESCRA durante los meses de septiembre, octubre, y noviembre de los años 1995 hasta 1999, correspondiente a otoño.

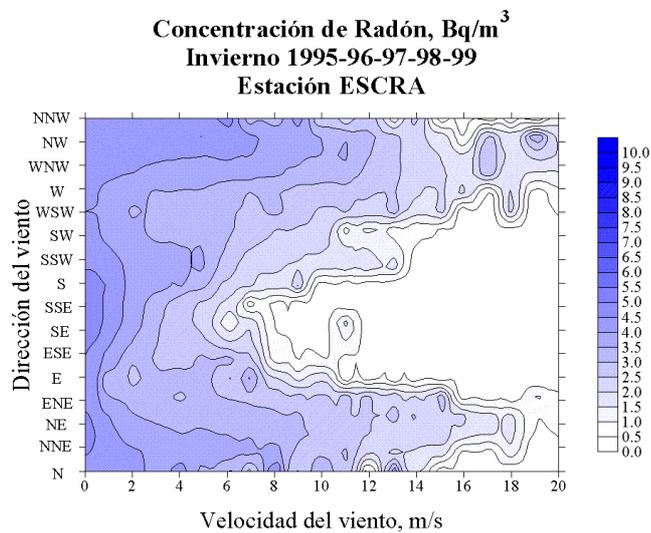


Figura 5.11: Concentración de radón en función de la velocidad y dirección del viento en la estación ESCRA durante los meses de diciembre, enero y febrero de los años 1995 hasta 1999, correspondiente a invierno.

5.2.3. Evolución temporal de la concentración de radón

En este apartado se analiza la relación existente entre la concentración de radón ambiental y la hora del día.

El análisis de los datos se ha realizado para el periodo de tiempo comprendido entre el año 1995 y el año 1999, ambos incluidos. Durante dicho periodo de 5 años se determinó la evolución temporal de la concentración de radón durante las 24 horas de un día, para cada mes. Los meses se han agrupado en grupos de 3 meses, donde cada grupo representa una estación del año. Los meses de marzo, abril, mayo corresponden a primavera; los meses de junio, julio, agosto corresponden a verano; los meses de septiembre, octubre y noviembre corresponden a otoño; y los meses de diciembre, enero, y febrero corresponden a invierno.

Los resultados obtenidos se han representado gráficamente en las figuras 5.12, 5.13, 5.14, 5.15. De dichas figuras se desprenden diversas conclusiones. En primer lugar cabe destacar la oscilación temporal de la concentración del radón, observándose un incremento durante la noche, y un decremento durante el día. Esta oscilación es más acusada durante los meses de primavera y verano. La concentración de radón máxima media durante los meses de marzo, abril y mayo (primavera) es de 4.4 Bq/m^3 , mientras que la mínima es de 2.1 Bq/m^3 . Esto implica una variación media de 2.3 Bq/m^3 entre el día y la noche. La concentración de radón máxima se suele observar entre las 8 horas y las 10 horas, y la concentración mínima aparece sobre las 18 horas. En el caso de los meses de verano (junio, julio, y agosto), la concentración de radón sufre una variación temporal similar a la primavera, oscilando entre 5.2 Bq/m^3 y 3.3 Bq/m^3 con una variación media de 2.7 Bq/m^3 . Los valores de la concentración de radón anteriormente citados son relativamente bajos en comparación con otros emplazamientos en los que la concentración puede llegar a ser muy elevada.

Al contrario de los meses de primavera y verano, durante los meses de otoño e invierno la oscilación diaria de la concentración de radón no es tan acusada. En otoño se ha medido una concentración máxima media de 5.2 Bq/m^3 mientras que el valor mínimo medio es de 3.4 Bq/m^3 , lo que implica una oscilación de 1.8 Bq/m^3 . Los meses de invierno, la variación entre los valores máximos y mínimos es menos acusada. El valor máximo medio es de 4.4 Bq/m^3 , y el valor mínimo es de 3.2 Bq/m^3 , obteniéndose una oscilación de 1.2 Bq/m^3 .

Este fenómeno observado es debido a que durante la noche, en general, al aparecer inversiones térmicas, el radón emanado por el terreno no tiene capacidad para diluirse y se acumula en capas bajas de la atmósfera. Cuando sale el Sol, se rompe la capa de inversión, y entonces el radón atmosférico tiene una mayor capacidad para diluirse en la atmósfera. Con el incremento de la radiación solar durante las horas del día, aparecen corrientes ascendentes de aire que favorecen la dilución del radón en la atmósfera. Por este motivo, durante los meses de mayor insolación, la concentración de radón sufre una gran reducción durante las horas del día, y consecuentemente se observa una acusada oscilación de la concentración del radón entre el día y la noche.

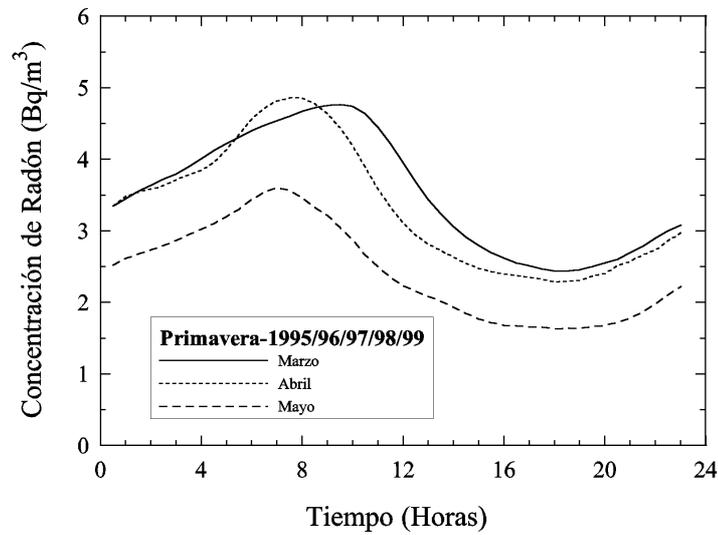


Figura 5.12: Evolución diaria de la concentración de radón media, en la estación ESCRA, durante los meses de marzo, abril y mayo de los años 1995 hasta 1999, correspondiente a primavera.

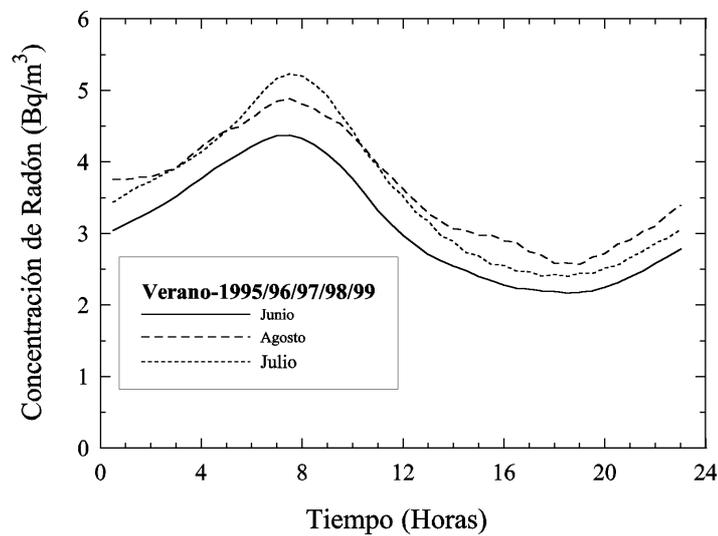


Figura 5.13: Evolución diaria de la concentración de radón media, en la estación ESCRA, durante los meses de junio, julio y agosto de los años 1995 hasta 1999, correspondiente a verano.

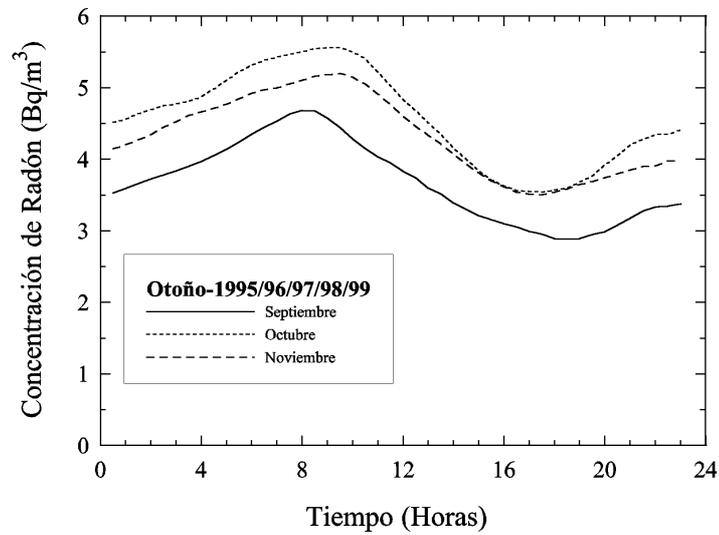


Figura 5.14: Evolución diaria de la concentración de radón media, en la estación ESCRA, durante los meses de septiembre, octubre y noviembre de los años 1995 hasta 1999, correspondiente a otoño.

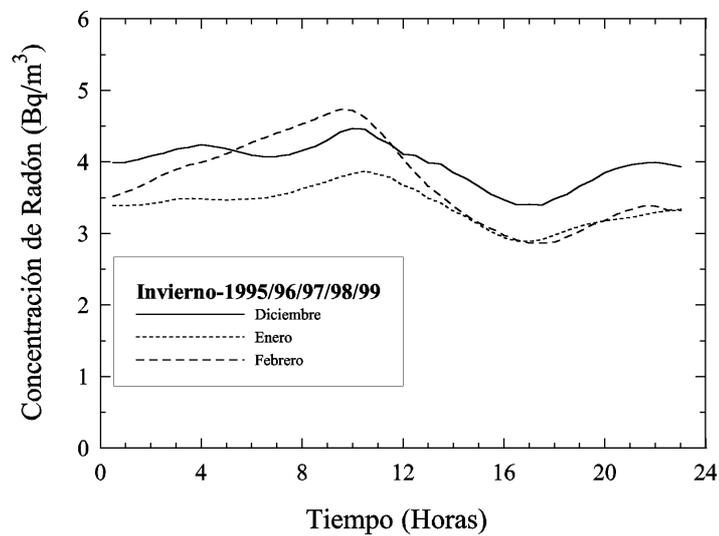


Figura 5.15: Evolución diaria de la concentración de radón media, en la estación ESCRA, durante los meses de diciembre, enero, y febrero de los años 1995 hasta 1999, correspondiente a invierno.

5.3. Concentración de los descendientes del radón en el agua de lluvia

5.3.1. Introducción

En este apartado se presentan los resultados obtenidos durante el funcionamiento del equipo SARAC, que tal y como se describe en la sección 3.2 se emplea para la medida de la actividad específica de los descendientes del radón en el agua de lluvia. Los datos obtenidos son de especial interés para los estudios presentados en este trabajo ya que permiten conocer la variación temporal de la actividad en la lluvia a intervalos de tiempo del orden de 600 segundos y por lo tanto, aportar nueva información sobre los mecanismos que intervienen en la generación radiación ionizante de origen natural i/o artificial durante los episodios de lluvia.

Todas las medidas obtenidas se realizaron en la estación ESCRA, ya que debido a las características del dispositivo de medida hacen inviable (de momento) el desplazamiento a otros emplazamientos.

5.3.2. Resultados obtenidos

La fase de construcción y calibración del equipo SARAC terminó a principios del mes de septiembre del año 1998. Una vez realizados los ajustes correspondientes durante los meses de octubre y noviembre del mismo año, el equipo estuvo operacional a partir de mediados del mes de diciembre. De este modo, las primeras lluvias ocurridas en Barcelona a principios del año 1999 permitieron obtener los primeros datos correspondientes a la actividad específica del agua de lluvia.

Los resultados que se presentan en este apartado corresponden a las medidas realizadas durante el año 1999. Debido a la escasa pluviometría registrada en la estación ESCRA (ver página 5-9 de la sección 5.1), los datos disponibles son escasos. En total se registraron 16 episodios de lluvia durante los que el equipo SARAC estuvo operativo. En el apéndice A.1 se presenta el conjunto de figuras que representan la evolución temporal de la actividad específica de los descendientes del radón (^{214}Pb y ^{214}Bi) en el agua de lluvia. A modo de ejemplo se incluyen en este apartado las gráficas 5.16 y 5.17 correspondientes al día 1 de enero de 1999 y al día 13 de marzo de 1999 respectivamente. Además, en la tabla 5.7 se describe con detalle la actividad media, máxima y mínima de cada episodio de lluvia, junto con su duración y fecha.

Según los datos presentados en la tabla y las figuras anteriormente citadas, se desprende que la actividad específica del agua de lluvia varía considerablemente en función del episodio de lluvia. Se ha observado que para el conjunto de episodios analizados la actividad oscila entre 20 Bq/l y 400 Bq/l para el ^{214}Pb , y entre 90 Bq/l y 1500 Bq/l para el ^{214}Bi . Más adelante analizaremos los factores que influyen en dicha variación. Si comparamos estos resultados con los de otros autores, podemos comprobar que en el caso de las medidas realizadas por N. Fujinami (1995) (ver referencia [50]) los valores son parecidos (entre 100 Bq/l y 1000 Bq/l). En el caso de las medidas realizadas por J. Paatero (ver referencia [49]), y por Nishikawa et al. (ver referencias [47] y [48]) los valores registrados por el equipo SARAC son inferiores.

Estos autores registraron unas actividades específicas que oscilaban entre 1000 Bq/l y 10000 Bq/l. Posiblemente la diferencia de resultados con estos dos autores se debe principalmente a la diferente exhalación de los diversos terrenos, al proceso de formación de las gotas de lluvia y al mecanismo de formación de la tormenta.

Epi- sodio	Fecha año 1999 (DD-MM)	Inicio-Fin (hh:mm)	Actividad específica ^{214}Pb			Actividad específica ^{214}Bi		
			mínima	máxima	media	mínima	máxima	media
1	01 - 01	9:24-16:58	129 ± 18	290 ± 34	194 ± 24	351 ± 52	915 ± 99	761 ± 88
2	13 - 03	8:43- 9:59	284 ± 32	435 ± 45	306 ± 34	871 ± 97	1270 ± 143	856 ± 99
3	24 - 03	21:23-23:56	30 ± 11	74 ± 16	51 ± 13	181 ± 37	309 ± 46	220 ± 40
4	25 - 03	6:51- 7:52	27 ± 12	41 ± 16	34 ± 14	246 ± 37	263 ± 48	350 ± 51
5	26 - 03	16:31-16:42	51 ± 17	85 ± 21	68 ± 19	246 ± 46	344 ± 59	295 ± 52
6	27 - 03	14:49-17:57	54 ± 15	153 ± 28	96 ± 20	247 ± 48	357 ± 72	285 ± 55
7	15 - 04	13:24-15:40	48 ± 12	203 ± 24	111 ± 17	199 ± 40	594 ± 74	406 ± 54
8	16 - 04	22:18-22:49	106 ± 21	205 ± 28	148 ± 24	441 ± 66	549 ± 83	481 ± 71
9	17 - 04	0:18- 0:49	99 ± 18	212 ± 30	154 ± 25	435 ± 61	537 ± 79	477 ± 70
10	28 - 04	18:06-22:19	60 ± 14	414 ± 45	231 ± 30	327 ± 44	1561 ± 171	903 ± 106
11	13 - 09	23:25-23:35	59 ± 11	76 ± 13	68 ± 13	247 ± 33	317 ± 41	282 ± 37
12	14 - 09	4:58- 7:04	78 ± 13	174 ± 25	110 ± 17	279 ± 36	839 ± 97	519 ± 63
13	14 - 09	18:56-19:38	115 ± 18	320 ± 37	192 ± 25	287 ± 39	1547 ± 167	806 ± 94
14	18 - 09	0:02- 1:02	249 ± 29	335 ± 37	282 ± 32	496 ± 60	933 ± 105	725 ± 85
15	19 - 09	9:28-11:37	15 ± 9	127 ± 17	65 ± 12	94 ± 26	276 ± 41	184 ± 30
16	20 - 10	13:26-19:54	21 ± 9	168 ± 22	56 ± 12	89 ± 17	542 ± 67	252 ± 37

Cuadro 5.7: Valores mínimos, máximos y medios de la actividad específica del agua de lluvia registrados durante el año 1999 en la estación ESCRA

Una inspección más detallada de las figuras A.1 hasta A.13, permite observar que la actividad específica del ^{214}Bi y la del ^{214}Pb no se encuentran en equilibrio. Si realizamos una representación gráfica de la actividad del ^{214}Pb respecto de la actividad del ^{214}Bi (ver figura 5.18), se comprueba que la relación de actividades mantiene una cierta correlación lineal, donde la pendiente de la recta de regresión es $\rho = ^{214}\text{Pb}/^{214}\text{Bi} = 0,29$. Este fenómeno también ha sido observado por otros autores, como es el caso de J. Paatero (ver referencia [49]), que obtiene un valor medio de $\rho = ^{214}\text{Pb}/^{214}\text{Bi} = 0,41$. Este desequilibrio entre la actividad de los dos descendientes del radón emisores de radiación gamma se debe a que una vez se ha formado la gota de agua y ya contiene los descendientes del radón en equilibrio, la desintegración radiactiva del ^{214}Pb va generando ^{214}Bi . El tiempo que tarda la gota de agua en llegar al suelo desde que se forma en la nube será responsable del grado de desequilibrio.

5.3.3. Relación entre la procedencia de la tormenta y la actividad del agua de lluvia

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, para distintos episodios de lluvia se ha observado una variación significativa de la actividad específica de los descendientes del radón en el agua. Para hallar una explicación a este fenómeno primero es preciso comprender

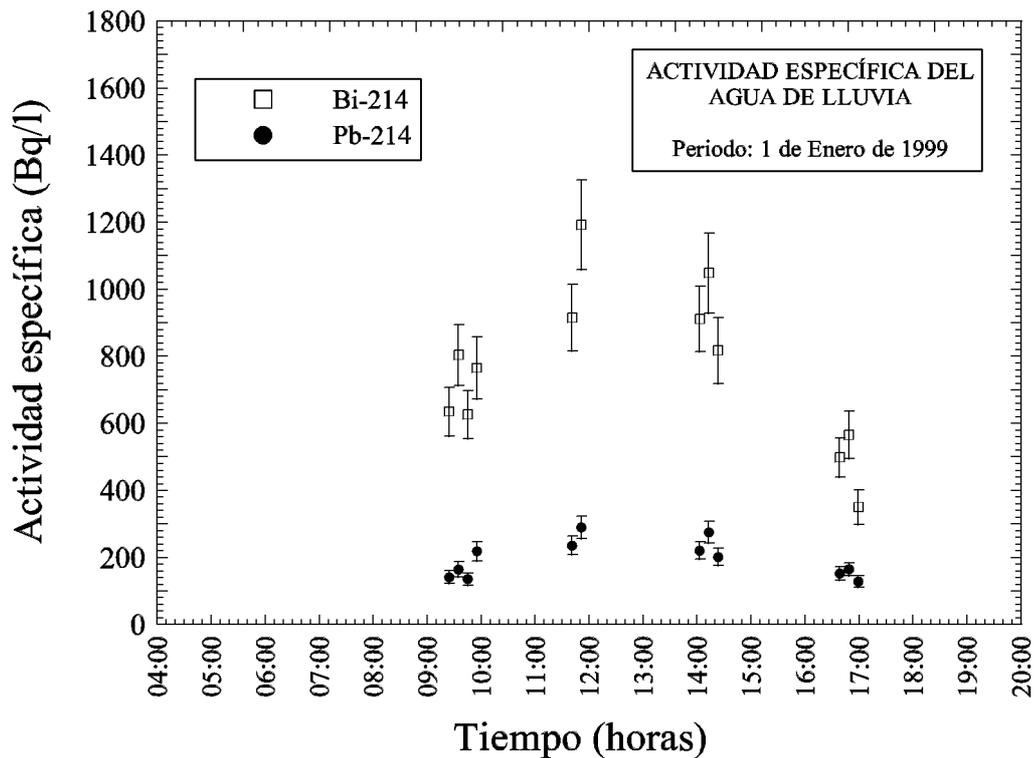


Figura 5.16: Actividad específica de los descendientes del radón ^{214}Pb y ^{214}Bi en el agua de lluvia registrada durante el día 1 de enero del año 1999 en la estación ESCRA.

los mecanismos de formación de la precipitación y además los factores que influyen en la aparición de descendientes del radón en el agua de lluvia. La formación de una gota de lluvia en general se inicia a partir de un núcleo de condensación (aerosol) que se encuentra en el interior de la nube siempre y cuando las condiciones de humedad, temperatura y presión sean unas determinadas. El núcleo de condensación favorece la adhesión de moléculas de agua que se encuentran en el interior de la nube en forma de vapor. Sin la existencia de dicha partícula, sería muy poco probable que las moléculas de agua se agruparan para formar una gota de agua. Al principio, y debido a su escasa masa, la gota recién formada no puede caer porque la fuerza que ejercen las corrientes de aire ascendentes en el interior de la nube superan el peso de la gota. A medida que va creciendo aumenta su masa hasta que las corrientes de la nube no pueden soportar su peso y entonces se inicia la precipitación hacia el suelo. A raíz de este proceso de formación de la gota de lluvia se desprende que su tamaño y tiempo de estancia en el interior de la nube dependerá de la velocidad de las corrientes de aire. Cuanto más fuertes sean dichas corrientes, más tiempo permanecerá en el interior de la nube y por lo tanto será, en general, de mayor tamaño.

Tal y como se comentó en el apartado 2.4.4, el mecanismo de incorporación de descendientes del radón en el agua de lluvia se debe a que los núcleos de condensación llevan adheridos descendientes del radón y a la interacción de las gotas durante su viaje de descenso desde la nube hasta el suelo. El primer mecanismo será mucho más eficiente que el segundo, ya que la tensión superficial de la gota tiende a impedir la incorporación de los aerosoles del aire. Por este motivo, uno de los factores determinantes en la concentración de los descendientes

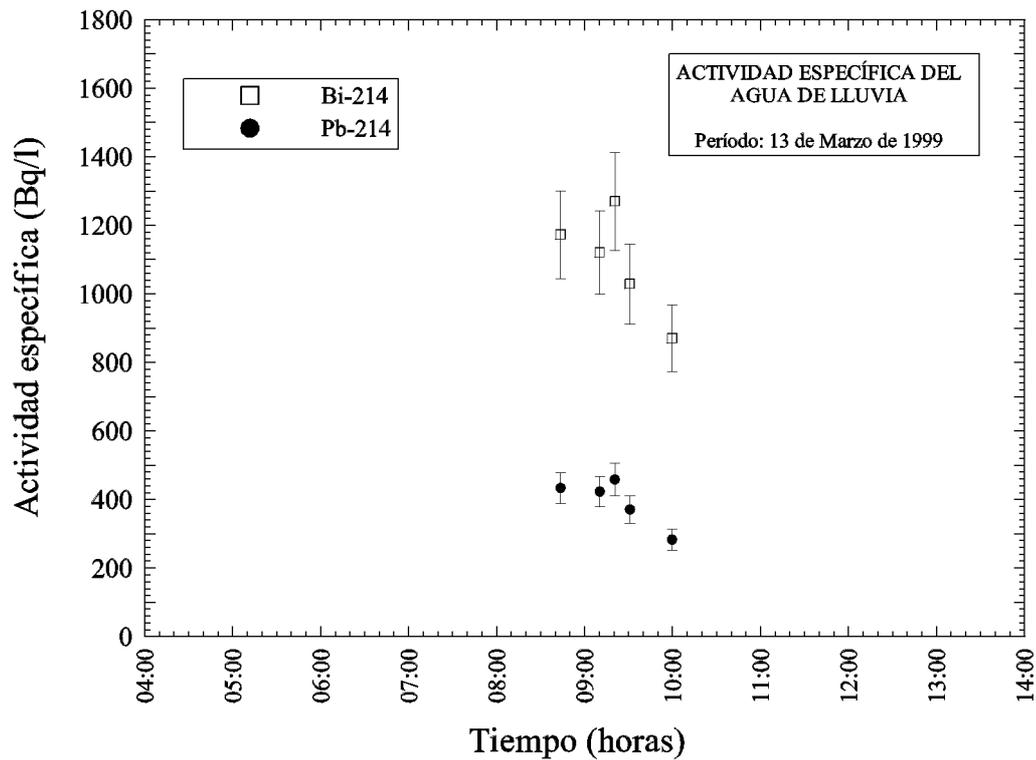


Figura 5.17: Actividad específica de los descendientes del radón ^{214}Pb y ^{214}Bi en el agua de lluvia registrada durante el día 13 de marzo del año 1999 en la estación ESCRA.

del radón en la lluvia consistirá en la concentración de los mismos en los aerosoles del aire de la nube y por lo tanto en la procedencia de la tormenta. Existen otros factores que influyen en la actividad del agua de lluvia, por ejemplo el tiempo de permanencia de la gota en el interior de la nube y que debido a que el periodo de semidesintegración de los descendientes del radón emisores gamma oscila alrededor de los 20 minutos; cuando el tiempo de permanencia de la gota en la nube sea del orden de magnitud del periodo de semidesintegración, la disminución de la concentración por desintegración será considerable. Otro factor de influencia consistirá en el tiempo de tránsito de la gota entre la nube y el suelo. Este tiempo de tránsito depende de la altura de la nube y la velocidad de caída de la gota que a su vez está relacionada con su tamaño. Estas velocidades oscilan entre 0.27 m/s y 9.2 m/s para diámetros entre 0.1 mm y 5.8 respectivamente (ver [61]). Por ejemplo, para nubes situadas a una altura de 800 metros, el tiempo de tránsito oscilará entre 50 minutos y 90 segundos.

El conocimiento preciso de las características de cada episodio de lluvia permitiría explicar la variación de la actividad del agua de lluvia observada. Desafortunadamente no se dispone de mucha información de los episodios de lluvia en los que se han obtenido valores de la actividad del agua, por lo que no es posible analizar de forma exhaustiva cada episodio. La única información utilizada correspondiente a los episodios analizados consiste en mapas de isobaras en los que se aprecia la procedencia de los frentes tormentosos y en fotografías en el espectro infrarrojo suministradas por la agencia americana, *National Oceanographic and Atmospheric Administration*, NOAA. En dichas fotografías se ofrecen varias secuencias de la evolución de las nubes sobre la Península Ibérica antes y durante los episodios de precipitación.

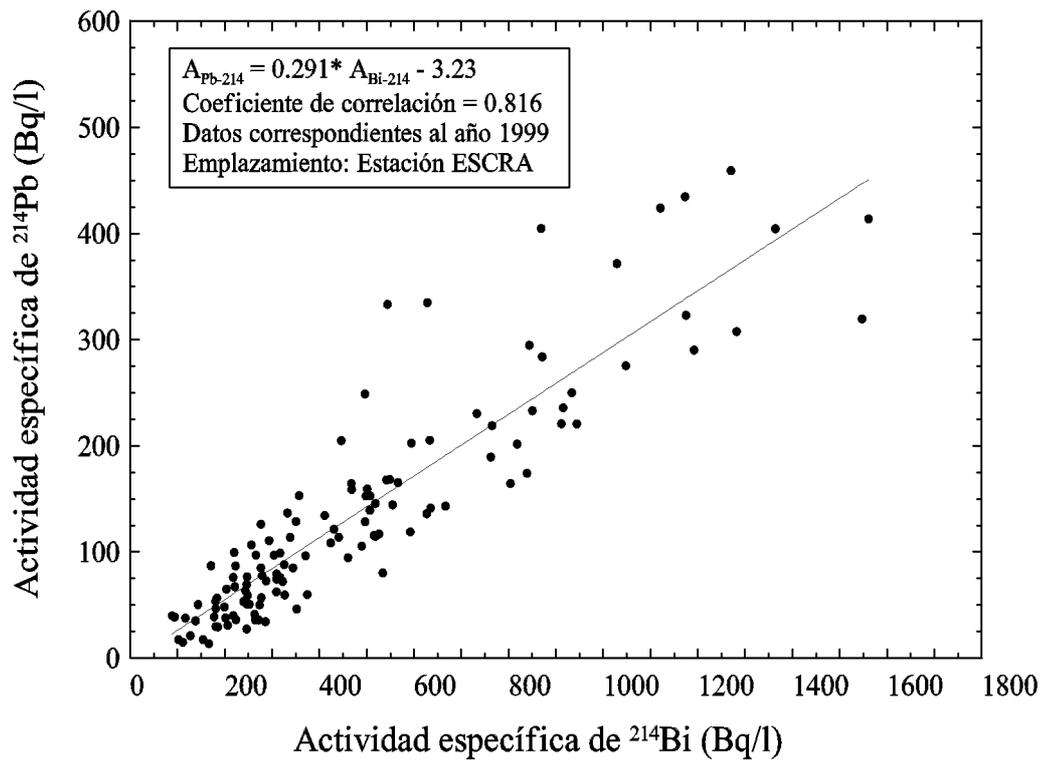


Figura 5.18: Relación entre la actividad específica del ^{214}Pb y el ^{214}Bi en el agua de lluvia. Valores registrados durante el año 1999 en la estación ESCRA.

Debido al tipo de información disponible para cada episodio de lluvia, el único parámetro analizado consiste en determinar, de forma cualitativa, la relación entre la actividad del agua de lluvia y la procedencia del frente tormentoso. Para ello se han clasificado los diversos episodios de lluvia en función de la actividad del $^{214}_{83}\text{Bi}$ en el agua de lluvia. Hemos distribuido los episodios en tres grupos: Grupo 1 con actividades entre 0 y 300 Bq/l; grupo 2 con actividades entre 300 Bq/l y 500 Bq/l; y grupo 3 con actividades superiores a 500 Bq/l. El parámetro fijado para caracterizar cada episodio de lluvia consiste en determinar la procedencia del frente tormentoso, la trayectoria de su recorrido y la zona geográfica donde se ha creado la nube. Estas características del episodio lluvioso se han extraído de los mapas isobáricos y fotografías aéreas anteriormente citados.

En la tabla 5.8 hemos agrupado los diversos episodios de lluvia en función del grupo al que pertenecen por su actividad, y además se da una breve explicación de las características del episodio. Se puede observar, que para los episodios del grupo 3, en general la procedencia del frente tormentoso es Atlántico, pasando por encima de la Península Ibérica. Este hecho explicaría la elevada concentración de descendientes en el agua de lluvia, ya que al pasar el frente por encima de la Península Ibérica, se realimenta con las elevadas concentraciones de radón exhaladas por el terreno que al desintegrarse genera los descendientes que se encuentran en la nube.

Por otro lado, los episodios de lluvia pertenecientes al grupo 1, en los que la concentración del agua de lluvia es baja ya que no supera los 300 Bq/l, el frente tormentoso proviene del

mar Mediterráneo y/o las nubes se forman sobre la costa mediterránea. Esto explicaría las concentraciones tan bajas observadas en el agua, ya que en general la tasa de exhalación de radón de las masas de agua como mares u océanos es muy pequeña, por lo que la concentración de radón del aire que existe sobre el mar (y por consiguiente las nubes alimentadas por dicho aire) será también pequeña .

Por último nos quedan los episodios de lluvia del grupo 2. En este caso se ha observado que al igual que en el grupo 1, las nubes se forman, en general, sobre la costa mediterránea. En este caso la actividad del agua es superior la del grupo 1 debido a que apesar de formarse sobre la costa, el aire que alimenta la nube se ha realimentado con radón exhalado por las regiones de la costa este de la Península Ibérica.

A modo de resumen podemos destacar que se ha comprobado de forma cualitativa que la variación de la concentración de descendientes de radón en el agua de lluvia depende de la procedencia de la tormenta y la zona de formación de la nube. Se ha observado que las concentraciones mas elevadas se producirán cuando la nube (o frente tormentoso) proviene de zonas continentales, y las concentraciones bajas se producirán cuando la tormenta se origina sobre el mar o proviene de zonas con baja tasa de exhalación de radón.

Grupo	Actividad Bi-214 (Bq/l)	Periodo dia - mes	Procedencia tormenta / Formacion nubes
1	0 a 300	24 - 3	Mediterraneo sur / Costa mediterránea
		26 - 3	Local / Costa mediterránea
		13 - 9	Península Ibérica / Costa mediterránea
		19 - 9	Atlántico pasando por mediterraneo sur / Costa Medit.
		20 - 10	Local / Mar Mediterraneo.
2	300 a 500	25 - 3	Península Ibérica / Costa mediterránea.
		15 - 4	Península Ibérica / Costa mediterránea.
		16 - 4	Península Ibérica / Costa mediterránea.
		17 - 4	Península Ibérica / Costa mediterránea.
3	500 <	1 - 1	Atlántico y Península Ibérica / —
		13 - 3	Atlántico y Península Ibérica / —
		28 - 4	Península Ibérica (P.I) / —
		14 - 9	Atlántico, pasa por P.I. y sur Francia / —
		18 - 9	Atlántico, pasa por P.I. / —

Cuadro 5.8: Clasificación de los episodios de lluvia registrados en la estación ESCRA durante el año 1999 en función de la concentración de $^{214}_{83}\text{Bi}$ en el agua de lluvia, y descripción de las características de la tormenta.

5.4. Dosimetría ambiental en la Estación ESCRA

5.4.1. Introducción

En este apartado se presenta la tasa de dosis ambiental registrada con los dispositivos disponibles en la estación ESCRA que se describen en la sección 3.1. Estos equipos están constituidos por detectores de ionización gaseosa y detectores de termoluminiscencia. El periodo de tiempo analizado está comprendido entre el día 1 de enero del año 1995 y el día 31 de diciembre del año 1999.

Se ha representado gráficamente y tabulado la variación temporal de la dosis ambiental para los diversos dispositivos de medida con el fin de mostrar la variabilidad de la misma y la diferencia sustancial entre los valores registrados por las distintas sondas y sistemas de detección.

5.4.2. Detectores de ionización gaseosa

Se han empleado dos detectores de ionización gaseosa para la medida de la tasa de dosis ambiental que consisten en un contador proporcional de la marca FAG y una cámara de ionización Reuter-Stokes, que denominaremos respectivamente, sonda FHZ601A y sonda RS. Las características de ambos detectores se presentan en el apartado 3.1.3. En dicho apartado aparece una tercera sonda constituida por un detector Geiger-Müller de la marca Berthold. Debido a problemas técnicos en su funcionamiento estuvo en operación durante un periodo de tiempo muy corto por lo que no disponemos de suficientes datos para obtener una estadística fiable de sus resultados. Por este motivo se tomó la decisión de no incluir en este estudio las medidas ofrecidas por esta sonda.

Se ha representado gráficamente la tasa de dosis medida con la sonda FHZ601A (figura 5.19) durante el periodo de tiempo comprendido entre el año 1995 y el año 1999. En el caso de la sonda RS el periodo de tiempo graficado corresponde a los años 1996, 1997 y 1998 (ver figura 5.20). El periodo de tiempo es inferior al de la sonda FHZ601A debido a que estuvo fuera de operación en la estación ESCRA durante el año 1995 y a partir de principios del año 1999 hasta la fecha de realización de este trabajo. En dichas gráficas se puede observar la oscilación temporal de la tasa de dosis y los periodos de tiempo durante los cuales no existen datos registrados (ausencia de curva en la gráfica). La ausencia de datos es debida a diversos factores, entre los cuales cabe citar averías en el funcionamiento de las sondas o interrupciones en el suministro eléctrico de la estación ESCRA. Por lo que respecta a las averías, la sonda FHZ601A estuvo fuera de servicio entre finales del mes de abril del año 1996 y principios del año 1997 debido a un fallo en el mecanismo de compensación de la temperatura, por lo que la tasa de dosis oscilaba en función de la temperatura ambiental. Por lo que respecta a los cortes en el suministro eléctrico de la estación ESCRA, sólo se aprecia falta de datos cuando la duración ha sido superior a 15 minutos gracias a la presencia del equipo de alimentación ininterrumpida (SAI). Cuando dicho equipo llega al límite de su capacidad de carga, los equipos de medida se detienen y se requiere la intervención de un operador para restituir su funcionamiento una vez el suministro eléctrico se ha restablecido.

Periodo Años 1996-1998	Tasa de dosis (nGy/h)		
	Máxima	Mínima	Media
Enero	122.2	90.5	99.1
Febrero	111.0	91.1	98.6
Marzo	110.0	91.1	100.3
Abril	135.6	90.9	99.4
Mayo	115.0	90.8	99.1
Junio	117.0	90.8	101.3
Julio	123.0	91.0	99.1
Agosto	143.0	91.3	98.5
Septiembre	128.2	90.9	98.4
Octubre	125.7	90.4	98.4
Noviembre	118.0	91.0	99.2
Diciembre	139.5	91.1	99.2

Cuadro 5.9: Valores máximo, mínimo y medio de la tasa de dosis ambiental mensual medida con la sonda FHZ601A en la estación ESCRA entre los años 1995 y 1999.

En las figuras anteriormente citadas se pueden observar los incrementos de dosis que se producen durante los episodios de lluvia.

En las tablas 5.9 y 5.10 se tabulan los valores mínimos, máximos y medios de la tasa de dosis registrada con las sondas FHZ601A y RS respectivamente, durante el tiempo en que estuvieron operativas.

A raíz de los valores de las tablas anteriores, podemos observar que la tasa de dosis media registrada con la sonda FHZ601A sufre una pequeña oscilación mensual, entre 101.3 nGy/h y 98.4 nGy/h, siendo la tasa de dosis media total del periodo de 5 años de 99.2 nGy/h. Por otro lado, para la sonda RS la oscilación mensual de la tasa de dosis media se encuentra entre 69.6 nGy/h y 70.6 nGy/h, siendo la tasa de dosis media total del periodo de 3 años de 63.2 nGy/h. Si comparamos la tasa de dosis media medida con ambas sondas podemos observar una diferencia de 36 nGy/h. Esta diferencia es debida principalmente a dos factores que se detallan a continuación. Por un lado la diferente respuesta de ambas sondas frente a la radiación cósmica (ver apartado 2.5). La sonda FHZ601A posee una sobreestimación de la tasa de dosis cósmica superior a la de la sonda RS tal y como se comprobará más adelante en el apartado 5.5.2, donde el coeficiente a_c correspondiente a la modelización de la tasa de dosis en periodos secos es superior para la sonda FHZ601A. Por otro lado, otro de los factores que influyen en la diferencia de dosis consiste en que la sonda RS se encuentra a mayor altura que la sonda FHZ601A. En la sección 4.5.3 donde se ha calculado el factor de dosis para diversos radionucleidos depositados en el suelo, se ha observado que en general la diferencia entre ambas posiciones es aproximadamente de un 10 %.

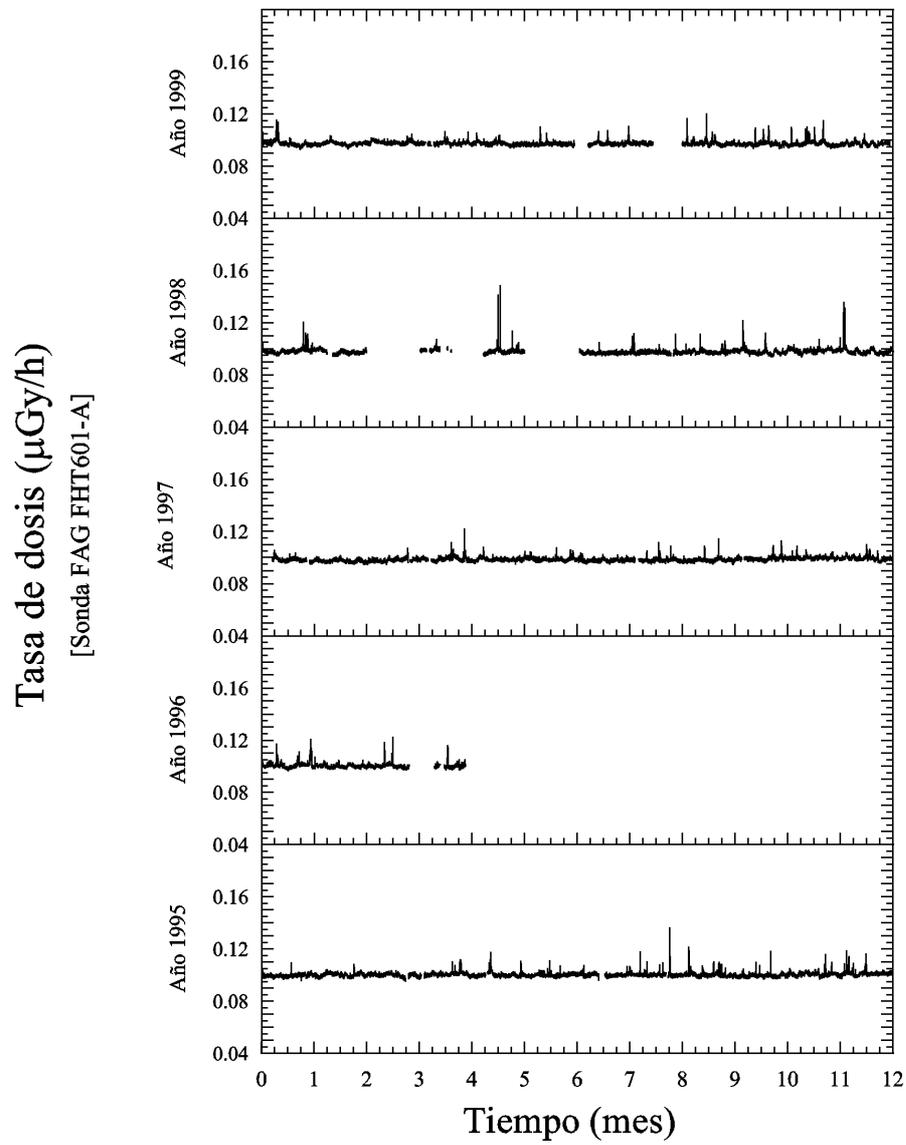


Figura 5.19: Tasa de dosis ambiental registrada con la sonda FHZ601A en la estación ESCRA entre los años 1995 y 1999.

Periodo Años 1996-1998	Tasa de dosis (nGy/h)		
	Máxima	Mínima	Media
Enero	91.7	62.3	68.6
Febrero	83.7	62.3	68.0
Marzo	97.0	61.4	67.9
Abril	105.7	61.4	69.6
Mayo	98.4	62.3	70.6
Junio	82.8	61.4	67.2
Julio	78.3	61.4	66.9
Agosto	83.7	63.2	67.1
Septiembre	83.7	61.4	67.3
Octubre	89.0	58.7	67.5
Noviembre	86.3	59.6	68.3
Diciembre	101.5	60.0	68.8

Cuadro 5.10: Valores máximo, mínimo y medio de la tasa de dosis ambiental mensual medida con la sonda Reuter-Stokes en la estación ESCRA entre los años 1996 y 1998.

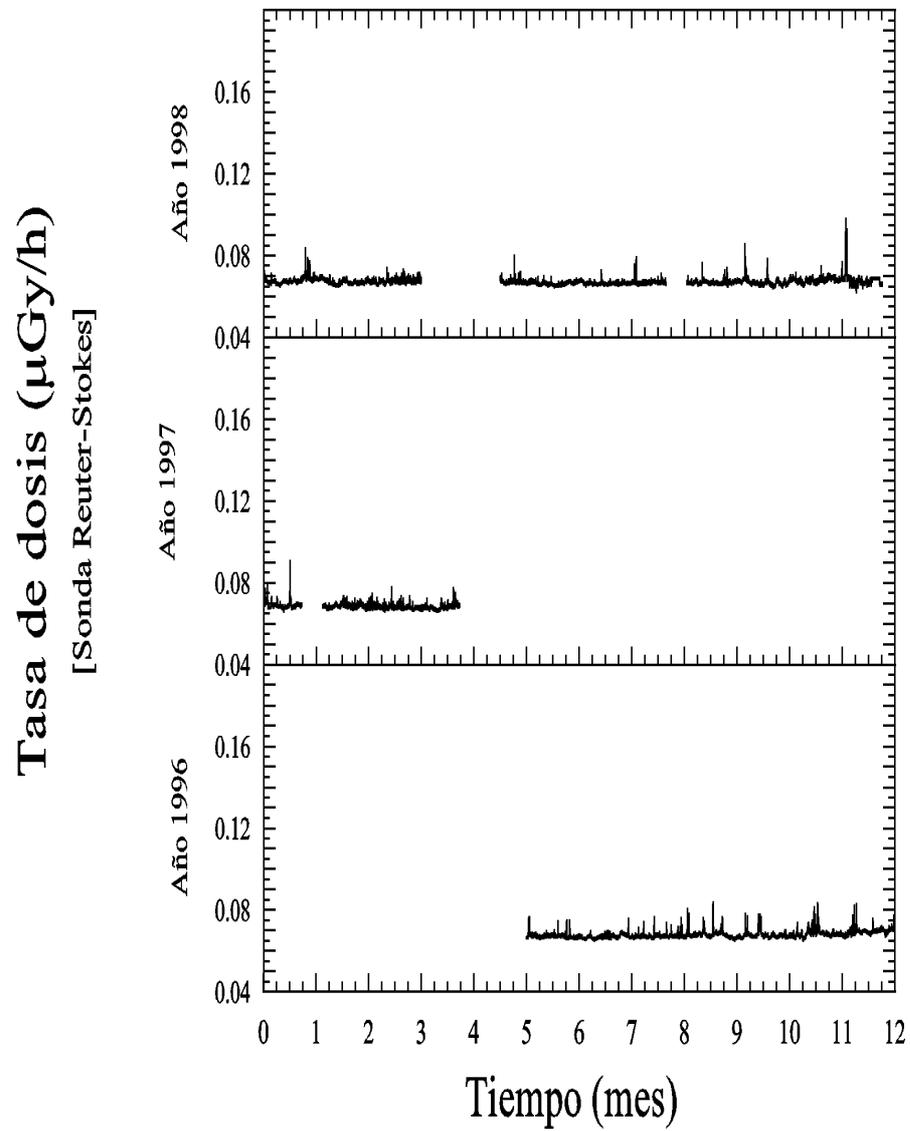


Figura 5.20: Tasa de dosis ambiental registrada con la sonda Reuter-Stokes en la estación ESCRA durante los años 1996 a 1998.

5.4.3. Detectores de termoluminiscencia

En este apartado se presentan los resultados obtenidos con los detectores de termoluminiscencia (detectores TL en adelante) empleados en la estación ESCRA como sistemas pasivos para medir la tasa de dosis ambiental. Sus características principales se describen con detalle en el apartado 3.1.6. A modo de resumen cabe destacar que disponemos de dos dosímetros TL (TLD-1 y TLD-2) ubicados a dos alturas distintas en la torre meteorológica de la estación ESCRA y un tercer dosímetro (TLD-3) ubicado en el interior de la estación. Los dosímetros de la torre meteorológica se encuentran a 275 cm (TLD-1) y a 135 cm (TLD-2) del suelo de la azotea.

Procedimiento de medida El procedimiento empleado para realizar las medidas de la tasa de dosis consistió en exponer los dosímetros TL a la radiación ambiental durante un periodo que oscilaba entre los 40 días y los 60 días, en función de la disponibilidad del laboratorio encargado de realizar las lecturas de los mismos. Transcurrido periodo de exposición el conjunto de dosímetros era retirado y sustituido por otro conjunto de dosímetros ya que de esta forma se cubría el máximo tiempo de integración sin interrupciones. En un plazo no superior a 24 horas se procedía a la lectura de los dosímetros TL en el Laboratorio de Calibración de Radiaciones Ionizantes del Instituto de Técnicas Energéticas. En el informe entregado por dicho laboratorio consta del número total de días de exposición a la radiación ambiental, la dosis total acumulada, la tasa de dosis correspondiente, y el factor de *fading* asociado (ver apartado 3.1.6).

Resultados de los dosímetros TL Los resultados presentados en este apartado corresponden a un total de cinco años — entre los años 1995 y 1999 —. En las tablas 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15 se encuentran los valores de las tasas de dosis registradas con los dosímetros TL junto con la incertidumbre asociada y el tiempo de exposición. En la tabla 5.16 se presentan los valores medios anuales y el valor medio para el periodo de cinco años de la tasa de dosis medida con los dosímetros. En la figura 5.21 se ha representado la tabla anterior para poder observar con más detalle la oscilación anual de la tasa de dosis y la diferencia entre las distintas posiciones. Por otro lado, en la figura 5.22 se ha representado la tasa de dosis media bimensual y el valor medio total de todo el periodo analizado.

De las tablas y gráficas descritas anteriormente se puede observar la relación existente entre la tasa de dosis medida a las diferentes alturas. Tomando como referencia la tasa de dosis registrada con el TLD2, $\dot{D}_{\text{TLD2}} = 82 \text{ nGy/h}$, la registrada con el TLD1, $\dot{D}_{\text{TLD1}} = 72 \text{ nGy/h}$ sufre una reducción de un 14%. Esta diferencia coincide con la existente entre los factores de dosis obtenidos mediante simulación MC para ambas posiciones según se puede observar en el apartado 4.5.3.

Por lo que respecta a la tasa de dosis registrada en el interior del laboratorio, $\dot{D}_{\text{TLD3}} = 99 \text{ nGy/h}$, se observa un valor superior a la registrada en las dos posiciones de la torre meteorológica. El incremento de tasa de dosis respecto al TLD2 que hemos tomado como referencia es del orden de un 37.5%. Esta diferencia se atribuye a la presencia de radionucleidos emisores gamma en los materiales de construcción del laboratorio (paredes, techo o suelo) y a que éstos envuelven el dosímetro TL en todas las direcciones, de forma que

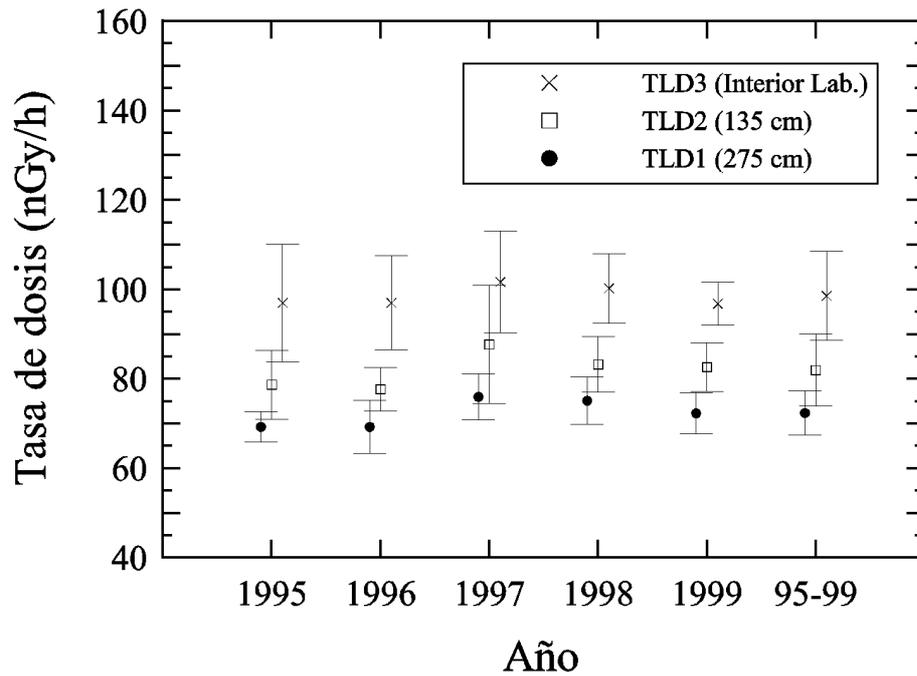


Figura 5.21: Valores medios anuales de la tasa de dosis ambiental medida con los dosímetros TL en la estación ESCRA durante los años 1995 a 1999. En el eje de abscisas, 95-99 corresponde al valor medio de la totalidad del periodo analizado.

Periodo (Inicio-fin)	Tiempo (días)	Tasa de dosis (nGy/h)		
		TLD-1	TLD-2	TLD-3
Enero-febrero	47	69 ± 3	80 ± 14	90 ± 3
Marzo-Abril	47	67 ± 3	77 ± 5	93 ± 16
Abril-mayo	43	75 ± 5	74 ± 9	103 ± 23
Junio-Julio	53	70 ± 3	80 ± 6	106 ± 19
Julio-Agosto	43	69 ± 4	81 ± 5	97 ± 6
Sept.-Octubre	44	66 ± 3	78 ± 5	96 ± 3
Novi.-Diciem.	57	69 ± 2	81 ± 5	94 ± 3

Cuadro 5.11: Resultados de la dosimetría ambiental en la estación ESCRA realizada con dosímetros de termoluminiscencia durante el año 1995.

el flujo de partículas ionizantes será superior al exterior y por lo tanto la tasa de dosis se verá incrementada.

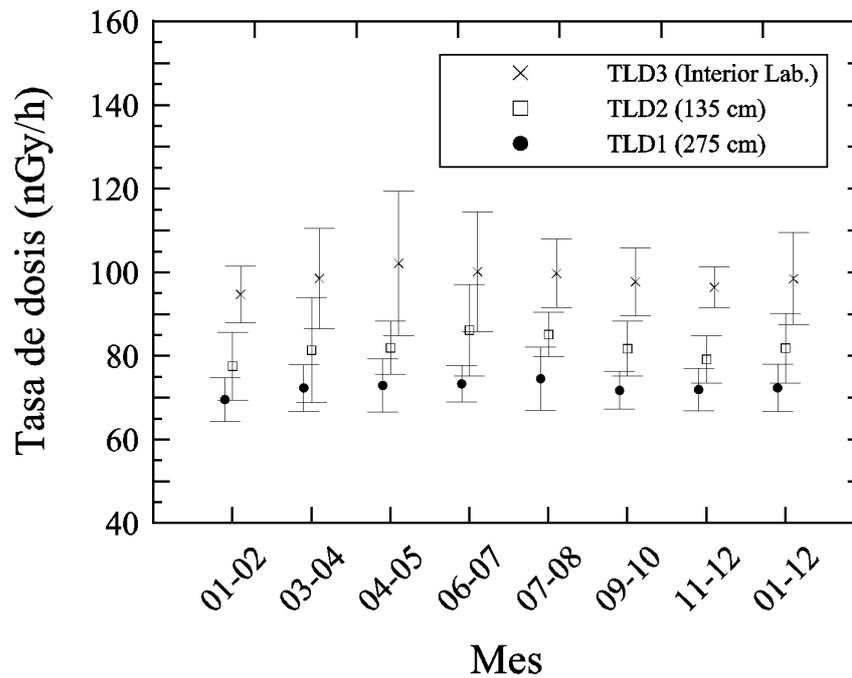


Figura 5.22: Variación bimensual de la tasa de dosis ambiental medida en la estación ESCRA con los dosímetros TL durante el periodo comprendido entre el año 1995 y el año 1999. En el eje de abscisas, 01-12 corresponde al valor medio de la totalidad de meses analizados.

Periodo (Inicio-fin)	Tiempo (días)	Tasa de dosis (nGy/h)		
		TLD-1	TLD-2	TLD-3
Enero-febrero	63	69 ± 6	79 ± 2	100 ± 9
Marzo-Abril	60	68 ± 4	76 ± 7	92 ± 3
Abril-mayo	42	66 ± 7	79 ± 5	109 ± 21
Junio-Julio	56	70 ± 3	75 ± 5	91 ± 3
Julio-Agosto	64	73 ± 10	81 ± 3	99 ± 10
Sept.-Octubre	56	71 ± 3	80 ± 5	92 ± 11
Novi.-Diciem.	64	68 ± 5	74 ± 5	96 ± 4

Cuadro 5.12: Resultados de la dosimetría ambiental en la estación ESCRA realizada con dosímetros de termoluminiscencia durante el año 1996.

Periodo (Inicio-fin)	Tiempo (días)	Tasa de dosis (nGy/h)		
		TLD-1	TLD-2	TLD-3
Enero-febrero	55	67 ± 3	73 ± 7	92 ± 5
Marzo-Abril	51	81 ± 7	91 ± 24	108 ± 14
Abril-mayo	47	76 ± 3	86 ± 6	97 ± 6
Junio-Julio	48	79 ± 6	104 ± 21	109 ± 23
Julio-Agosto	57	80 ± 6	88 ± 4	99 ± 6
Sept.-Octubre	49	77 ± 5	90 ± 9	110 ± 7
Novi.-Diciem.	50	72 ± 5	82 ± 4	97 ± 6

Cuadro 5.13: Resultados de la dosimetría ambiental en la estación ESCRA realizada con dosímetros de termoluminiscencia durante el año 1997.

Periodo (Inicio-fin)	Tiempo (días)	Tasa de dosis (nGy/h)		
		TLD-1	TLD-2	TLD-3
Enero-febrero	63	73 ± 3	79 ± 8	99 ± 5
Marzo-Abril	43	74 ± 7	80 ± 9	102 ± 15
Abril-mayo	51	76 ± 7	86 ± 3	105 ± 5
Junio-Julio	55	73 ± 4	83 ± 2	95 ± 8
Julio-Agosto	70	78 ± 5	83 ± 8	108 ± 7
Sept.-Octubre	68	73 ± 5	82 ± 3	94 ± 4
Novi.-Diciem.	71	79 ± 5	80 ± 6	99 ± 4

Cuadro 5.14: Resultados de la dosimetría ambiental en la estación ESCRA realizada con dosímetros de termoluminiscencia durante el año 1998.

Periodo (Inicio-fin)	Tiempo (días)	Tasa de dosis (nGy/h)		
		TLD-1	TLD-2	TLD-3
Enero-febrero	63	70 ± 6	77 ± 4	93 ± 3
Marzo-Mayo	61	72 ± 4	83 ± 3	98 ± 5
Mayo-Julio	63	72 ± 5	85 ± 5	97 ± 5
Julio-Sept.	72	75 ± 4	89 ± 8	100 ± 7
Sept.-Novi.	73	73 ± 3	83 ± 4	96 ± 4
Novi.-Diciem.	50	72 ± 5	79 ± 7	97 ± 4

Cuadro 5.15: Resultados de la dosimetría ambiental en la estación ESCRA realizada con dosímetros de termoluminiscencia durante el año 1999.

Periodo	Tiempo (días)	Tasa de dosis (nGy/h)		
		TLD-1	TLD-2	TLD-3
1995	334	69 ± 3	79 ± 8	97 ± 13
1996	405	69 ± 6	78 ± 5	97 ± 11
1997	357	76 ± 5	88 ± 13	102 ± 11
1998	421	75 ± 5	83 ± 6	100 ± 8
1999	382	72 ± 5	83 ± 5	97 ± 5
Valor medio		72 ± 5	82 ± 8	99 ± 10

Cuadro 5.16: Valores medios de la dosimetría ambiental TL en la estación ESCRA durante los años 1995 a 1999.

5.5. Modelización de la evolución de la tasa de dosis ambiental de origen natural

5.5.1. Introducción

De acuerdo con lo expuesto en la sección 2.4, la tasa de dosis ambiental de origen natural debe su origen, principalmente, a tres componentes: la componente terrestre, \dot{D}_{s0} , la componente cósmica, \dot{D}_c , y la componente debida a los descendientes del radón, \dot{D}_r . En el caso de periodos de lluvia será necesario añadir un término que hace referencia la dosis debida a la radiación gamma de ciertos descendientes del radón presentes en el agua de lluvia, que se expresará como \dot{D}_l . Tal y como se describe en la sección indicada anteriormente, la lectura de la dosis entregada por las sondas no coincide con el valor real de la tasa de dosis. Por este motivo se emplean las expresiones 2.27 y 2.31 (ver páginas 2-51 y 2-52 respectivamente) para modelizar la tasa de dosis en periodos secos y húmedos. La obtención de los parámetros que intervienen en las expresiones anteriores, permitirá estimar la tasa de dosis real.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la modelización de la tasa de dosis ambiental medida con diversas sondas en periodos secos y húmedos.

5.5.2. Evolución de la dosis en períodos secos

Durante los periodos secos, y en ausencia de fuentes de radiación gamma artificiales, la tasa de dosis ambiental de origen natural medida por una sonda se puede expresar según 5.1 (para más detalles ver página 2-51)

$$\dot{D}'_{seco} - \dot{D}_b = \dot{D}'_{s0} - a'_c(p - p_0) + a'_r C_r. \quad (5.1)$$

Nuestro interés se centrará en determinar los coeficientes, \dot{D}'_{s0} , a'_c y a'_r para las sondas disponibles en la Estación ESCRA que se describen en la sección 3.1.

Método empleado

La obtención de coeficientes \dot{D}'_{s0} , a'_c y a'_r se ha realizado mediante el ajuste de la función 5.1 con los valores de la tasa de dosis medida con cada sonda, la presión atmosférica, y la concentración de radón ambiental.

Para la realización de dicho ajuste se han empleado dos programas de análisis denominados `FRD.EXE` y `FRDALL.EXE`, desarrolladas específicamente para estos estudios. El lenguaje de programación utilizado para su desarrollo es `C` lo que permite su compilación en diversos sistemas operativos (MS-DOS, UNIX o LINUX). La ventaja del empleo de dichas aplicaciones en los sistemas operativos anteriormente mencionados consiste en la posibilidad de automatizar el proceso de análisis cuando el volumen de datos es muy elevado.

Formato de los ficheros de entrada de datos Los ficheros de entrada de datos (meteorológicos y radiológicos) a los programas de análisis `FRD.EXE` y `FRDALL.EXE`, deben encontrarse en el formato ESCRA-C, que se describe en la sección 3.3. En total deberemos disponer de 4 ficheros de datos denominados: `DOSERATE.DAT` para la tasa de dosis medida expresada en unidades de $\mu\text{Gy/h}$; `PRESSURE.DAT` para la presión atmosférica, expresada en unidades de mbar; `RADON.DAT` para la concentración de radón expresada en unidades de Bq/m^3 ; y `RAINRATE.DAT` para la intensidad de lluvia, expresada en unidades de $\text{l m}^{-2}\text{h}^{-1}$. Este último fichero es necesario para identificar los periodos de lluvia y eliminarlos del análisis. Cabe indicar que la tasa de dosis, \dot{D}_m , que contiene el fichero `DOSERATE.DAT` equivale a la tasa de dosis obtenida por la sonda una vez sustraído el fondo intrínseco de la misma, $\dot{D}_m = \dot{D}'_{\text{seco}} - \dot{D}_b$.

A continuación se detallan los requisitos que deben cumplir los ficheros de entrada de datos para que sean procesados correctamente por los programas de análisis:

- Primera columna Contiene el tiempo expresado en segundos. El origen de tiempo se encuentra en el día 1 de enero de 1970 a las 0:00 horas.
- Segunda columna El valor numérico de la variable medida (meteorológica o radiológica). Los datos de dicha columna estan separados por un espacio en blanco de los datos de la primera columna.
- Cada fila termina con un salto de línea.
- El primer y último de dato de cada columna corresponde a una señal de control. Su valor es $-1\text{e}+15$.
- Todo dato anómalo o inexistente se marca como $-1\text{e}+15$. Estos valores son descartados por el programa de análisis.
- Es necesario que exista un fichero de entrada de datos para cada variable empleada en el ajuste.
- Los datos de cada fichero de entrada estan sincronizados entre ellos. Para realizar la sincronización de datos y medias temporales se ha empleado el programa `MEAN.EXE` que forma parte de las rutinas de análisis de la Estación ESCRA (ver 3.3).

Formato del fichero de salida Contiene la información del análisis realizado con los datos de los ficheros de entrada. La información generada es la siguiente:

- Parámetros globales
 - Número de puntos empleados en el ajuste
 - Suma de los cuadrados de los errores ponderados por la incertidumbre, χ^2
 - Probabilidad, Q , de obtener el valor χ^2 . Esta magnitud proporciona una idea de la bonanza del ajuste y debe ser superior a 0.1.

- Desviación media, σ , que definimos como el valor medio de la diferencia entre la tasa de dosis medida, \dot{D}_m , y la tasa de dosis calculada, \dot{D}_{fit} , con los coeficientes del ajuste según se desprende de la expresión 5.2, donde N es el número total de puntos analizados.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\dot{D}_m - \dot{D}_{fit})^2}{N}} \quad (5.2)$$

- Presión de referencia utilizada en el modelo, p_0 .
 - Valor del factor de sobreestimación de la componente cósmica, e
 - Valor los coeficientes \dot{D}'_{s0} , a'_c y a'_r .
- Valores para cada punto
 - Tasa de dosis medida (valor presente en el fichero de entrada) y su incertidumbre asociada, \dot{D}_m y $\sigma(D_m)$ respectivamente.
 - Tasa de dosis estimada por el modelo y su incertidumbre asociada, \dot{D}'_{fit} y $\sigma(D_{fit})$ respectivamente.
 - Valor numérico de cada una de las tres componentes de la expresión 5.1: el término constante, \dot{D}'_{s0} , el término debido a la componente cósmica, a'_c , y el término del radón, a'_r .

Resultados obtenidos en la Estación ESCRA

El método descrito anteriormente se ha aplicado para modelizar la tasa de dosis medida por las sondas FAG FHZ601A (en adelante sonda FHZ601A) y Reuter-Stokes (en adelante sonda RS) de la Estación ESCRA. Las características de ambas sondas se describen en la sección 3.1.4 (ver página 3-9).

Sonda FHZ601A El periodo de tiempo analizado corresponde a los años 1995, 1997 y 1998. Se ha escogido este periodo en función de la operatividad de los equipos de medida. Es preciso disponer de datos simultáneos de tasa de dosis, presión, concentración de radón e intensidad de lluvia, para poder determinar los coeficientes que intervienen en el modelo de la tasa de dosis medida. Ello implica que la carencia de una sola de dichas variables impide la aplicación del modelo para el instante de tiempo correspondiente. Para el año 1997 se han eliminado los datos correspondientes a septiembre y para el año 1998 se han eliminado los datos correspondientes a los meses de marzo, junio y octubre. Esto es debido a que la mayoría de datos concentración de radón y/o tasa de dosis para dichos periodos són erróneos por problemas en el funcionamiento de los sensores. Tampoco se dispone de datos correspondientes al año 1996 debido a que la sonda FHZ601A se encontraba en proceso de reparación debido a un fallo en su funcionamiento.

En las tablas, 5.17, 5.18 y 5.19 se presentan los valores de los coeficientes D'_{s0} , a'_c y a'_r correspondientes a los diversos meses de los años 1995, 1997 y 1998. Dichos coeficientes han sido obtenidos con el programa FRD.EXE. Se observa que el valor medio (años 1995, 1997 y 1998) del término D'_{s0} correspondiente a la componente constante de la tasa de dosis medida es del orden de $96.6 \text{ nGy/h} \pm 0.4 \text{ nGy/h}$. La oscilación de este parámetro es muy pequeña

sufriendo una desviación el valor máximo y mínimo respecto del valor medio del orden de 2%. En la figura 5.23 se encuentra representada la variación mensual de dicho parámetro para los tres años analizados. Se puede apreciar la poca oscilación de los valores calculados.

El parámetro, a'_c de la componente cósmica, sufre una mayor oscilación entre el valor máximo y mínimo respecto del valor medio que es de 0.142 ± 0.004 nGy/h por cada hPa de decremento en la presión atmosférica. Este valor difiere entre el máximo (0.168 nGy/h por hPa) y el mínimo (0.117 nGy/h por hPa) en un 18%. Esta fluctuación es más importante que la debida al término constante debido a fluctuaciones en la intensidad de la radiación cósmica independientes de la presión atmosférica y que no intervienen en el modelo. Por ejemplo, la existencia de erupciones solares (efecto Forbush) o la variación entre periodos nocturnos y diurnos. En la figura 5.24 se representa la variación mensual de la componente cósmica

Otro de los coeficientes obtenidos mediante el ajuste con el programa FRD.EXE consiste en la componente, a'_r , que cuantifica el efecto de los descendientes del radón (emisores de radiación gamma) presentes en la atmósfera, en la tasa de dosis medida. El valor medio de dicho parámetro es de 0.31 ± 0.01 nGy/h por Bq/m³. La diferencia con el valor máximo es de un 45% y con el valor mínimo de un 33%. Esta fluctuación es debida a que las dimensiones del término fuente varían en función de las condiciones climáticas. En situaciones de inversión térmica el volumen de aire que contiene descendientes de radón emisores de radiación gamma es inferior al volumen cuando no existe dicha inversión. Por este motivo, aunque la concentración de radón sea la misma, la influencia en la tasa de dosis total será inferior en el caso de la inversión térmica. Esto implica que en situaciones de inversión térmica, el valor del parámetro a'_r sea inferior a otras situaciones. Lo expuesto anteriormente se confirma al observar la figura 5.25, donde aprecia un incremento de dicho parámetro durante los meses más calurosos (finales de primavera y verano), cuando la inversión térmica no es tan frecuente como en los meses más fríos (invierno, principios de primavera y finales de otoño).

Para comprobar la bonanza del ajuste se ha calculado la probabilidad Q para todos los meses de los años analizados y se han obtenido valores próximos a la unidad, muy superiores al límite inferior $Q= 0.1$, para todos los periodos con datos. En las figuras citadas anteriormente se ha introducido otro la desviación media, σ , calculada para cada mes. Los valores obtenidos oscilan entre 0.89 nGy/h y 1.03 nGy/h.

En las figuras 5.26, 5.27, 5.28 y 5.29 se ha representado la tasa de dosis medida (símbolo en forma de triángulo) junto con la tasa de dosis ajustada (línea continua) para los meses de enero (invierno), abril (primavera), agosto (verano) y octubre (otoño) del año 1995. En los cuatro gráficos se aprecia que en general el modelo reproduce de forma aceptable la tasa de dosis medida.

Mes-Año	Nº Datos	D'_{s0} (nGy/h)	a'_c (nGy/h por hPa)	a'_r (nGy/h por Bq/m ³)	σ (nGy/h)
01-95	1216	97.9 ± 0.2	0.147 ± 0.001	0.32 ± 0.01	0.89
02-95	1299	97.9 ± 0.1	0.1532 ± 0.0004	0.272 ± 0.003	0.92
03-95	1332	98.0 ± 0.1	0.1338 ± 0.0004	0.294 ± 0.007	0.90
04-95	1234	97.8 ± 0.2	0.1478 ± 0.0006	0.288 ± 0.008	0.91
05-95	1278	97.5 ± 0.2	0.1564 ± 0.0008	0.28 ± 0.01	0.92
06-95	1270	97.5 ± 0.3	0.143 ± 0.002	0.246 ± 0.007	0.86
07-95	1240	97.0 ± 0.4	0.168 ± 0.002	0.297 ± 0.009	0.93
08-95	1207	97.3 ± 0.7	0.154 ± 0.004	0.28 ± 0.01	1.03
09-95	1218	97.5 ± 0.3	0.117 ± 0.001	0.32 ± 0.01	0.94
10-95	1286	97.1 ± 0.2	0.168 ± 0.003	0.307 ± 0.005	0.92
11-95	1254	97.7 ± 0.2	0.1504 ± 0.0006	0.267 ± 0.005	0.95
12-95	1146	98.2 ± 0.3	0.1196 ± 0.0005	0.223 ± 0.004	0.93

Cuadro 5.17: Coeficientes de los componentes de la dosis medida con la sonda FHZ601A instalada en la Estación ESCRA, obtenidos mediante el programa FRD.EXE para el año 1995.

Mes-Año	Nº Datos	D'_{s0} (nGy/h)	a'_c (nGy/h por hPa)	a'_r (nGy/h por Bq/m ³)	σ (nGy/h)
01-97	926	96.2 ± 0.3	0.1415 ± 0.0006	0.26 ± 0.02	0.90
02-97	1274	96.5 ± 0.1	0.1455 ± 0.0007	0.270 ± 0.005	0.89
03-97	1280	96.7 ± 0.1	0.1399 ± 0.0005	0.273 ± 0.004	0.88
04-97	1222	96.8 ± 0.1	0.1335 ± 0.0006	0.240 ± 0.006	1.09
05-97	1291	95.9 ± 0.2	0.1670 ± 0.0009	0.30 ± 0.02	0.86
06-97	1247	97.7 ± 0.3	0.1360 ± 0.001	0.368 ± 0.009	0.88
07-97	965	95.5 ± 0.3	0.136 ± 0.003	0.367 ± 0.009	0.88
08-97	1269	95.6 ± 0.3	0.137 ± 0.002	0.336 ± 0.007	0.91
09-97	—	—	—	—	—
10-97	1296	96.4 ± 0.3	0.118 ± 0.001	0.268 ± 0.003	0.90
11-97	1280	96.9 ± 0.4	0.1176 ± 0.0008	0.206 ± 0.005	0.96
12-97	1246	96.4 ± 0.2	0.1276 ± 0.0005	0.289 ± 0.005	0.97

Cuadro 5.18: Coeficientes de los componentes de la dosis medida con la sonda FHZ601A instalada en la Estación ESCRA, obtenidos mediante el programa FRD.EXE para el año 1997.

Mes-Año	Nº Datos	D'_{s0} (nGy/h)	a'_c (nGy/h por hPa)	a'_r (nGy/h por Bq/m ³)	σ (nGy/h)
01-98	1260	96.0 ± 0.2	0.1478 ± 0.0006	0.324 ± 0.009	0.96
02-98	1040	96.3 ± 0.1	0.1324 ± 0.0004	0.226 ± 0.003	0.90
03-98	–	–	–	–	–
04-98	436	96 ± 1	0.151 ± 0.003	0.33 ± 0.07	0.89
05-98	913	94.9 ± 0.2	0.163 ± 0.002	0.43 ± 0.01	1.02
06-98	–	–	–	–	–
07-98	1376	94.9 ± 0.3	0.133 ± 0.002	0.38 ± 0.02	0.87
08-98	1115	94.7 ± 0.4	0.143 ± 0.004	0.45 ± 0.01	0.96
09-98	1202	95.0 ± 0.3	0.1219 ± 0.0008	0.39 ± 0.02	0.92
10-98	1324	95.2 ± 0.1	0.1545 ± 0.0005	0.314 ± 0.007	0.95
11-98	–	–	–	–	–
12-98	1356	95.2 ± 0.1	0.1528 ± 0.0004	0.347 ± 0.003	0.94

Cuadro 5.19: Coeficientes de los componentes de la dosis medida con la sonda FHZ601A instalada en la Estación ESCRA, obtenidos mediante el programa FRD.EXE para el año 1998.

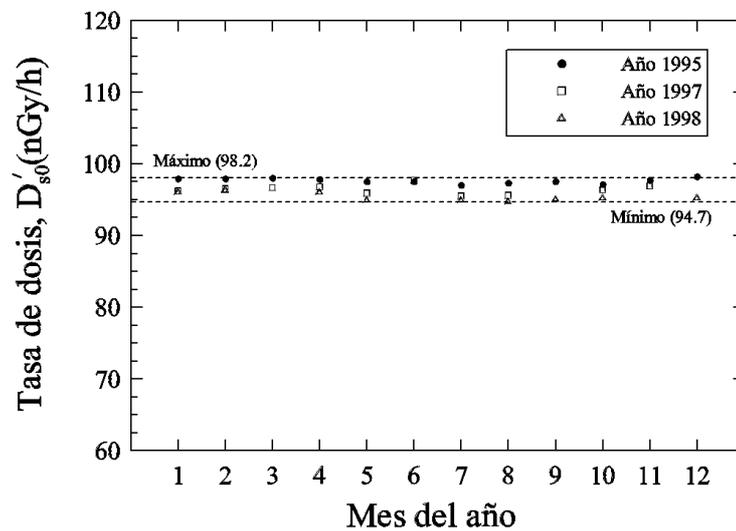


Figura 5.23: Representación de la variación mensual de la componente terrestre, D'_{s0} , obtenida por ajuste al modelo teórico de la tasa de dosis medida. Sonda FHZ601A instalada en la Estación ESCRA. Periodo analizado: años 1995, 1997 y 1998.

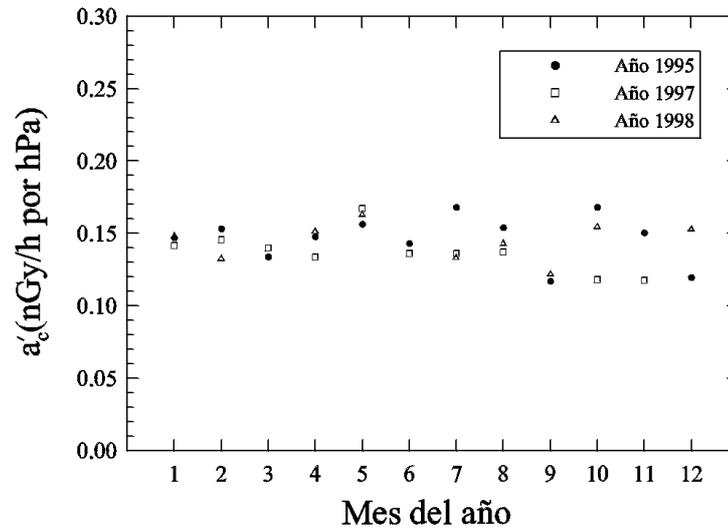


Figura 5.24: Representación de la variación mensual de la componente cósmica, a'_c , obtenida por ajuste al modelo teórico de la tasa de dosis medida. Sonda FHZ601A instalada en la Estación ESCRA. Periodo analizado: años 1995,1997 y 1998.

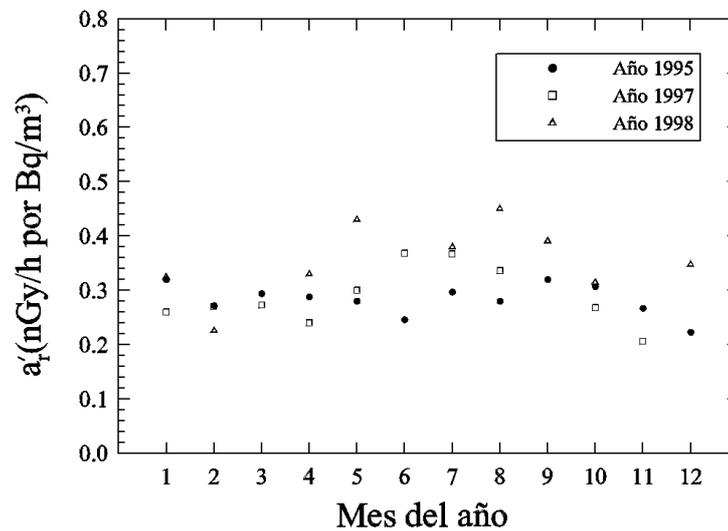


Figura 5.25: Representación de la variación mensual de la componente del radón, a'_r , obtenida por ajuste al modelo teórico de la tasa de dosis medida. Sonda FHZ601A instalada en la Estación ESCRA. Periodo analizado: años 1995,1997 y 1998.

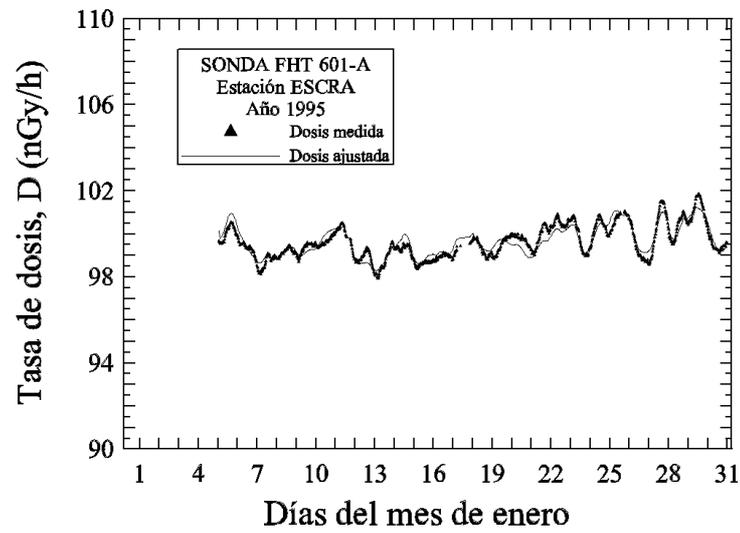


Figura 5.26: Comparación entre la tasa de dosis medida en la estación ESCRA y la tasa de dosis ajustada durante el mes de enero del año 1995. Sonda FHZ601A

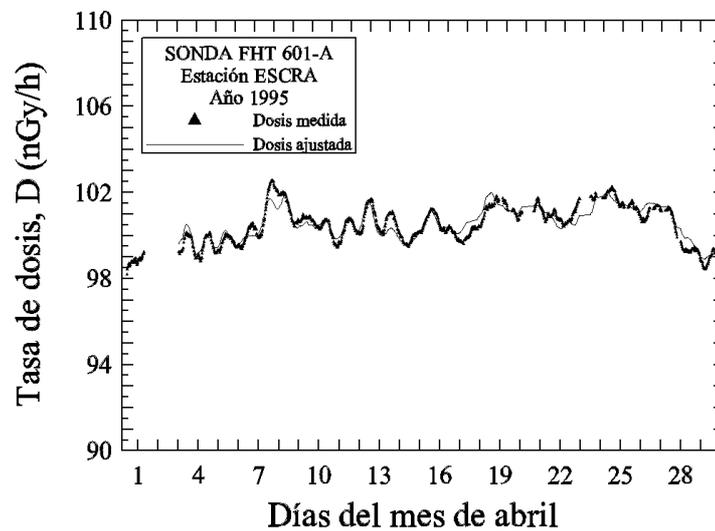


Figura 5.27: Comparación entre la tasa de dosis medida en la estación ESCRA y la tasa de dosis ajustada durante el mes de abril del año 1995. Sonda FHZ601A

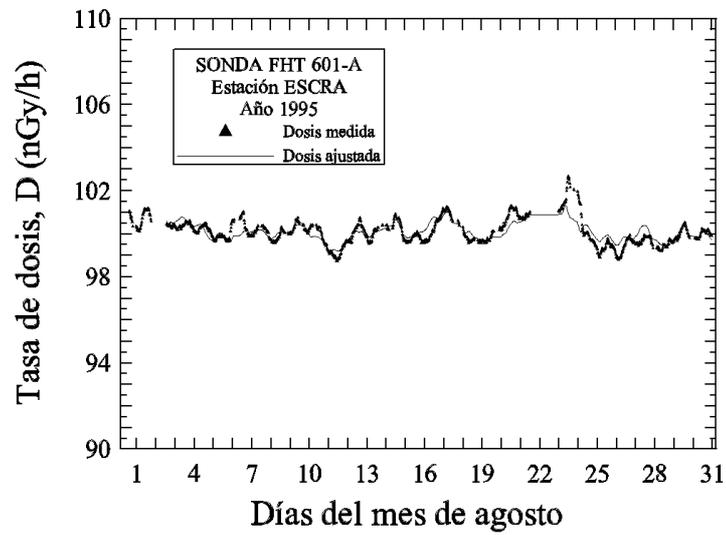


Figura 5.28: Comparación entre la tasa de dosis medida en la estación ESCRA y la tasa de dosis ajustada durante el mes de agosto del año 1995. Sonda FHT601A

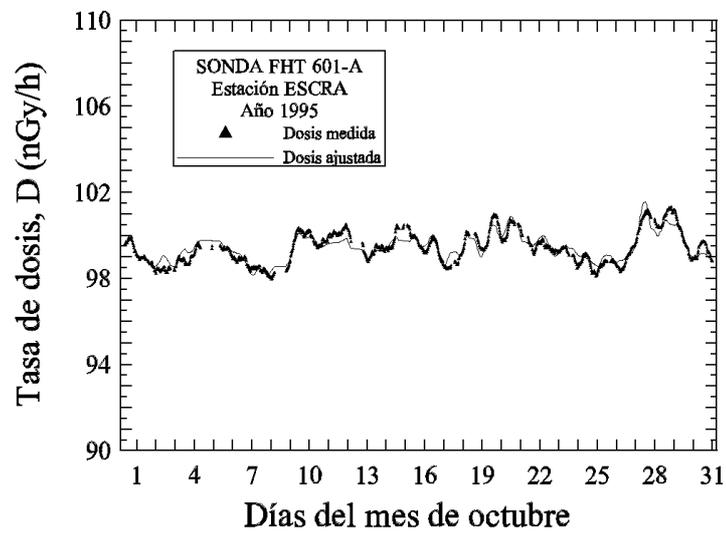


Figura 5.29: Comparación entre la tasa de dosis medida en la estación ESCRA y la tasa de dosis ajustada durante el mes de octubre del año 1995. Sonda FHT601A

Sonda RS El periodo de tiempo analizado corresponde a los años 1996, 1997 y 1998. Al igual que la sonda FHZ601A, se ha escogido dicho intervalo de tiempo en función de la operatividad de los equipos de medida. No se dispone de datos correspondientes al año 1995 debido a que la sonda RS se instaló en la estación ESCRA a finales del mes de octubre del año 1995. Debido a problemas técnicos no estuvo operativa hasta mediados del mes de diciembre de dicho año, por lo que se han desestimado dichos datos. Para el año 1996 sólo se han utilizado los datos correspondientes a los meses de junio hasta diciembre, ya que los datos obtenidos de la tasa de dosis no son comparables con el resto del periodo analizado al estar situada la sonda en una ubicación distinta a la posición habitual. Para el año 1997 se han eliminado los datos de los meses de enero y marzo por problemas en el funcionamiento de la sonda y los datos del mes de septiembre por estar el equipo de radón fuera de operación. Por último, durante el año 1998 se han eliminado los datos de los meses de abril, mayo y diciembre por problemas en los datos registrados por la sonda.

En las tablas, 5.20, 5.21 y 5.22 se presentan los valores de los coeficientes D'_{s0} , a'_c y a'_r correspondientes a los diversos meses de los años 1996, 1997 y 1998. Dichos coeficientes han sido obtenidos con el programa FRD.EXE. Se observa que el valor medio (años 1996, 1997 y 1998) del término D'_{s0} correspondiente a la componente constante de la tasa de dosis medida es del orden de $65.7 \text{ nGy/h} \pm 0.3 \text{ nGy/h}$. La oscilación de este parámetro es muy pequeña sufriendo una desviación el valor máximo y mínimo respecto del valor medio del orden de 5% . En la figura 5.30 se encuentra representada la variación mensual de dicho parámetro para los tres años analizados. Se puede apreciar la poca oscilación de los valores calculados.

El parámetro, a'_c de la componente cósmica, sufre una mayor oscilación entre el valor máximo y mínimo respecto del valor medio que es de $0.096 \pm 0.002 \text{ nGy/h}$ por cada hPa de decremento en la presión atmosférica. Este valor difiere entre el máximo (0.114 nGy/h por hPa) y el mínimo (0.065 nGy/h por hPa) en un 50% . Al igual que ocurre con la sonda FHZ601A, esta fluctuación es más importante que la debida al término constante debido a fluctuaciones en la intensidad de la radiación cósmica independientes de la presión atmosférica y que no intervienen en el modelo. En la figura 5.31 se representa la variación mensual de la componente cósmica

Otro de los coeficientes obtenidos mediante el ajuste con el programa FRD.EXE consiste en la componente, a'_r , que cuantifica el efecto de los descendientes del radón (emisores de radiación gamma) presentes en la atmósfera, en la tasa de dosis medida. El valor medio de dicho parámetro es de $0.278 \pm 0.002 \text{ nGy/h}$ por Bq/m^3 . La diferencia con el valor máximo es de un 27% y con el valor mínimo de un 43% . Las causas de la fluctuación de dicho parámetro son las mismas que se han descrito anteriormente en el apartado correspondiente a la sonda FHZ601A.

Al igual que la sonda FHZ601A, se ha determinado la bonanza del ajuste mediante el parámetro Q . El valor obtenido para el conjunto de meses con datos válidos es próximo a la unidad por lo que se confirma de nuevo la validez de los resultados obtenidos. Por lo que respecta a la desviación media, los resultados obtenidos oscilan entre 0.49 nGy/h y 1.17 nGy/h , resultados similares a los obtenidos con la sonda FHZ601A.

En las figuras 5.33, 5.34, 5.35 y 5.36 se ha representado la tasa de dosis medida (símbolo en forma de triángulo) junto con la tasa de dosis ajustada (línea continua) para los meses de julio (verano), octubre (otoño) y enero (invierno) del año 1998 y mayo (primavera) del año

1997. En los cuatro gráficos se aprecia que en general el modelo reproduce de forma aceptable la tasa de dosis medida.

Mes-Año	Nº Datos	D'_{s0} (nGy/h)	a'_c nGy/h por hPa	a'_r nGy/h por Bq/m ³	σ nGy/h
06-96	1310	65.64 ± 0.08	0.0729 ± 0.0006	0.276 ± 0.003	0.59
07-96	1285	64.86 ± 0.08	0.1078 ± 0.0006	0.347 ± 0.002	0.50
08-96	1162	65.5 ± 0.3	0.065 ± 0.002	0.289 ± 0.005	0.49
09-96	1200	65.2 ± 0.1	0.1132 ± 0.0004	0.286 ± 0.006	0.50
10-96	1028	65.8 ± 0.1	0.0687 ± 0.0005	0.220 ± 0.002	0.51
11-96	1149	66.38 ± 0.07	0.1010 ± 0.0002	0.192 ± 0.002	0.60
12-96	1168	66.1 ± 0.1	0.1091 ± 0.0002	0.352 ± 0.005	0.67

Cuadro 5.20: Coeficientes de los componentes de la dosis medida con la sonda Reuter-Stokes instalada en la Estación ESCRA, obtenidos mediante el programa FRD.EXE para el año 1996.

Mes-Año	Nº Datos	D'_{s0} (nGy/h)	a'_c nGy/h por hPa	a'_r nGy/h por Bq/m ³	σ nGy/h
01-97	–	–	–	–	1.04
02-97	1137	68.20 ± 0.06	0.1118 ± 0.0004	0.159 ± 0.003	1.03
03-97	–	–	–	–	–
04-97	1305	65.79 ± 0.05	0.0940 ± 0.0003	0.295 ± 0.003	0.74
05-97	1293	65.7 ± 0.1	0.1058 ± 0.0004	0.293 ± 0.006	0.68
06-97	1247	65.3 ± 0.1	0.0961 ± 0.0005	0.326 ± 0.004	0.62
07-97	965	65.1 ± 0.2	0.114 ± 0.002	0.295 ± 0.004	0.49
08-97	1269	65.1 ± 0.1	0.0998 ± 0.0008	0.273 ± 0.003	0.69
09-97	–	–	–	–	–
10-97	1296	65.9 ± 0.1	0.0671 ± 0.0006	0.213 ± 0.001	0.57
11-97	1280	66.1 ± 0.2	0.0786 ± 0.0004	0.200 ± 0.003	0.58
12-97	1246	65.8 ± 0.1	0.0947 ± 0.0003	0.299 ± 0.002	0.58

Cuadro 5.21: Coeficientes de los componentes de la dosis medida con la sonda Reuter-Stokes instalada en la Estación ESCRA, obtenidos mediante el programa FRD.EXE para el año 1997.

Mes-Año	Nº Datos	D'_{s0} (nGy/h)	a'_c nGy/h por hPa	a'_r nGy/h por Bq/m ³	σ nGy/h
01-98	1259	65.46 ± 0.08	0.1232 ± 0.0003	0.351 ± 0.004	0.75
02-98	1040	66.06 ± 0.05	0.0995 ± 0.0002	0.207 ± 0.001	0.63
03-98	1377	66.25 ± 0.05	0.1011 ± 0.0005	0.261 ± 0.003	1.17
04-98	1296	–	–	–	–
05-98	1209	–	–	–	–
06-98	1013	65.02 ± 0.06	0.0937 ± 0.0007	0.331 ± 0.008	0.59
07-98	1433	64.8 ± 0.1	0.0971 ± 0.0009	0.353 ± 0.009	0.55
08-98	873	65.2 ± 0.2	0.107 ± 0.002	0.244 ± 0.008	0.61
09-98	1181	–	–	–	0.62
10-98	1324	65.05 ± 0.05	0.1040 ± 0.0002	0.281 ± 0.003	0.67
11-98	1300	65.70 ± 0.08	0.0906 ± 0.0003	0.321 ± 0.002	0.88
12-98		–	–	–	–

Cuadro 5.22: Coeficientes de los componentes de la dosis medida con la sonda Reuter-Stokes instalada en la Estación ESCRA, obtenidos mediante el programa FRD.EXE para el año 1998.

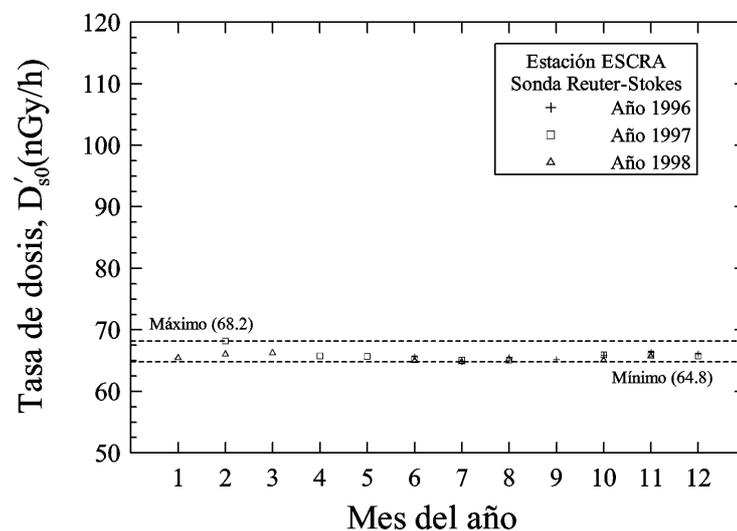


Figura 5.30: Representación de la variación mensual de la componente terrestre, D'_{s0} , obtenida por ajuste al modelo teórico de la tasa de dosis medida. Sonda Reuter-Stokes instalada en la Estación ESCRA. Periodo analizado: años 1996, 1997 y 1998.

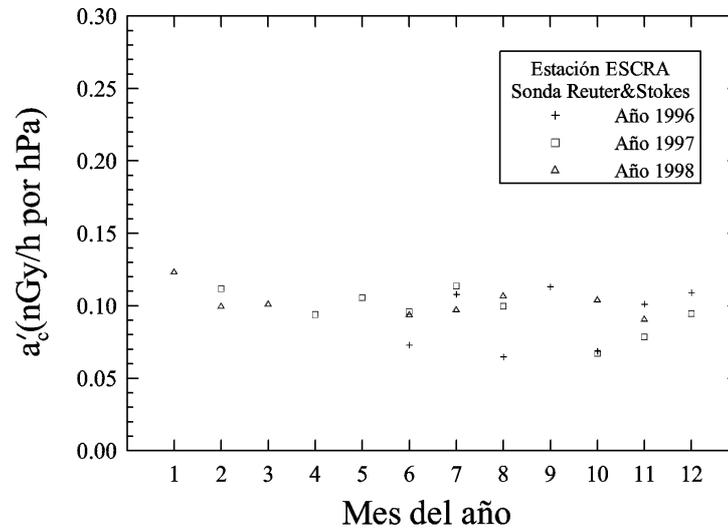


Figura 5.31: Representación de la variación mensual de la componente cósmica, a'_c , obtenida por ajuste al modelo teórico de la tasa de dosis medida. Sonda Reuter-Stokes instalada en la Estación ESCRA. Periodo analizado: años 1996,1997 y 1998.

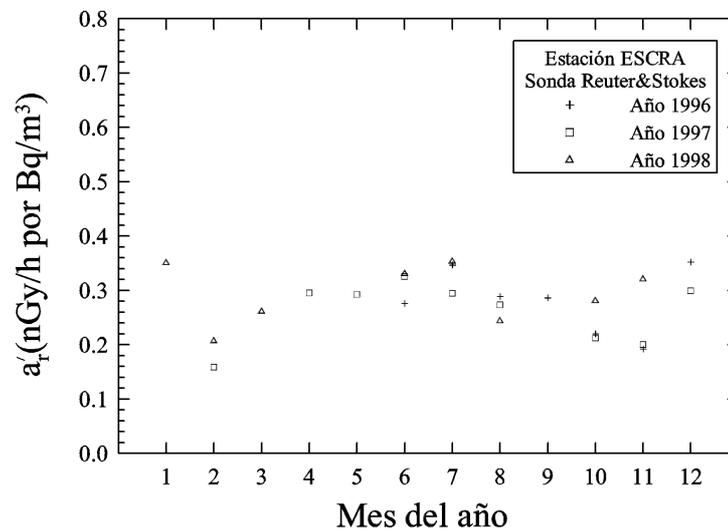


Figura 5.32: Representación de la variación mensual de la componente del radón, a'_r , obtenida por ajuste al modelo teórico de la tasa de dosis medida. Sonda Reuter-Stokes instalada en la Estación ESCRA. Periodo analizado: años 1996,1997 y 1998.

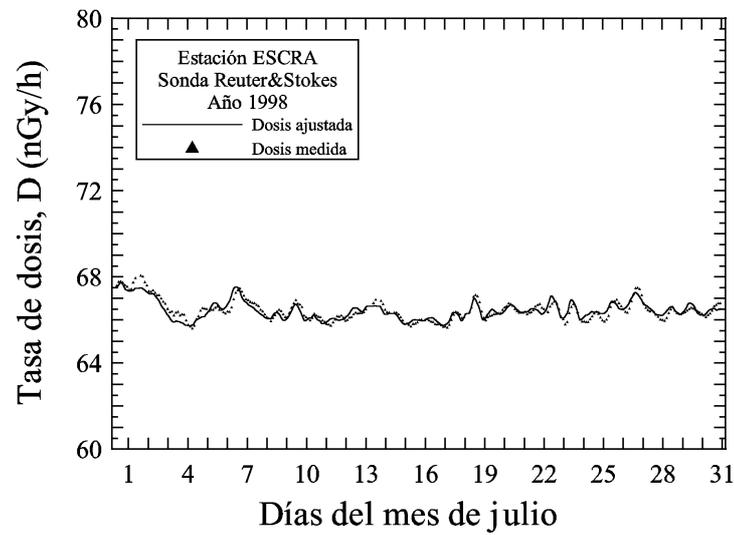


Figura 5.33: Comparación entre la tasa de dosis medida en la estación ESCRA y la tasa de dosis ajustada durante el mes de julio del año 1998. Sonda Reuter-Stokes.

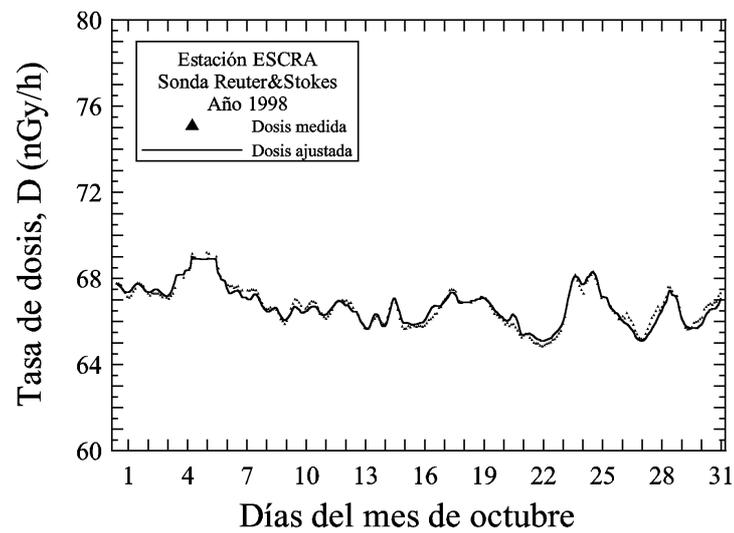


Figura 5.34: Comparación entre la tasa de dosis medida en la estación ESCRA y la tasa de dosis ajustada durante el mes de octubre del año 1998. Sonda Reuter-Stokes

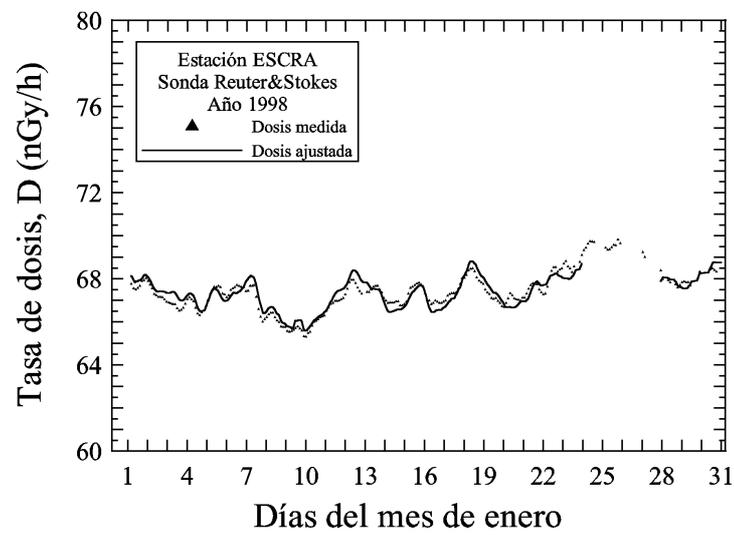


Figura 5.35: Comparación entre la tasa de dosis medida en la estación ESCRA y la tasa de dosis ajustada durante el mes de enero del año 1998. Sonda Reuter-Stokes

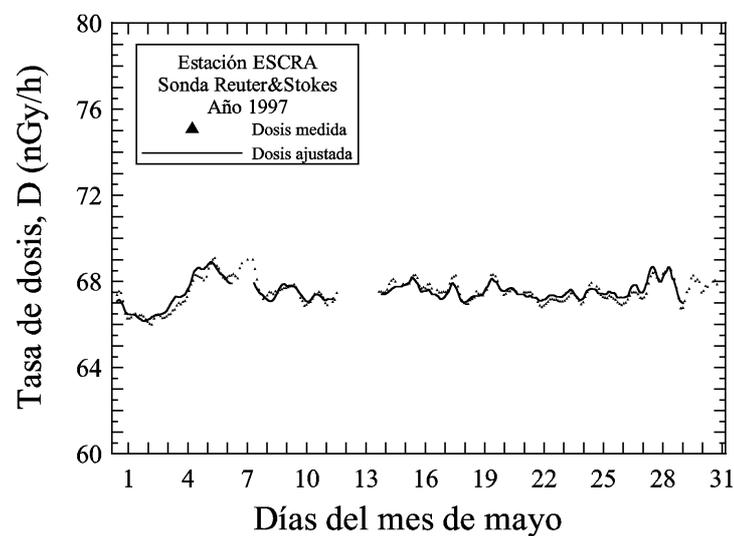


Figura 5.36: Comparación entre la tasa de dosis medida en la estación ESCRA y la tasa de dosis ajustada durante el mes de mayo del año 1997. Sonda Reuter-Stokes

Relación entre los coeficientes D'_{s0} , a'_c , a'_r de la sonda FHZ601A y los de la sonda RS

- **Coefficiente D'_{s0} :** Tal y como se describe en la expresión 2.10 de la sección 2.4, este parámetro incluye tanto el término correspondiente a la dosis debida a la radiación terrestre, como la componente constante de la tasa de dosis cósmica. El valor medio correspondiente a la sonda RS es de 65.7 nGy/h en cambio para la sonda FHZ601A es de 96.6 nGy/h. La diferencia observada entre ambas sondas es significativa y se puede atribuir, principalmente, a tres factores que se describen a continuación:

 - La respuesta frente a la radiación terrestre: Si observamos las figuras 3.4 y 3.5 donde se representa la respuesta energética de la sonda RS y FHZ601A respectivamente, se observa que la respuesta frente a energías superiores a 1 MeV es superior para la sonda FHZ601A que para la sonda RS. Para esta última sonda, la respuesta es bastante constante hasta energías del orden de 3 MeV, mientras que para la sonda FHZ601A la respuesta crece de forma significativa. Debido a que gran parte de la tasa de dosis terrestre proviene de la transición gamma de 1460 keV del ^{40}K , la lectura de la dosis medida por el contador proporcional FHZ601A será superior a la de la cámara de ionización RS.
 - Posición de las sondas: La distinta ubicación de ambas sondas implica que el campo de radiación observado sea diferente. Debido a que la sonda RS se encuentra a mayor distancia del suelo que la sonda FHZ601A, el campo de radiación que proviene del terreno será inferior para la sonda RS con lo que la tasa de dosis depositada será menor que en la sonda FHZ601A.
 - Respuesta frente a la radiación cósmica: Cada sonda posee una respuesta frente a los muones de origen cósmico distinta. En el caso los detectores proporcionales (sonda FHZ601A) la sobreestimación de la dosis debida a dicha radiación es superior a la producida en las cámaras de ionización Reuter-Stokes. Por este motivo es posible que la dosis medida por la sonda FHZ601A sea superior a la medida por la sonda RS.
- **Coefficiente a'_c** Este parámetro, que representa la variación de la tasa de dosis cósmica con la presión atmosférica, también difiere entre dos sondas distintas. El motivo es similar a planteado en el punto anterior. La respuesta de cada sonda frente a la radiación cósmica es distinta. Por este motivo, para la sonda FHZ601A, $a'_c = 0.142$ nGy/h por hPa, mientras que para la sonda RS, $a'_c = 0.096$ nGy/h por hPa. Esta diferencia es significativa y está de acuerdo con lo expuesto anteriormente, ya que el valor de a_c es superior para la sonda FHZ601A que posee una mayor sobreestimación de la radiación cósmica.
- **Coefficiente a'_r** Representa la relación entre la concentración de radón ambiental y la tasa de dosis generada en un punto por sus descendientes emisores gamma. Si comparamos los valores medios obtenidos para ambas sondas (0.278 nGy/h por Bq/m³ para la sonda RS y 0.31 nGy/h por Bq/m³ para la sonda FHZ601A), se observa que la diferencia es poco significativa. La variación entre el valor correspondiente a la sonda RS y la sonda FHZ601A es de un 11.5 % valor muy inferior a la variación que experimenta dicho parámetro para una sonda dada entre diferentes estaciones del año. De esta forma se puede concluir que el parámetro a'_r sufre una oscilación a lo largo del año en

funcion de las condiciones ambientales y es prácticamente independiente de la sonda empleada. Únicamente existirá diferencia cuando la respuesta angular y energética de ambas sondas sea muy distinta. En este caso, la respuesta de ambas sondas frente a la radiación gamma más abundante, correspondiente a los 609 keV del ^{214}Bi , es muy similar de forma que el factor de dosis a'_r será también muy parecido.

Generalización de la tasa de dosis en periodos secos Con la finalidad de generalizar el modelo de la tasa de dosis en episodios secos para cualquier periodo de tiempo, se han calculado los coeficientes D'_{s0} , a'_c y a'_r correspondientes a ambas sondas, a partir de los valores de las tablas 5.17, 5.18, 5.19 para la sonda FHZ601A y los valores de las tablas 5.20, 5.21, 5.22 para la sonda RS. De esta forma se obtienen las tablas 5.23 y 5.24 que contienen los valores medios de los coeficientes anteriormente mencionados para las sondas FHZ601A y RS respectivamente. Debido a la variabilidad observada en dichos coeficientes en función de la estación del año, se ha determinado el valor medio para cada mes del año. De esta forma, para cada sonda disponemos de un conjunto de doce coeficientes que modelizan la evolución de la tasa de dosis en periodos secos.

Para validar el modelo y los coeficientes calculados, se ha modelizado la evolución de la tasa de dosis durante el año 1999. Debido a una avería en el funcionamiento de la sonda RS durante el año 1999 no se dispone de datos para aplicar el modelo a dicha sonda, por lo que únicamente se ha modelizado la tasa de dosis medida con la sonda FHZ601A.

En las figuras 5.37 y 5.38 se han graficado los resultados obtenidos con el modelo en la determinación de la tasa de dosis en periodos secos durante los meses de enero y junio del año 1999 respectivamente. En dichas figuras se compara la tasa de dosis medida con la calculada. En el apéndice B.1 se presenta la totalidad de gráficos obtenidos correspondientes a cada uno de los meses del año 1999. Se han eliminado los episodios de lluvia que no intervienen en el modelo y que serán tratados en el apartado 5.5.3. De acuerdo con los resultados presentados en dichas figuras, se puede observar que el grado de ajuste es aceptable y que se modeliza de forma bastante precisa las variaciones temporales en la tasa de dosis medida. Según se observa en la tabla antes citada, la desviación media oscila entre 1.45 nGy/h y 1.77 nGy/h. Estos valores son superiores a los obtenidos al calcular los coeficientes del ajuste, pero siguen indicando un grado de ajuste aceptable entre los valores medidos y los calculados con el modelo. En lo que respecta a la sonda RS, debido a que no se dispone de datos suficientes para el año 1999, no se ha podido calcular la desviación media.

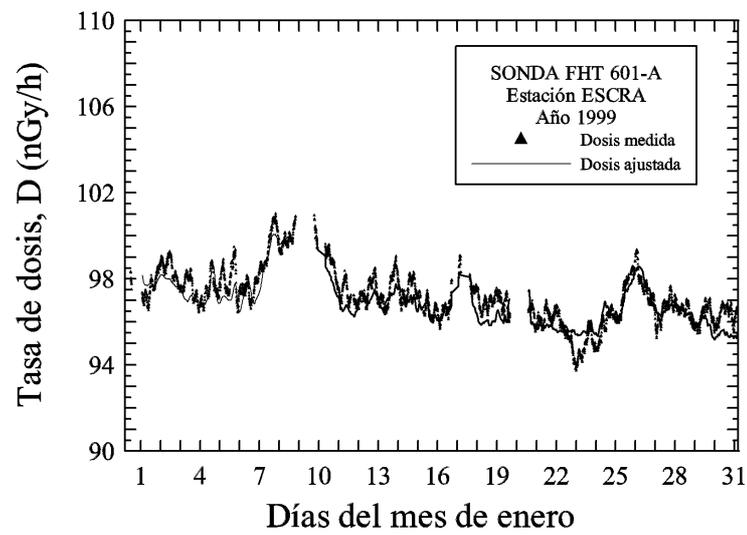


Figura 5.37: Comparación entre la tasa de dosis medida en la estación ESCRA y la tasa de dosis ajustada durante el mes de enero del año 1999. Sonda FHZ601A.

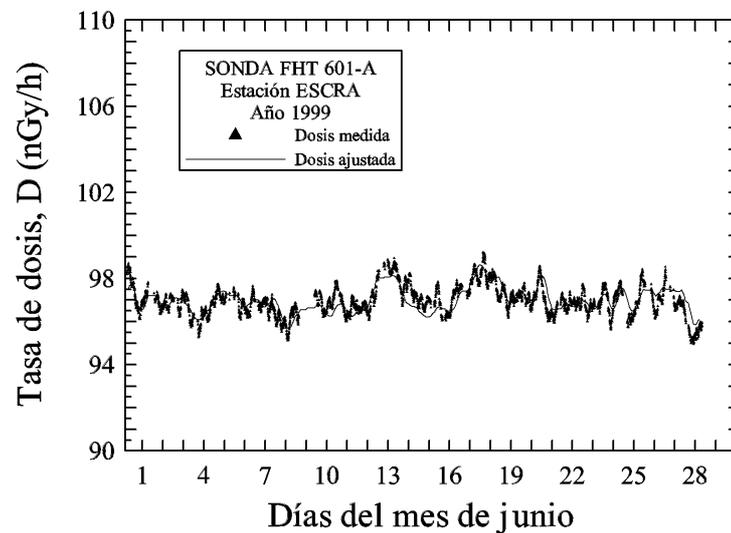


Figura 5.38: Comparación entre la tasa de dosis medida en la estación ESCRA y la tasa de dosis ajustada durante el mes de junio del año 1999. Sonda FHZ601A.

Mes	D'_{s0} (nGy/h)	a'_c nGy/h por hPa	a'_r nGy/h por Bq/m ³	σ nGy/h
01	96.7 ± 0.1	0.1454 ± 0.0004	0.301 ± 0.008	1.54
02	96.9 ± 0.1	0.1437 ± 0.0003	0.256 ± 0.002	1.51
03	97.4 ± 0.1	0.1369 ± 0.0002	0.284 ± 0.003	1.50
04	96.9 ± 0.3	0.1441 ± 0.001	0.29 ± 0.02	1.44
05	96.1 ± 0.1	0.1621 ± 0.0008	0.337 ± 0.008	1.45
06	97.6 ± 0.2	0.1395 ± 0.0008	0.307 ± 0.004	1.53
07	95.8 ± 0.2	0.146 ± 0.001	0.348 ± 0.008	1.77
08	95.9 ± 0.3	0.145 ± 0.002	0.355 ± 0.005	1.55
09	96.3 ± 0.2	0.1195 ± 0.0004	0.355 ± 0.007	1.54
10	96.2 ± 0.1	0.147 ± 0.001	0.296 ± 0.003	1.58
11	97.3 ± 0.2	0.1340 ± 0.0003	0.237 ± 0.002	1.61
12	96.6 ± 0.2	0.1333 ± 0.0003	0.286 ± 0.002	–

Cuadro 5.23: Coeficientes para la modelización de la tasa de dosis medida con la sonda FHZ601A instalada en la Estación ESCRA, obtenidos a partir de los valores medios de los coeficientes correspondientes a los años 1995,1997 y 1998.

Mes	D'_{s0} (nGy/h)	a'_c nGy/h por hPa	a'_r nGy/h por Bq/m ³
01	65.46 ± 0.08	0.1232 ± 0.0003	0.351 ± 0.004
02	66.61 ± 0.04	0.1057 ± 0.0002	0.186 ± 0.002
03	66.25 ± 0.05	0.1011 ± 0.0005	0.261 ± 0.003
04	65.79 ± 0.05	0.0940 ± 0.0003	0.295 ± 0.003
05	65.7 ± 0.1	0.1058 ± 0.0004	0.293 ± 0.006
06	65.32 ± 0.05	0.0876 ± 0.0003	0.311 ± 0.003
07	64.92 ± 0.08	0.1063 ± 0.0008	0.332 ± 0.003
08	65.3 ± 0.1	0.091 ± 0.001	0.269 ± 0.003
09	65.2 ± 0.1	0.1132 ± 0.0004	0.286 ± 0.006
10	65.58 ± 0.05	0.0799 ± 0.0003	0.238 ± 0.001
11	66.06 ± 0.07	0.0901 ± 0.0002	0.238 ± 0.001
12	66.95 ± 0.07	0.1019 ± 0.0001	0.326 ± 0.003

Cuadro 5.24: Coeficientes para la modelización de la tasa de dosis medida con la sonda Reuter-Stokes instalada en la Estación ESCRA, obtenidos a partir de los valores medios de los coeficientes correspondientes a los años 1996,1997 y 1998.

5.5.3. Evolución de la dosis en periodos húmedos

Tal y como se describe en la página 2-38 de la sección 2.4, y en el apartado 2.4.4, durante los episodios de lluvia se produce, en general, un incremento de la tasa de dosis ambiental debido a la presencia de los descendientes del radón emisores gamma en el agua de lluvia. Con la finalidad de reproducir dichos incrementos de dosis hemos desarrollado un modelo que tiene en cuenta la intensidad de lluvia, la concentración de descendientes del radón en el agua, y la geometría del emplazamiento además de otros factores. En el citado modelo consideraremos que los únicos responsables del incremento de la tasa de dosis ambiental son los descendientes del radón ^{214}Pb y ^{214}Bi . En general asociaremos el subíndice $k = 1$ para las variables relacionadas con el ^{214}Pb y el subíndice $k=2$ para las variables relacionadas con ^{214}Bi .

Descripción del modelo Consideremos un episodio de lluvia que tiene un tiempo de duración total t_1 . Podemos dividir el episodio de lluvia en un conjunto n de intervalos de lluvia, I_i , con una duración $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ cada uno de ellos, siendo t_{i-1} y t_i el tiempo de inicio y finalización de dicho intervalo de lluvia, respectivamente. La razón por la que se ha dividido el episodio de lluvia en intervalos se basa en que la intensidad de lluvia y la concentración de descendientes del radón en el agua de lluvia no son constantes durante todo el episodio. Por este motivo se asigna, a cada intervalo I_i , una intensidad de lluvia R_i media (expresada en unidades de $\text{lm}^{-2}\text{s}^{-1}$) y una actividad específica de los descendientes del radón $C_{k,i}$ media (expresada en unidades de Bq/l). Estas variables se calculan a partir de los valores registrados durante todo el intervalo de lluvia considerado.

Para plantear las ecuaciones que modelizan la evolución de radionucleidos en el terreno, deberemos considerar que si por un lado se están aportando radionucleidos por la acción de la lluvia, por otro lado desaparecen debido a la desintegración radiactiva y a las características del terreno que en ciertas ocasiones puede disponer de mecanismos de evacuación de agua (desagües, terrenos porosos, etc.)

La variación temporal de descendientes en el agua depositada en el suelo se podrá expresar mediante las ecuaciones diferenciales 5.3 y 5.4, donde $N_{k,i}$ representa la cantidad de núcleos del descendiente k por unidad de superficie presentes en el terreno, λ_k la constante de semidesintegración del radionucleido k y $c_{k,i}$ la concentración de núcleos del descendiente k por unidad de volumen de agua de lluvia que se relaciona con la actividad específica, $C_{k,i}$ (unidades de Bq/l) mediante la expresión $C_{k,i} = \lambda_k c_{k,i}$.

$$\frac{dN_{1,i}(t)}{dt} = R_i c_{1,i} - q_1 - \lambda_1 N_{1,i}(t), \quad (5.3)$$

$$\frac{dN_{2,i}(t)}{dt} = R_i c_{2,i} - q_2 - \lambda_2 N_{2,i}(t) + \lambda_1 N_{1,i}(t), \quad (5.4)$$

siendo q_k un parámetro que cuantifica la tasa de evacuación del radionucleido k del agua depositada en la superficie del terreno y que consideraremos constante durante todo el episodio de lluvia. Este parámetro se ha introducido debido a las características del emplazamiento donde se ubica el equipo SARAC, que consiste en una zona urbana con edificaciones y suelos

embaldosados que disponen de desagües. Cuando llueve, el agua junto con los descendientes del radón se acumula en el suelo y azoteas de las edificaciones hasta que el volumen es suficientemente elevado para empezar el proceso de desagüe. Cuando se da dicha circunstancia los descendientes del radón son arrastrados junto con el agua, reduciéndose por lo tanto su contribución a la tasa de dosis ambiental. En el caso de que la intensidad de lluvia sea moderada y el episodio de lluvia sea de corta duración, la tasa de agua que se pierde por los desagües será inferior a la que se aporta por la lluvia, de forma que podremos considerar $q_k = 0$. En otras circunstancias, en las que la intensidad de lluvia sea elevada, parte de los radionucleidos aportados por la lluvia serán evacuados del agua del suelo sin haber contribuido a la dosis ambiental. Por este motivo, el valor de dicho parámetro, q_k , no será nulo y dependerá de cada episodio de lluvia.

Si se resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales planteado con las expresiones 5.3 y 5.4, obtenemos las expresiones 5.5 y 5.6 que representan la actividad específica $A_{k,i}$ de los descendientes del radón ^{214}Pb y ^{214}Bi , respectivamente, para cualquier instante de tiempo t perteneciente al intervalo $[t_{i-1}, t_i]$.

$$A_{(1,i)} = \frac{K_1}{\lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 \Delta t_i}) + A_{(1,i-1)} e^{\lambda_1 \Delta t_i}, \quad (5.5)$$

$$A_{(2,i)} = \frac{K_1 \lambda_2 + K_2 \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 \Delta t_i}) + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \left(\frac{\lambda_1 A_{1,i-1} - K_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) (e^{-\lambda_1 \Delta t_i} - e^{-\lambda_2 \Delta t_i}) + A_{2,i-1} e^{-\lambda_2 \Delta t_i} \quad (5.6)$$

siendo

$$\Delta t_i \equiv t - t_{i-1} \quad \forall t \in [t_{i-1}, t_i] \quad (5.7)$$

y

$$K_j = RC_j - Q_j \quad (5.8)$$

con R la intensidad de lluvia expresada en l/m^2s , $C_j = c_j * \lambda_j$ la concentración del descendiente j del radón en el agua de lluvia expresada en unidades de Bq/l , y $Q_j = q_j * \lambda_j$ la tasa de escape por unidad de superficie de los descendientes del radón depositados en el terreno, que se expresa en unidades de Bq/m^2s .

Conocida la concentración de descendientes del radón en el agua de lluvia (expresiones 5.5 y 5.6), se puede calcular la tasa de dosis, $\dot{D}_{k,i}$, depositada en un punto, en un cualquier instante de tiempo del intervalo I_i , mediante la expresión 5.9, donde F_k representa el factor de dosis del emplazamiento en cuestión y relaciona la actividad de los emisores gamma por unidad de superficie con la tasa de dosis depositada en un punto debido a la radiación gamma emitida,

$$\dot{D}_{k,i} = F_k A_{k,i}. \quad (5.9)$$

De esta forma, la tasa de dosis total en el intervalo I_i se obtendrá a partir de la contribución de la tasa de dosis debida a los dos descendientes del radón emisores gamma de acuerdo con la expresión 5.10,

$$\dot{D}_{l,i} = F_1 A_{1,i} + F_2 A_{2,i}. \quad (5.10)$$

Hay que hacer constar que la tasa de dosis \dot{D}_l representa sólo el incremento de la tasa de dosis ambiental debida a la lluvia. De acuerdo con lo expuesto en la sección 2.4 (página 2-38), la tasa de dosis total durante el episodio de lluvia será igual a la suma de las contribuciones de la tasa de dosis terrestre, la radiación cósmica, y la concentración de radón ambiental, tal y como se expresa en la ecuación 2.13 (página 2-39),

Aplicación del modelo y resultados Para validar el modelo descrito anteriormente, se ha desarrollado un código de cálculo —escrito en el lenguaje de programación C— denominado **DOSERAIN**. Este código implementa las expresiones 5.5 y 5.6, y las expresiones que permiten el cálculo de la tasa de dosis en ausencia de precipitación (periodos secos) y que se describen en la sección 5.5.2.

Los datos utilizados han sido registrados en la estación ESCRA durante el año 1999. Durante dicho periodo de tiempo, el equipo SARAC ubicado en la estación ESCRA midió la actividad específica del agua de lluvia de un total de 16 episodios de lluvia cuyos valores máximos, mínimos y medios se presentan en la tabla 5.7 de la sección 5.3 (ver página 5-20). Otras variables de interés registradas en la estación durante dicho periodo de tiempo fueron la intensidad de lluvia (ver sección 5.1, página 5-9), la tasa de dosis ambiental obtenida con el contador proporcional FHZ601A, que se describe en la sección 3.1.4, la presión atmosférica y la concentración de radón. Estas dos últimas variables permiten la determinación de la tasa de dosis en periodos secos a la que habrá que sumar el incremento de dosis debido a la lluvia para determinar la tasa de dosis total.

Otro de los parámetros necesarios para la aplicación del modelo es el factor de dosis de los descendientes del radón para la posición de la sonda FHZ601A en la estación ESCRA. Los factores de dosis utilizados corresponden a los obtenidos en la simulación por técnicas de Monte Carlo realizadas en la Estación ESCRA y que se describen en la sección 4.5, y cuyos resultados se presentan en la tabla 4.6 de la página 4-35. Para el ^{214}Pb se ha empleado un factor de dosis de $F_1=0.376 \times 10^{-3}$ nGy/h por Bq/m² y para el ^{214}Bi un factor de dosis $F_2=1.776 \times 10^{-3}$ nGy/h por Bq/m².

El procedimiento que sigue el código **DOSERAIN** para modelizar la dosis durante los episodios de lluvia consiste en calcular la concentración de los descendientes del radón en el agua depositada en el suelo y el incremento de la tasa de dosis mediante el modelo planteado anteriormente, y por otro lado calcular la tasa de dosis que se depositaría en caso de que no existiera precipitación empleando el modelo de periodos secos descrito en el apartado 5.5.2 de este capítulo. De esta forma la tasa de dosis total será la suma de las dos magnitudes calculadas.

En general, los episodios analizados con el programa **DOSERAIN** abarcan desde tres días antes de iniciarse el episodio de lluvia hasta los tres días posteriores a la finalización del mismo. De

este modo se puede observar el incremento de la tasa de dosis durante el episodio de lluvia, y el decrecimiento posterior. Para el modelo de periodos secos se han empleado los coeficientes del ajuste presentados en el apartado correspondiente a la generalización del modelo que se encuentra en la página 5-51 de este capítulo. Para cada intervalo de tiempo de 600 segundos (a contar desde el inicio del periodo analizado) se determina el valor medio de la presión y concentración de radón y se calcula la tasa de dosis seca, \dot{D}_s , mediante los coeficientes correspondientes al mes analizado. Además se comprueba si durante dicho intervalo se ha producido precipitación. En caso afirmativo, se calcula el valor medio de la intensidad de lluvia y concentración de descendientes del radón en el agua de lluvia durante dicho intervalo de 600 segundos. Con estos datos se calcula la concentración de descendientes del radón en el agua del suelo y superficies mojadas mediante las expresiones 5.5 y 5.6. A continuación se aplica la expresión 5.10 para determinar la tasa de dosis debida a la lluvia \dot{D}_l para $t=600$ s, es decir, la tasa de dosis al finalizar el intervalo analizado. El siguiente intervalo de lluvia empleará como concentración de descendientes del radón inicial el valor obtenido en el anterior intervalo de lluvia. De esta forma, la tasa de dosis total \dot{D}_t será la suma de la tasa de dosis seca, \dot{D}_s , y la tasa de dosis húmeda, \dot{D}_l . El valor obtenido se ha comparado con la tasa de dosis registrada \dot{D}_m durante dicho intervalo de tiempo.

Se incluyen siete figuras, de la 5.39 a la 5.45, en las que se presentan los resultados obtenidos para los intervalos de lluvia de los meses de enero, marzo, abril y septiembre del año 1999. Sólo se han incluido dichos intervalos de lluvia, ya que únicamente durante dichos periodos disponemos de medidas de los diversos parámetros necesarios para modelizar la tasa de dosis ambiental. Disponemos de medidas de la concentración de descendientes del radón en la lluvia, intensidad de lluvia, presión atmosférica, concentración de radón y tasa de dosis ambiental registrada con la sonda FHZ601A. En cada una de las figuras mencionadas se compara la tasa de dosis medida (trazo fino) con la ajustada con el modelo (trazo grueso) y además se incluye la intensidad de lluvia y la concentración de descendientes del radón en dos gráficas adicionales que disponen de la misma base de tiempos (expresada en días).

Uno de los parámetros que se deben introducir en el modelo consiste en el factor de desagüe Q_j ($j=1$ para ^{214}Pb y $j=2$ para ^{214}Bi). Tal y como se comentó en el apartado anterior en el que se describe el modelo en periodos húmedos (ver página 5-54), este parámetro cuantifica la evacuación de descendientes del radón en el agua de lluvia depositada en el suelo. En general se ha considerado que dicho parámetro es igual a cero, $Q_j = 0$, para el conjunto de episodios analizados, excepto para un episodio correspondiente al mes de septiembre (figura 5.44) en el que se ha considerado un valor distinto de cero debido a que la intensidad de lluvia fue muy elevada. Más adelante se describe con más detalle dicho episodio de lluvia. A continuación se analizan los resultados obtenidos en los diversos episodios considerados

- **Episodio 1. Enero de 1999. Figura 5.39** Durante el día 1 de enero del año 1999 se observaron unos 6 episodios de lluvia con una diferencia de tiempo entre ellos inferior a dos horas tal y como se observa en la gráfica de la figura correspondiente. Los incrementos de tasa de dosis registrados (trazo fino) son del orden de 10 nGy/h, lo suficientemente elevados como para ser detectados por la sonda FHZ601A. Si la comparamos la tasa de dosis calculada con el modelo (trazo grueso), se observa una gran correlación entre ambos valores. Se modeliza con gran precisión el inicio de la lluvia, el incremento de la tasa de dosis siguiente, y el posterior decaimiento de la intensidad una vez cesa la precipitación. A principios del día 31 de diciembre del año 1998 apa-

rece un incremento de la dosis del orden de 4 nGy/h que coincide con un episodio de precipitación. Este incremento no fue modelizado debido a que no existían datos de la actividad del agua de lluvia al estar el equipo fuera de operación.

- **Episodio 2. Marzo de 1999. Figura 5.40** Se observó un episodio de lluvia durante el día 13 de marzo sobre las 8:00 horas. Apesar de que la actividad del agua de lluvia era bastante elevada para los valores medios medidos en el emplazamiento —se encontraba entre 800 Bq/l y 1300 Bq/l para el ^{214}Bi —, debido a que la intensidad de lluvia fue muy baja (unos 3 l/m²h) y su duración muy corta (menos de dos horas), el incremento máximo de la dosis ambiental fue pequeño ($\Delta\dot{D} \simeq 6$ nGy/h) tal y como se puede apreciar en la figura. Apesar de ello, el modelo permite reproducir el incremento de dosis observado.
- **Episodio 3. Marzo de 1999. Figura 5.41** Se observaron diversos episodios de lluvia entre los días 24, 25, 26 y 27 de marzo. Las principales características de dicho episodio consiste en la baja actividad de los descendientes del radón en el agua de lluvia (entre 200 y 400 Bq/l para el ^{214}Bi) y en la baja intensidad de lluvia (inferior a 8 l/m²h). Esto se traduce en un ligero incremento de la dosis ambiental, del orden de 2 nGy/h para los intervalos de lluvia de los días 24, 25 y 26, y 6 nGy/h para el día 27, cuando la intensidad de lluvia fue máxima. En este caso el modelo reproduce de forma aceptable el incremento de la tasa de dosis.
- **Episodio 4. Abril de 1999. Figura 5.42** Se han observado dos episodios de lluvia entre los días 13 y 19 de abril del año 1999. El primero de ellos —día 15— tuvo una duración de unas 14 horas con una intensidad de lluvia máxima de 6 l/m²h y concentraciones de ^{214}Bi entre 200 Bq/l y 600 Bq/l. En este caso la dosis simulada no se ajusta con la misma precisión a la dosis medida como en los casos anteriores. Se observa que la dosis calculada es inferior a la medida en unos 3 nGy/h. Este hecho puede ser debido a que el equipo SARAC dejó de registrar la actividad de la lluvia entre las 10 horas y las 14 horas y entre las 16 horas y las 18 horas por problemas en su funcionamiento. Para poder realizar la modelización del episodio de lluvia se ha asignado a dichos intervalos de lluvia una concentración media de descendientes del radón calculada a partir de los valores anteriores y posteriores del intervalo sin datos. Existe la posibilidad de que la concentración calculada sea inferior a la concentración real, con lo que se explicaría la discrepancia de resultados entre el modelo y los valores medidos.

El segundo intervalo de lluvia que se produce entre el día 16 y 17 tiene una duración de dos horas con unas concentraciones de descendientes del radón similares al intervalo anterior. En la figura se puede apreciar el incremento de dosis reproducido por el modelo.

- **Episodio 5. Abril de 1999. Figura 5.43** En la figura correspondiente se pueden observar tres intervalos de lluvia. El primero se produce sobre las 4 horas del día 27 de abril y su principal característica consiste en la baja intensidad de la lluvia que es inferior a 1 l/(m²h) y la corta duración del intervalo de lluvia (inferior a 10 minutos). Para estas intensidades y duraciones de la lluvia, el volumen total de agua recogida por el equipo SARAC es del orden de unos 30 cm³. Para que el equipo SARAC pueda registrar la actividad específica del agua es necesario un volumen por muestra de agua superior a 250 cm³. Por este motivo, no se dispone de información respecto a la actividad específica de la lluvia y tampoco se ha podido simular el incremento de la dosis ambiental. A pesar de ello, si que se dispone de medidas de la dosis ambiental y se observa que no se produce

ningún incremento significativo de la misma. Esto puede ser debido a dos causas: que la escasa precipitación no deposite suficientes descendientes del radón en el terreno para que el incremento de dosis sea significativo, y por otro lado que la actividad específica del agua de lluvia sea baja. El segundo intervalo de lluvia se produce entre las tres horas y las 4 horas del día 28 de abril. La duración del intervalo de lluvia es de una hora aproximadamente, con una intensidad máxima del orden de $2 \text{ l}/(\text{m}^2\text{h})$. En este caso se observa un incremento máximo de la tasa de dosis de unos $4 \text{ nGy}/\text{h}$. A pesar de la baja intensidad de lluvia, se aprecia un incremento de la tasa de dosis debido a que en este caso la concentración de descendientes del radón es bastante elevada ($\sim 900 \text{ Bq}/\text{l}$ para ^{214}Bi) si la comparamos con los valores registrados en otros episodios de lluvia. En la figura se puede apreciar el elevado grado de ajuste entre la dosis medida y la dosis calculada. Por último citaremos el tercer intervalo de lluvia que se produce entre las 17:00 horas y las 23:00 horas del día 28 de abril. En este caso la duración del periodo de lluvia es superior a los casos anteriores y su intensidad máxima es más elevada, llegando hasta los $10 \text{ l}/(\text{m}^2\text{h})$. La actividad específica del agua de lluvia es muy variable, oscilando entre $400 \text{ Bq}/\text{l}$ al inicio de la precipitación y $50 \text{ Bq}/\text{l}$ al finalizar la precipitación para el ^{214}Bi . El incremento de dosis medido alcanza un valor máximo de $15 \text{ nGy}/\text{h}$. Este incremento de dosis ha sido reproducido con gran precisión con el modelo de cálculo de dosis durante el episodio de lluvia, tal y como se puede observar en la figura 5.43.

- **Episodio 6. Septiembre de 1999. Figura 5.44** En este episodio de lluvia se distinguen cuatro intervalos de lluvia cuyas características respectivas son bastante distintas. El primero de ellos ocurrido entre las 22 horas del día 13 de septiembre y las 0 horas del día 14 del mismo mes se caracteriza por una intensidad de lluvia muy baja. Por este motivo, al igual que ocurrió con casos anteriores, el agua recogida por el equipo SARAC fué insuficiente para obtener resultados significativos. Por lo tanto no se dispone de medidas de la actividad específica del agua de lluvia para dicho intervalo igual que en el primer intervalo de lluvia del episodio 6. En aquella ocasión el incremento de dosis fué inapreciable, en cambio en este caso del mes de septiembre se aprecia un incremento máximo de la tasa de dosis ambiental de unos $5 \text{ nGy}/\text{h}$. Este hecho indica que la actividad específica del agua de lluvia debió ser bastante elevada depositándose en el terreno suficientes descendientes del radón para que el incremento de dosis fuese significativo. Tal y como veremos más adelante, durante el resto de intervalos de lluvia de este episodio los valores de la actividad del agua fueron elevados comparados con los registrados en otras ocasiones. Por este motivo es posible considerar que durante dicho intervalo (aunque no se disponga de medidas) los niveles de actividad del agua fuesen del mismo orden de magnitud. Para el segundo intervalo de lluvia iniciado a las 5 horas del día 14 y finalizado a las 7 horas del mismo día la actividad del agua de lluvia se encontraba entre $1000 \text{ Bq}/\text{l}$ y $1500 \text{ Bq}/\text{l}$ para el ^{214}Bi . Si observamos detalladamente el intervalo de lluvia se aprecian dos picos en la intensidad de precipitación correspondientes a dos incrementos de la intensidad de lluvia. Estos dos picos de lluvia llevan asociados dos incrementos de la tasa de dosis medida que es del orden de $4 \text{ nGy}/\text{h}$ para ambos. Al aplicar el modelo se han reproducido con gran precisión ambos incrementos de dosis. El tercer intervalo de lluvia ocurrido entre las 18:30 horas y las 20 horas del día 14 es de muy corta duración pero la intensidad de lluvia es muy elevada llegando hasta un máximo de $130 \text{ l}/(\text{m}^2\text{h})$. La magnitud de la intensidad de lluvia, que se puede calificar de torrencial, implica que los procesos relacionados con la evacuación del agua

del suelo y azoteas de los edificios colindantes al punto de medida sean distintos a los que ocurren durante episodios de lluvia con intensidades moderadas. La capacidad de retención de agua de las azoteas y suelo del Campus Nord es limitada, por este motivo cuando la intensidad de lluvia es muy elevada, una fracción de los descendientes del radón del agua es evacuada directamente por los desagües junto con el agua de lluvia sin influir en el incremento de la tasa de dosis ambiental, ya que el tiempo de tránsito por la superficie del terreno es muy pequeño. En cambio cuando la intensidad de lluvia es moderada, existe un cierto tiempo de permanencia del agua de lluvia junto con los descendientes del radón en las superficies del terreno. De esta forma, si aplicamos el modelo con el factor de evacuación, $Q_j = 0$, para este intervalo de lluvia obtenemos un incremento de tasa de dosis del orden del 100 nGy/h, valor que no se ajusta a la realidad que es de 32 nGy/h. Para evitar este resultado hemos aplicado un factor de evacuación distinto de cero e igual a $Q_{\text{Bi-214}} = 30 \text{ Bq}/(\text{m}^2\text{s})$ para el ^{214}Bi y de $Q_{\text{Pb-214}} = 10 \text{ Bq}/(\text{m}^2\text{s})$ para el ^{214}Pb . Estos dos valores permiten reproducir con gran precisión el incremento de dosis durante dicho intervalo tal y como se puede observar en la figura 5.44. El último intervalo de lluvia del episodio en cuestión tiene lugar entre las 2 horas y las 6 horas del día 15 de septiembre. En esta ocasión también se observa un incremento de la tasa de dosis que es reproducido por el modelo de dosis en periodos húmedos.

- **Episodio 7. Septiembre de 1999. Figura 5.45** En este episodio se observan tres intervalos de lluvia. El primer intervalo de lluvia (se produce entre las 0 horas y las 2:00 horas del día 18 de septiembre) implica un incremento máximo de la tasa de dosis de 12 nGy/h. Este incremento de dosis es reproducido con bastante exactitud con por la dosis calculada con el modelo. En el segundo intervalo de lluvia (entre las 9 y las 12 horas del día 19 de septiembre) se produce un incremento máximo de la tasa de dosis de 6 nGy/h. En esta ocasión, a pesar de que la intensidad de lluvia es mayor ($10 \text{ l}/(\text{m}^2\text{h})$) que en el intervalo anterior ($8 \text{ l}/(\text{m}^2\text{h})$) el incremento de la dosis es inferior. Esto es debido a que la actividad específica de la lluvia es inferior en el segundo intervalo. En el tercer intervalo, la intensidad de lluvia máxima es de unos ($15 \text{ l}/(\text{m}^2\text{h})$) y el incremento de tasa de dosis es del mismo orden de magnitud que en el intervalo anterior. En este tercer intervalo no se ha podido reproducir el incremento de tasa de dosis con el modelo debido a que no se dispone de datos de la actividad específica del agua de lluvia debido a que el equipo SARAC se encontraba fuera de operación.

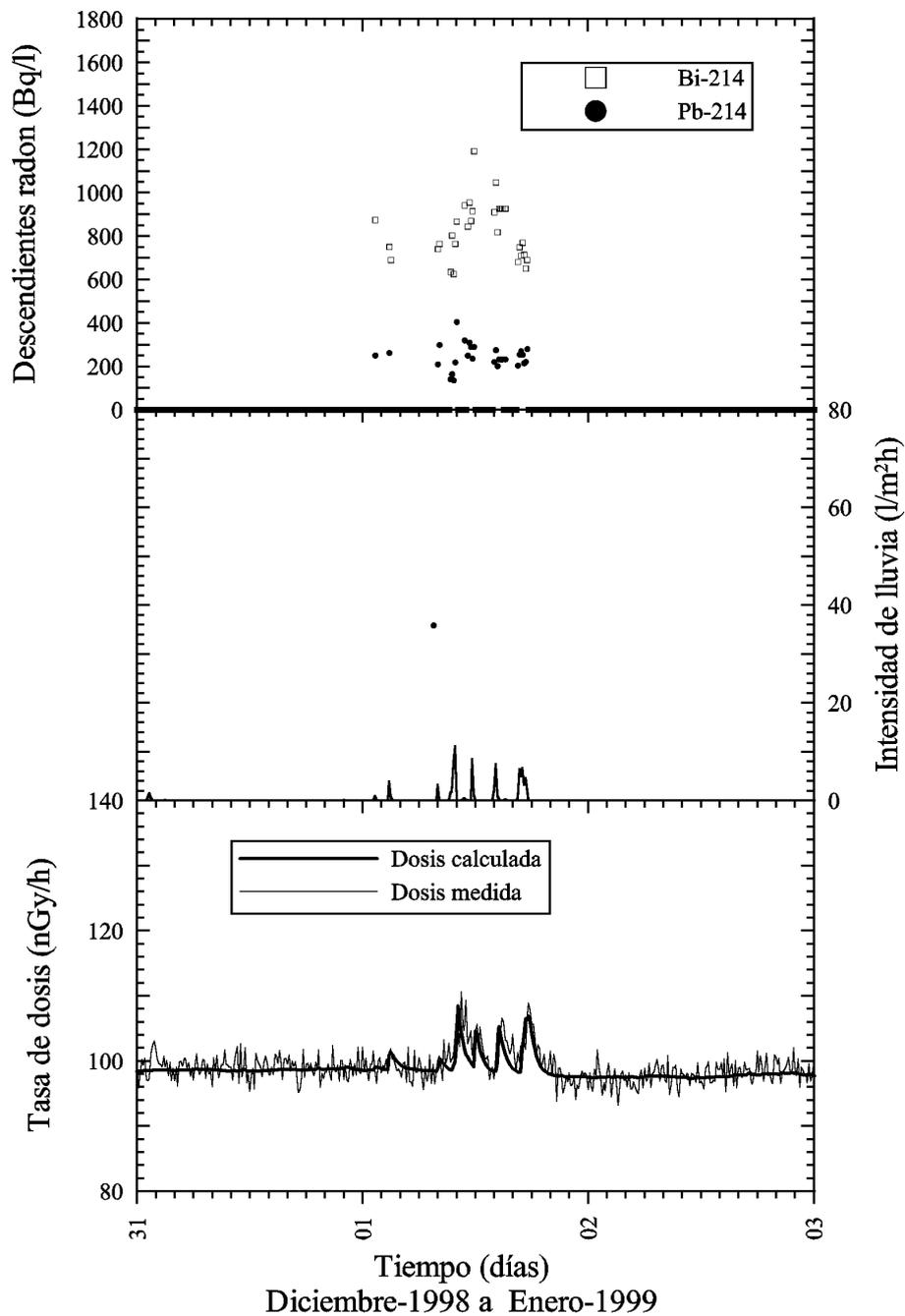


Figura 5.39: Comparación entre la tasa de dosis medida en la estación ESCRA y la tasa de dosis ajustada en periodos húmedos durante los días 1, 2, y 3 del mes de enero del año 1999. Sonda FHZ601A.

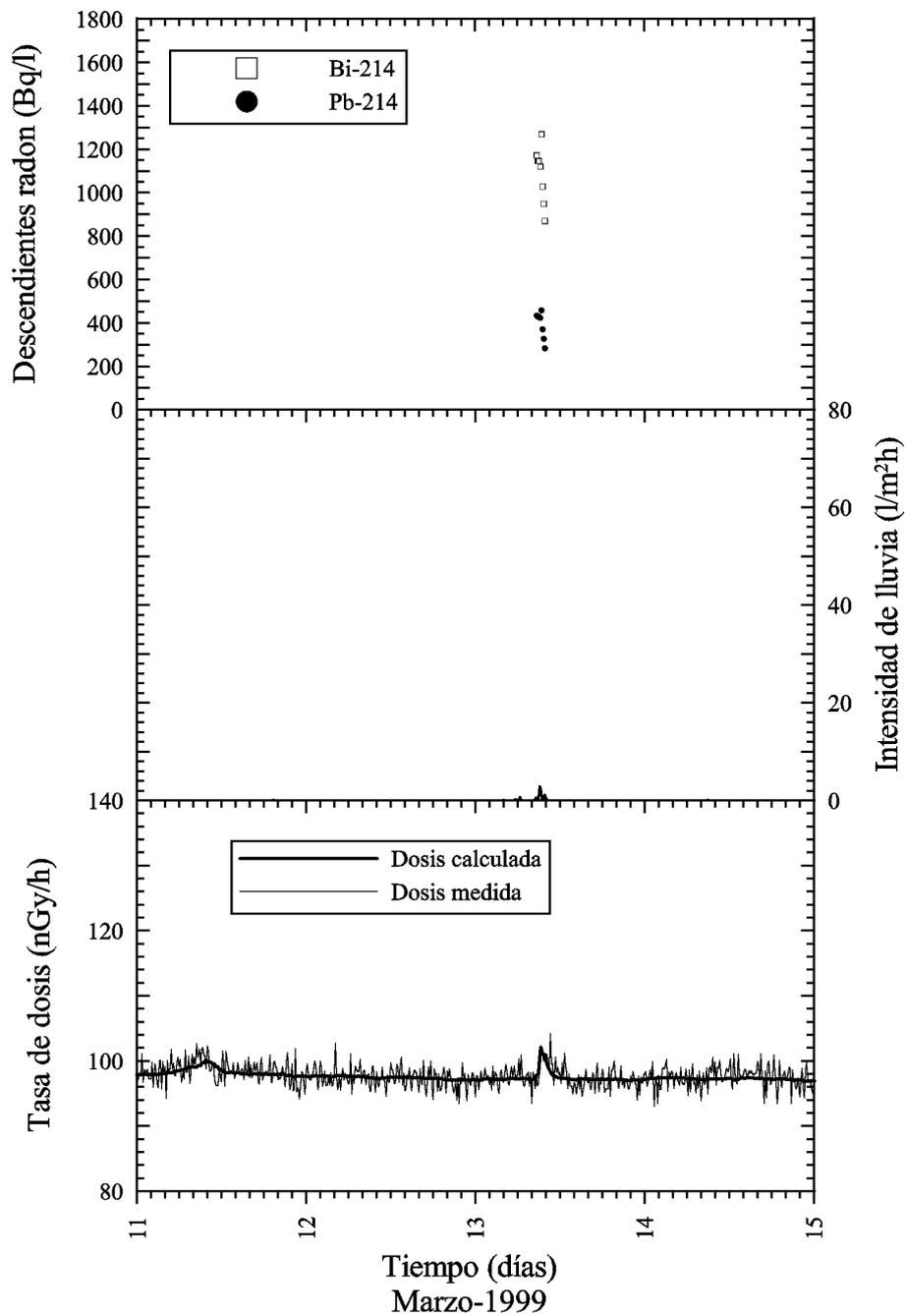


Figura 5.40: Comparación entre la tasa de dosis medida en la estación ESCRA y la tasa de dosis ajustada en periodos húmedos entre los días 11 y 15 del mes de marzo del año 1999. Sonda FHZ601A.

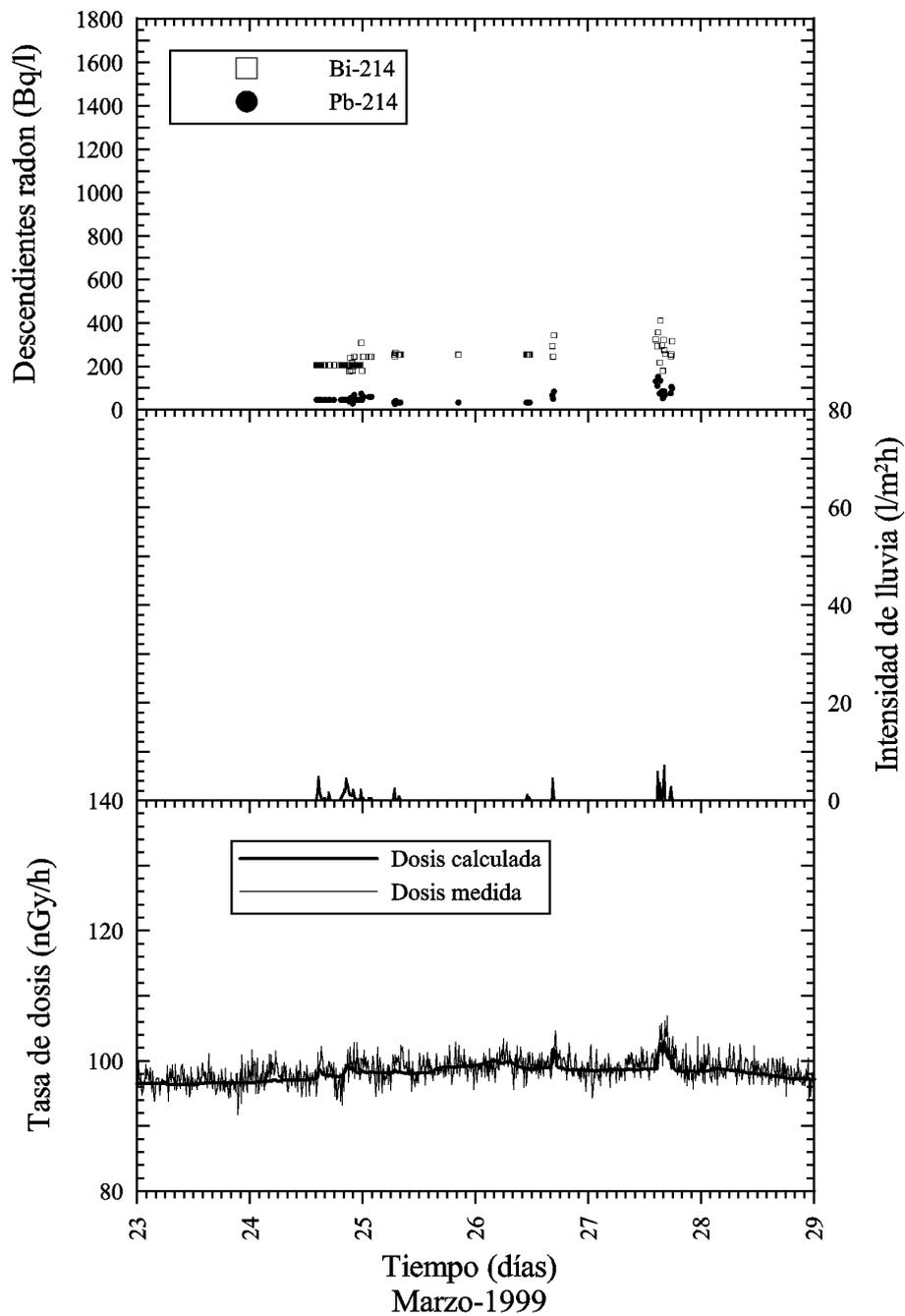


Figura 5.41: Comparación entre la tasa de dosis medida en la estación ESCRA y la tasa de dosis ajustada en periodos húmedos entre los días 23 y 29 del mes de marzo del año 1999. Sonda FHZ601A.

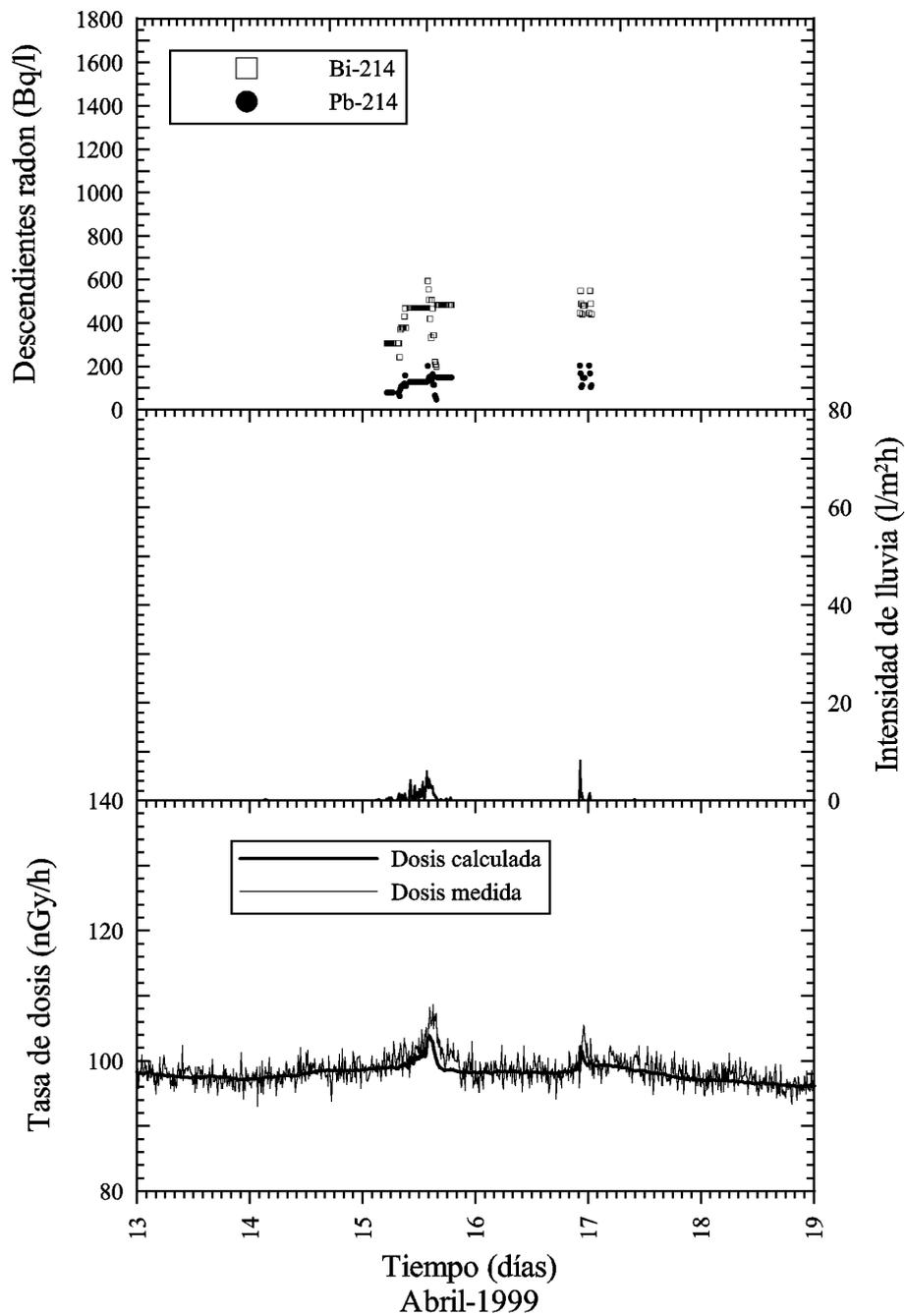


Figura 5.42: Comparación entre la tasa de dosis medida en la estación ESCRA y la tasa de dosis ajustada en periodos húmedos entre los días 13 y 19 del mes de abril del año 1999. Sonda FHZ601A.

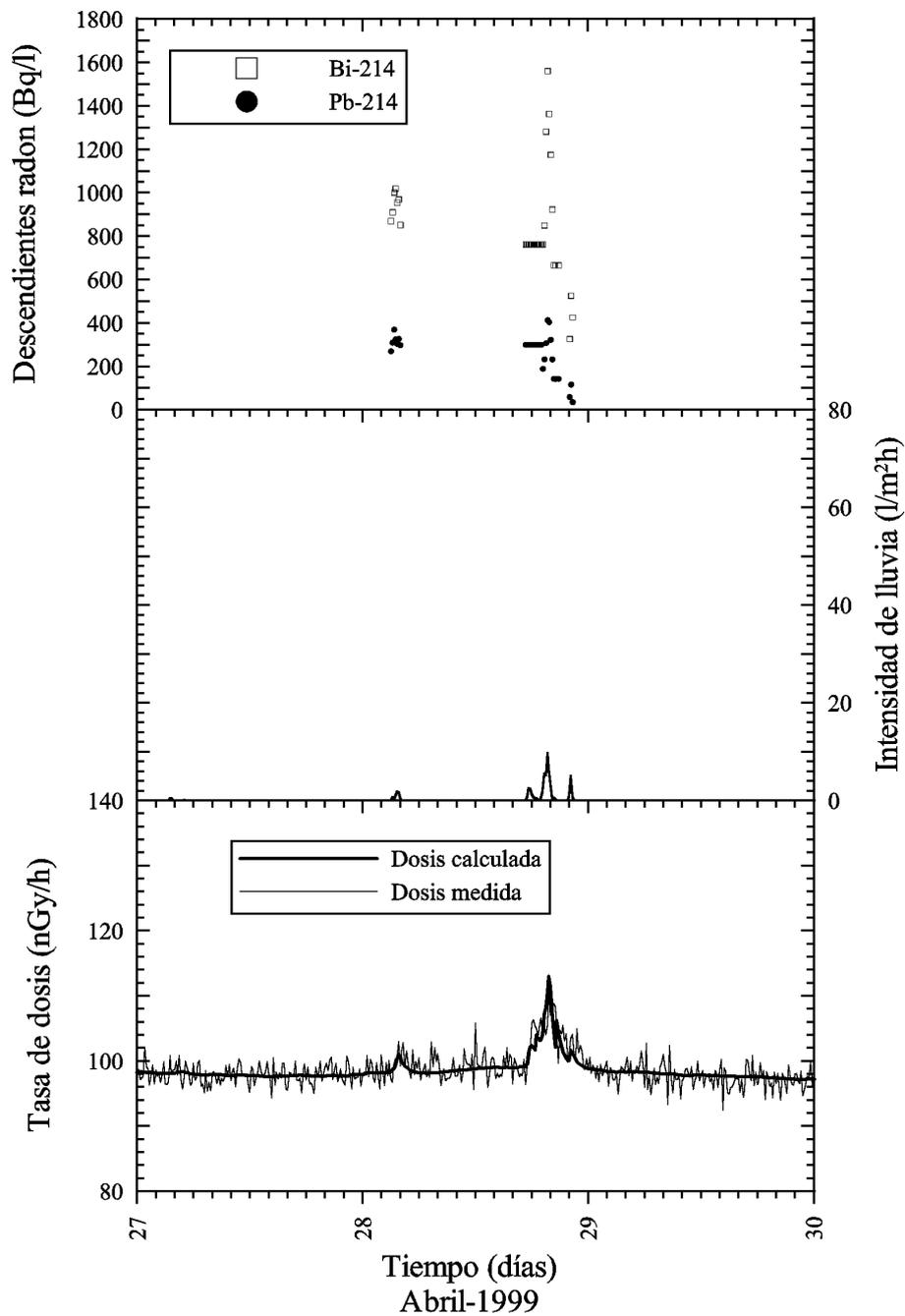


Figura 5.43: Comparación entre la tasa de dosis medida en la estación ESCRA y la tasa de dosis ajustada en periodos húmedos entre los días 27 y 30 del mes de abril del año 1999. Sonda FHZ601A.

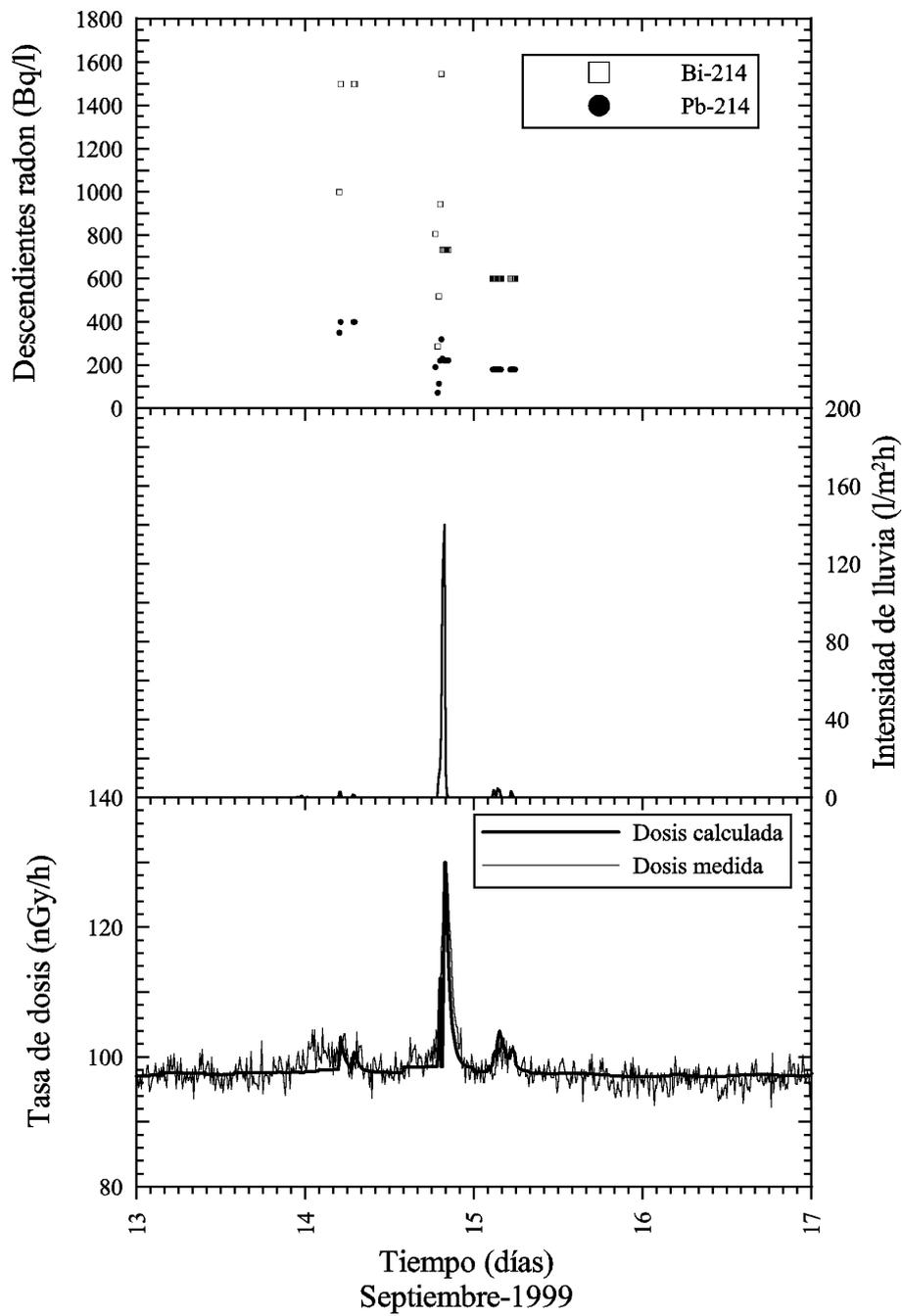


Figura 5.44: Comparación entre la tasa de dosis medida en la estación ESCRA y la tasa de dosis ajustada en periodos húmedos entre los días 13 y 17 del mes de septiembre del año 1999. Sonda FHZ601A.

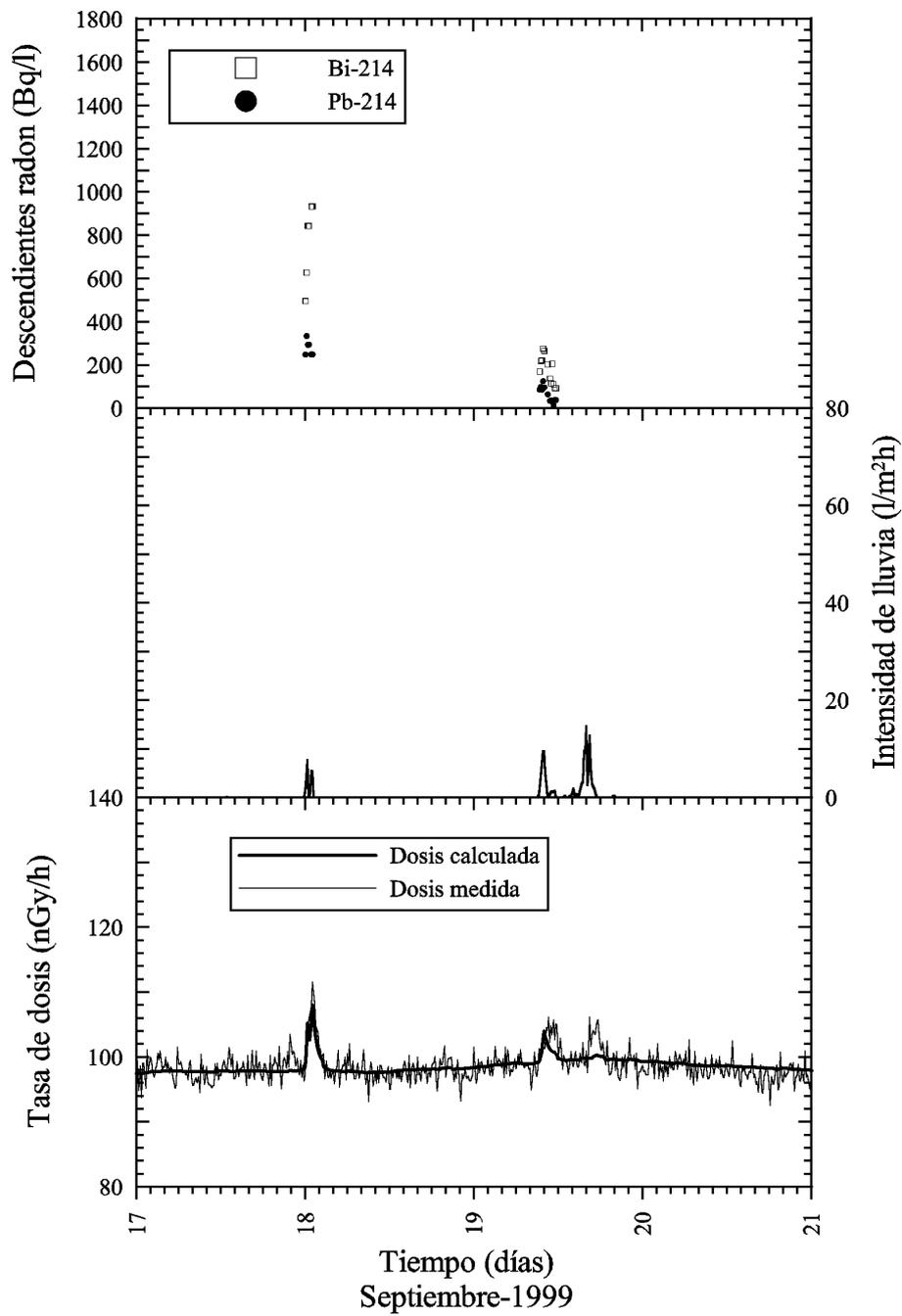


Figura 5.45: Comparación entre la tasa de dosis medida en la estación ESCRA y la tasa de dosis ajustada en periodos húmedos entre los días 17 y 21 del mes de septiembre del año 1999. Sonda FHZ601A.

