



Facultat de Ciències
Departament de Física

TESI DOCTORAL
2012

**EL RADÓ
EN ACTIVITATS LABORALS:
INSTRUMENTACIÓ,
PROTECCIÓ RADIOLÒGICA
I GEOLOGIA**

Victòria Moreno Baltà

Directors:

**Dra. Carmen Baixeras Divar
Dr. Lluís Font Guiteras**



Facultat de Ciències
Departament de Física

TESI DOCTORAL

2012

**El Radó en activitats laborals:
Instrumentació,
Protecció Radiològica
i Geologia**

Victòria Moreno Baltà

Directors:

Dra. Carmen Baixeras Divar

Dr. Lluís Font Guiteras

Agraïments

Desitjo expressar el meu sincer agraïment:

A la Dra. Carmen Baixeras i el Dr. Lluís Font, directors d'aquesta tesi doctoral, per haver-me donat l'oportunitat de formar part del grup de recerca del radó, per haver-me mostrat tot el seu entusiasme, paciència i dedicació durant els darrers vuit anys i especialment pel seu suport professional i humà durant la realització d'aquesta tesi.

Al Dr. Joan Bach per la seva motivació en aquesta recerca i per tot el seu ajut durant el transcurs de les diferents campanyes de mesura.

A tots els membres de la Unitat de Física de les Radiacions de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB) per haver-me acollit a la unitat, per contar amb mi per col·laborar en les seves línies de recerca i per ajudar-me en el desenvolupament del meu treball.

A totes les persones dels diferents departaments, centres de recerca i serveis de la UAB i d'altres universitats que han col·laborat directament o que han facilitat les seves infraestructures pel desenvolupament dels estudis d'aquesta tesi. Vull agrair especialment la col·laboració dels membres integrants de l'Institut de Tècniques Energètiques de la UPC, la Universitat de Cantàbria i la Health Protection Agency.

Als organismes públics que han finançat els diferents projectes de recerca en els que s'emmarca aquesta tesi (Consejo de Seguridad Nuclear, Parc Natural de la Zona Volcànica de la Garrotxa i Ajuntament d'Olot).

A totes les persones que han tingut l'amabilitat de col·laborar a les diferents campanyes de mesura deixant-nos instal·lar detectors a l'interior dels seus llocs de treball i habitatges i també a totes les persones dels diferents ajuntaments que ens han facilitat l'accés a molts dels recintes estudiats.

Als companys i amics que m'han ajudat en algun moment de la recerca i a tots els que m'han fet costat des de la distància.

Finalment, també voldria agrair la força i l'amor de la meva família i sobretot de la meva mare, a qui dedico aquesta tesi de tot cor.

Índex de continguts

1.	INTRODUCCIÓ	1
1.1.	MOTIVACIÓ I PROJECTES DE RECERCA	1
1.2.	OBJECTIUS.....	3
1.3.	ESTRUCTURA	4
2.	LA RADIACIÓ NATURAL I EL GAS RADÓ	5
2.1.	LA RADIACIÓ CÒSMICA	5
2.2.	LA RADIACIÓ TERRESTRE	6
2.2.1.	La component externa: la radiació gamma terrestre.....	6
2.2.2.	La component interna: Ingestió i inhalació d'elements radioactius.....	7
2.3.	EL GAS RADÓ	8
2.3.1.	Característiques físiques i químiques, isòtops i descendents.....	8
2.3.2.	Dinàmica	11
2.3.2.1.	Generació i emanació.....	11
2.3.2.2.	Transport i exhalació	12
2.3.2.3.	Radó al sòl i a les aigües.....	14
2.3.2.4.	Radó a l'aire exterior i a l'interior de recintes	14
2.3.2.5.	Modelització del radó.....	15
2.4.	LA PROTECCIÓ RADIOLÒGICA.....	16
2.4.1.	Normativa europea.....	18
2.4.2.	Normativa espanyola.....	19
3.	INSTRUMENTACIÓ	21

3.1.	INSTRUMENTACIÓ UTILITZADA.....	22
3.1.1.	Els detectors actius de radó	22
3.1.1.1.	El monitor PRASSI.....	22
3.1.1.2.	El monitor ATMOS 12 DPX.....	24
3.1.1.3.	El monitor AlphaGUARD i els seus accessoris	25
3.1.1.4.	El monitor RAD7 i els seus accessoris	26
3.1.1.5.	La sonda Clipperton II.....	27
3.1.2.	Els detectors passius de radó	28
3.1.2.1.	El detector de Makrofol	31
3.1.2.2.	El detector de LR115	33
3.1.2.3.	El detector de CR-39.....	34
3.1.2.4.	El detector d'Electret	35
3.1.3.	Les cambres de radó.....	36
3.1.3.1.	Les cambres de radó i toró de l'INTE	37
3.1.3.2.	Les cambres de radó de la HPA.....	38
3.1.3.3.	La cambra de radó de la UFR de la UAB	38
3.1.4.	El detector de radiació gamma ambiental.....	39
3.1.5.	El sistema d'espectrometria gamma.....	40
3.1.6.	Altres instruments	40
3.1.6.1.	Estacions meteorològiques i velocímetre d'aire	41
3.1.6.2.	Bombes d'aigua	41
3.1.6.3.	Conductímetre i cel·la de flux.....	42
3.2.	CONTROL DE QUALITAT	43
3.2.1.	Control de qualitat extern: calibratges	43
3.2.1.1.	Detectors actius de radó	43
3.2.1.2.	Detectors passius de radó	44
3.2.1.3.	Detector de radiació gamma ambiental	46
3.2.1.4.	Sistema d'espectrometria gamma	46
3.2.2.	Control de qualitat extern: Intercomparacions	47
3.2.2.1.	Intercomparació de sistemes en continu de radó a l'INTE	47
3.2.2.2.	Intercomparacions de detectors passius de radó (HPA i INTE)	48
3.2.2.3.	Comparacions UAB - UC	52
3.2.3.	Control de qualitat intern: Verificacions i optimitzacions	59
3.2.3.1.	El fons, el trànsit i el límit de detecció.....	59
3.2.3.2.	Exposicions a la cambra de radó de la UAB.....	63
3.2.3.3.	Optimitzacions.....	69
3.3.	EXPOSICIONS EN CONDICIONS EXTREMES	72
3.3.1.	Intercomparació a l'INTE.....	72
3.3.2.	Exposicions a les estacions científiques de la Península Antàrtica.....	73

3.3.3.	Exposicions a l'INTE	77
3.3.4.	Exposicions a llocs amb alta humitat.....	86
3.3.4.1.	Exposicions a una cova	87
3.3.4.2.	Exposicions a un balneari.....	88
3.3.4.3.	Exposicions a unes mines	88
3.4.	ADAPTACIÓ DEL MODEL RAGENA AL MÒDUL DE SAELICES EL CHICO	92
3.4.1.	Adaptació en l'estat estacionari.....	94
3.4.2.	Adaptació en l'estat dinàmic: l'efecte de les variacions de la pressió atmosfèrica.	100
3.5.	DISCUSSIÓ	104
4.	LA ZONA VOLCÀNICA DE LA GARROTXA I LA FALLA D'AMER	111
4.1.	CONTEXT GEOGRÀFIC I GEOLÒGIC	112
4.1.1.	Els materials	114
4.1.1.1.	Materials volcànics: piroclastos i colades basàltiques.....	114
4.1.1.2.	Materials no volcànics.	115
4.1.2.	La falla d'Amer	116
4.1.3.	Els bufadors	118
4.1.3.1.	Els bufadors de les colades del Pla de Batet i del Pla d'Olot.....	118
4.1.3.2.	Els bufadors del volcans Garrinada i Montsacopa	119
4.1.3.3.	Els bufadors de les colades del Bosc de Tosca	121
4.1.4.	Les aigües subterrànies	121
4.1.4.1.	Aqüífers al·luvials (A).....	121
4.1.4.2.	Aqüífers al·luvial-volcànics (AV)	123
4.1.4.3.	Aqüífers eocens (E)	123
4.2.	CAMPANYES DE MESURA.....	123
4.2.1.	Radó a l'aire de llocs de treball i habitatges	124
4.2.2.	Radó al sòl	132
4.2.2.1.	La campanya 2005-2009	132
4.2.2.2.	La campanya 2010	135
4.2.3.	Radó i toró en els bufadors	139
4.2.4.	Radó a les aigües subterrànies	146
4.2.5.	Mesures complementàries: contingut de radionúclids i radiació gamma terrestre	152
4.3.	DISCUSSIÓ	157
5.	RADÓ EN ALTRES ACTIVITATS LABORALS	161
5.1.	LLOCS DE TREBALL SUBTERRANIS DE CATALUNYA	162
5.1.1.	Les mines 6.....	165

5.1.1.1.	Primer estudi: variacions espacials i estacionals.....	165
5.1.1.2.	Segon estudi: variacions diàries	167
5.1.2.	La mina 7	168
5.1.3.	Estacions i cotxeres del metro de Barcelona	170
5.2.	ESTABLIMENTS TERMALS.....	173
5.2.1.	Balneari 1	174
5.2.2.	Balneari 2.....	180
5.3.	LA MARJAL DE PENYÍSCOLA.....	183
5.4.	DISCUSSIÓ	189
6.	CONCLUSIONS I PERSPECTIVES DE FUTUR	193
6.1.	CONCLUSIONS.....	193
6.1.1.	Instrumentació.....	193
6.1.2.	La zona volcànica de la Garrotxa i la falla d'Amer	197
6.1.3.	Radó en altres activitats laborals.....	199
6.2.	PERSPECTIVES DE FUTUR	200
6.2.1.	Instrumentació.....	200
6.2.2.	La zona volcànica de la Garrotxa i la falla d'Amer	201
6.2.3.	Radó en altres activitats laborals.....	201
	ANNEXES.....	203
	ANNEX A: CARACTERÍSTIQUES I RESULTATS DELS RECINTES ESTUDIATS A LA CAMPANYA DE MESURA DE LA CONCENTRACIÓ DE RADÓ A L'AIRE D'INTERIORS DE LA ZONA VOLCÀNICA DE LA GARROTXA I LA FALLA D'AMER.	205
	ANNEX B: RESULTATS DE LA CAMPANYA DE MESURA DELS BUFADORS DE LA ZONA VOLCÀNICA DE LA GARROTXA DURANT L'ANY 2007.	211
	ANNEX C: RESULTATS DE LA CAMPANYA DE MESURA DE LES AIGÜES SUBTERRÀNIES DE LA ZONA VOLCÀNICA DE LA GARROTXA DURANT L'ANY 2007.	213
	ANNEX D: MAPES AMB LA DISTRIBUCIÓ DE PUNTS DE MESURA DE LA RADIACIÓ GAMMA TERRESTRE A LA ZONA VOLCÀNICA DE LA GARROTXA.....	215
	ANNEX E: RECOLLIDA I PROCESSAT DE MOSTRES DE SÒL PER ESPECTROMETRIA GAMMA..	221
	ANNEX F: DIAGRAMA DEL MODEL RAGENA PEL MÒDUL DE SAELICES EL CHICO.....	223
	GLOSSARI D'ACRÒNIMS	225
	REFERÈNCIES.....	227

1. Introducció

Aquesta tesi doctoral recull bona part dels estudis relacionats amb el gas radó que s'han dut a terme al llarg dels últims vuit anys en la Unitat de Física de les Radiacions (UFR) de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB).

1.1. Motivació i projectes de recerca

La tesi s'ha desenvolupat en el marc de diferents projectes de recerca finançats per diferents organismes públics (Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Parc Natural de la Zona Volcànica de la Garrotxa (PNZVG) i Ajuntament d'Olot). Els diferents projectes tenen com a denominador comú el camp de coneixement de la radiació natural. Els del CSN estan clarament orientats cap a la Protecció Radiològica (PR) dels treballadors i membres del públic en general i també cap a la millora de les eines per determinar, predir o mitigar els nivells de radiació (instrumentació de mesura, modelització, etc.). Els projectes del PNZVG i l'ajuntament d'Olot tenen tant una component de PR com també una de Geofísica molt important. Una altra característica d'aquesta tesi és la seva temporalitat, ja que el fet de recollir la recerca duta a terme al llarg de vuit anys fa que sovint se'n faci una descripció cronològica que permet entendre millor els resultats obtinguts en les seves diferents etapes. També cal esmentar que s'han realitzat estudis en regions geogràfiques molt diverses però totes elles interessants, tant des del punt de vista de la Geofísica com de la PR. Totes aquestes característiques han ofert la possibilitat, en primer lloc, de treballar de forma multidisciplinària amb altres instituts, universitats i centres de recerca, i de forma més especial amb els geòlegs de la Unitat de Geodinàmica Externa i d'Hidrogeologia (UGEH) del Departament de Geologia de la UAB. En segon lloc, de presentar la recerca desenvolupada en diferents congressos i publicar els resultats en revistes nacionals i internacionals de diversos àmbits.

L'any 2004, moment en què la doctoranda inicia la seva recerca dins de la UFR de la UAB, el grup acaba d'iniciar el projecte finançat pel CSN titulat "Estudio del riesgo asociado a la inhalación de descendientes del radón en diferentes actividades laborales y en viviendas". Aquest projecte, tal i com el seu nom indica, consisteix en l'estudi de les concentracions de radó a diferents llocs de treball i habitatges de Catalunya on els treballadors i els membres del públic en general poden estar exposats a uns nivells elevats de radó i de descendents que poden representar un increment de la dosi deguda a la radiació natural que sigui significatiu des del punt de vista de la PR. Per realitzar aquest projecte es busquen i analitzen de forma sistemàtica totes aquelles activitats laborals que poden complir aquestes condicions, com mines en explotació, antigues mines que actualment són museus, coves turístiques, aparcaments subterranis, etc., és a dir, qualsevol lloc de treball subterrani sense tenir en compte la litologia (Font et al., 2008a; Baixeras et al., 2005b). Amb aquest projecte també s'estudien llocs de treball subterranis i habitatges de la zona volcànica de la Garrotxa i la falla d'Amer, ja que en una campanya preliminar dels nivells de radó a l'interior de recintes d'Olot, realitzada l'any 2002, s'obtenen valors elevats, especialment en els edificis construïts sobre els materials volcànics (Baixeras et al., 2005a). Una campanya posterior, ampliada a més llocs de treball i habitatges d'Olot i d'alguns pobles dels voltants de la falla d'Amer, havia de permetre confirmar els resultats preliminars obtinguts i observar la possible influència del tipus de sòl sobre els nivells de radó i les seves variacions estacionals (Moreno, 2006; Font et al., 2008b; Moreno et al., 2008).

L'any 2007 la UGEH, juntament amb la UFR, porta a terme un parell d'estudis, finançats pel PNZVG, amb els quals continua la recerca sobre la distribució dels nivells de gas radó a la zona volcànica. Un estudi està dedicat a la caracterització dels bufadors com a fonts de radó i toró (Bach et al., 2007a; Moreno et al., 2009a) i l'altre a les concentracions de radó dissolt a les aigües subterrànies (Bach et al., 2007b; Moreno et al., 2012a). Aquell mateix any la doctoranda també comença a col·laborar en les campanyes de mesures de la concentració de radó a la marjal de Penýscola (Castelló) (Moreno et al., 2009b), que s'inicien a conseqüència del desenvolupament del projecte "Evaluación de la descarga de agua subterránea al mar desde el acuífero regional Jurásico de la Unidad Hidrogeológica de El Maestrazgo (Castellón), mediante isótopos de Ra" (codi de referència CGL2006-09274/HID), on es fan uns estudis preliminars de la distribució de radionúclids naturals en el sòl de la marjal (Rodellas, 2008; Cherta, 2008).

L'any 2008, amb el suport de la UFR i la UGEH de la UAB, la doctoranda rep la beca d'investigació en Ciències Naturals Oriol de Bolòs, que convoca anualment l'ajuntament d'Olot, per a la realització d'un projecte de recerca. Aquesta beca li permet continuar els estudis iniciats sobre els nivells de radó a la zona volcànica de la Garrotxa i ampliar el coneixement cap a les altres fonts naturals de radiació presents a la zona (Moreno, 2009; Moreno et al., 2012a). El mateix any 2008 s'estableix un conveni de col·laboració entre la UAB i el CSN per aplicar el model dinàmic RAGENA (Font i Baixeras, 2003) al mòdul experimental de Saelices el Chico (Salamanca). Aquest projecte permet estudiar i modelitzar els mecanismes d'entrada i acumulació del radó a l'interior d'un recinte tancat i la influència de les condicions meteorològiques.

Finalment, l'any 2009, la UFR de la UAB obté finançament del CSN per la realització del projecte d'I+D titulat "Estudio de la instrumentación de vigilancia radiológica ambiental y de medida de radón en condiciones ambientales extremas" (codi de referència 2686-SRA). Amb aquest nou projecte s'estudia detalladament la instrumentació utilitzada per determinar els nivells de radó i es realitzen noves mesures de la concentració de radó a aquells llocs de treball on les condicions de mesura són especialment extremes degut a unes elevades concentracions d'aerosols, altes temperatures o altes humitats, incloent els establiments termals com a activitats laborals analitzades (Moreno et al., 2011; Moreno et al., 2012b).

1.2. Objectius

L'objectiu principal d'aquest treball és l'estudi de les concentracions de gas radó en diferents activitats laborals tenint en compte tant aspectes relacionats amb la instrumentació utilitzada, com amb la PR dels treballadors i el públic en general, així com també amb la geologia dels emplaçaments analitzats. Aquest estudi estableix unes bases metodològiques per poder avaluar correctament l'impacte radiològic degut al gas radó en: (i) zones volcàniques i de falles i (ii) activitats laborals on els treballadors poden estar exposats de forma significativa a les fonts naturals de radiació. Aquest estudi facilita el desenvolupament dels procediments de mesura necessaris perquè la UFR de la UAB pugui disposar de l'acreditació corresponent per realitzar aquest tipus de mesures amb garantia de qualitat.

Els objectius parcials que es desenvolupen al llarg del treball són:

1. Dur a terme un control de qualitat intern i extern dels sistemes de mesura (calibratges, comparacions nacionals i internacionals i exposicions pròpies).
2. Realitzar optimitzacions de la instrumentació per poder-la utilitzar en unes condicions ambientals extremes.
3. Adaptar el model dinàmic RAGENA a una construcció real per poder aplicar el coneixement adquirit a altres situacions d'interès radiològic.
4. Realitzar mesures de la concentració de radó i de la radiació gamma terrestre en activitats laborals i alguns habitatges de zones amb interès geològic i radiològic.
5. Estudiar les possibles fonts de radó en les zones d'estudi, realitzant mesures en el subsòl i en les aigües subterrànies, així com determinant el contingut de radionúclids del sòl (radi, urani, ...).

1.3. Estructura

Aquesta tesi està dividida en 6 capítols.

En el capítol 1 s'exposen la motivació, els projectes de recerca, els objectius i l'estructura del treball.

En el capítol 2 es descriu de forma resumida en què consisteix la radiació natural en general i de forma més detallada el gas radó.

En el capítol 3 es presenta tota la instrumentació utilitzada per dur a terme les mesures de radiació natural, el control de qualitat utilitzat per garantir la fiabilitat dels resultats obtinguts i l'adaptació del model dinàmic RAGENA al mòdul experimental de Saelices el Chico, Salamanca.

En el capítol 4 es descriu la recerca realitzada a la zona volcànica de la Garrotxa i la falla d'Amer, orientada des de dos punts de vista diferents: *(i)* l'interès geofísic de la zona i *(ii)* la PR dels treballadors de diferents activitats laborals d'una àrea identificada pel seu potencial de presentar nivells alts de radó.

En el capítol 5 es descriuen les mesures realitzades a diferents activitats laborals: *(i)* llocs de treball subterranis, els quals es caracteritzen per tenir el sòl com la principal font de radó de l'aire del seu interior, *(ii)* establiments termals, activitats laborals on la principal font de radó a l'aire del seu interior són les aigües subterrànies i *(iii)* diferents llocs de treball de la marjal de Penyíscola, una àrea identificada per tenir nivells alts de radiació natural.

Finalment, en el capítol 6 es recullen les principals conclusions dels diferents estudis i les perspectives de futur.

2. La radiació natural i el gas radó

La radiació natural ha estat present al planeta Terra des dels seus orígens i totes les formes de vida han conviscut amb ella. Aquesta radiació està formada per la radiació procedent de l'espai exterior (raigs còsmics) i la radiació que emeten els materials radioactius constituents de l'escorça terrestre i dels éssers vius, molts dels quals estan incorporats a l'aire, als aliments, a l'interior de l'organisme humà, als materials de construcció dels edificis, etc.

2.1. La radiació còsmica

La Terra està contínuament bombardejada per partícules molt energètiques procedents de l'espai exterior que constitueixen el que s'anomena radiació còsmica primària. Quan aquestes partícules interaccionen amb els nuclis dels elements que es troben a l'atmosfera, principalment ^{14}N , ^{16}O i ^{40}Ar , produeixen una sèrie de partícules, com neutrons, protons, muons, electrons i radiació electromagnètica, que constitueixen la radiació còsmica secundària. Segons el Comitè Científic de les Nacions Unides sobre els Efectes de la Radiació Atòmica (UNSCEAR), la taxa de dosi efectiva a nivell del mar deguda a la component directament ionitzant i als fotons de la radiació còsmica és de $32 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$ per latituds entre els 30° i 50° (la Península Ibèrica s'estén entre els paral·lels 36° i 44° de latitud nord). La variació d'aquesta taxa de dosi amb l'altitud ve descrita per la següent expressió:

$$D(z) = D(0) \left(0.21 e^{-1.649z} + 0.79 e^{0.4528z} \right) \quad (2.1)$$

on $D(0)$ és la taxa de dosi a nivell del mar i z és l'altitud expressada en quilòmetres.

Per determinar l'exposició a la radiació còsmica que té lloc a l'interior dels edificis, les dosis han de reduir-se degut al blindatge que proporcionen els materials de construcció. El valor exacte del factor de reducció depèn del tipus d'edifici i dels materials utilitzats, però en general pot utilitzar-se un factor de 0.8. Un altre factor a tenir en compte és el factor d'ocupació a l'interior dels edificis, amb el valor universalment acceptat de 0.8. Acceptar aquesta xifra significa assumir que, com a mitjana, la població només passa el 20 % del seu temps a l'exterior dels edificis, tot i que hi pot haver grans diferències en funció de la zona climàtica (UNSCEAR, 2000).

2.2. La radiació terrestre

A la naturalesa existeixen unes sèries d'elements radioactius que formen les anomenades cadenes naturals o sèries de desintegració. En elles, el radionúclid resultant d'una desintegració també és un element radioactiu, és a dir, produeix una nova desintegració i un nou radionúclid, i així successivament fins arribar a un isòtop estable. Les cadenes s'anomenen tenint en compte el radionúclid amb el període de semidesintegració més elevat. Inicialment eren quatre: la de l'urani (^{238}U), la del neptuni (^{237}Np), la de l'actini (^{235}U) i la del tori (^{232}Th). La cadena del neptuni pràcticament ja ha desaparegut de l'escorça terrestre degut a tenir un període de semidesintegració més petit que l'edat de la Terra. Actualment només es troba en quantitats molt petites en les mines d'urani, com a conseqüència de les reaccions de transmutació que hi tenen lloc, i també s'obté en majors quantitats i de forma artificial en els reactors nuclears (Choppin et al., 2002). De les tres cadenes naturals existents, les més abundants són la de l'urani (^{238}U) i la del tori (^{232}Th). Els radionúclids d'aquestes cadenes són emissors α , β i γ . La contribució de l'actini (^{235}U) i els seus productes de desintegració a la dosi total deguda a la radiació terrestre és inapreciable, ja que l'urani natural només conté un 0.72 % d'actini (UNSCEAR, 2008). Existeixen altres isòtops emissors gamma que no pertanyen a cap d'aquestes cadenes. El més abundant és el ^{40}K , amb un període de semidesintegració de $1.3 \cdot 10^9$ anys, el qual es troba en un percentatge del 0.01 % en el potassi natural (UNSCEAR, 2008). Des del punt de vista de la dosi de radiació rebuda per les persones deguda a la radiació terrestre es poden distingir dues components, una d'interna i una altra d'externa.

2.2.1. La component externa: la radiació gamma terrestre

La radiació gamma terrestre és l'energia emesa per la superfície terrestre en forma de radiació electromagnètica com a conseqüència de la desintegració dels radionúclids de les cadenes de desintegració i altres elements inestables presents a la Terra. La distribució dels radionúclids a la geosfera depèn tant de la distribució del medi geològic, que n'és la font, com dels processos que concentren o eliminen els radionúclids en un lloc específic i/o en una fase concreta. Per exemple, les roques ígnies, com els granits, tenen uns continguts de ^{40}K , ^{238}U i ^{232}Th més elevats que altres tipus de roques, com poden ser les sedimentàries o les basàltiques (Taboada et al., 2006), i per tant, són les que presenten uns nivells més elevats de radiació gamma terrestre.

Quan estem a l'aire lliure, el sòl que trepitgem és la principal font d'exposició a la radiació gamma, mentre que quan estem a l'interior dels edificis, els materials de construcció poden ser-ne els principals contribuents. En general els elements constructius dels edificis (fonaments, parets i sostre) incrementen la taxa de dosi mesurada a l'exterior, en major proporció com més elevada sigui la concentració d'elements emissors gamma que tinguin, però també poden comportar-se com elements que la disminueixen, si tenen baixes concentracions en comparació amb els sòls adjacents, i aleshores actuen de blindatges. Per altra banda, si l'edifici està construït amb fusta o té les parets molt fines pràcticament no hi ha diferències apreciables entre la taxa de dosi per radiació gamma mesurada dins i fora, ja que la radiació gamma té un elevat poder de penetració a la matèria. Per atenuar-la significativament són necessaris gruixos de plom o grans blocs de formigó. Gairebé sempre els materials de construcció estan constituïts per minerals de la pròpia zona, per aquest motiu, normalment existeix una relació lineal entre les dosi absorbides als interiors i als exteriors dels edificis. El valor mig del quocient entre ambdues taxes de dosi és 1.4, per tant, les exposicions a la radiació gamma terrestre a l'interior dels edificis acostumen a ser un 40 % superiors a les exteriors (UNSCLEAR, 2000).

L'any 2000, el CSN i l'Empresa Nacional de l'Urani, S.A. (ENUSA) van elaborar el primer mapa de radiació gamma natural d'Espanya, conegut com el mapa MARNA. Aquest mapa presenta la distribució de les taxes d'exposició a la radiació gamma que es troben a l'aire lliure i a 1 m d'alçada del sòl. El mapa es va realitzar a partir de les mesures obtingudes des de l'aire i amb automòbils durant els plans d'exploració nacional d'urani (1968-81) i en campanyes més específiques (1991-2000). Ara bé, no totes les zones del territori espanyol van ser mesurades amb la mateixa resolució. A les zones on no hi havia mesures disponibles es va fer una estimació mitjançant una extrapolació geològica (Quindós Poncela et al., 2004). Les zones amb nivells de radiació gamma més elevats corresponen a les comunitats autònomes d'Extremadura, Castella-Lleó i Galícia (Figura 2.1), caracteritzades per tenir molts substrats granítics. Aquestes zones posteriorment han estat més mesurades per tal d'elaborar mapes més detallats. A Catalunya es poden observar 3 zones on els nivells de la taxa d'exposició superen els $15 \mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$, les quals també presenten substrats granítics.

2.2.2. La component interna: Ingestió i inhalació d'elements radioactius

En general, les dosis per ingestió no són elevades, encara que presenten una gran variabilitat degut a diversos factors com la radioactivitat del sòl, el clima, les pràctiques agràries, etc. Els radionúclids de les sèries de l'urani i el tori es troben en els diferents tipus d'aliments (cereals, fruites, hortalisses, carn, peix, productes làctics, etc.) i el consum d'aigua també pot ser una font important de radionúclids a l'organisme, especialment si el seu origen és subterrani.

La dosi de radiació rebuda per inhalació es deu a la presència de gas radó en l'aire que respirem i, més concretament, als seus descendents de vida mitja curta. La resta de radionúclids naturals donen lloc a dosi menyspreables (~ 0.01 %).

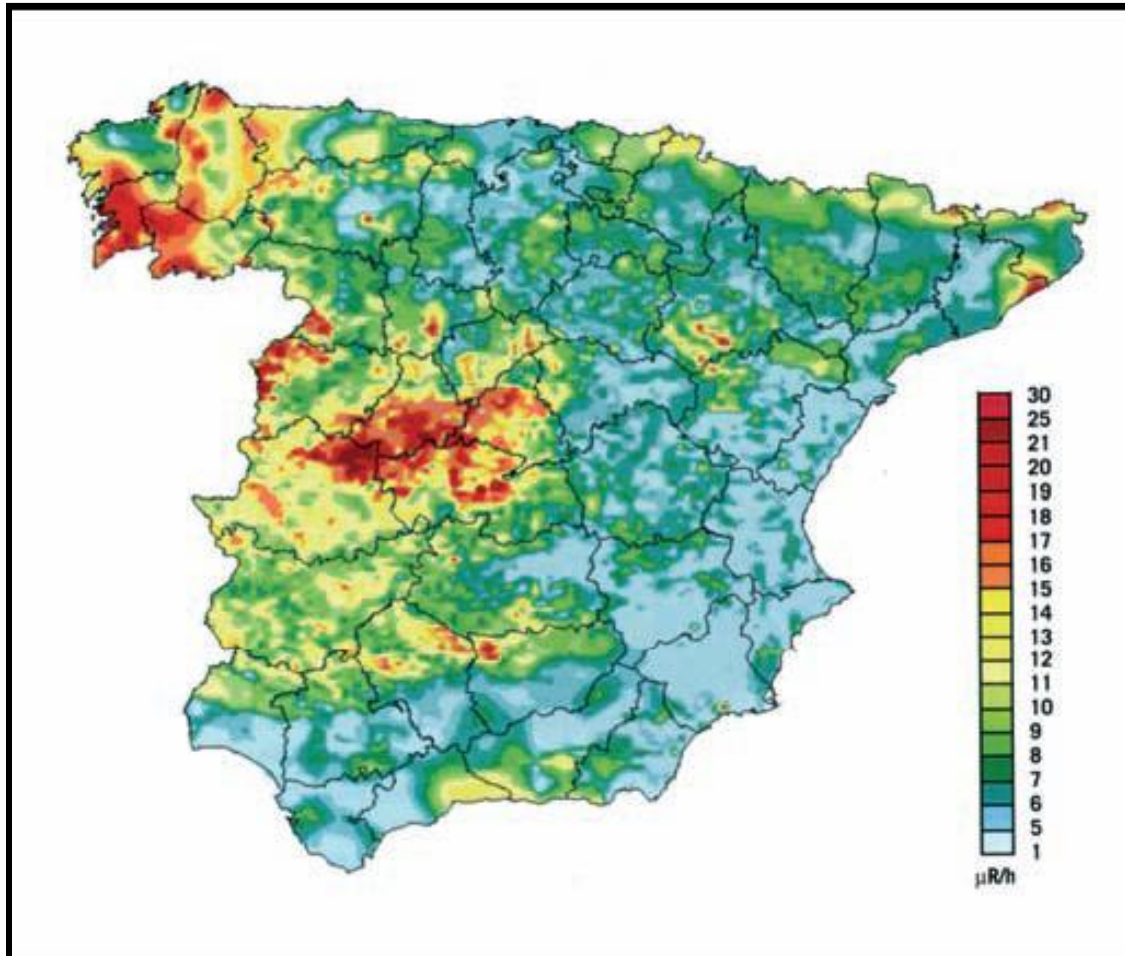


Figura 2.1. Mapa MARNA de la radiació gamma terrestre (García-Talavera et al., 2007).

2.3. El gas radó

2.3.1. Característiques físiques i químiques, isòtops i descendents

El radó apareix a la taula periòdica com l'element gasós de símbol Rn i nombre atòmic 86. Deu el seu nom al radi, l'element químic del qual s'origina. Té una densitat de $9.73 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a la temperatura de $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. El seu punt de fusió es troba a una temperatura de $-71 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i el d'ebullició a $-62 \text{ }^{\circ}\text{C}$. A temperatures ordinàries es caracteritza per ser incolor, inodor i insípid però quan es solidifica presenta fosforescència brillant, que esdevé grogosa a baixes temperatures i vermell-taronjosa a la temperatura de l'aire líquid, $-140 \text{ }^{\circ}\text{C}$. La seva concentració mitjana a l'aire atmosfèric és d'1 àtom per cada 10^{18} i el coeficient de difusió en aquest medi és de $10^{-4} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$. La seva solubilitat en aigua és gran i augmenta a mesura que disminueix la temperatura ($230\cdot 10^{-6} \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ a $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i de $510\cdot 10^{-6} \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ a $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Està present a les tres cadenes naturals de desintegració (Figures 2.2, 2.3 i 2.4) i la seva principal característica és el fet de ser un gas noble. Com que els àtoms de radó són químicament estables es poden moure lliurement sense reaccionar amb cap altre element.

Es coneixen més de 30 isòtops del radó, però la majoria d'ells no es troben a la natura. Els tres isòtops naturals són el ^{222}Rn , el ^{220}Rn i el ^{219}Rn , anomenats radó, toró i actinó respectivament. El radó, ^{222}Rn , és descendent del ^{226}Ra i forma part de la cadena de desintegració del ^{238}U (**Figura 2.2**). Dels tres isòtops és el que té el període de semidesintegració més llarg ($T_{1/2} = 3.8$ d) i, per tant, és el que pot escapar amb més facilitat del material on es forma i arribar a unes concentracions en aire més grans. Això fa que tingui més importància radiològica i, de fet, el seu nom coincideixi amb el de l'element, a diferència dels altres dos isòtops que tenen noms propis. El toró, ^{220}Rn , és descendent directe del ^{224}Ra i forma part de la cadena de desintegració del ^{232}Th (**Figura 2.3**). Dels tres isòtops del radó és el més abundant a la natura però, en general, el seu impacte radiològic és petit degut al seu curt període de semidesintegració ($T_{1/2} = 56$ s). L'actinó, ^{219}Rn , és descendent directe del ^{223}Ra i forma part de la cadena de desintegració del ^{235}U (**Figura 2.4**). La seva contribució a la radioactivitat natural és menyspreable degut a la petita raó isotòpica del ^{235}U respecte el ^{238}U ($^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.72\%$) i al seu curt període de semidesintegració ($T_{1/2} = 4$ s), responsable de que es desintegri dins els materials on es forma abans d'arribar a l'aire exterior. Per tant, des del punt de vista de la PR, no té cap importància. A partir d'aquest moment, quan es parla del radó es fa referència a l'isòtop ^{222}Rn .

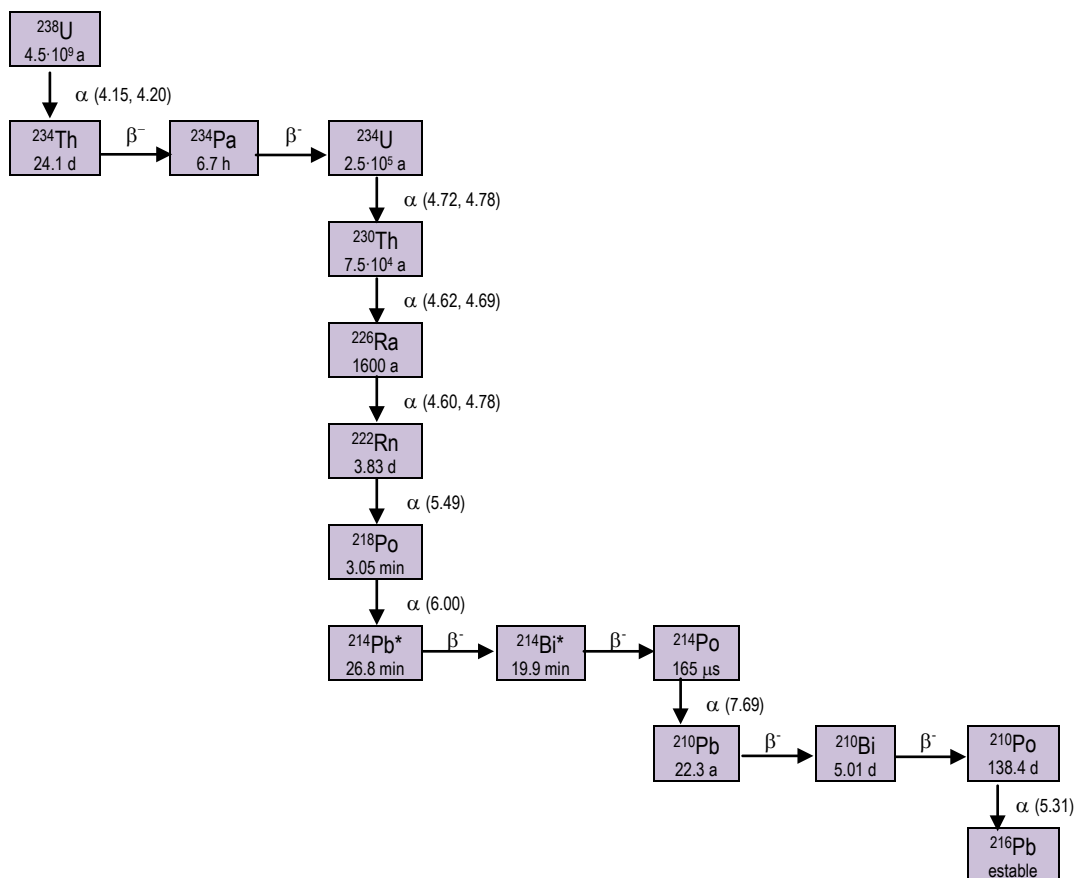


Figura 2.2. Cadena de desintegració del ^{238}U amb els períodes de semidesintegració de cada radionúclid i les energies (en MeV) de les partícules α emeses. L'asterisc indica que l'isòtop és un emissor gamma significatiu.

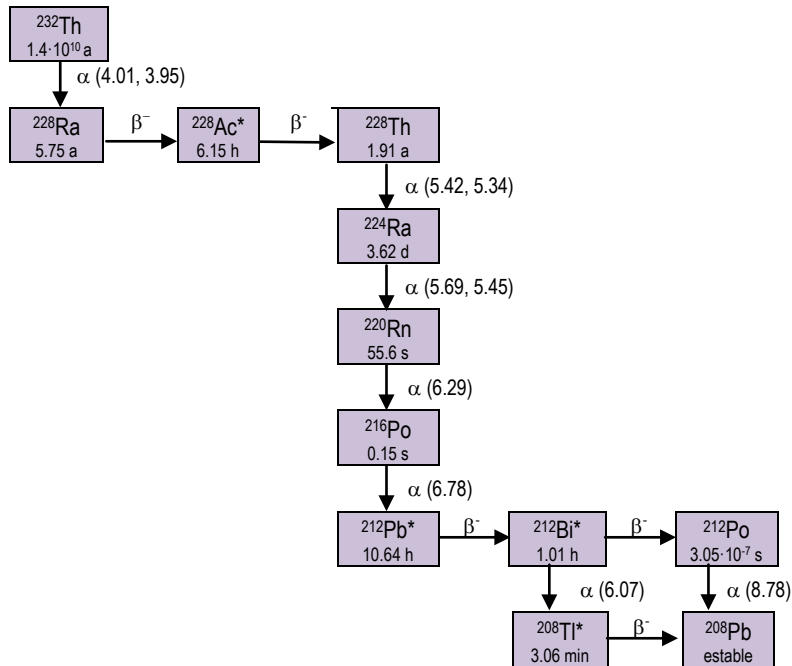


Figura 2.3. Cadena de desintegració del ^{232}Th amb els períodes de semidesintegració de cada radionúclid i les energies (en MeV) de les partícules α emeses. L'asterisc indica que l'isòtop és un emissor gamma significatiu.

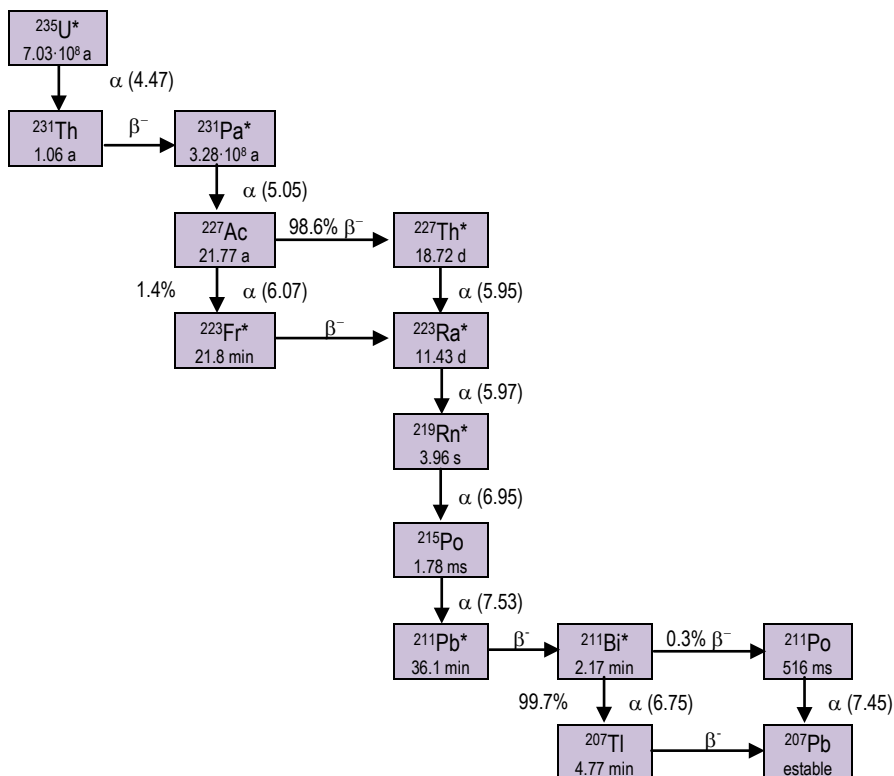


Figura 2.4. Cadena de desintegració del ^{235}U amb els períodes de semidesintegració de cada radionúclid i les energies (en MeV) de les partícules α emeses. L'asterisc indica que l'isòtop és un emissor gamma significatiu.

Quan un àtom de radó es desintegra, emetent una partícula α , esdevé un nou element que també és radioactiu però que, en comptes d'un gas, és un sòlid. Tots els descendents del radó són metalls pesants, de càrrega positiva i químicament molt actius. Segons el seu període de semidesintegració es poden dividir en dos grups: (i) els de vida mitja llarga, amb $T_{1/2} > 30$ minuts, i (ii) els de vida mitja curta, amb $T_{1/2} < 30$ minuts, el què implica una major influència en la contaminació interna quan són incorporats dins el nostre organisme. Com que el període de semidesintegració dels descendents de vida mitja curta del radó és molt més petit que el del propi radó, en unes condicions ideals en que inicialment no es tingui concentració d'aquests descendents, ràpidament (< 3.5 h) s'arriba a una situació d'equilibri radioactiu (secular), en el qual el ritme de desintegració dels fills que es van formant ve marcat per la pròpia desintegració del pare. En condicions reals, però, no tenim aquest equilibri degut al fet que els descendents, en ser metalls pesants, s'adhereixen en major o menor grau als aerosols presents a l'aire i es dipositen sobre superfícies, trencant l'equilibri radioactiu.

2.3.2. Dinàmica

Per dinàmica del radó s'entenen tots els processos que poden experimentar els àtoms de radó, des de la generació fins a la desintegració. Entre aquests dos esdeveniments es pot donar l'emanació a l'espai intersticial, el transport per difusió i advecció a través d'un medi, la incorporació a masses d'aigua, l'exhalació a l'aire atmosfèric i l'acumulació a l'interior de recintes. A cadascun d'aquests processos es pot trobar una certa influència de les condicions meteorològiques i de les característiques del medi i del recinte.

2.3.2.1. Generació i emanació

El radó es forma en desintegrar-se el radi ^{226}Ra que es troba present, en major o menor grau, a qualsevol material de l'escorça terrestre. La quantitat de radó generada depèn del contingut de radi en els materials, el qual ve donat típicament com l'activitat per unitat de massa seca, A_{Ra} ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$). Tot material està format d'uns grans de mida variable i d'un espai porós, anomenat intersticial, que està ple d'alguns fluids, principalment aire i/o aigua. De tot el radó que es crea en els grans, una part pot passar a l'espai intersticial del material i després viatjar a través d'aquest fins arribar a l'aire exterior. L'emanació del radó consisteix en l'alliberament dels àtoms de radó que han estat creats en els grans del material i que arriben a l'espai intersticial abans de desintegrar-se. Aquest fet es produeix, principalment, gràcies al retrocés que experimenta l'àtom de radó quan es desintegra el nucli de radi, degut a la conservació del moment lineal. A la fracció d'àtoms que surt dels grans del material respecte dels que es creen en el seu interior se l'anomena coeficient d'emanació, f . El ritme a què es produeix aquesta emanació del radó depèn de diferents factors, com la distribució de mides dels grans, les alteracions en les seves superfícies i el contingut d'aigua a l'espai intersticial.

2.3.2.2. Transport i exhalació

El transport del gas radó a través de l'espai intersticial del material es produeix mitjançant els mecanismes de difusió i advecció, descrits per les lleis de Fick i Darcy, respectivament. La llei de Fick diu que un fluid tendeix a moure's en la direcció oposada en què augmenta el seu gradient de concentració. Es defineix la densitat de flux de concentració a través de l'àrea dels porus com:

$$\phi = -D_e \nabla C_{Rn} \quad (2.2)$$

on D_e és el coeficient efectiu de difusió ($m^2 \cdot s^{-1}$) i C_{Rn} és la concentració de gas radó en l'espai intersticial ($Bq \cdot m^{-3}$), ($C_{Rn} = A_{Rn} V^1$, on A_{Rn} és l'activitat de gas radó (Bq)) (Nazaroff i Nero, 1988).

La llei de Darcy relaciona la velocitat del fluid, v ($m \cdot s^{-1}$), que travessa una determinada àrea perpendicular al flux amb el gradient de pressió, ∇P (Pa), la permeabilitat del medi, k (m^2) i la viscositat dinàmica de l'aire en els porus del medi, μ (Pa·s), segons l'expressió:

$$v = -\frac{k}{\mu} \nabla P \quad (2.3)$$

Aleshores, la densitat de flux d'activitat deguda a l'advecció s'obté de l'expressió:

$$\phi = \frac{C_{Rn}}{\varepsilon} v \quad (2.4)$$

on ε és la porositat del medi.

A partir de l'equació de la conservació de la massa i l'assumpció d'algunes simplificacions es pot deduir una equació que descriu el transport del gas radó en un medi, tal com (Nazaroff i Nero, 1988):

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial (C_g \varepsilon_g + C_w \varepsilon_w)}{\partial t} = \nabla \cdot D'_e \nabla C_g - \nabla \cdot C_g \frac{v'}{\varepsilon_g} + f' \rho_{gr} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} A_{Ra} \lambda_{Rn} - \frac{1}{\varepsilon} \lambda_{Rn} (C_g \varepsilon_g + C_w \varepsilon_w) \quad (2.5)$$

on C_g és la concentració de radó en el gas del volum dels porus del medi ($Bq \cdot m^{-3}$), ε_g és la porositat del gas, definida com el quocient entre el volum de gas del porus i el volum total del porus; C_w és la concentració de radó en l'aigua del volum dels porus del medi ($Bq \cdot m^{-3}$), ε_w és la porositat de l'aigua, definida com el quocient entre el volum d'aigua del porus i el volum total del porus ($\varepsilon = \varepsilon_g + \varepsilon_w$), D'_e és el coeficient efectiu de difusió corregit per l'efecte del contingut d'aigua ($m^2 \cdot s^{-1}$), v' és el vector de velocitat superficial del gas ($m \cdot s^{-1}$), f' és el coeficient d'emanació corregit per l'efecte del contingut d'aigua, ρ_{gr} és la densitat dels grans del medi ($kg \cdot m^{-3}$) i λ_{Rn} és la constant de desintegració del radó ($2.1 \cdot 10^{-6} s^{-1}$).

El primer terme del costat dret de la igualtat correspon al procés de difusió, el segon terme al procés de l'advecció, el tercer terme a la generació dels àtoms de radó en els grans del

medi i l'últim terme a la seva desintegració. Les aproximacions que s'han tingut en compte per obtenir l'equació (2.5) són:

- Negligir el transport del radó com a resultat de la difusió de qualsevol altre altra espècie en l'aire.
- Considerar que, com en l'aire lliure, les col·lisions dels àtoms de radó es produeixen amb les molècules de l'aire. Aquesta assumptió és raonable quan els porus del medi són grans en relació amb el recorregut lliure mig dels àtoms de radó, 0.065 μm at 25 °C.
- Negligir qualsevol possible absorció de radó a les superfícies dels grans del medi.
- Negligir qualsevol migració d'humitat o migració de radó amb l'aigua del medi.

L'equació (2.5) es pot simplificar considerant les següents assumpcions addicionals:

- Negligir el contingut d'aigua.
- Descriure el vector velocitat superficial per la llei de Darcy.
- Considerar que el sòl és homogeni i isotròpic respecte D_e , μ , ε , f , A_{Ra} i ρ_{gr} .
- Considerar que el gas és incompressible dins el rang de pressions d'interès,

aleshores, l'equació (2.5) es pot escriure

$$\frac{\partial C_{Rn}}{\partial t} = D_e \nabla^2 C_{Rn} + \frac{k}{\varepsilon \mu} \nabla P \nabla C_{Rn} + f \rho_{gr} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} A_{Ra} \lambda_{Rn} - \lambda_{Rn} C_{Rn} \quad (2.6)$$

Al procés de sortida del radó des dels porus del material on s'ha creat cap a l'aire exterior se l'anomena exhalació i la velocitat en que això es produeix és la taxa d'exhalació E_{Rn} , expressat en unitats de $\text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$. El flux de radó F_{Rn} ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) és la taxa d'exhalació per unitat de superfície del sòl i es pot determinar de forma indirecta, mitjançant equacions empíriques (Grossi et al., 2011) o a partir de l'equació de difusió (Nazaroff i Nero, 1988):

$$F_{Rn} = A_{Ra} \lambda_{Rn} f \rho_{gr} \sqrt{\frac{D_e}{\lambda \varepsilon}} \quad (2.7)$$

i també de forma directe, mitjançant el mètode de la cambra d'acumulació. La variació temporal de la concentració de radó a l'interior d'una cambra de volum V (m^3) que cobreix una superfície A (m^2) s'expressa a partir de la següent equació:

$$\frac{\partial C_{Rn}}{\partial t} = \frac{E_{Rn}}{V} - \lambda^0 C_{Rn} \quad (2.8)$$

on $E_{Rn} = F_{Rn} A$ i la constant $\lambda^0 = \lambda_{Rn} + \lambda^*$ (s^{-1}) ve donada per la suma entre la constant de desintegració del radó i la constant de ventilació (λ^*), la qual quantifica la possible disminució de la concentració de radó degut a pèrdues de la cambra. Considerant que la concentració inicial és $C_{Rn}(t=0)=0$ i negligint la reabsorció del radó en el sòl, la solució de l'equació (2.8) és:

$$C_{Rn} = \frac{F_{Rn} A}{\lambda^0 V} (1 - e^{-\lambda^0 t}) \quad (2.9)$$

En funció del mètode de mesura utilitzat per determinar la C_{Rn} a l'interior d'aquesta cambra, l'expressió (2.9) es pot simplificar.

2.3.2.3. Radó al sòl i a les aigües

Les concentracions de radó a la majoria de sòls de l'escorça terrestre poden variar entre els $2000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i els $10^6 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (ICRP, 2011). El radó de l'espai intersticial principalment viatja per difusió i per advecció, depenent de les característiques del medi com la porositat, la permeabilitat i la presència d'esquerdes o falles. Un altre possible mecanisme de transport que té aquest gas és amb el moviment de l'aigua, ja que el radó és soluble en ella. Tant les aigües superficials com les subterrànies tenen sempre una certa concentració de radó dissolt i aquesta quantitat depèn de diferents factors, com per exemple les característiques del terreny pel qual circula l'aigua, el temps de permanència en el seu interior o superfície, etc. Els nivells típics van des de valors pràcticament negligibles, com $4 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ($4\cdot 10^{-3} \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$) en els oceans, fins a més de $10^7 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ($10 \text{ kBq}\cdot\text{l}^{-1}$) en algunes aigües subterrànies, que normalment estan associades amb altes concentracions d'urani en el subsòl. Un sòl saturat d'aigua amb una porositat del 20 % i una concentració de radi de $40 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, que és el valor mig mundial a l'escorça terrestre, provoca una C_{Rn} en equilibri en aigües subterrànies de l'ordre dels $50 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ (UNSCEAR, 2000). Pel cas de les aigües continentals superficials, com per exemple un riu o un llac, aquests nivells són de l'ordre dels $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ o inferiors. La baixa C_{Rn} d'aquestes aigües és deguda a l'alliberament d'aquest gas cap a l'atmosfera, sobretot en les situacions on el flux d'aigua és turbulent (Mulligan i Charette., 2006).

2.3.2.4. Radó a l'aire exterior i a l'interior de recintes

En general, quan el radó arriba a l'aire atmosfèric es difon ràpidament. La C_{Rn} típica a l'atmosfera és de l'ordre de $10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, tot i que pot variar en un ampli rang de valors, entre 1 i $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, depenent de l'exhalació de radó de cada terreny. En canvi, dins un recinte el radó pot quedar confinat i la seva concentració pot arribar a assolir valors equivalents a la del sòl. Per tant, es poden trobar valors que van des de $10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ fins a $70000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, essent el valor mig mundial de $40 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (UNSCEAR, 2000; 2008; 2010). Existeixen molts factors que condicionen les concentracions de radó en l'aire exterior, per exemple les condicions meteorològiques, tal com la temperatura del sòl i de l'aire exterior, la pressió atmosfèrica, la humitat i la velocitat del vent. Un factor que influeix molt sobre l'exhalació del radó són les variacions de la pressió atmosfèrica. Quan la pressió disminueix, l'exhalació augmenta degut al fenomen de bombeig d'aire i, en canvi, quan la pressió augmenta l'aire atmosfèric tendeix a penetrar en el sòl, la qual cosa frena la sortida del radó. Un altre paràmetre és la distància respecte el sòl, ja que la C_{Rn} disminueix en augmentar aquesta, pel propi procés de dilució. En algunes zones continentals on hi ha fonts de radó importants o en el cas de determinades condicions meteorològiques, com la inversió tèrmica o èpoques de poca precipitació, la C_{Rn} en l'atmosfera pot arribar a tenir

valors elevats. En canvi, en zones oceàniques, aquesta concentració presenta uns valors molt baixos degut bàsicament a la poca presència de radó a l'aigua dels oceans i a l'alta solubilitat de radó en l'aigua a baixes temperatures. D'aquesta forma, la C_{Rn} en zones costeres és, en general, menor que en zones continentals. Aquests comportaments ofereixen la possibilitat d'utilitzar el gas radó per l'estudi dels moviments de masses d'aire en l'atmosfera (Dentener et al., 1999; Szegvary et al., 2009; Arnold et al., 2009; Grossi et al., 2012).

La C_{Rn} en interiors depèn de la facilitat amb que aquest pugui penetrar a l'interior dels recintes. Bàsicament ho pot fer directament a través del sòl i els materials de construcció on s'ha format o mitjançant algun medi que el transporti, com per exemple, corrents d'aire, l'aigua o el gas natural. Aquests modes d'entrada constitueixen les fonts de radó (Nazaroff i Nero, 1988). Normalment la principal font de radó és el sòl i la difusió és el principal mecanisme d'entrada, però en aquelles situacions en que es produeixen diferències de pressió degudes a diferències de temperatura entre l'interior i l'exterior, a la velocitat del vent, a l'ús de sistemes d'extracció, etc., l'advecció esdevé el mecanisme d'entrada principal i aleshores els nivells de radó acostumen a ser més elevats (Nazaroff, 1992). L'altra font de radó que segueix en importància és els materials de construcció. La contribució de l'aigua, el gas natural i els corrents d'aire com a fonts de radó, en general, és molt petita i només és considerable si el seu contingut de radó és excepcionalment elevat. En el cas de l'aigua, per exemple, només es troben concentracions altes en recintes que utilitzen aigües subterrànies riques en radó (Appleton, 2007). Per tal de caracteritzar l'entrada de radó a l'interior d'un recinte es defineix la taxa específica d'entrada deguda a una font com l'activitat de radó per unitat de temps i de volum d'aire interior. Aquesta magnitud té unitats de $Bq \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$. Com que normalment la C_{Rn} de l'aire exterior és menor que a l'interior, en molts casos s'utilitza la simple ventilació per tal de disminuir les altes concentracions de radó. Es defineix la taxa de ventilació λ_v , amb unitats de h^{-1} , com la fracció del volum d'aire d'un recinte que surt a l'exterior per unitat de temps. També es pot definir la taxa d'intercanvi d'aire entre els recintes a i b , λ_{ab} (h^{-1}), com la fracció del volum d'aire del recinte a que va a parar al recinte b per unitat de temps.

2.3.2.5. Modelització del radó

L'estudi dels processos que intervien en la dinàmica del gas radó fa possible l'elaboració de models que permeten simular i preveure el comportament d'aquest gas en escenaris molt diversos. Existeixen diferents tipus de models, que es poden classificar segons si estudien o no l'evolució temporal, en dinàmics o estacionaris, i segons la tècnica matemàtica utilitzada per resoldre l'equació de transport del radó, en numèrics o analítics. També es poden classificar sobre quin aspecte concret estan estudiant: transport de radó en el sòl, entrada de radó, dinàmica de radó a l'interior, mètodes de mitigació, etc. Una revisió dels diferents models d'entrada del radó a l'interior de recintes es dona a Andersen (2001). En els darrers anys han aparegut alguns models nous, com els de Wang i Ward (2000), Nikolopoulos i Voggiannis (2007) i Jelle (2012). A la UFR de la UAB s'han desenvolupat dos models: (i) el RAGENA, un model dinàmic que descriu la generació, l'entrada i l'acumulació del gas radó a l'interior d'habitatges (Font, 1997) i (ii) el TRANSRAD, un model pel transport del radó des del sòl a l'interior d'habitatges en estat

estacionari i transitori (Albarracín, 1999). Posteriorment se n'ha fet anàlisis de variabilitat i s'han aplicat a situacions reals (Font et al., 1999a; Albarracín et al., 2002; Font i Baixeras, 2003). Aquests models han estat desenvolupats per a poder: (i) predir les concentracions de radó a llarg termini a partir de mesures ràpides, (ii) estimar l'efecte sobre els nivells de radó dependent de la tècnica de construcció utilitzada, (iii) trobar els mètodes de mitigació que afavoreixen la disminució del nivell del radó i (iv) estudiar l'impacte dels canvis de les característiques dels recintes sobre l'exposició al radó per part del públic en general.

2.4. La protecció radiològica (PR)

Inicialment les fonts de radiació d'origen natural eren considerades com un fons ambiental de radiació al qual tothom estava exposat i que no era necessari controlar. Tots els esforços de control, basats en les recomanacions de la Comissió Internacional de Protecció Radiològica (ICRP) fetes a partir dels avenços científics de la comunitat internacional, només estaven dedicats a les fonts artificials, és a dir, al control de les dosi rebudes com a conseqüència de l'acció de l'home. Ara bé, el fet de descobrir que la contribució més important a la dosi total de radiació rebuda pel públic en general és la deguda a la radiació natural, i concretament a la inhalació dels descendents de vida mitja curta del radó, ha fet augmentar la sensibilitat de la comunitat científica i de la societat en general davant el problema del radó, especialment durant les darreres tres dècades (**Figura 2.5**). A la publicació 60 de la ICRP (ICRP, 1991) apareixen per primera vegada recomanacions relacionades amb el gas radó. Segons l'UNSCEAR el valor mig anual de la dosi efectiva deguda a les fonts artificials de radiació és de 0.6 mSv (**Taula 2.1**), mentre que la deguda a les fonts naturals és de 2.4 mSv, dels quals 1.26 mSv (52 %) són deguts al radó i els seus descendents (**Figura 2.6 i Taula 2.2**) (UNSCEAR, 2008).

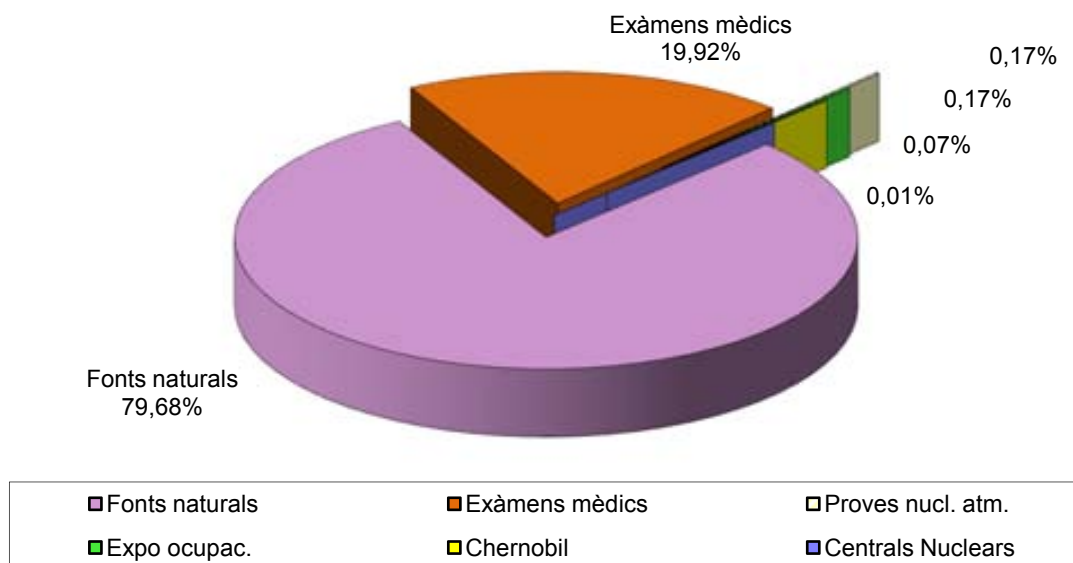


Figura 2.5. Contribució relativa de les diferents fonts de radiació a la dosi total rebuda pel públic en general.

Taula 2.1. Dosi anual degudes a les fonts artificials de radiació per individus del públic en general (UNSCEAR, 2008).

Font	Dosi anual (mSv)	Valors típics (mSv)
Aplicacions mèdiques (diagnòstic)	0,6	0 – algunes desenes
Proves nuclears atmosfèriques	0,005	< 0,11 (1963)
Exposició ocupacional	0,005	0 – 20
Accident de Chernòbyl	0,002	< 0,04 (1986)
Producció d'energia nuclear	0,0002	0 – 0,02
Total	0,6	0 – algunes desenes

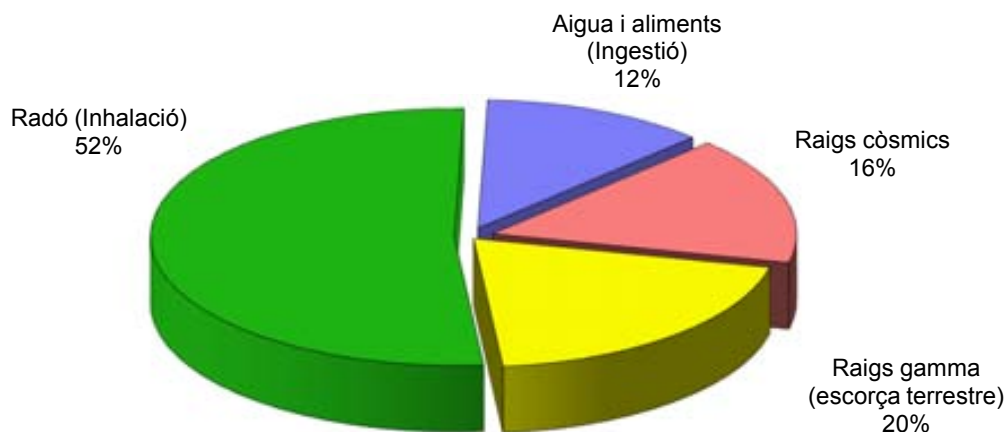


Figura 2.6 Contribució relativa de les diferents fonts de radiació natural a la dosi total rebuda pel públic en general.

Taula 2.2. Dosi anual degudes a les fonts naturals de radiació per individus del públic en general (UNSCEAR, 2008).

Font	Dosi anual (mSv)	Valors típics (mSv)
Exposició externa		
Raigs còsmics	0,39	0,3-1,0
Raigs gamma de l'escorça terrestre	0,48	0,3-1,0
Exposició interna		
Radó (Inhalació)	1,26	0,2-10
Aigua i aliments (Ingestió)	0,29	0,2-1,0
Total	2,4	1-13

Quan el radó és inhalat té una probabilitat petita de desintegrar-se a l'interior dels pulmons abans de ser expulsat, degut al fet de ser un gas noble i a tenir una vida mitja relativament llarga. En canvi, els seus descendents de vida mitja curta es poden dipositar fàcilment a les parets del sistema respiratori. Quan aquests es desintegren poden deixar tota l'energia de les seves emissions alfa en aquestes superfícies, especialment dels teixits bronquials, i produir un dany biològic important. L'any 1986 l'Organització Mundial de la Salut (OMS) va identificar el radó com un carcinogen pulmonar (WHO, 2009). Inicialment l'estimació del risc radiològic associat a la inhalació dels descendents del radó es feia a través de dues grans vies d'investigació: la basada en els estudis epidemiològics i la que utilitza models dosimètrics del sistema respiratori, però els resultats obtinguts per ambdues vies no acabaven de coincidir (ICRP, 1994). Recentment la ICRP ha considerat que el radó i els seus descendents haurien de ser tractats de la mateixa forma que la resta de radionúclids

dins el sistema de PRA i, per tant, conclou que la millor forma de calcular-ne les dosis és a través dels models dosimètrics (ICRP, 2010). Per dur a terme una estimació precisa de la dosis és necessari conèixer un conjunt de paràmetres que no són senzills de determinar, com són, el factor d'equilibri entre el radó i els seus descendents, la fracció lliure dels descendents i l'espectre dimensional de les partícules dels aerosols (Vargas et al., 2004a). Degut a la complexitat per a controlar totes aquestes variables, quan es realitzen extenses campanyes de mesura només es porten a terme mesures de la C_{Rn} de forma integrada durant períodes de temps llargs i després s'estimen les dosis assumint uns valors de referència dels paràmetres mediambientals.

Aquest fet ha provocat que en els darrers anys molts països hagin establert uns nivells d'acció en termes de la C_{Rn} anual i no en termes de dosis rebuda. Els valors més estesos es situen al voltant de 200-600 Bq·m⁻³ en habitatges i 500-1500 Bq·m⁻³ per llocs de treball. Aquests valors de concentració s'han determinat aplicant uns factors de conversió, obtinguts amb els resultats dels estudis epidemiològics utilitzats per la ICRP 65 (ICRP, 1993) per dosis efectives de 3-10 mSv i períodes d'exposició anuals de 7000 hores en habitatges i de 2000 hores en llocs de treball. Assumint un factor d'equilibri de 0.4, comú en els habitatges, s'estimava que la dosis efectiva per unitat d'exposició a gas radó per membres del públic era de 2.4 nSv per Bq·m⁻³·h. Per fer una correcta estimació de la dosis en els llocs de treball i habitatges que tenien unes condicions ambientals significativament diferents a les de referència calia modificar adequadament els corresponents paràmetres. Com que recentment s'ha establert que la determinació de les dosis s'ha de fer utilitzant els models dosimètrics, està previst que pròximament es determinin uns nous coeficients de dosis per unitat d'exposició al radó i als seus descendents per diferents condicions d'exposició domèstica i ocupacional, amb factors d'equilibri i característiques dels aerosols específics (ICRP, 2010). L'any 2007 la ICRP recomanava un nivell de referència per la C_{Rn} en habitatges de 600 Bq·m⁻³, però tenint en compte les últimes investigacions, l'any 2010 va revisar a la baixa el valor màxim pel nivell de referència fins a 300 Bq·m⁻³. L'any 2007 la ICRP considerava que un valor de 1000 Bq·m⁻³ podria ser utilitzat globalment per harmonitzar els estàndards de seguretat ocupacional, mentre que ara ja recomana aquest valor com a punt d'entrada pels requisits de PR ocupacional en els llocs de treball existents (ICRP, 2007; 2010).

2.4.1. Normativa europea

L'any 1990 la Comissió de les Comunitats Europees (CEC), basant-se en les recomanacions de la publicació 60 de la ICRP (1991), presentava una recomanació relativa a la PR de la població contra els perills de l'exposició al radó en l'interior d'edificis (CEC, 1990), on proposava com a nivells d'acció una C_{Rn} de 200 Bq·m⁻³ pels habitatges de nova construcció i 400 Bq·m⁻³ pels habitatges existents, considerant que calia prendre accions de remei simples en cas de que s'excedissin aquests valors. L'any 1996 el Consell de la Unió Europea (CEU) presentava una directiva amb els estàndards de seguretat bàsica per la protecció de la salut dels treballadors i dels membres del públic en general contra els danys deguts a les radiacions ionitzants, amb un capítol dedicat a les fonts naturals de radiació. En concret obligava als membres de la unió europea a identificar aquelles activitats on els treballadors i els membres del públic en general poden tenir un

increment significatiu d'exposició deguda a la inhalació dels descendents de radó o toró o a la radiació gamma que no pugui menysprear-se des del punt de vista de la PR (CEU, 1996). L'any 2009 la Comissió Europea (CE) va fer una proposta de revisió d'aquesta directiva que tenia en compte les novetats incorporades a la publicació 103 de la ICRP (2007), concretament es feia una clara distinció entre situacions d'exposició existents i planejades (CE, 2009).

En relació a les aigües de consum la CEC recomanava, l'any 2001, dur a terme mesures dels nivells de radó en aigües subterrànies procedents de diferents tipus de fonts i pous en diferents àrees geològiques que estiguessin destinades al consum humà, per tal de determinar l'escala i naturalesa de les exposicions a que podia estar sotmesa la població consumidora. Segons aquesta recomanació no calia prendre mesures d'acció quan les concentracions fossin inferiors a $100 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ (CEC, 2001). L'any 2011, la CE va presentar una proposta de directiva amb els requeriments per la protecció de la salut del públic en general en relació a les substàncies radioactives de les aigües utilitzades per consum humà, on es contemplaven les recomanacions de CEC relatives als nivells de radó en aigües subterrànies (CE, 2011).

2.4.2. Normativa espanyola

Les fonts naturals de radiació s'inclouen per primer vegada a la legislació espanyola l'any 2001. Concretament, en els articles 62 i 63 (Títol VII) del Reglament sobre la protecció sanitària contra les radiacions ionitzants (RPSRI) (Real Decreto 783/2001, 2001) es fa referència a les exposicions degudes a la inhalació dels descendents del radó i del toró. S'estableix la necessitat de dur a terme estudis en aquells llocs de treball on existeixin fonts naturals de radiació per tal de determinar si es produeix un increment significatiu de l'exposició dels treballadors o dels membres del públic. A la recent modificació d'aquest reglament (Real Decret 1439/2010, 2010) s'obliga als titulars de les activitats laborals on existeixi fonts naturals de radiació a declarar aquestes activitats davant els òrgans competents en matèria d'indústria de les Comunitats Autònomes del territori on es desenvolupen aquestes activitats. També se'ls responsabilitza de la realització dels estudis necessaris per tal de determinar si existeix un increment significatiu de l'exposició dels treballadors o dels membres del públic que no pugui considerar-se menyspreable des del punt de vista de la PR. Entre les activitats que han de ser declarades i sotmeses a aquests estudis s'inclouen les activitats laborals a les quals els treballadors i, en el seu cas, els membres del públic estiguin exposats a la inhalació de toró o de radó o a la radiació gamma o a qualsevol altra exposició en llocs de treball tals com coves, mines, galeries, establiments termals, instal·lacions on s'emmagatzemi i tracti aigües d'origen subterrani i llocs de treball subterrànies o no subterrànies en àrees identificades.

Recentment, el CSN ha publicat la Instrucció IS-33 sobre els criteris radiològics en front de l'exposició a radiació natural (CSN, 2012). En ella: (i) s'estableixen les activitats laborals que han de realitzar els estudis requerits pel RPSRI; (ii) es determinen els llindars de referència pels treballadors, en termes de dosis efectives i de concentració de radó, la superació dels quals requereixi l'adopció de mesures correctores o dispositius de

vigilància; (iii) s'indiquen els criteris sobre l'aplicació del RPSRI en els casos en què els resultats dels estudis demostrin que es superen els nivells de referència establerts.

Concretament pel cas del gas radó els nivells de la C_{Rn} a partir dels quals s'han d'adoptar mesures correctores o dispositius de vigilància són:

- $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ de valor mig anual pels membres del públic en llocs de permanència elevada (escoles, hospitals, etc.)
- $600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ de valor mig anual durant la jornada laboral pels treballadors.

Els nivells de referència de la C_{Rn} per l'aplicació de les actuacions indicades en el RPSRI són:

- $< 600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$: no és necessari control.
- $600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3} - 1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$: s'ha d'aplicar un nivell baix de control.
- $> 1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$: s'ha d'aplicar un nivell alt de control.

3. Instrumentació

Els nostres sentits no són sensibles directament a cap de les diferents radiacions ionitzants, per tant, per poder detectar-ne la seva presència i mesurar-ne les seves magnituds quantificables és necessari utilitzar detectors especialment dissenyats per cada cas en concret. Els detectors de radiacions ionitzants es basen en els diferents processos d'interacció de la radiació amb la matèria i la detecció es pot dur a terme mitjançant diferents mètodes. Depenent de quins són els objectius de cada mesura s'ha d'escollir el detector i el mètode més adequat entre les diferents possibilitats disponibles. En funció del temps que dura el procés de mesura, es poden distingir tres tipus diferents de mesures: puntuals, en continu i integrades. La mesura puntual es realitza durant un període de temps molt curt, normalment inferior a 2 hores. El resultat obtingut representa el valor de la variable buscada en un instant concret, per tant, aquest tipus de mesura permet fer una estimació ràpida. La mesura en continu es realitza durant un temps, que va des d'algunes hores fins a diversos dies o, fins i tot, mesos o anys. Generalment, es registra durant tot el procés que dura la mesura i els resultats s'obtenen en uns intervals de temps, anomenats temps d'integració, que acostumen a ser curts, des d'alguns minuts fins a diverses hores. Aquest tipus de mesura es realitza per estudiar l'evolució temporal de la variable mesurada. La mesura integrada es realitza en un període de temps relativament llarg que pot variar des d'alguns dies fins a diversos mesos, depenent del nivell de radiació existent. El resultat d'aquesta mesura és el valor mig de la variable en l'interval de temps que dura l'exposició del detector.

Hi ha molts tipus de detectors que mesuren la radiació ionitzant i es poden classificar de diferents formes. Una forma habitual és distingir entre els detectors actius i els detectors passius. Els detectors actius són sistemes que necessiten algun tipus de subministrament d'energia elèctrica mentre dura la mesura, ja sigui amb bateries o connexió a la xarxa elèctrica, perquè consten de mecanismes elèctrics, com bombes d'aire, i/o d'una electrònica associada. Els detectors passius són sistemes que no necessiten cap aportació d'energia elèctrica al llarg de la mesura, com per exemple, els detectors sòlids de traces

nuclears, els de carbó activat o els de termoluminescència (TLD). Una altra possible manera de diferenciar entre detectors actius i passius consisteix en considerar com a actius aquells que generen un senyal elèctric quan la radiació travessa el material del detector, i els passius són els que registren el pas de la radiació de forma permanent durant tota l'exposició. Amb els detectors actius s'acostuma a fer una mesura instantània o en continu mentre que amb els detectors passius es realitzen les mesures integrades.

Una altra forma de classificar els detectors de radiació és a partir del tipus de procés d'interacció de la radiació amb la matèria (excitació, ionització, etc.) que utilitzen per dur a terme la detecció i del material amb el que la radiació interactua. D'aquesta forma podem distingir els detectors de centelleig, els detectors de gas, els detectors de semiconductor, etc. Fer una descripció detallada de tots els tipus de detectors s'escapa dels objectius d'aquest treball, així que a continuació es descriuen els detectors que s'han utilitzat directament en aquest treball.

3.1. Instrumentació utilitzada

La instrumentació utilitzada per la UFR de la UAB per dur a terme mesures de radiació natural consisteix en diversos detectors de radó actius i passius, un detector de radiació gamma ambiental i un detector d'espectrometria gamma. També s'han utilitzat cambres de radó, algunes de referència i altres no. Finalment també es descriuen alguns equips de mostreig i instruments que permeten determinar altres magnituds físiques dels diferents medis analitzats.

3.1.1. Els detectors actius de radó

Per dur a terme mesures puntuals i en continu de la concentració de radó, C_{Rn} , s'han utilitzat cinc tipus de detectors actius (PRASSI, ATMOS, AlphaGUARD, RAD7 i Clipperton). Alguns estan especialment dissenyats per realitzar mesures de radó només en l'aire o en el sòl i altres permeten realitzar mesures en diferent medis utilitzant alguns accessoris.

3.1.1.1. El monitor PRASSI

El monitor de radó PRASSI 5S és un detector actiu portàtil, comercialitzat per la antiga marca italiana SILENA, que la UFR disposa des de l'any 1992 (**Figura 3.1**). Aquest monitor permet de fer mesures puntuals i en continu del gas radó amb la tècnica de mesura de les cambres de centelleig sòlid (Cel·la de Lucas). Aquesta tècnica es basa en el fenomen de l'excitació, és a dir, utilitza la propietat de certs materials d'emetre llum visible quan els seus àtoms o molècules es desexciten després del pas de la radiació ionitzant. La llum emesa es pot transmetre mitjançant un acoblament òptic i transformar-se en un senyal elèctric mitjançant un tub fotomultiplicador. L'amplitud del senyal és proporcional a

l'energia del fotó incident i, per tant, els comptadors de centelleig poden treballar com espectròmetres d'energia si disposen d'una electrònica associada que ho faci possible.



Figura 3.1. El monitor de radó PRASSI.

El monitor PRASSI consisteix bàsicament en una cel·la d'1.83 litres de forma cilíndrica, recoberta per la part interior d'una capa de sulfur de zinc activat amb plata [ZnS(Ag)] i acoblada a un tub fotomultiplicador. En el punt d'entrada de l'aire exterior es col·loca un filtre de fibra de vidre que reté, entre altres partícules, els descendents del radó. El flux d'aire que entra a la cel·la, de $3 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$, està regulat electrònicament per compensar el fet que el filtre es pugui anar tapant al llarg de la mesura. Aquest detector mesura les desintegracions del gas radó que es produeixen a l'interior de la cel·la. No fa espectrometria, així que no distingeix entre els diferents isòtops del radó ni entre els seus descendents. Un algoritme informàtic permet eliminar els comptes procedents dels descendents dipositats a les superfícies interiors de la cel·la. Disposa d'unes bateries que li proporcionen una autonomia de 8 hores i si ha de mesurar durant períodes de temps més llargs ha d'estar endollat a la xarxa elèctrica. Mitjançant un display es poden visualitzar els resultats en el mateix moment de la mesura i observar-ne l'evolució temporal. El temps d'integració de la mesura es pot programar, amb intervals de 5 minuts, des dels 15 minuts fins a les 24 hores. La memòria interna permet emmagatzemar fins a 6500 mesures. A través d'un port sèrie RS232 connectat a un ordinador es poden programar els paràmetres de la mesura i descarregar les dades obtingudes un cop finalitzada. Aquest detector permet realitzar mesures molt acurades de la C_{Rn} degut al seu baix fons, $(1.03 \pm 0.81) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. A l'hora de mesurar concentracions molt elevades s'ha d'anar en compte ja que els descendents sòlids que es formen a l'interior de la cel·la i que es dipositen a les seves parets, a la llarga, poden donar lloc a una certa contaminació i posteriors resultats erronis. En aquests casos, després de la mesura s'ha de procedir a fer un Flushing, consistent en fer passar nitrogen pur durant 15 minuts per l'interior de la cambra de mesura. Aquest monitor també ofereix la possibilitat de realitzar mesures de la C_{Rn} en mostres de sòl i aigua, utilitzant un sèrie d'accessoris i muntant un circuit d'aire tancat (Soavi, 1994).

3.1.1.2. El monitor ATMOS 12 DPX

El monitor ATMOS 12 PDX de la marca sueca Gammadata Instrument AB¹ és un detector actiu que consisteix en una cambra d'ionització de 0.6 l de volum de detecció, una font d'alimentació d'alt voltatge, una bomba d'aire interna que bombeja un flux continu d' $1.4 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$, un filtre amb dessecant (termostat Peltier), un modelador de polsos electrònics, un comptador analògic-digital (ADC) de 256 canals i un microprocessador (**Figura 3.2**).



Figura 3.2. Monitor ATMOS 12 PDX.

La cambra d'ionització, tal i com el seu nom indica, es basa en el fenomen de la ionització. Consisteix en una cambra, que pot tenir geometria plana o cilíndrica, a dins de la qual hi ha aire o un altre gas que s'ionitza com a conseqüència del pas de la radiació a través seu. En el cas de l'ATMOS aquest gas és el propi aire que es bombeja per ser mesurat. També disposa d'uns elèctrodes on s'aplica una diferència de potencial per generar un camp elèctric. Aquest camp provoca que les càrregues elèctriques produïdes a cada ionització siguin recollides en els elèctrodes i generin uns senyals elèctrics que permeten l'anàlisi i/o quantificació de les radiacions. En una cambra de ionització ideal tota la càrrega generada per la ionització és registrada sense recombinació ni multiplicació. Els impulsos elèctrics produïts són de l'ordre dels mV i per tal d'analitzar-los cal amplificar-los. Com que l'amplitud de cada impuls és proporcional a l'energia dipositada a la cambra, aquest sistema permet de fer espectrometria, és a dir, distingir l'energia de la radiació ionitzant. L'histograma resultant s'emmagatzema a la memòria mitjançant un microprocessador. La resolució en energia dels pics del radó i els seus descendents (^{218}Po i ^{214}Po) és de 0.3 MeV d'amplada a mitja altura del pic. Ara bé, la finestra definida per la detecció del radó va dels 5 MeV als 6.3 MeV i, per tant, no fa una distinció entre el radó i el toró.

L'ATMOS és un equip portàtil i robust, dissenyat per treballar a l'interior de recintes i mesurar concentracions de radó a l'aire des de $0.1 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (per una mesura de 24h) fins a un valor de $100 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$. No disposa de bateries així que només funciona endollat a la

¹ Gammadata Instrument AB, Vallongatan 1, SE-752 28 Uppsala, Suècia. www.gammadatainstrument.se

xarxa elèctrica amb un transformador a corrent continu de 12 V. Els possibles temps d'integració de la mesura són 1, 5, 10 i 30 minuts i 1, 8 i 24 hores. Els resultats es visualitzen en una pantalla LC mentre dura la mesura i s'emmagatzemen a una memòria interna. Mitjançant el programa ATMOS32 i una connexió RS232 es poden descarregar les dades de la memòria i visualitzar-les en funció del temps i com un espectre d'energies.

3.1.1.3. El monitor AlphaGUARD i els seus accessoris

El monitor l'AlphaGUARD PQ2000 PRO de la marca alemanya Saphymo GmbH² (antigament Genitron Instruments GmbH) és un altre detector actiu portàtil basat en la cambra de ionització dissenyat per mesurar la C_{Rn} en l'aire entre $2 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i $2 \text{ MBq}\cdot\text{m}^{-3}$ (Figura 3.3).



Figura 3.3. Monitor AlphaGUARD PQ2000 PRO.

Consisteix en una cambra de geometria cilíndrica de 0.6 l plena d'aire on s'aplica una diferència de potencial de 750 V. Disposa de bateries internes que li proporcionen una autonomia de 10 dies i té una capacitat d'emmagatzematge de 3400 dades. Mitjançant el programa DataEXPERT i una connexió RS-232 es poden descarregar les dades a un ordinador. A part de mesurar la C_{Rn} en l'aire també mesura simultàniament la temperatura ambient, la humitat relativa i la pressió atmosfèrica amb uns sensors integrats. L'aire té dues possibles formes d'entrar a l'interior del volum de detecció. Una és per difusió a través d'un filtre de fibra de vidre que està en contacte amb l'aire de l'exterior i els temps d'integració per aquestes mesures poden ser de 10 min o de 60 min. L'altre forma és mitjançant una bomba d'aire externa, anomenada AlphaPUMP, que proporciona un flux d'aire constant i seleccionable des de $0.03 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ fins a $1 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Aquest aire prèviament ha de passar a través d'un filtre extern que reté les partícules de pols i els descendents del radó. Aquesta segona forma permet la mesura de mostres d'aire procedents del sòl o d'un circuit tancat d'aire on hi ha una mostra d'aigua. La mesura de la C_{Rn} en el sòl requereix una sonda STITZ modificada que es clava en el sòl fins a una profunditat d'uns 70 cm i d'un filtre d'aigua extern per evitar l'entrada d'aigua a l'interior del detector. Aquesta tècnica també permet obtenir mesures puntuals de la concentració de toró, d'acord amb el

² Saphymo GmbH, Heerstrabe 149, D-60488 Frankfurt a.M., Alemanya. www.genitron.de

procediment que es descriu en els seus manuals (Saphymo,1998; Saphymo i Geophysik, 2001). Existeixen altres accessoris que permeten fer mesures puntuals de la C_{Rn} dissolt en mostres d'aigua (AquaKIT), mesures de l'exhalació de radó en el sòl i materials de construcció (Radon Box), mesures d'emanació de radó de mostres (container) i mesures de la concentració de descendents del radó en aire (AlphaPM).

3.1.1.4. El monitor RAD7 i els seus accessoris

El monitor RAD7 de la marca nord-americana DurrIDGE Co³ (**Figura 3.4**) és un detector actiu portàtil que permet mesurar, de forma puntual o contínua, el radó i el toró presents a l'aire en un ampli rang de concentracions, [$2 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3} - 2 \text{ MBq}\cdot\text{m}^{-3}$]. Aquest instrument està basat en un detector de semiconductor amb una cambra d'electrodeposició. El fonament de detecció dels semiconductors és similar al de les cambres de ionització substituint el gas per un sòlid semiconductor que genera parells electró-forat amb la interacció de la radiació. Sota l'efecte d'un camp elèctric els electrons i els forats viatges cap a uns elèctrodes i produeixen uns polsos elèctrics que es poden mesurar en un circuit associat. Els materials semiconductors més utilitzats són el germani i el silici. Els detectors de germani, s'utilitzen per la detecció de la radiació γ i requereixen d'un sistema de refrigeració, normalment amb nitrogen líquid, ja que la resposta del detector té una gran dependència amb la temperatura. Els detectors de silici s'utilitzen per partícules α o β i no tenen el problema de la temperatura.

El RAD7 disposa d'un detector de silici pla i una cambra de deposició de 0.7 l en forma de semiesfera, recoberta interiorment amb un conductor elèctric. Entre les parets d'ela cambra i el detector s'aplica un camp elèctric, perquè els descendents del radó es dipositen sobre la superfície del detector. El silici converteix l'energia de la radiació α dels descendents del radó en un senyal elèctric directament proporcional a l'energia de les partícules α , per tant, permet fer espectrometria. En aquest cas el detector disposa de vuit finestres per distingir entre els diferents descendents del ^{222}Rn i del toró ^{220}Rn i, per tant, distingir entre les concentracions d'aquests dos isòtops. L'entrada de l'aire es realitza mitjançant una bomba d'aire interna i a través d'un filtre de fibra de vidre que reté els descendents del radó i altres partícules en suspensió. Pot funcionar alimentat per la xarxa elèctrica o amb bateries internes que li proporcionen una autonomia de 72 hores. Per realitzar les mesures és necessari que la humitat de l'aire que penetra a la cambra de detecció sigui inferior al 10 % i això s'aconsegueix fent passar l'aire a través d'unes columnes de dessecant de Drierite⁴. Perquè el toró pugui arribar a la cambra de detecció abans de desintegrar-se cal que el volum de dessecant que travessa no sigui molt gran, per aquest motiu les columnes de Drierite que permeten fer les mesures de radó i toró de forma simultània són més petites que les que s'utilitzen exclusivament per mesures del radó. Al ser més petites s'esgoten al cap d'un parell d'hores de mesura i, per tant no serveixen per fer llargues mesures en continu de toró, a no ser que es puguin estar renovant contínuament.

³ DURRIDGE Company, Inc., 524 Boston Road, Billerica, MA 01821, EUA. www.durrIDGE.com

⁴ W. A. Hammond DRIERITE Co. LTD, P. O. Box 460, Xenia, OH 45385-0460, EUA. www.drierite.com



Figura 3.4. *Esquerra: Monitor RAD7 realitzant una mesura de la C_{Rn} a l'aire. Al seu damunt hi ha una petita impressora que permet disposar d'un registre escrit dels resultats al llarg de la mesura. Dreta: Monitor RAD7 realitzant una mesura d'una mostra d'aigua amb l'accessori RAD H₂O.*

Mitjançant una sèrie d'accessoris també es pot utilitzar per mesurar la C_{Rn} dissolt a l'aigua o la C_{Rn} present en l'aire del sòl. Per la mesura de la C_{Rn} en aigua disposa de dos accessoris diferents, anomenats RAD H₂O o RAD AQUA. Amb el RAD H₂O es poden fer mesures puntuals de mostres d'aigua mentre que amb el RAD AQUA en continu. La tècnica utilitzada és la de mesures puntuals, la qual consisteix en agafar una mostra d'aigua i introduir-la dins una ampolla de vidre de 40 ml o 250 ml procurant de no perdre el gas radó. La C_{Rn} dissolt en les aigües es mesura acoblant directament en les ampolles de vidre el dispositiu de bombolleig RAD H₂O (**Figura 3.4**). Amb aquest component es produeix la circulació d'aire d'un circuit tancat amb el detector RAD7 a través de la mostra d'aigua provocant la desgasificació del gas radó. Per obtenir la lectura directa de la C_{Rn} de la mostra s'ha de seleccionar, entre els diferents protocols de mesura que ofereix el detector, el corresponent a la mostra d'aigua. Finalment es realitza la correcció que té en compte la desintegració del gas radó durant el temps transcorregut entre la recollida de la mostra i el moment de la mesura. S'ha de procurar que aquest interval de temps no sigui gaire llarg ja que el període de semidesintegració del radó és inferior als quatre dies.

La mesura de la concentració de l'aire en el sòl es fa mitjançant una sonda metàl·lica, també de la marca Durrige, de 127 cm de longitud que es clava en el sòl mitjançant un martell. L'aire és succionat per la pròpia bomba del monitor RAD7. Mitjançant un filtre d'aigua s'evita que aquesta pugui entrar a la columna de drierita i posteriorment a l'interior del monitor. Aquest sistema permet fer tres tipus de mesures diferents: puntuals, en continu i de toró, depenent del protocol de mesura seleccionat amb el monitor.

3.1.1.5. La sonda Clipperton II

La sonda Clipperton II és un instrument desenvolupat per la Universitat de Montpel·lier per fer mesures en continu de la C_{Rn} en el sòl, des de 10^2 Bq·m⁻³ fins a 10^6 Bq·m⁻³ (Morin et al., 1993; Monnin i Seidel, 1998). Està basat en un detector de semiconductor sense polarització, protegit per unes capes especials contra la fricció i la humitat. Està situat a l'interior d'un tub de difusió de 50 cm de longitud per tal d'evitar la detecció del gas toró. Un microprocessador NSC810A s'encarrega del processat de les dades i l'emmagatzematge.

La memòria interna pot guardar fins a 3250 resultats. Mitjançant el programa Sondegb, una connexió Comms Link i una petita computadora Psion Organiser II s'inicialitza el programa de mesures i es fa la descàrrega de dades. Aquesta sonda s'instal·la en el sòl dins un tub de PVC de 1m de longitud i 7.5 cm de diàmetre amb una tapa i un aïllant, tal i com s'observa a la **Figura 3.5**. L'aïllant evita que la temperatura del detector arribi al punt de rosada i es formin gotes d'aigua a la seva superfície. La freqüència de mostreig es pot ajustar des d'uns pocs minuts fins a diverses hores, el què permet analitzar la dinàmica de la C_{Rn} en el sòl de forma diària, estacional o fins i tot anual. Disposa d'unes bateries externes que li proporcionen una autonomia que depèn de la freqüència de mostreig. Per una freqüència habitual de dues hores les bateries aguanten uns dos mesos (Font et al., 1999a).



Figura 3.5. La sonda Clipperton II instal·lant-se en el camp dins un tub de PVC (superior esquerra), programant-se amb la computadora Psion (superior dreta) i alimentant-se amb bateries externes (inferior).

3.1.2. Els detectors passius de radó

Per dur a terme mesures integrades de la C_{Rn} s'han utilitzat quatre tipus de detectors passius: Makrofol, LR115, CR-39 i Electrets. Els tres primers són detectors sòlids de traces nuclears, mentre que els Electrets són cambres de ionització passives. Durant els últims 30 anys la UFR de la UAB ha treballat en l'aplicació dels detectors sòlids de traces nuclears en diferents camps d'investigació com els raigs còsmics (Casas et al., 1983; Domingo et al., 1996), interacció de ions pesants amb la matèria (Domingo et al., 1998;

Domingo et al., 2003), dosimetria de neutrons (Bouassoule et al., 1999; García, et al., 2005) i dosimetria de radó (Baixeras et al., 1991; Font, 1993; Amgarou, 2002).

Els detectors sòlids de traces nuclears es basen en el procés d'interacció de la radiació directament ionitzant amb la matèria sòlida. Les partícules carregades i amb una certa energia cinètica poden penetrar a una certa profunditat dels materials abans de frenar-se completament i la distància recorreguda depèn de l'energia de cada partícula. En el cas del radó, quan les partícules alfa procedents de la desintegració del radó i dels seus descendents interaccionen amb un material plàstic, com per exemple el Makrofol, poden arribar a penetrar fins a profunditats de l'ordre de varies desenes de μm (Amgarou, 2002). Cada partícula provoca la ruptura de les macromolècules al llarg del seu recorregut, produint el què es coneix per traça latent. Les traces, que inicialment només es poden observar amb un microscopi electrònic, poden augmentar la seva mida varis ordres de magnitud si es sotmet el material plàstic a un revelatge químic o electroquímic. La densitat de traces, ρ ($\text{tr}\cdot\text{cm}^{-2}$), és proporcional a l'exposició de radó, X_{Rn} ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$):

$$\rho = \varepsilon X_{Rn} \quad (3.1)$$

on ε és la sensibilitat o factor de calibratge del detector ($\text{tr}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})^{-1}$) i X_{Rn} es defineix com:

$$X_{Rn} = \int_0^{t_0} C_{Rn}(t) dt \quad (3.2)$$

on $C_{Rn}(t)$ és la concentració de radó ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) a l'instant t i t_0 és el temps total d'exposició.

Aquest tipus de detector normalment es col·loca a l'interior d'un recipient que fa la funció de cambra de difusió, però també es pot trobar exposat directament a l'aire lliure. Normalment l'entrada del radó a l'interior de la cambra de difusió es fa a través d'un filtre i el procés de difusió comporta un temps de retard, τ_M (s), que depèn de les característiques del filtre, com el gruix, δ (cm), la superfície, S_f (cm^2) i el coeficient de difusió, D ($\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$), i de la cambra de difusió, com el seu volum, V^{ch} (cm^3):

$$\tau_M = \frac{\delta V^{ch}}{D S_f} \quad (3.3)$$

La desintegració dels àtoms de radó durant la seva difusió a través del filtre fa que la concentració estacionària a l'interior de la cambra, C_{Rn}^{ch} , no sigui la mateixa que a l'exterior, C_{Rn} . Aleshores la C_{Rn}^{ch} es pot descriure per la següent equació de conservació de la massa (Ward et al., 1977):

$$\frac{\partial C_{Rn}^{ch}}{\partial t} = -\lambda C_{Rn}^{ch} + \frac{1}{\tau_M} (C_{Rn} - C_{Rn}^{ch}) \quad (3.4)$$

El primer terme de la dreta de la igualtat és la disminució deguda a la desintegració radioactiva del radó, caracteritzada per la seva vida mitja $\tau_R = 1/\lambda$, i el segon terme és la deguda a la difusió a través del filtre. Considerant que inicialment $C_{Rn}^{ch}(0)=0$, l'acumulació del radó dins de la cambra esdevé (veure **Figura 3.6**):

$$C_{Rn}^{ch}(t \leq t_0) = \frac{\tau C_{Rn}}{\tau_M} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (3.5)$$

on el temps τ ve donat per:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_M} \quad (3.6)$$

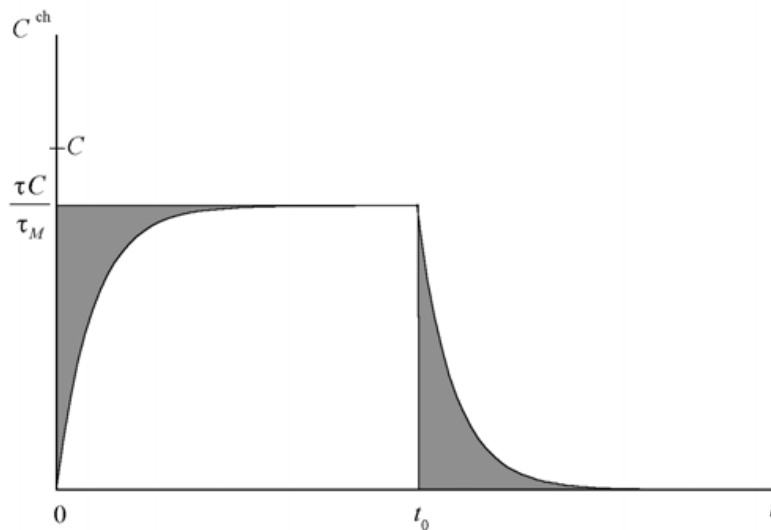


Figura 3.6. Evolució temporal de la concentració de radó a l'interior de la cambra de difusió, C^{ch} , d'un detector passiu amb un filtre que provoca un retard a l'entrada del radó (Amarou, 2002).

En finalitzar l'exposició ($t > t_0$), la disminució de C_{Rn}^{ch} en una atmosfera lliure de radó ve donada per:

$$\frac{\partial C_{Rn}^{ch}}{\partial t} = -\frac{C_{Rn}^{ch}}{\tau} \quad (3.7)$$

que es pot integrar per donar:

$$C_{Rn}^{ch}(t > t_0) = \frac{\tau C_{Rn}}{\tau_M} \left(1 - e^{-\frac{t_0}{\tau}} \right) e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \quad (3.8)$$

Segons la **Figura 3.6**, la disminució de l'exposició de radó deguda a la difusió del radó a través del filtre es pot compensar si en finalitzar l'exposició es deixa a l'interior de la cambra un temps t més gran que τ . La integral de tota la corba és la mateixa que la de la

corba ideal (rectangle) amb la qual la C_{Rn}^{ch} màxima s'assoleix de forma immediata al principi de l'exposició, roman constant mentre aquesta dura i baixa a zero al finalitzar. Per tant, quan $t \gg \tau$ l'exponencial de l'expressió (3.5) s'aproxima a zero i aleshores la C_{Rn}^{ch} màxima dins de la cambra de difusió és la C_{Rn} exterior reduïda un factor d/τ_M . Fer el calibratge del detector per unes condicions de temperatura i humitat determinades implica tenir en compte, en el propi factor de calibratge, el factor corrector τ_M/τ . En el cas de variar el tipus de filtre o les condicions ambientals aquest quocient es pot veure modificat i, aleshores cal, realitzar un nou calibratge.

Si el detector s'extreu de la cambra de difusió immediatament després de finalitzar l'exposició ($t=t_0 \gg \tau$), l'exposició mesurada pel detector dins la cambra, X_{Rn}^{ch} , és:

$$X_{Rn}^{ch} = X_{Rn} \frac{\tau}{\tau_M} \frac{t_0 - \tau}{t_0} \quad (3.9)$$

que és com si el detector hagués estat exposat durant un temps $(t_0 - \tau)$ a una concentració $C_{Rn} d/\tau_M$. Aleshores, el factor corrector total, f_T , que cal aplicar per tenir la X_{Rn} real és:

$$f_T = \frac{\tau_M t_0}{\tau(t_0 - \tau)} \quad (3.10)$$

3.1.2.1. El detector de Makrofol

El Makrofol DE és un policarbonat àmpliament utilitzat com a detector sòlid de traces nuclears. Aquest material és capaç de registrar les partícules alfa procedents de les desintegracions dels àtoms de radó, toró i dels seus descendents emissors alfa: ^{218}Po , ^{214}Po i ^{216}Po , ^{212}Bi , respectivament. En canvi, no registra les partícules més lleugeres que les α ni la radiació electromagnètica i, per tant, els descendents que són emissors β i/o γ no hi deixen cap senyal. El Makrofol es fabrica en forma de làmines de diferents gruixos, recobertes per una làmina de Mylar⁵ aluminitzat de 3 μm de gruix. La funció de la làmina de Mylar és evitar la creació de càrrega estàtica a la superfície del detector, fet que podria afectar a la deposició dels descendents del radó. Al mateix temps produeix l'absorció de 0.5 MeV de l'energia de les partícules α que arriben al detector. La làmina de Makrofol es talla en forma de disc de 2.1 cm de diàmetre i es col·loca a l'interior d'una petita cambra de difusió per constituir el conjunt anomenat detector (**Figura 3.7**). Els components de la cambra de difusió són fets de plàstic elèctricament conductor per evitar una deposició anisòtropa dels descendents del radó a les parets interiors de la cambra i aconseguir, d'aquesta forma, que les partícules α que arriben al detector tinguin una distribució uniforme. L'aspecte exterior d'aquest detector és el d'un cilindre de 2 cm d'alçada i 4 cm de diàmetre, mentre que el seu interior és una semiesfera de 1.5 cm de radi, en la base de la qual hi ha una peça que subjecta el detector i el filtre. La tapa de la cambra de difusió té

⁵ Fabricat per DuPont Teijin Films, 1 Discovery Drive, Hopewell, VA 23860, EE UU.

unes obertures que permeten l'entrada del radó en el seu interior. Aquesta entrada es fa per difusió a través d'un filtre de fibra de vidre GF6⁶ de 36 mm de diàmetre que es col·loca just sota de la tapa. La seva funció és la de protegir el detector dels aerosols, la pols i la humitat, així com d'evitar l'entrada dels descendents del radó i del toró produïts fora de la cambra de difusió. Aquests descendents, que es poden trobar lliures o adherits en les petites partícules de pols o aerosols que hi ha en suspensió a l'aire, queden retinguts a la seva superfície. Si bé dins de la cambra de difusió només entren aquests dos gasos, amb el pas del temps, també tenim una certa concentració dels seus descendents, que es van generant a mesura que es desintegren els seus pares. Com que el procés de difusió no és instantani, sinó que els gasos tarden uns 20 segons en arribar a l'interior de la cambra, es produeix una discriminació del 81 % del toró, degut al seu curt període de semidesintegració. Aleshores, el nombre d'àtoms dels seus descendents formats dins la cambra també és menor (Amgarou, 2002). Les cambres de difusió són del tipus que fabrica el Karlsruhe Institute of Technology⁷ (KIT) (antigament Forschungszentrum Karlsruhe (FzK)) d'Alemanya, centre amb una àmplia experiència en Dosimetria Radó (Urban, 1986). A finals dels anys 80 la UFR va decidir utilitzar aquest tipus de detector passiu per mesurar la C_{Rn} a l'interior de recintes tancats i es va posar a punt tot un sistema de revelatge electroquímic i lectura per analitzar la informació registrada en aquests detectors (Baixeras et al., 1989; García, 1990). Al llarg dels anys s'han anat introduint algunes modificacions que han permès optimitzar i semi-automatitzar tot el sistema de mesura, tal com es veu en Amgarou (2002) i a l'apartat 3.2.3.4 d'aquesta tesi. El revelatge que permet l'observació de les partícules alfa d'energies entre 3.0 – 5.0 MeV registrades en el detector de Makrofol consta de dues parts. La primera és un pre-revelatge o revelatge químic, amb un agent revelador consistent en la dissolució de KOH 6 N (1:1) etanol pur-96 %, que dura 4 h i que es realitza a una temperatura de 40 °C. La segona part és un revelatge electroquímic, amb el mateix agent revelador i la mateixa temperatura, que dura 1.5 h i durant el qual es sotmet el detector a una intensitat del camp elèctric de 31 kV cm⁻¹ i a una freqüència de 3 kHz. Una descripció més detallada de tot el sistema d'anàlisi i de la metodologia per la seva utilització es pot trobar a Moreno (2006).



Figura 3.7. *Esquerra: Làmina de Makrofol recoberta amb la làmina de Mylar i alguns trossos tallats en forma de disc. Centre: els diferents components de la cambra de difusió i un disc de Makrofol. Dreta: un detector de Makrofol muntat (imatge dreta).*

⁶ Fabricat per Schleicher & Schuell MicroScience GmbH, D-37586 Dassel, Alemanya.

⁷ Karlsruhe Institute of Technology, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Alemanya. <http://www.kit.edu>

3.1.2.2. El detector de LR115

Un altre tipus de detector sòlid de traces nuclears és el LR115 no despellible (Tipus II), fet de nitrat de cel·lulosa i fabricat per la marca francesa Dosirad Co. La UFR utilitza aquest detector per realitzar mesures de radó en el sòl. Com a conseqüència de fer un revelatge químic en comptes d'un electroquímic, la mida de les traces obtingudes és menor que en el cas del Makrofol. Això permet tenir el detector exposat durant més temps a altes concentracions de radó sense arribar a la saturació. El LR115 ve de fàbrica en un rotlle de 50 m de llarg i 9 cm d'ample. En el laboratori es talla en peces de 2.3 cm x 2.3 cm i es col·loca a la part superior d'un tub de PVC de 30 cm de longitud i 5 cm de diàmetre que fa la funció de cambra de difusió. A l'altre extrem d'aquest cilindre es col·loca un filtre de fibra de vidre que permet l'entrada del gas radó per difusió però evita que les partícules de pols i els descendents del gas radó penetrin al seu interior. Aquest conjunt s'instal·la en el sòl mitjançant un altre tub de PVC de les mateixes característiques que els que s'utilitzen per les sondes Clipperton (**Figura 3.8**).



Figura 3.8. *Esquerra: detector de LR115 situat a la cambra de difusió amb filtre de fibra de vidre per mesures del radó en el sòl. Dreta: Tub de PVC clavat en el sòl a l'interior del qual s'instal·la el detector de LR115 i l'aïllant tèrmic.*

Després de l'exposició, que pot ser des de 1 setmana fins a diversos mesos, es recullen els tubs i les làmines de LR115 són analitzades mitjançant un revelatge químic. Aquest revelatge es duu a terme en un bany tèrmic a 60 °C durant 105 min amb una dissolució de NaOH 2.5 N. La densitat de traces s'obté amb un sistema semiautomàtic que consisteix en un microscopi òptic acoblat a una càmera CCD i un ordinador amb una targeta gràfica de televisió digital (**Figura 3.9**). El recompte de les traces es duu a terme amb el mateix programa de processat d'imatges digitals que s'utilitza pels detectors de Makrofol, l'ImageJ⁸.

⁸ Desenvolupat al National Institute of Health (NIH) dels EUA i disponible de forma gratuïta a: <http://rsbweb.nih.gov/ij/>



Figura 3.9. Esquerra: Bany tèrmic del revelatge químic dels detectors de LR115. Dreta: Microscòpic òptic amb cambra CCD acoblada per la lectura i captació d'imatges de les traces en els detectors de LR115.

3.1.2.3. El detector de CR-39

El CR-39 és un altre policarbonat àmpliament utilitzat com a detector sòlid de traces nuclears. Hi ha diverses marques que comercialitzen aquest plàstic per detectar el gas radó; la UFR ha utilitzat els detectors de la marca sueca Landauer Nordic AB⁹ (antigament Gammadata Mätteknik AB) (**Figura 3.10**). La cambra de difusió que conté el CR-39, dissenyada pel NRPB/SSI, també està fabricada d'un plàstic elèctricament conductor per tal d'evitar problemes amb la càrrega estàtica però, a diferència de les cambres utilitzades pel Makrofol i LR115, no utilitza cap filtre de fibra de vidre. En aquesta cambra el gas radó entra a través d'una capa d'aire de 10 μm situat a la part inferior de la cambra i que fa la funció de filtre pels aerosols i els descendents del radó, que queden dipositats a les parets externes de la cambra (Mamont-Cieśła et al., 2010). Els detectors de CR-39 són analitzats mitjançant un revelatge químic en una dissolució de NaOH i, per tant, la mida de les traces és més petita que en el cas del Makrofol. Això fa que es necessiti un microscopi òptic i un sistema automàtic pel seu recompte. Gammadata va desenvolupar un mètode de recompte de traces acreditat per exposicions de radó fins a 50 $\text{MBq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$. El mètode està basat en el recompte de l'àrea total radiada de la làmina de CR-39 amb unes compensacions fetes a partir de les mides de les traces individuals. Aquest mètode s'utilitza quan hi ha molta saturació de traces, normalment a l'interval d'exposicions de 7-50 $\text{MBq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ (Anestad et al., 2007).



Figura 3.10. La cambra de difusió de NRPB/SSI amb detector de CR-39 en el seu interior.

⁹ Landauer Nordic AB, Rapskatan 25, SE-75450 Uppsala, Suècia. www.landauernordic.com

A diferència dels detectors de Makrofol i de LR115, que es compren desmuntats i es preparen i analitzen en els propis laboratoris de la UFR de la UAB, els detectors de CR-39 utilitzats ja venen preparats de fàbrica i posteriorment són analitzats en els laboratoris d'origen.

3.1.2.4. El detector d'Electret

El sistema E-Perm de la marca nord-americana Rad Elec inc.¹⁰ està format per tres components: (i) un disc de tefló (Electret) carregat electrostàticament, (ii) una cambra de ionització feta de material plàstic conductor i (iii) un voltímetre que mesura el potencial de la superfície de l'Electret (**Figura 3.11**).

Un detector d'Electret es basa en la tècnica de la cambra de ionització però es considera un detector passiu perquè no requereix de cap dispositiu elèctric mentre s'està realitzant la mesura. Consisteix en una cambra de plàstic conductor i en un aïllant elèctric d'alta estabilitat, anomenat Electret, que ja ve de fàbrica carregat positivament a un cert potencial. La tensió inicial d'un Electret nou està al voltant del 750 V i el valor més baix útil per fer una mesura és d'uns 200 V.

L'entrada de radó a l'interior de la cambra es fa per difusió a través d'un filtre per eliminar els descendents. Quan el radó es desintegra, l'aire de la cambra s'ionitza i els ions negatius que es formen són atrets cap a l'Electret. A mesura que va recollint els ions, la seva càrrega superficial es va neutralitzant i el voltatge disminueix de forma proporcional a la C_{Rn} de l'interior de la cambra i al temps d'exposició. Aquesta disminució del voltatge es determina mitjançant el Lector SPER-1 (Kotrappa, 2007).



Figura 3.11. Esquerra: Cambres de ionització model S, una oberta i una tancada, un electret ST i el Lector d'Electrets. Dreta: una cambra de ionització model H.

¹⁰ Rad Elec, Inc. 5716-A Industry Lane, Frederick, Maryland 21704, EUA. www.radelec.com

Una mesura de la C_{Rn} sempre comporta realitzar dues lectures del voltatge de l'Electret; una lectura inicial abans de l'exposició, V_i (V), i una després de l'exposició, V_f (V). Aquestes dues lectures, juntament amb el temps d'exposició, t (h), i el factor de calibratge de l'Electret, ε ($V \cdot (Bq \cdot m^{-3})^{-1}$), permeten determinar el valor mig de la C_{Rn} ($Bq \cdot m^{-3}$), a partir de l'expressió:

$$C_{Rn} = \frac{V_i - V_f}{\varepsilon \cdot t} - b \cdot g \cdot d \quad (3.11)$$

on b és el fons de radiació gamma ambiental ($\mu R \cdot h^{-1}$), g és el factor de conversió de radiació gamma ambiental a C_{Rn} equivalent ($pCi \cdot l^{-1} \cdot (\mu R \cdot h^{-1})^{-1}$), el qual depèn del tipus de cambra de ionització i es pot trobar a les taules del manual (Kotrappa, 2007) i $d = 37 Bq \cdot m^{-3} \cdot (pCi \cdot l^{-1})^{-1}$ és el factor de conversió per expressar la C_{Rn} en unitats coherents del sistema internacional (SI), ja que la marca Rad Elec inc és nord-americana i no utilitza el SI vigent a la Unió Europea.

Rad Elec fabrica dos tipus d'Electrets (ST i LT) i tres tipus de cambres de ionització (L, S i H). Els Electrets de curta durada (ST=short-term) tenen una sensibilitat alta i se'ls identifica pel color blau de l'etiqueta i la seva superfície blanca. En canvi, els Electrets menys sensibles, utilitzats principalment per mesures de llarga durada (LT=long-term), tenen etiquetes vermelles i la seva superfície és de color coure. Totes les cambres de ionització tenen una obertura a la seva base on es poden enroscar els Electrets. El model L de cambra de ionització, consisteix en una càpsula de 58 ml de volum, el model S consisteix en un recipient de 210 ml de volum, que inclou un mecanisme d'obertura/tancament per destapar i tancar la superfície de l'Electret, i el model H consisteix en una cambra en forma de semiesfera de 960 ml de volum. Existeix una versió de cambra H que disposa d'un filtre per evitar l'entrada de toró al seu interior. Existeixen sis possibles configuracions per fer mesures de la C_{Rn} : SST, SLT, LST, LLT, HST i HLT, on la primera lletra indica el tipus de cambra i les dues següents el tipus d'Electret. Per exemple, la configuració LLT s'utilitza per fer mesures de llarga durada, normalment des de 3 a 12 mesos, mentre que la configuració HST s'utilitza per fer mesures acurades de baixos nivells de radó en breus períodes d'exposició, com ara un dia.

3.1.3. Les cambres de radó

La demanda de serveis de mesura de la C_{Rn} d'alta qualitat ha generat la necessitat de disposar d'instal·lacions on els detectors de radó puguin ser calibrats sota condicions ben controlades i traçades amb estàndards nacionals i internacionals. Aquestes instal·lacions reben el nom de cambres de radó i estan localitzades en centres de referència com el Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) d'Alemanya, a la Health Protection Agency (HPA) de Chilton, al Regne Unit, a l'Institut de Tècniques Energètiques (INTE) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), a Espanya, etc. Des de que la UFR de la UAB utilitza detectors actiu i passiu de radó també està utilitzant de forma regular el servei de calibratge que ofereixen aquests centres i participa a les intercomparacions que organitzen alguns d'ells de forma periòdica, tal i com es descriu de forma més detallada als apartats 3.2.1. i 3.2.2.

3.1.3.1. Les cambres de radó i toró de l'INTE

La cambra de radó de l'INTE de la UPC consisteix bàsicament en un recinte d'uns 20 m³ amb un elevat grau d'hermeticitat (Vargas et al, 2004b) (Figura 3.12). Disposa d'equips que controlen els nivells de C_{Rn} , temperatura i humitat relativa. També disposa de sistemes de mesura pel control de la concentració i mida de les partícules d'aerosol, i equips per la mesura de la concentració dels descendents del radó. La determinació de la C_{Rn} en la cambra es realitza mitjançant l'ús de dos sistemes de mesura en continu traçats al PTB per vies independents. El 2001 es va du a terme, en la cambra de radó del PTB, una intercomparació entre l'equip ATMOS 12 DPX de l'INTE amb un altre propietat del PTB. La segona via de traçabilitat consisteix en el calibratge d'un sistema de mesura desenvolupat a l'INTE, basat en la deposició electrostàtica dels ions de ²¹⁸Po en un detector de semiconductor, mitjançant un dispositiu que permet el transvasament d'activitats de radó a l'interior del citat sistema de mesura. Les activitats de radó que es transfereixen són conegudes i traçades també al PTB. Aquest segon mètode permet assolir una traçabilitat de primer ordre, mentre que el sistema basat en la intercomparació es considera de segon ordre. La cambra de l'INTE ha participat a les últimes intercomparacions de laboratoris europeus amb cambres de radó de referència (Röttger et al., 2005; Röttger et al., 2006).

L'INTE també disposa d'una cambra de toró que consisteix en un recipient cilíndric d'uns 200 litres de capacitat, amb un nivell elevat d'estanqueïtat (Figura 3.12). També disposa dels equips necessaris per mesurar els nivells de concentració de radó i toró, temperatura i humitat relativa. La determinació de la concentració de toró en la cambra es realitza mitjançant un sistema de mesura en continu traçat al PTB. El 2004 es va du a terme, en la cambra de radó del PTB, una intercomparació entre l'equip ATMOS 12 DPX de l'INTE amb un altre similar propietat del PTB. La cambra utilitza un segon equip de mesura de la concentració de toró desenvolupat a l'INTE, basat en la deposició electrostàtica dels ions de ²¹⁶Po en un detector de semiconductor. El seu calibratge s'ha dut a terme a la cambra de radó de l'INTE per comparació amb l'equip ATMOS.



Figura 3.12. Esquerra: Cambra de radó de l'INTE de la UPC. Dreta: Cambra de toró de l'INTE de la UPC.

3.1.3.2. Les cambres de radó de la HPA

Des de l'any 1981 l'Airborne Radionuclides Group de la HPA, l'antic National Radiological Protection Board (NRPB), disposa d'una cambra de radó de referència. Aquesta cambra consisteix en un recinte de 43 m³ amb un elevat grau d'hermeticitat i una sèrie d'equips que controlen la concentració de gas radó, la concentració d'aerosols i el factor d'equilibri. La C_{Rn} es genera mitjançant diverses fonts de ²²⁶Ra seques i líquides i es mesura mitjançant un monitor ATMOS 12 DPX. Aquest equip es calibra cada 6 mesos amb una font de gas radó proporcionada pel National Physical Laboratory del Regne Unit o pel PTB. La cambra de la HPA també disposa d'equips que mesuren de forma continua els nivells de C_{Rn} , temperatura, humitat relativa i pressió atmosfèrica. Des de l'any 1997 la HPA organitza anualment intercomparacions de detectors passius de radó a l'interior d'aquesta cambra¹¹. L'any 2010 la HPA va incorporar un AlphaGUARD com a segon instrument de referència per la seva cambra de radó amb el que fa un calibratge creuat diari amb l'equip primari de referència, l'ATMOS 12 DPX. Aquest centre de referència també disposa d'una segona cambra de menors dimensions per fer exposicions de detectors passius a altes concentracions de radó durant poc temps. Aquesta cambra consisteix en un recipient d'uns 0.2 m³ connectat a un equip que mesura de forma continua la C_{Rn} (Howarth, 2009b).

3.1.3.3. La cambra de radó de la UFR de la UAB

La cambra de radó de la UFR de la UAB és un recipient cúbic, de 125 dm³, fabricat de PVC a la pròpia UAB (Amgarou, 2002) (Figura 3.13). S'utilitza per exposar detectors actius i passius a una certa C_{Rn} , la qual s'obté a partir de determinades quantitats de pechblenda triturada.



Figura 3.13. Cambra de radó de la UFR de la UAB oberta on s'observa el monitor AlphaGUARD, un pot de pechblenda i alguns detectors de Makrofol en el seu interior.

¹¹ www.hpa.org.uk/ProductsServices/Radiation/RadonMeasurementServices/radon05DetectorIntercomparison

La C_{Rn} es mesura de forma contínua mitjançant un o més monitors actius de radó, com l'AlphaGUARD, situat en el seu interior, o el PRASSI, l'ATMOS i el RAD7, des de l'exterior i connectats amb la cambra mitjançant un circuit tancat d'aire. La UFR utilitza aquesta petita cambra per fer exposicions de radó tant per temes de recerca com per portar un control de qualitat intern del laboratori de radó.

3.1.4. El detector de radiació gamma ambiental

Per realitzar mesures puntuals de la radiació gamma terrestre a l'aire exterior i a l'interior d'edificis, entre els diferents detectors de radiació gamma ambiental de què disposa la UAB, s'ha decidit utilitzar un que combina portabilitat, fàcil manipulació i mesura ràpida amb precisió acceptable de nivell baixos de radiació gamma. Es tracta del monitor de radiació Eberline E-600 comercialitzat per la marca Thermo Electron Corporation¹² (**Figura 3.14**). Aquest monitor està dissenyat per poder connectar-li diferents sondes, en funció del tipus de radiació que es vulgui determinar. Pel present estudi s'ha utilitzat la sonda HP-270 de la mateixa marca, que consisteix en un detector Geiger-Müller (GM) compensat en energia.



Figura 3.14. Esquerra: El monitor Eberline E600. Dreta: La sonda HP-270.

Els comptadors GM treballen a una tensió més elevada que els altres detectors de gas. L'amplitud dels impulsos també és més elevada, de l'ordre dels volts, i independent de l'energia de la radiació incident, per tant, no poden treballar com espectròmetre d'energies. Per contra, posseeixen una gran eficiència per partícules dèbilment ionitzants i no necessiten amplificació. Aquest instrument està calibrat en unitats de taxa d'exposició ($R \cdot h^{-1}$) i permet detectar des de nivells molt baixos (de l'ordre dels $nR \cdot h^{-1}$) fins a $200 mR \cdot h^{-1}$, en un ampli rang d'energies, de 30 keV a 1.3 MeV. Les mesures de la taxa d'exposició es converteixen en mesures de taxa de dosi absorbida, \dot{D} ($Gy \cdot h^{-1}$), a partir de factor de conversió $1 R = 0.008764 Gy$. Com que aquest detector no permet distingir la radiació gamma deguda a la radiació còsmica de la radiació terrestre, a la taxa de dosi

¹² Thermo Electron Corporation., 5981 Airport Road, Santa Fe, New Mexico 87507, EUA.

absorbida mesurat pel detector, \dot{D} , s'ha de restar el valor teòric degut a la radiació còsmica corresponent a l'alçada del punt de mesura, $\dot{D}_c(z)$, obtingut a partir de l'expressió (2.1), i el valor del fons del propi equip, \dot{D}_b . D'aquesta forma s'obté el valor de l'exposició neta degut a la radiació gamma terrestre en cada punt \dot{D}_t , d'acord amb l'expressió:

$$\dot{D}_t = \dot{D} - \dot{D}_c(z) - \dot{D}_b \quad (3.12)$$

3.1.5. El sistema d'espectrometria gamma

El sistema d'espectrometria gamma utilitzat per mesurar el contingut de radionúclids de mostres de material del sòl consisteix en un detector coaxial de germani d'alta puresa (model GMX-20190 de la marca ORTEC¹³). Per tal de minimitzar la detecció de la radiació del fons natural (còsmica i terrestre) el detector disposa d'un blindatge passiu progressiu de Pb, Cd i Cu de 10 cm, 1 mm i 10 mm de gruix, respectivament. Està connectat a un convertidor analògic-digital (ADC) de la marca CANBERRA¹⁴ (model 8701) de 8192 canals de resolució. El full d'especificacions tècniques proporcionat pel fabricant indica que de fàbrica el detector té una eficiència relativa del 20 % i una resolució nominal de 1.90 keV per la línia del ⁶⁰Co de 1.33 MeV.

Per a dur a terme l'anàlisi dels espectres s'utilitza el programa CANBERRA Genie 2000. El programa proporciona un llistat amb els diferents radionúclids identificats amb les energies de les diferents emissions gamma de cadascun d'aquests radionúclids. Els valors de les concentracions d'activitat van acompanyats d'una incertesa i venen expressats en unitats de Bq·kg⁻¹. La determinació de les concentracions d'activitat dels radionúclids acostuma a realitzar-se de forma indirecta mitjançant els seus descendents més importants des del punt de vista de la detecció. La determinació de l'activitat del ²²⁶Ra, per exemple, es fa a través del ²¹⁴Pb en la línia d'emissió de 351 keV, validant-la amb les activitats de ²¹⁴Pb de la línia d'emissió de 295 keV i de ²¹⁴Bi a 609 keV. L'activitat del ²³²Th es determina a través de la línia d'emissió de 911 keV del ²²⁸Ac i es valida amb el ²¹²Pb a 238 keV, suposant que aquests radionúclids es troben en equilibri radioactiu secular. L'activitat de ⁴⁰K es determina directament a través de la línia d'emissió de 1460 keV (García-Orellana, 2004; Casacuberta et al., 2009). A l'annex D es detalla tot el procediment utilitzat per realitzar la recollida i el processat de mostres de sòl per espectrometria gamma.

3.1.6. Altres instruments

Dins d'aquest apartat es descriuen tots aquells instruments i equips de mostreig utilitzats per determinar altres paràmetres diferents a la radiació natural dels diferents medis analitzats (aire, aigua i sòl), com són la temperatura, la humitat, la conductivitat, etc.

¹³ www.ortec-online.com

¹⁴ Canberra Industries, Inc., 800 Research Parkway, Meriden, CT 06450, EUA.

3.1.6.1. Estacions meteorològiques i velocímetre d'aire

S'ha utilitzat una petita estació meteorològica TFA¹⁵ per determinar la temperatura i la humitat relativa de l'aire així com la pressió atmosfèrica. Aquesta estació també disposa d'una memòria interna que registra les dades cada hora i permet la seva posterior visualització a la pantalla (**Figura 3.15**, esquerra). Una segona estació meteorològica més simple, que determina temperatures i humitats, envia les dades registrades cada hora a l'estació principal a través d'ones de radiofreqüència (**Figura 3.15**, centre). Aquest conjunt permet determinar els paràmetres meteorològics a dos punts separats fins a 100 m, tant a l'interior com a l'exterior de recintes.

Un altre instrument que permet determinar la temperatura i la humitat relativa és el mesurador d'aire VelociCalc Plus de TSI¹⁶, model 8386A (**Figura 3.15**, dreta). Aquest dispositiu disposa d'una sonda telescòpica per facilitar la mesura en zones de dimensions reduïdes o de difícil accés. La peculiaritat d'aquest instrument és que permet mesurar la velocitat de l'aire que circula per un conducte o que surt per un orifici.



Figura 3.15. Estacions meteorològiques TFA principal (esquerra) i auxiliar (centre) i velocímetre d'aire VelociCalc Plus (dreta).

3.1.6.2. Bombes d'aigua

Per obtenir mostres d'aigua de pous s'ha utilitzat un parell d'equips portàtils de bombes submergides de la casa Eijkelkamp¹⁷. Un equip, consistent en una bomba model Gigant i 12 m de tub, permet extreure l'aigua d'una profunditat inferior als 10 m. L'altre equip, consistent en una bomba model Gigant unida en sèrie amb tres bombes model Booster i 40 m de tub, permet extreure aigua de profunditats fins el 35 m (**Figura 3.16**). Els dos equips de bombes van alimentats amb bateries de 12 i 24 V, respectivament.

¹⁵ TFA Dostmann GMBH + Co.KG, Zum Ottersberg 12, 97877 Wertheim-Reicholzheim, Alemanya.

¹⁶ TSI Incorporated, 500 Cardigan Road, Shoreview, MN 55126, EUA.

¹⁷ Eijkelkamp Agrisearch Equipment, Nijverheidsstraat 30, 6987 EM Giesbeek, Holanda.

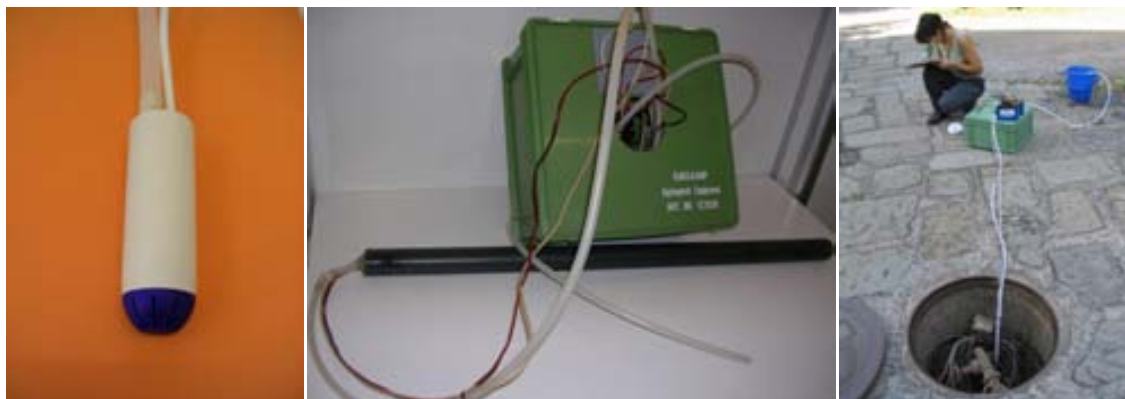


Figura 3.16. *Esquerra: Bomba submergible Gigant. Centre: Equip de bombes Gigant i Booster connectades en sèrie, protegides per un tub de PVC, amb 40 metres de tub i cable enrotllats en una caixa. Dreta: Extracció d'aigua en un pou.*

3.1.6.3. Conductímetre i cel·la de flux

Per determinar la temperatura i la conductivitat de l'aigua s'ha utilitzat un conductímetre. Aquest equip consisteix en un monitor portàtil alimentat per bateries i una sonda. La mesura consisteix en submergir la punta de la sonda a la mostra d'aigua que es vol analitzar. Si es disposa d'un flux d'aigua continu es poden fer mesures més estables utilitzant una cel·la de flux. Aquesta cel·la consisteix en un recipient amb uns orificis d'entrada i sortida per l'aigua corrent i una tapa on s'hi han practicat orificis per introduir-hi les sondes dels instruments de mesura. Aquest dispositiu evita que l'aigua analitzada estigui directament en contacte amb l'aire exterior i que degut a això experimenti variacions ràpides de la seva temperatura i altres propietats físiques i químiques (**Figura 3.17**).



Figura 3.17. *Esquerra: mostreig d'aigua procedent d'un pou on es mostra el conductímetre per mesurar la temperatura i la conductivitat. Dreta: mesura de paràmetres de camp amb la cel·la de flux.*

3.2. Control de qualitat

Un control de qualitat consisteix en un conjunt d'accions i processos que es realitzen per garantir el correcte desenvolupament d'unes activitats i detectar-ne possibles errors. En el cas dels laboratoris de la UFR de la UAB, la seva principal activitat consisteix en la realització de mesures de radiació i el control de qualitat pretén garantir la fiabilitat dels resultats obtinguts en aquestes mesures.

Seguint les directrius sobre la competència dels laboratoris i serveis de mesura de radó en aire que dóna el CSN a la Guía de Seguridad 11.01 (CSN, 2010), la UFR ha iniciat la implementació de la norma internacional sobre els requisits generals relatius a la competència dels laboratoris d'assaig i calibratge (ISO/IEC 17025).

En aquest apartat es presenten les activitats més destacades en les quals la UFR ha participat (control de qualitat extern) o que ha dut a terme (control de qualitat intern) durant els darrers vuit anys i que li han permès adquirir les eines i l'experiència per poder implementar en un futur immediat la norma esmentada.

3.2.1. Control de qualitat extern: calibratges

Normalment quan s'adquireix un nou equip de detecció aquest acostuma a venir acompanyat d'un certificat de calibratge del propi fabricant. En el cas dels detectors sòlids de traces nuclears es poden donar dues situacions diferents: (i) que s'utilitzi el servei de dosimetria del centre que fabrica els detectors i aleshores ja no cal realitzar el calibratge, o (ii) que es comprin els diferents components que configuren el detector per separat i que, tant el muntatge com tot l'anàlisi posterior, es porti a terme en el propi laboratori. Com que cada laboratori pot tenir uns procediments interns diferents (tals com l'emmagatzematge, el muntatge, el revelatge, la lectura, etc.) la resposta dels seus detectors també pot ser diferent. Aleshores, quan es posa a punt el sistema de mesura cal realitzar un calibratge i és aconsellable repetir-lo regularment, especialment si es realitza alguna modificació en algun procediment intern que afecta aquest sistema o si s'adquireix un nou lot de material que configura el sistema. En el cas dels detectors de radó cal fer un calibratge a una cambra de radó de referència.

3.2.1.1. Detectors actius de radó

Els diferents detectors actius de radó utilitzats per la UFR de la UAB (PRASSI, Clipperton, RAD7, AlphaGUARD i ATMOS) són calibrats en els seus respectius punts de fabricació abans de ser adquirits i posteriorment es verifica el seu funcionament a la cambra de radó de referència de l'INTE i a la cambra de radó de la UAB, tal i com es presenta en els apartats 3.2.2 i 3.2.3.

3.2.1.2. Detectors passius de radó

Dels diferents processos de calibratge de la instrumentació utilitzada en la UFR de la UAB en els darrers anys, aquells que requereixen més atenció per part del personal de laboratori de radó són els calibratges dels detectors de traces nuclears de Makrofol i de LR115 i que es descriuen de forma més detallada a continuació.

Detectors de Makrofol

Des de l'inici de les seves activitats, la UFR de la UAB ha calibrat aquest tipus de detectors a la cambra de radó de la HPA. L'any 2004 s'envia novament un conjunt de 20 detectors de Makrofol per ser exposats a l'interior de la cambra de radó de la HPA. Els 20 detectors es separen en 4 grups de 5 detectors cadascun. Un grup, anomenat de trànsit, serveix per controlar l'exposició rebuda durant el transport dels dosímetres i els altres tres grups s'exposen a l'interior de la cambra a tres valors diferents d'exposició, X_{Rn} , que s'han acordat prèviament. Un cop finalitzades les exposicions, la HPA proporciona els valors reals de les exposicions a l'interior de la cambra, amb una incertesa del 5 %, i retorna tots els detectors a la UAB perquè siguin revelats i analitzats en el laboratori radó de la UFR. S'obtenen tres valors mitjos de la densitat de traces, $\bar{\rho}$, als que se'ls resta el valor mig de la densitat de traces dels detectors de trànsit, $\bar{\rho}_t = (16 \pm 6) \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}$, i s'obtenen les densitats de traces netes, $\bar{\rho}_n$. Aquest conjunt de dades (**Taula 3.1**) permet obtenir una corba de calibratge, el pendent de la qual proporciona el factor de calibratge, ε ($\text{tr}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot(\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})^{-1}$), ja que en aquest interval de valors la relació entre l'exposició i la densitat de traces és lineal.

Taula 3.1. Valors de l'exposició i la densitat de traces netes corresponents al calibratge a la HPA dels detectors de Makrofol l'any 2004.

X_{Rn} ($\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$)	$\bar{\rho}_n$ ($\text{tr}\cdot\text{cm}^{-2}$)
98 ± 5	82 ± 13
440 ± 22	291 ± 14
803 ± 40	557 ± 46

A partir de la recta de regressió de la **Figura 3.18** s'obté el valor del factor de calibratge, $\varepsilon = (0.69 \pm 0.05) \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot(\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})^{-1}$ ($R^2 = 0.9998$). Aquest valor coincideix dins l'interval d'incertesa amb el valor que havia estat utilitzant la UFR des de l'últim calibratge, $(0.76 \pm 0.02) \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot(\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})^{-1}$, (Amgarou, 2002).

Quan la densitat de traces és superior als $560 \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}$ comença a observar-se l'efecte de la saturació, perquè la pròpia mida de les traces fa que aquestes comencin a solapar-se les unes amb les altres. Això significa que el factor de calibratge només es pot utilitzar quan el detector ha estat sotmès a una exposició inferior als $800 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$, valor fins el qual es sap del cert que la resposta del detector és lineal. Per exposicions majors veure l'apartat 3.2.2.2.

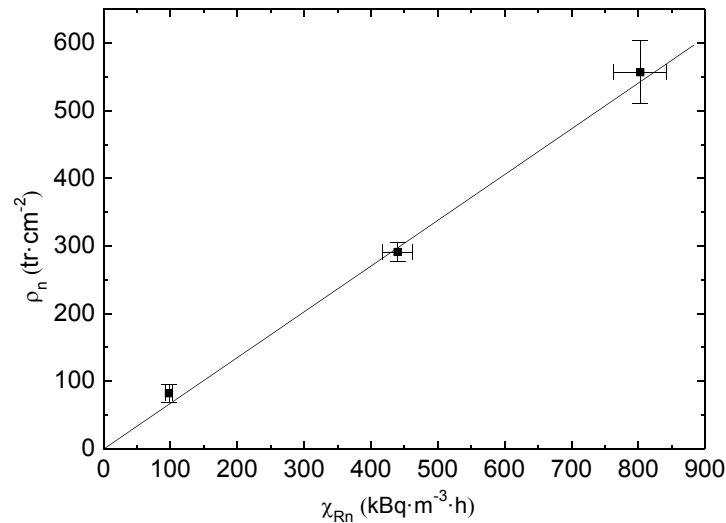


Figura 3.18. Recta de calibratge dels detectors de Makrofol.

Detectors de LR115

L'any 2006 la UFR compra un nou lot de LR115 i, de forma anàloga que amb els detectors de Makrofol, envia un conjunt de detectors a la HPA perquè siguin exposats a l'interior de la seva cambra de radó a tres valors diferents d'exposició i així obtenir la corba de calibratge corresponent (**Figura 3.19**). El valor del factor de calibratge obtingut és $(0.86 \pm 0.03) \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot(\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})^{-1}$ ($R^2 = 0.9981$). Aquest valor també coincideix amb el que havia estat utilitzant la UFR des de l'últim calibratge, $(0.9 \pm 0.2) \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot(\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})^{-1}$, (Font, 1997).

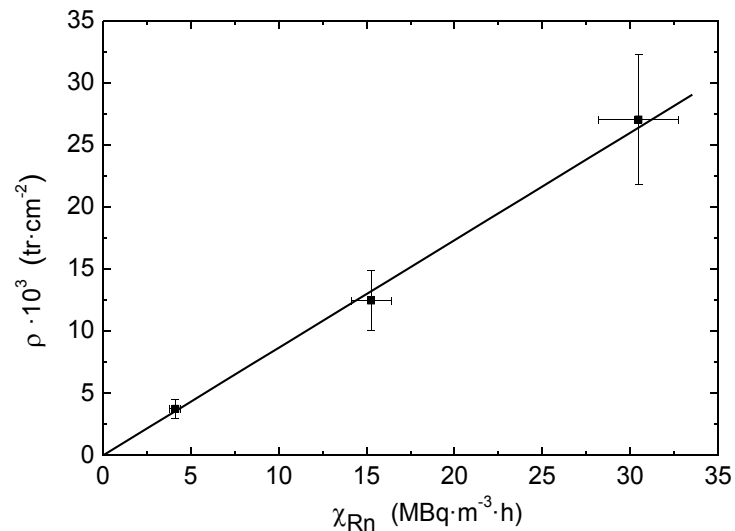


Figura 3.19. Recta de calibratge dels detectors de LR115.

Electrets

Segons el manual que proporciona el fabricant dels Electrets, el factor de calibratge ε ($\text{V}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$) està relacionat linealment amb el voltatge de l'Electret dins l'interval de 150 V a 750 V. Per tant, per determinar el valor del factor de calibratge per cada exposició

s'utilitza una fórmula auto-correctada que té en compte el valor mig del voltatge durant l'exposició. L'expressió utilitzada és:

$$\varepsilon = \left(A + B \left(\frac{V_i + V_f}{2} \right) \right) \frac{1}{d} \quad (3.13)$$

on **A** ($V \cdot (\text{pCi} \cdot \text{l}^{-1})^{-1}$) i **B** ($(\text{pCi} \cdot \text{l}^{-1})^{-1}$) són unes constants per cada configuració particular que es troben en el manual (Kotrappa, 2007), V_i (V) és la tensió abans d'iniciar la mesura, V_f (V) és la tensió quan la mesura ha finalitzat i $d = 37 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot (\text{pCi} \cdot \text{l}^{-1})^{-1}$ és el factor de conversió per expressar la C_{Rn} en unitats coherents del SI.

3.2.1.3. Detector de radiació gamma ambiental

El monitor de radiació Eberline amb la seva sonda HP-270 també ve calibrat de fàbrica i regularment es verifica el seu funcionament a les instal·lacions de la Unitat Tècnica de Protecció Radiològica (UTPR) de la UAB (**Figura 3.20**). L'any 2010 s'envia a calibrar de nou al Laboratori de Calibratge i Dosimetria de l'INTE i del certificat corresponent se'n desprèn que cal multiplicar el factor de calibratge original per un factor corrector de 1.1.

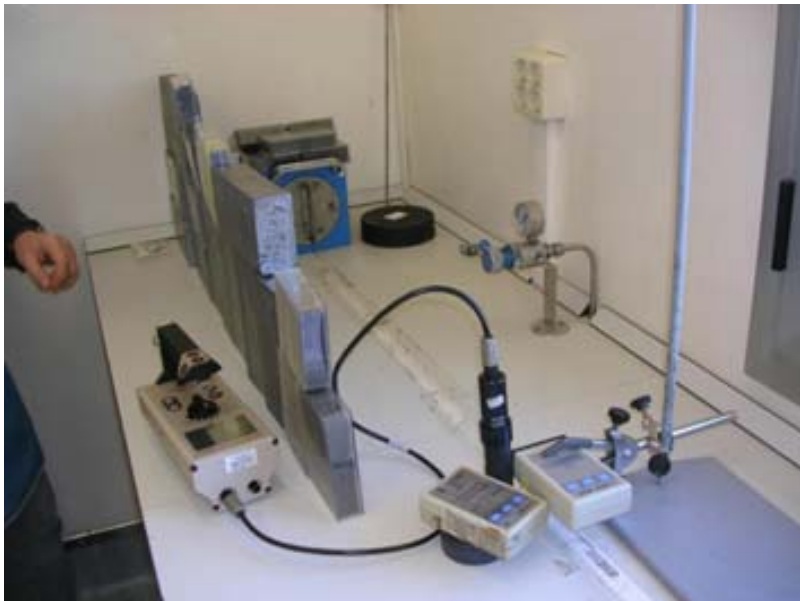


Figura 3.20. Verificació del funcionament del monitor Eberline a les instal·lacions de la UTPR de la UAB.

3.2.1.4. Sistema d'espectrometria gamma

El sistema d'espectrometria gamma està calibrat mitjançant el material de referència SRM 4276-B-148, consistent en un còctel patró de ^{154}Eu , ^{155}Eu i ^{125}Sb . El calibratge es porta a terme mitjançant la mesura del patró i creant, mitjançant el software de mesura GENIE 2000, un fitxer de calibratge (García-Orellana, 2004).

3.2.2. Control de qualitat extern: Intercomparacions

Encara que al llarg del temps no es realitzin modificacions del sistema de mesura, igualment s'han d'anar fent calibratges, amb una freqüència que dependrà de les especificacions que doni el fabricant o dels protocols del propi laboratori. Ara bé, entre calibratges també cal anar fent comprovacions internes del seu funcionament i comprovacions externes del factor de calibratge. Una manera de fer el control extern és participar a les intercomparacions nacionals i internacionals que organitzen alguns centres de recerca que disposen d'instal·lacions de referència per fer calibratges. Alguns centres també organitzen comparacions en condicions de camp reals. A continuació es descriuen els diversos exercicis de comparació i intercomparació realitzats al llarg dels últims 8 anys amb els diferents detectors actius i passius de radó. En primer lloc es presenten els exercicis realitzats en condicions controlades de l'interior de les cambres de radó de referència de l'INTE i de la HPA i, en segon lloc, els realitzats en condicions reals de l'interior de recintes tancats o de cambres que no són de referència, com són les diferents comparacions organitzades per la Universitat de Cantàbria (UC).

3.2.2.1. Intercomparació de sistemes en continu de radó a l'INTE

L'any 2004 la UFR participa en la Intercomparació de sistemes de mesura en continu de la C_{Rn} que organitza l'INTE de la UPC (**Figura 3.21**). Dels diferents detectors actius de la C_{Rn} descrits anteriorment, en aquest moment només es disposa del monitor PRASSI. L'objectiu de la intercomparació és avaluar la resposta de diferents equips sota diferents condicions de temperatura i humitat, entre 13 °C i 30 °C i entre 30 % i 80 %, respectivament. També s'analitza la resposta a la concentració de toró i es determina el fons. Els equips són exposats a l'interior de la cambra de radó amb diferents concentracions de radó, des de 450 Bq·m⁻³ fins a 9 kBq·m⁻³, i posteriorment es connecten a la cambra de toró a una concentració de (490 ± 98) Bq·m⁻³ (Vargas i Ortega, 2006).

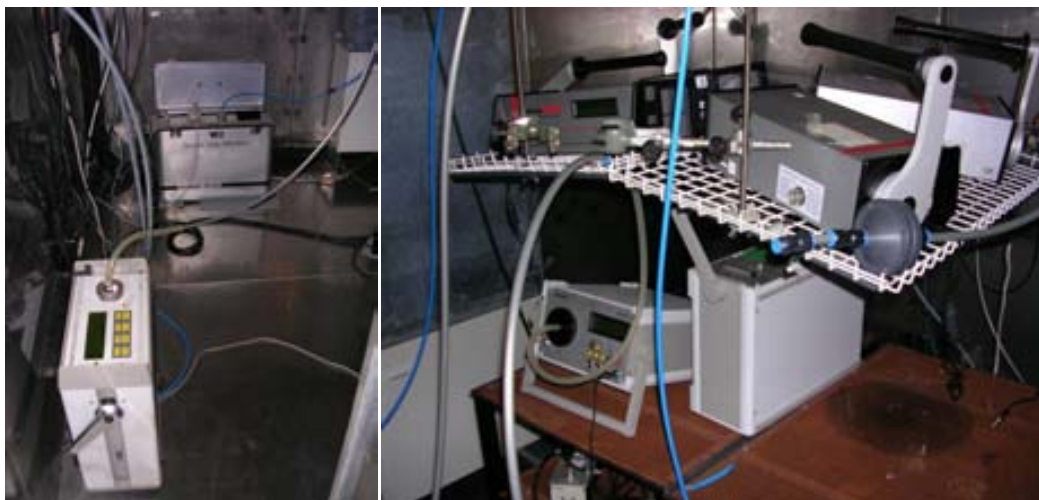


Figura 3.21. Esquerra: El monitor PRASSI de la UFR a l'interior de la cambra de radó de l'INTE i al fons el seu monitor ATMOS de referència. Dreta: Altres detectors actius dins la cambra de radó de l'INTE.

Els resultats posen de manifest que el PRASSI té un fons de $(1.03 \pm 0.81) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i que la seva mesura no es veu afectada per les condicions de temperatura i humitat, tot i que cal fer una correcció del 13 % en les concentracions de radó mesurades pel detector. Això representa aplicar un factor corrector de 0.87 ± 0.01 . Per altra banda, s'observa una clara influència de les concentracions de toró sobre les mesures de radó ja que el PRASSI, que no distingeix entre ambdós isòtops, mesura un valor mig de la concentració de radó de $(845 \pm 13) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, es a dir, un factor 1.73 ± 0.03 la concentració de toró de la cambra. Aquest fet no és sorprenent en absolut perquè el PRASSI està calibrat per a mesurar radó i no pas toró. A part d'això, el factor de sobreestimació en concret pot ser degut a la curta vida mitja del ^{216}Po que, en estar en equilibri amb el toró, es desintegra completament en el volum de detecció. Per altra banda, el nombre d'àtoms de ^{218}Po produïts pel radó i dipositats a les parets del volum de detecció es pot veure disminuït per la ventilació generada en realitzar una mesura amb molt poc radó ($< 30 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$). Per a què els comptes detectats siguin estrictament proporcionals a la concentració de radó, el PRASSI elimina, del nombre total de comptes, aquells que procedeixen de la deposició dels descendents de radó a les parets. Aleshores una disminució dels descendents dipositats i la presència de descendents de toró en equilibri pot contribuir a una sobreestimació important de la concentració de radó en presència de toró.

3.2.2.2. Intercomparacions de detectors passius de radó (HPA i INTE)

La UFR de la UAB participa habitualment en la intercomparació de detectors passius de radó que organitza la HPA (Howarth, 2008; 2009a; 2009b). Entre els anys 2005 i 2010 s'organitzen de forma anual. En cada exercici s'envien 40 detectors de Makrofol, 10 dels quals no s'exposen dins la cambra de radó ja que serveixen per controlar l'exposició rebuda durant el transport (trànsit) i els altres 30, dividits en tres grups de 10, s'exposen dins la cambra a tres valors diferents d'exposició que són desconeguts pels laboratoris participants.

L'any 2005 també es participa en la intercomparació de sistemes de mesura integradors de la C_{Rn} que organitza l'INTE de la UPC (Vargas i Ortega, 2007). La UFR de la UAB prepara 20 detectors dobles de Makrofol, 2 dels quals serveixen de trànsit i els altres 18 s'exposen a diferents concentracions de radó, que oscil·len entre 8 i 9 $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$, variant les condicions de temperatura i humitat. Cada detector doble està format per la unió de dos detectors simples diferenciats pel tipus de filtre. Un porta un filtre de fibra de vidre i l'altre un filtre de polietilè. L'objectiu d'aquest experiment és determinar la influència del tipus de filtre en les respostes dels detectors exposats a diferents condicions ambientals (a l'apartat 3.3.1 es descriu amb més detall la motivació d'aquest estudi i els resultats obtinguts) però en aquest apartat ens centrem en els resultats obtinguts en condicions habituals de laboratori (20 °C i 45 %).

L'any 2008 la UC i l'INTE organitzen una comparació de sistemes de mesura de la C_{Rn} en la que participen diferents grups nacionals. Cada grup prepara un conjunt de 8 detectors, 6 per ser exposats i 2 pel control del trànsit. La UFR de la UAB participa amb els detectors de Makrofol. Es planifica una única exposició a l'interior de la cambra de l'INTE a una C_{Rn}

de $(11.1 \pm 1.6) \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ durant unes 70 hores i amb unes condicions ambientals de 20 °C de temperatura i del 45 % d'humitat relativa.

L'any 2010 la UFR inicia una sèrie d'exposicions a l'interior de la cambra de radó de l'INTE per comprovar la resposta de diferents detectors actius i passius de radó sota diferents condicions de temperatura i humitat (**Figura 3.22**). A l'apartat 3.3.3 es descriu en detall la motivació d'aquest estudi i aquí novament ens centrem en els resultats dels detectors passius obtinguts en condicions habituals de laboratori.



Figura 3.22. Muntatge de l'exposició de detectors passius dins la cambra de radó de l'INTE de la UPC.

Amb les diferents comparacions i intercomparacions a la HPA i a l'INTE entre els anys 2005-2010 s'observa que el valor del factor de calibratge dels detectors de Makrofol experimenta fluctuacions (**Taula 3.2**). Aquestes fluctuacions, que poden ser degudes a variacions en els lots de material de Makrofol i de les condicions de revelatge, posen de manifest la necessitat de dur a terme calibratges i participar en exercicis d'intercomparació amb una certa regularitat.

Amb el conjunt de dades de la **Taula 3.2** s'obté una nova corba de calibratge que resol la limitació de la resposta del detector per exposicions elevades. Per fer l'ajustament, les dades de l'any 2007 no es tenen en compte ja que els factors de correcció són molt diferents als de la resta d'anys, provocat per un problema amb la font d'alimentació durant el revelatge dels detectors. Les dues últimes columnes de la **Taula 3.2** fan referència al sistema de la classificació utilitzat per la HPA. Per cada set de detectors que envien els laboratoris participants es calcula el valor mig de la diferència del percentatge absolut (M) i el valor mig de la desviació estàndard (SD) entre el valor obtingut i el valor de referència. Aquells sets que presenten ambdós paràmetres (M i SD) menors del 10 % tenen una categoria A, menors del 15 % categoria B, menors del 20 % categoria C, menors del 25 % categoria D i tota la resta categoria E. Dins de cada categoria, els sets s'ordenen utilitzant la suma de M i SD (Howarth, 2008; 2009a; 2009b).

Taula 3.2. Resultats de les diferents intercomparacions a la HPA i a l'INTE des del 2005 al 2010 obtinguts amb els detectors de Makrofol. Es presenten els valors de l'exposició de referència, la densitat de traces obtinguda, el factor de correcció (F), definit com el quocient entre el factor de calibratge del 2004 i el factor obtingut amb la intercomparació; el factor de calibratge de les dues exposicions baixes de cada any (ε') i el factor de correcció (F') que cal aplicar sobre el factor de calibratge obtingut l'any 2004. També s'indica el sistema de classificació (C) utilitzat per la HPA i la posició de la UFR entre el número total de laboratoris participants a la intercomparació.

Lloc Any	X_{Rn} Ref. (kBq·m ⁻³ ·h)	$\bar{\rho}_n$ (tr·cm ⁻²)	F	ε' (tr·cm ⁻² ·(kBq·m ⁻³ ·h) ⁻¹)	F'	C	No/ Total
INTE							
2005	599 ± 84	359 ± 23	1.15 ± 0.14	-	-		
2008	775 ± 54	378 ± 40	1.41 ± 0.21	-	-		
2010	627 ± 51	284 ± 18	1.52 ± 0.19	0.50 ± 0.05	1.38 ± 0.18		
	1000 ± 70	475 ± 40	1.45 ± 0.19				
	1149 ± 80	600 ± 48	1.32 ± 0.16				
HPA							
2005	150 ± 8	120 ± 15	0.86 ± 0.13	0.76 ± 0.06	0.91 ± 0.10	C	39/51
	278 ± 14	209 ± 25	0.92 ± 0.14				
	1745 ± 87	959 ± 32	1.26 ± 0.12				
2006	177 ± 9	115 ± 18	1.06 ± 0.19	0.66 ± 0.05	1.05 ± 0.11	B	19/32
	320 ± 16	213 ± 19	1.04 ± 0.13				
	1719 ± 86	868 ± 46	1.37 ± 0.14				
2007	140 ± 7	60 ± 32	1.62 ± 0.89	0.41 ± 0.03	1.68 ± 0.17	E	42/43
	255 ± 13	102 ± 38	1.73 ± 0.66				
	1913 ± 40	(66 ± 15)·10	2.01 ± 0.48				
2008	165 ± 8	101 ± 28	1.12 ± 0.32	0.63 ± 0.05	1.10 ± 0.12	C	15/20
	330 ± 17	211 ± 29	1.08 ± 0.18				
	1436 ± 72	716 ± 50	1.38 ± 0.15				
2009	109 ± 5	89 ± 30	0.85 ± 0.29	0.69 ± 0.06	1.00 ± 0.11	B	9/13
	390 ± 20	266 ± 38	1.01 ± 0.17				
	1680 ± 84	928 ± 45	1.25 ± 0.13				
2010	226 ± 11	157 ± 30	0.99 ± 0.21	0.61 ± 0.05	1.13 ± 0.12	B	3/7
	750 ± 38	455 ± 49	1.14 ± 0.16				
	1470 ± 74	763 ± 71	1.33 ± 0.17				

Totes les exposicions a l'INTE donen factors de correcció més grans que 1.10. Si es determina el factor de calibratge només a partir de les dades de l'INTE s'obté (0.50 ± 0.05) tr·cm⁻²·(kBq·m⁻³·h)⁻¹, valor que és significativament diferent a l'obtingut en el calibratge a la HPA l'any 2004.

Pel què respecte a les intercomparacions a la HPA, les exposicions que tenen valors inferiors als 800 kBq·m⁻³·h presenten uns factors de correcció molt propers a 1.00 mentre les que superen els 800 kBq·m⁻³·h presenten factors de correcció més elevats, iguals o superiors a 1.25. A partir de les dades de la HPA es fa un ajustament a una corba de saturació del tipus:

$$\rho = a \cdot (1 - e^{-b \cdot X_{Rn}}) \quad (3.14)$$

Per determinar els valors dels paràmetres **a** i **b**, es desenvolupa l'expressió (3.14) en una sèrie de Taylor. En primera aproximació, és a dir, per exposicions petites, el primer terme del desenvolupament correspon a l'expressió de la recta $\rho = a \cdot b \cdot X_{Rn}$ i aleshores el

producte dels paràmetres a i b coincideix amb el factor de calibratge ε . Per tant, substituint

$a = \frac{\varepsilon}{b}$ a l'expressió (3.14), tenim l'expressió:

$$\rho = \frac{\varepsilon}{b} \cdot (1 - e^{-b \cdot X_{Rn}}) \quad (3.15)$$

on només hi ha un paràmetre lliure, b . El valor d' ε es calcula a partir de totes les dades de les exposicions realitzades a la mateixa cambra de radó controlada de la HPA i que tenen densitats de traces inferiors als $560 \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}$ (exceptuant les dades de l'any 2007). El valor obtingut, $(0.66 \pm 0.05) \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot(\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})^{-1}$ ($R^2=0.9977$), coincideix amb el valor del factor de calibratge del 2004, dins l'interval d'incertesa. La corba que s'ajusta millor als punts està representada a la **Figura 3.23**. Aleshores, per densitats de traces superiors a $560 \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}$, el valor de l'exposició s'obté a partir de l'expressió:

$$X_{Rn} = -\frac{1}{b} \cdot \ln\left(1 - \frac{\rho \cdot b}{\varepsilon}\right) \quad (3.16)$$

on $b = (28 \pm 2) \cdot 10^{-5} (\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})^{-1}$ i $\varepsilon = (0.66 \pm 0.05) \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot(\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})^{-1}$ ($\chi^2=0.962$).

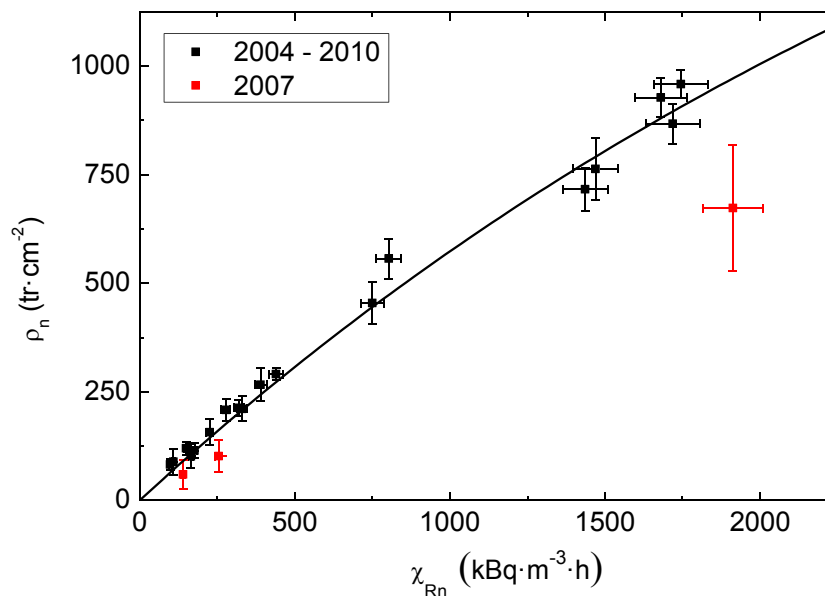


Figura 3.23. Corba de saturació dels dosímetres de Makrofol a partir de les dades del calibratge del 2004 i les següents intercomparacions a la HPA fins l'any 2010. Les dades en vermell corresponen a la intercomparació del 2007 que no s'han tingut en compte a l'hora de fer l'ajust.

S'ha observat una discrepància del 24 % entre els valors dels factors de calibratge dels detectors de Makrofol a les cambres de radó de referència de la HPA ($(0.66 \pm 0.05) \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2} (\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})^{-1}$) i de l'INTE de la UPC ($(0.50 \pm 0.05) \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2} (\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})^{-1}$). Tant l'INTE com la HPA són centres de referència que disposen del monitor ATMOS 12 DPX com a equip primari de referència però per exemple, aquestes dues cambres no han estat traçades en el mateix moment ni de la mateixa forma respecte el PTB d'Alemanya. L'INTE ha traçat la seva cambra de radó amb un equip de mesura portàtil procedent del PTB (Vargas et al.,

2004b), mentre que la HPA calibra els seus equips de referència amb una font de radó procedent del PTB (Howarth, 2009b). Com a grans centres de referència estan sotmesos a estrictes controls de qualitat interns i externs, ja que també participen a intercomparacions, però aquestes potser no es fan amb la suficient regularitat que caldria, ja que la última gran intercomparació de laboratoris de calibratge de radó data del 2004 (Röttger et al., 2006). Si existeixen discrepàncies entre els seus equips de referència, un cop propagades en els resultats dels usuaris que utilitzen les seves cambres, es poden veure diferències significatives, com pot estar passant en el cas de la UFR de la UAB que participa en intercomparacions en ambdós centres.

Considerant que no existeixin diferències entre ambdós centres, en representar gràficament les dades de totes les exposicions a l'INTE i la HPA conjuntament, excepte les de l'any 2007, s'observa que es poden ajustar a una recta (Figura 3.24), el pendent de la qual és $(0.53 \pm 0.05) \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot(\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})^{-1}$ ($R^2=0.9947$). Aquest valor coincideix amb el factor de calibratge obtingut amb les dades de l'INTE soles i a més posa de manifest que la resposta del detector té un comportament lineal com a mínim fins a una densitat de traces de $1000 \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}$.

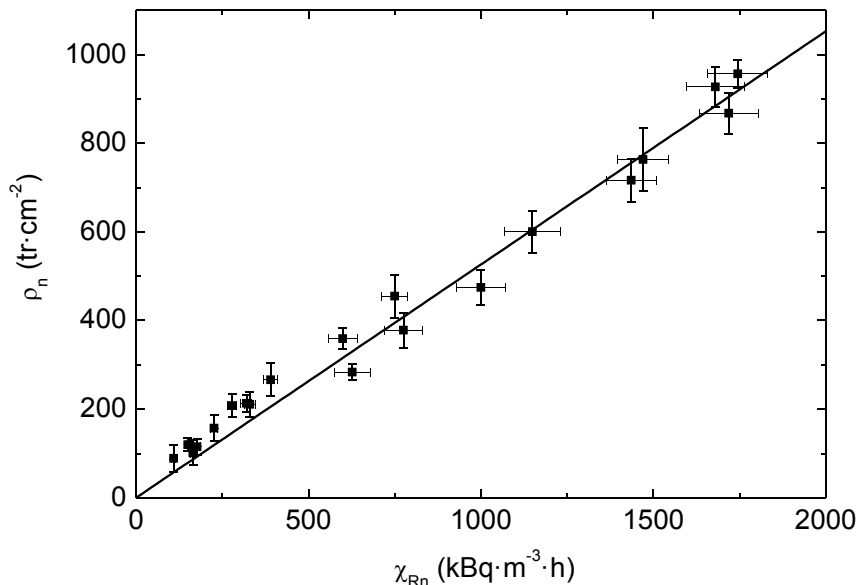


Figura 3.24. Recta de calibratge dels dosímetres de Makrofol a partir de les dades de les exposicions a l'INTE i la HPA des del 2005 al fins el 2010.

3.2.2.3. Comparacions UAB - UC

Durant l'any 2008 la UC porta a terme una campanya de mesures de la concentració C_{Rn} de radó a l'interior d'habitatges a diferents zones del territori espanyol. Per fer la distribució dels dosímetres es demana la col·laboració d'altres universitats i això permet comparar els diferents detectors passius que utilitza cada universitat en les condicions reals dels habitatges. La distribució es realitza contactant amb els directors de 5 instituts d'ensenyament i realitzant reunions amb tots els professors interessats en col·laborar. Es demana que a cada emplaçament escollit per la mesura s'hi deixin dos detectors: un de

Makrofol de la UAB i un de CR-39 de la UC (CR-39 de Radosys¹⁸) per poder-los comparar (En aquest moment la UAB encara no ha utilitzat mai els detectors de CR-39 de l'apartat 3.1.2.3). D'aquesta forma un total de 93 parells de detectors queden repartits per diferents municipis de Catalunya i Aragó. Després d'una exposició de 3 mesos es sol·licita als col·laboradors que recullin els seus detectors i que els portin en els seus instituts per passar a buscar-los personalment. Es fan diferents recordatoris per totes aquelles persones que no tornen els detectors després del primer avís i finalment es recupera un total de 57 detectors de cada tipus que han estat exposats a 52 habitatges diferents.

Amb els resultats d'aquesta campanya s'observa un acord clar amb les tendències dels resultats obtinguts amb els dos laboratoris però que els detectors de la UAB mesuren valors superiors als de la UC a la majoria dels habitatges (**Figura 3.25**). La distribució dels quocients entre les concentracions de radó obtingudes per la UC (C_{Rn-UC}) i les obtingudes per la UAB (C_{Rn-UAB}) mostra un pic en el valor de 0.5 (**Figura 3.26**) i amb els resultats de les mitjanes geomètriques també s'observa aquesta relació, 0.46 (**Taula 3.3**).

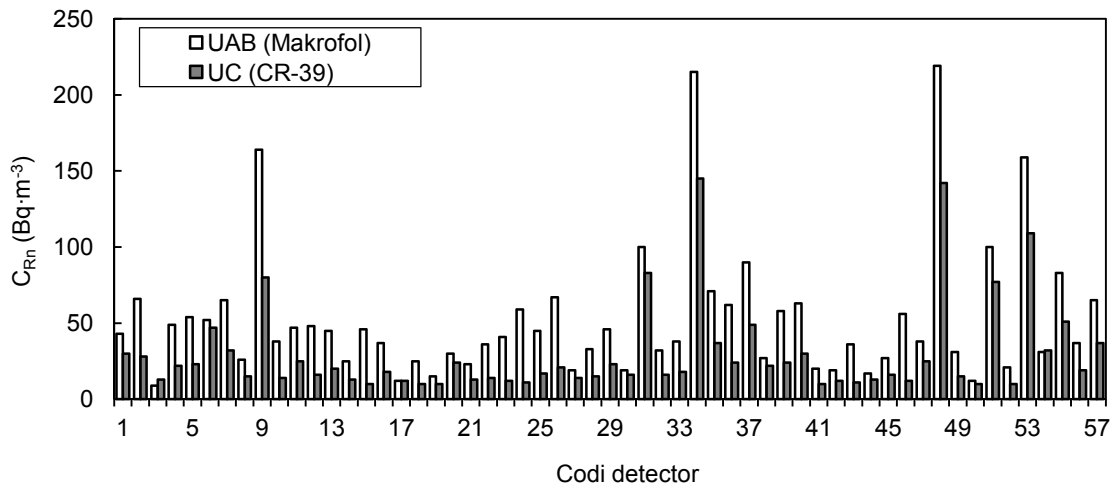


Figura 3.25. Comparació de tots els resultats obtinguts per la UC i la UAB en els 57 habitatges mesurats de Catalunya i Aragó.

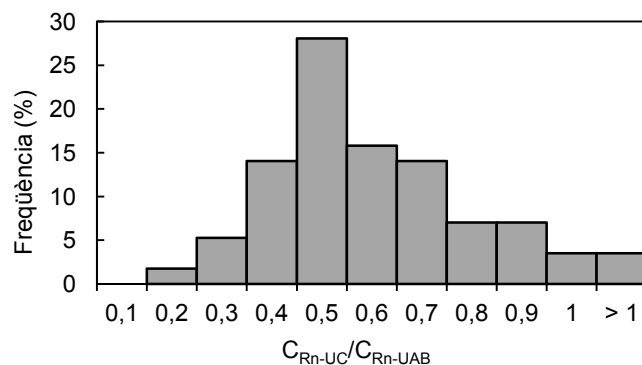


Figura 3.26. Distribució dels quocients entre els valors de la C_{Rn} obtinguts pels dos laboratoris, UC i UAB.

¹⁸ Radosys, Ltd., Vegyész u. 17-25, H-1116 Budapest, Hongria.

S'ha de tenir en compte que aquesta discrepància s'observa a baixes exposicions, justament quan la resposta dels detectors té una incertesa més gran i que pot estar influïda per petites imprecisions en els procediments de la col·locació, el revelatge, la lectura, etc. En aquesta campanya, la instal·lació i la retirada del dosímetre l'han fet els propis habitants de les cases i és possible que en molts casos no es seguissin correctament les instruccions que donava cada laboratori pel seu detector en concret, fet que també pot haver influït de forma significativa sobre les respostes.

Taula 3.3. Valors mitjos aritmètic i geomètric de la C_{Rn} obtinguda en els habitatges de Catalunya i Aragó a la campanya conjunta de la UAB i la UC.

Centre	Detector	C_{Rn} (Bq·m ⁻³)			
		Mitja aritmètica	σ	Mitja geomètrica	σ geom.
UAB	Makrofol	53	44	41	2
UC	Cr-39	29	30	22	2

A la comparació de detectors de radó que organitza la UC a la cambra de radó de l'INTE el mateix any 2008, tant la UC com la UAB presenten valors inferiors al de referència i s'obté una discrepància del 14 % entre ambdós centres. Aquest cop, però, els valors de la UAB són inferiors que els de la UC i presenten una discrepància respecte el valor de referència del 30 % (**Taula 3.4**). Ambdós centres tenen els seus detectors calibrats a la cambra de radó de la HPA, i a l'apartat 3.2.2.2 s'ha comentat un possible motiu per aquestes diferències amb l'INTE.

Taula 3.4. Resultats de la C_{Rn} obtinguts per la UAB i la UC a la cambra de radó de l'INTE.

Centre	Detector	C_{Rn} (kBq·m ⁻³)	Discrepància (%)
INTE	ATMOS (Referència)	11.1 ± 1.6	
UAB	Makrofol	7.74 ± 0.34	30
UC	CR-39	8.80 ± 0.18	21

A finals del 2008 la UC i la UFR de la UAB realitzen noves comparacions dels seus detectors passius i actius de radó per analitzar aquestes discrepàncies en profunditat. Aquest cop les exposicions es duen a terme tant en els propis laboratoris de la UC com a l'interior del mòdul experimental de Saelices el Chico, Salamanca. Aquest mòdul va ser construït l'any 2005 dins el marc d'un projecte de recerca dut a terme per l'Institut de Ciències de la Construcció Eduardo Torroja (IETcc – CSIC) i la càtedra de Física Mèdica de la Universidad de Cantabria (UC) amb l'objectiu de provar diferents solucions arquitectòniques per a la reducció dels nivells de radó (Olaya i Quindós, 2007). En el laboratori de la UC es fa una comparació de detectors actius durant 29 hores de mesura en continu de la C_{Rn} de l'interior d'un recipient. Es compara un AlphaGUARD i un Radon Scout (monitor de la marca SARAD¹⁹ basat amb un detector de semiconductor) de la UC i un RAD7 (1760) de la UAB. Tal i com s'observa a la **Figura 3.27**, no hi ha diferències significatives entre els resultats dels equips dels dos laboratoris. Cal esmentar que el temps d'integració del Radon Scout és d'una hora, a diferència dels altres dos equips que

¹⁹ SARAD GmbH, Wiesbadener Strasse 20, D - 01159 Dresden, Alemanya. www.sarad.de

el tenen de 10 minuts. Per aquest motiu el Radon Scout sembla que té una resposta més lenta i que no descriu unes fluctuacions tan ràpides com els altres dos equips.

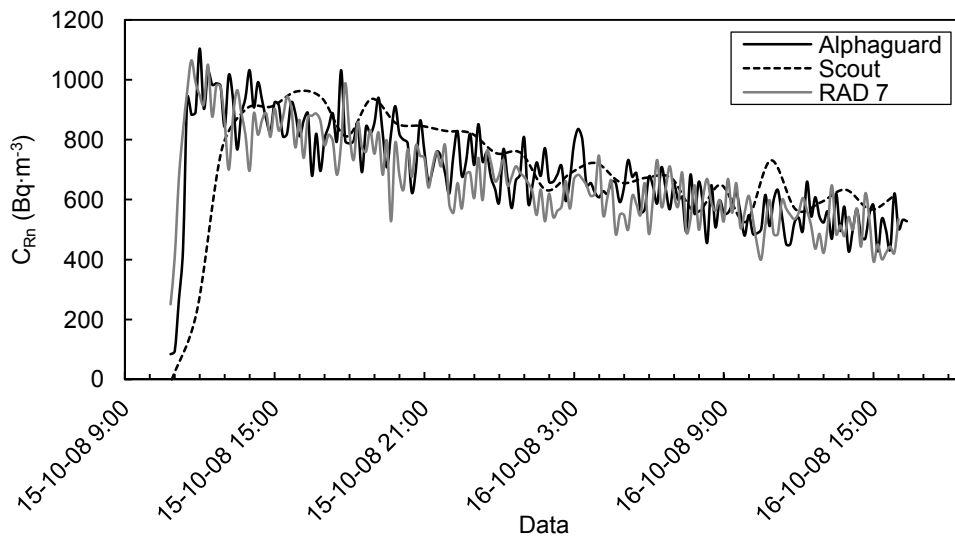


Figura 3.27. Comparació de tres monitors (AlphaGUARD i Radon Scout de la UC i el RAD7 de la UAB) mesurant en continu la C_{Rn} de l'interior d'una cambra de radó del laboratori de la UC.

El mòdul experimental de Saelices el Chico consisteix en un petit edifici de dues plantes (planta baixa i semi-soterrani) on la C_{Rn} pot arribar als $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (**Figura 3.28**). Una descripció més detallada d'aquest mòdul es dona en l'apartat 3.4. En el seu interior es realitza la comparació de detectors actius (dos Radon Scout de la UC i un RAD7 de la UAB mesurant de forma contínua) i detectors passius (Makrofol de la UAB i CR-39 de la UC) en diferents exposicions. La UC prepara 30 detectors de CR-39: 20 per exposar i 10 de trànsit. La UFR de la UAB prepara 40 detectors dobles de Makrofol (un amb filtre de fibra de vidre (a) i l'altre amb filtre de polietilè (b)): 30 per exposar i 10 de trànsit. Inicialment estan previstes dues exposicions però davant la possibilitat de que els detectors de Makrofol puguin quedar saturats, un conjunt de 10 detectors es deixen durant un temps d'exposició intermedi entre les dues exposicions programades. A la **Taula 3.5** es mostren les principals característiques de les tres exposicions dels detectors de Makrofol. Per estudiar la possible influència del toró, els detectors passius són instal·lats sobre una taula de 80 cm d'alçada i a 5 distàncies diferents de la paret (2, 25, 50, 90 i 180 cm), tal i com s'observa a la **Figura 3.28**.

Taula 3.5. Principals característiques de les tres exposicions de detectors passius i actius a l'interior del soterrani del mòdul.

Exposició	No. Detectors passius	Data inici	Data fi	Temps d'exposició	
				(d)	(h)
1	10 Makrofol 10 CR-39	10/10/2008	13/10/2008	3	76
2	10 Makrofol	13/10/2008	25/10/2008	12	288
3	10 Makrofol 10 CR-39	10/10/2008	25/10/2008	15	360



Figura 3.28. Esquerra: Mòdul experimental de Saelices el Chico (Salamanca). Dreta: Muntatge de la primera exposició de detectors passius i actius a l'interior del soterrani del mòdul.

Durant les 4 primeres hores de la primera exposició el monitor RAD7 mesura la C_{Rn} al costat d'un Radon Scout i a 5 cm de la paret. Fa tres mesures puntuals de la concentració de toró, obtenint valors molt baixos, $[0 - 13] \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Com que el tub de Drierita que permet fer les mesures del toró s'esgota en poques hores, no es poden mesurar els dos isòtops (^{222}Rn i ^{220}Rn) durant tota l'exposició. Aleshores es col·loca el monitor RAD7 en el centre de la sala, al costat d'un altre Radon Scout, tal i com mostra la **Figura 3.28**. Transcorreguts els tres primers dies de la primera exposició es retira el monitor RAD7, la meitat dels detectors de Makrofol i CR-39 i s'afegeixen 10 detectors més de Makrofol, corresponents a la segona exposició (**Figura 3.29**). Els detectors que estan exposats durant més temps corresponen a la tercera exposició.



Figura 3.29. Muntatges de la segona exposició (esquerra) i de la tercera exposició (dreta) a l'interior del soterrani del mòdul.

A partir de l'evolució temporal de la C_{Rn} obtinguda durant la primera exposició (**Figura 3.30**) es suposa que la C_{Rn} pot continuar augmentant fins arribar a valors pròxims als $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Es considera el cas en què la C_{Rn} arriba als $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i s'estima el nombre de dies d'exposició per la resta de detectors passius, per tal de tenir unes densitats de traces corresponents a la zona lineal de la corba de calibratge. L'evolució temporal de la C_{Rn} mesurada amb el monitor Radon Scout de la UC durant els 15 dies que duren les tres exposicions dins el mòdul confirma que la C_{Rn} arriba als $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (**Figura 3.31**) i

mostra el bon acord entre els resultats dels dos detectors actius durant els tres primers dies d'exposició, temps durant el qual el monitor RAD7 està exposat en el mòdul.

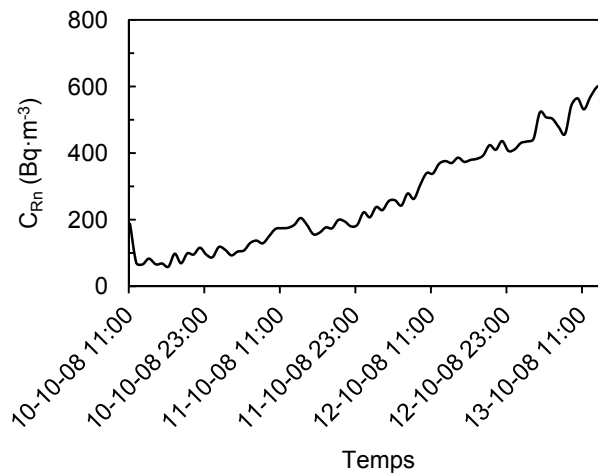


Figura 3.30. Evolució temporal de la C_{Rn} obtinguda amb el monitor RAD7 de la UAB durant la primera exposició dins el mòdul.

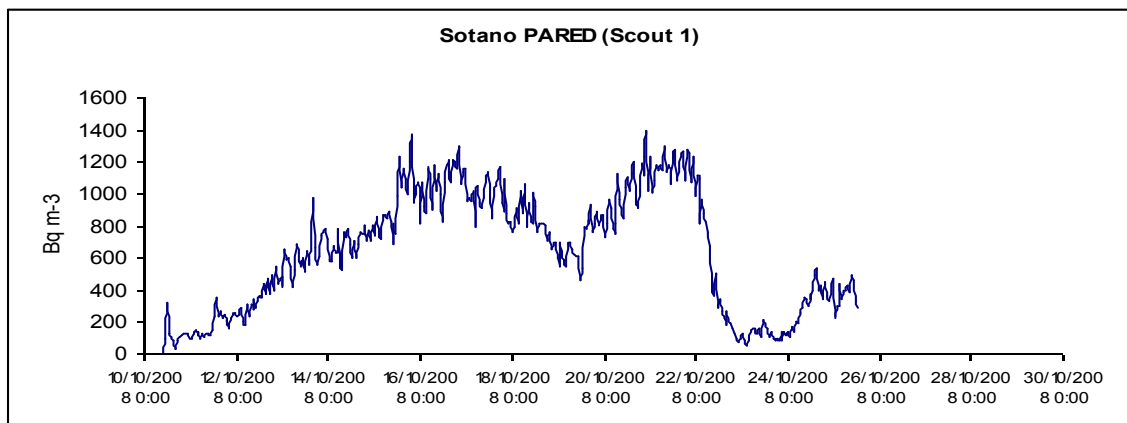


Figura 3.31. Evolució temporal de la C_{Rn} obtinguda amb el monitor Radon Scout de la UC durant els 15 dies d'exposicions dins el mòdul. Gràfica proporcionada per la UC.

Respecte als detectors passius, la primera exposició de està programada creient que el valor mig de la C_{Rn} dins el mòdul es troba entre els 500 i els 1000 $Bq \cdot m^{-3}$, però no es veu fins després de la recollida dels detectors que aquest no supera els 300 $Bq \cdot m^{-3}$ (Taula 3.6), el què suposa tenir una densitat de traces, ρ , inferior al límit de detecció, L_D . Els 10 detectors de trànsit presenten un valor mig de la densitat de traces de $(31 \pm 4) \text{ tr} \cdot \text{cm}^{-2}$ i una desviació estàndard, σ , de $15 \text{ tr} \cdot \text{cm}^{-2}$, per tant, el L_D resulta ser de $64 \text{ tr} \cdot \text{cm}^{-2}$ (segons l'expressió (3.17) de l'apartat 3.2.3.1). I efectivament, tots els detectors de la primera exposició donen $\rho < L_D$ i presenten una dispersió molt gran de valors, $[0 - 62] \text{ tr} \cdot \text{cm}^{-2}$. Els detectors de la segona i la tercera exposició ja presenten una menor dispersió dels valors de la ρ i tots els resultats es troben per sobre del L_D . Pel cas dels detectors de Makrofol s'observa que els valors mitjans de la C_{Rn} obtinguts amb els dos tipus de filtre coincideixen dins l'interval d'incertesa. Comparant amb els resultats dels detectors de la UC, s'obté que els detectors de la UAB també donen uns valors més baixos que els de la UC, amb una discrepància del 35 %.

Taula 3.6. Valors mitjans de la C_{Rn} obtinguts amb els detectors passius i actius a les tres exposicions dins el mòdul.

Tipus mesura	Detector (LAB.)	Emplaçament	C_{Rn} ($Bq \cdot m^{-3}$)		
			1a expo	2a expo	3a expo
Continua	RAD7 (UAB)	Centre	268 ± 26	-	-
	Radon Scout (UC)	Centre	298 ± 45	783 ± 90	685 ± 75
	Radon Scout (UC)	Paret	276 ± 48	736 ± 79	642 ± 72
Integrada	Makrofol-a (UAB)	Taula	$< L_D$	558 ± 26	444 ± 39
	Makrofol-b (UAB)	Taula	$< L_D$	587 ± 37	420 ± 28
	Cr-39 (UC)	Taula	381 ± 53	-	688 ± 32

A partir dels resultats dels detectors de Makrofol amb els dos tipus de filtre (*a*: fibra de vidre; *b*: polietilè) representats en funció de la seva distància, *d* (cm), a la paret del mòdul a la que han estat durant l'exposició no s'observa cap influència del gas toró ni dependència respecte la distància a la paret (**Figures 3.32 i 3.33**).

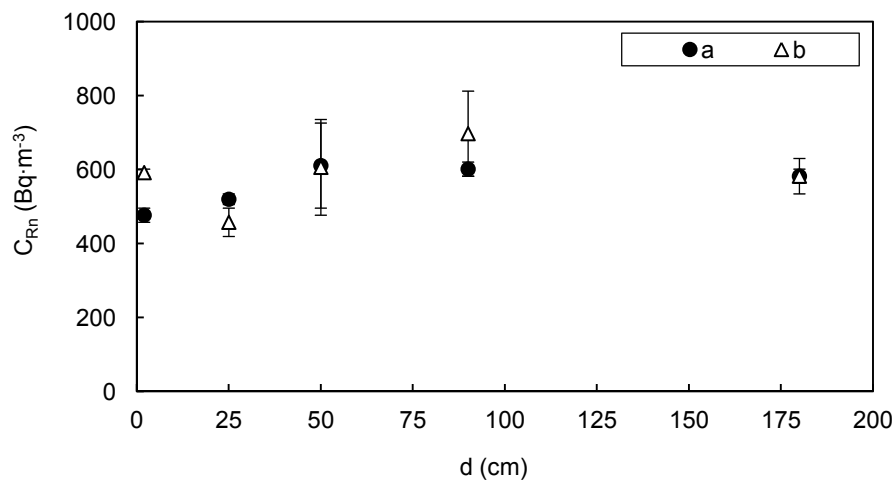


Figura 3.32. Resultats dels detectors de Makrofol amb filtre de fibra de vidre (*a*) i de polietilè (*b*) de la segona exposició representats en funció de la distància a la paret del mòdul.

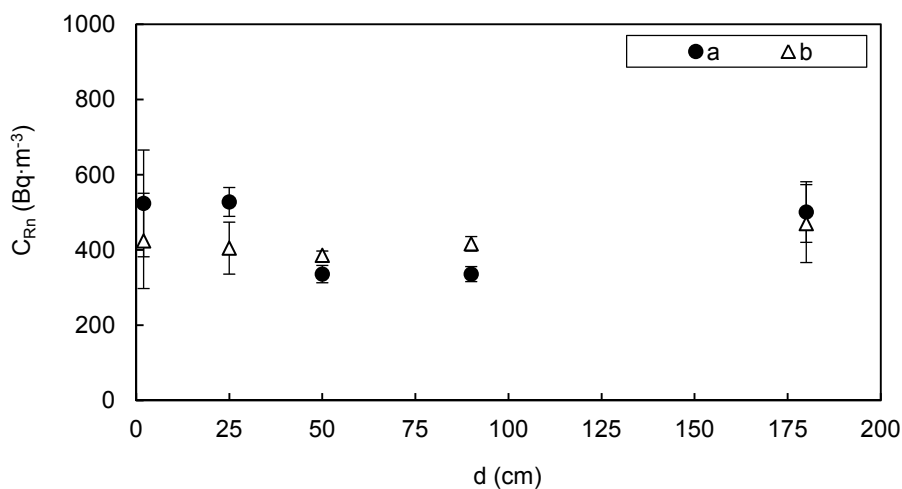


Figura 3.33. Resultats dels detectors de Makrofol amb filtre de fibra de vidre (*a*) i de polietilè (*b*) de la tercera exposició representats en funció de la distància a la paret del mòdul.

3.2.3. Control de qualitat intern: Verificacions i optimitzacions

En el Laboratori de radó de la UFR de la UAB es realitzen diverses verificacions amb el propòsit de dur a terme un control de qualitat intern de la metodologia emprada amb els detectors actius i passius de radó. Les verificacions realitzades són les periòdiques determinacions del fons, el trànsit i el límit de detecció dels detectors de traces nuclears utilitzats, així com també les diferents exposicions que es duen a terme a l'interior de la cambra de radó pròpia. Les optimitzacions realitzades corresponen al processos d'emmagatzematge, revelatge electroquímic i lectura dels detectors de traces nuclears i a les exposicions de radó a l'interior de la cambra de la UAB.

3.2.3.1. El fons, el trànsit i el límit de detecció

El fons d'un detector és el resultat d'una mesura en absència de la magnitud física que aquest és capaç de detectar, en el nostre cas la radiació. En els detectors actius de radó pot ser degut tant al soroll que genera la pròpia electrònica associada com a la contaminació pels descendents de vida mitja llarga que es produeix després d'una exposició a nivells de radó molt elevats. En el cas dels detectors passius, el fons s'obté analitzant un detector que no ha estat utilitzat per mesurar el radó. Concretament, amb els detectors de traces nuclears són les traces degudes a les imperfeccions del propi material i a les partícules ionitzants que han interaccionat amb el detector des de la seva fabricació fins el moment del seu ús. La determinació de la densitat de traces de fons, $\bar{\rho}_f$, es realitza revelant un conjunt de detectors que no han estat exposats. El valor mig obtingut cal restar-lo a totes les densitats de traces obtingudes amb detectors exposats i d'aquesta forma s'obté la densitat de traces neta de cada mesura, ρ_n . Cada vegada que s'adquireix un nou lot de material (Makrofol o LR115) es determina el seu fons inicial i, a mesura que es va utilitzant, es va comprovant si el seu valor experimenta variacions significatives.

Per altra banda, el trànsit d'una mesura es determina mitjançant un conjunt de detectors que acompanyen als detectors que són exposats per tal de controlar la densitat de traces acumulada mentre es realitza el muntatge del detector, el transport fins al punt de mesura, el viatge de retorn al laboratori, el seu desmuntatge, l'emmagatzematge previ a l'anàlisi i la preparació del seu revelatge. Quan el valor mig de la densitat de traces dels detectors de trànsit, $\bar{\rho}_t$, és superior a $\bar{\rho}_f$, aleshores s'utilitza $\bar{\rho}_t$ per obtenir la densitat de traces neta de cada mesura, ρ_n . En aquest cas no existeix un únic valor ben determinat sinó que cada mesura té un trànsit diferent que varia en funció de les característiques de cada muntatge i, sobretot, de cada desplaçament.

El límit inferior de detecció, L_D , d'un sistema de mesura és la lectura mínima induïda per la magnitud física capaç d'ésser mesurada pel sistema (Currie, 1999a) i es pot calcular a partir de l'expressió simplificada (Currie, 1999b):

$$L_D = 4.26 \cdot \sigma_0 \quad (3.17)$$

on σ_0 és la desviació estàndard del fons, ja que es compleixen les condicions d'aplicabilitat d'aquesta relació (acceptant la hipòtesis nul·la, tenint una densitat de traces de fons ben determinada, amb una distribució normal de valors i una desviació estàndard constant, etc). Quan el nombre de detectors de trànsit és prou gran com perquè es compleixin aquestes condicions, tal i com passa en els calibratges i les intercomparacions, i $\bar{\rho}_t > \bar{\rho}_f$, aleshores es pot determinar L_D a partir de la desviació estàndard del trànsit, σ_t .

Detectors de Makrofol

En els últims 8 anys es fan 5 comandes diferents de discs de Makrofol, que varien entre les 500 i les 1500 unitats cadascuna. Al llarg d'aquest temps es determina el fons en un total de 20 ocasions i s'observa que aquest no experimenta increments significatius (**Figura 3.34**). Això posa de manifest que el mètode d'emmagatzematge del material és adequat (a l'interior de bosses on es fa el buit i a dins la nevera). Els valors mitjos de la densitat de traces de fons de cada comanda es mostren a la **Taula 3.7** on s'observa que coincideixen dins els rangs d'incertesa. El límit de detecció dels detectors de Makrofol és de $16 \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}$, de manera que, per exposicions d'entre un i sis mesos de durada, la C_{Rn} mínima que es pot detectar va des de $33 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ a $6 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivament.

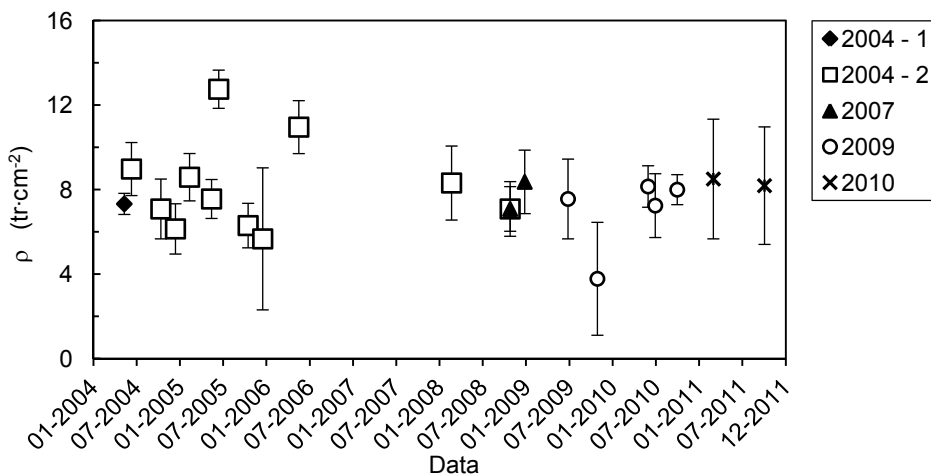


Figura 3.34. Valors de la densitat de traces de fons en les diferents comandes de detectors de Makrofol.

Taula 3.7. Valors mitjos de la densitat de traces de fons a les cinc últimes comandes de Makrofol.

Any comanda	$\bar{\rho}_0$ (tr·cm ⁻²)
2004 - 1	7.3 ± 0.5
2004 - 2	8.2 ± 0.4
2007	7.7 ± 1.1
2009	7.9 ± 0.5
2010	8.3 ± 1.8

Detectors de LR115

De LR115 se'n fa una comanda l'any 2006 i a partir de 20 mesures s'obté una densitat de traces de fons de $(38 \pm 2) \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}$. Al llarg dels anys es determina 39 vegades la densitat de traces de trànsit, es comprova que el valor mig obtingut, $(38 \pm 6) \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}$, coincideix amb el

valor del fons i que no experimenta cap increment significatiu. El límit de detecció dels detectors de LR115 és de $185 \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}$ i, per tant, per exposicions entre dues i vuit setmanes la concentració mínima que es pot detectar va des de $0.64 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ a $0.16 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivament.

Detectors actius de radó

A la intercomparació de detectors actius de l'any 2004 organitzada per l'INTE es determina el fons dels equips participants amb una exposició a l'interior de la cambra de radó (Apartat 3.2.2.1). El valor de fons obtingut pel PRASSI és $(1.0 \pm 0.8) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Posteriorment es realitzen noves comparacions del fons de tots els monitors actius que es van adquirir, seguint les instruccions dels seus manuals. Aquestes es porten a terme dins els laboratoris de la UFR de la UAB. Lo ideal és mesurar aire lliure de radó, com aire envellit, nitrogen o, menys preferible, aire exterior durant un mínim de 8 hores. A les **Figures 3.35 i 3.36** es presenten els resultats dels monitors actius disponibles el juny de 2011 mesurant simultàniament i en continu, amb temps d'integració de 10 minuts, durant 4 dies l'aire d'un laboratori ben ventilat. Per la majoria d'equips el valor mig de la C_{Rn} obtingut és inferior als $10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, a excepció del monitor ATMOS que presenta el valor de fons més elevat i unes fluctuacions més grans (**Figura 3.35 i Taula 3.8**). Aquest valor es resta al resultat final de les mesures realitzades amb el monitor ATMOS, quan els nivells de radó obtingut és inferior als $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Les sondes Clippertons són els que presenten els valors de fons més elevats, tal i com s'observa a la **Taula 3.8**. Les mesures es realitzen a l'interior de la cambra de radó de la UAB on es reproduïxen les mateixes condicions de foscor del sòl. Cal recordar que aquests equips estan dissenyats per mesurar concentracions de radó en el sòl, que són de l'ordre dels $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$.

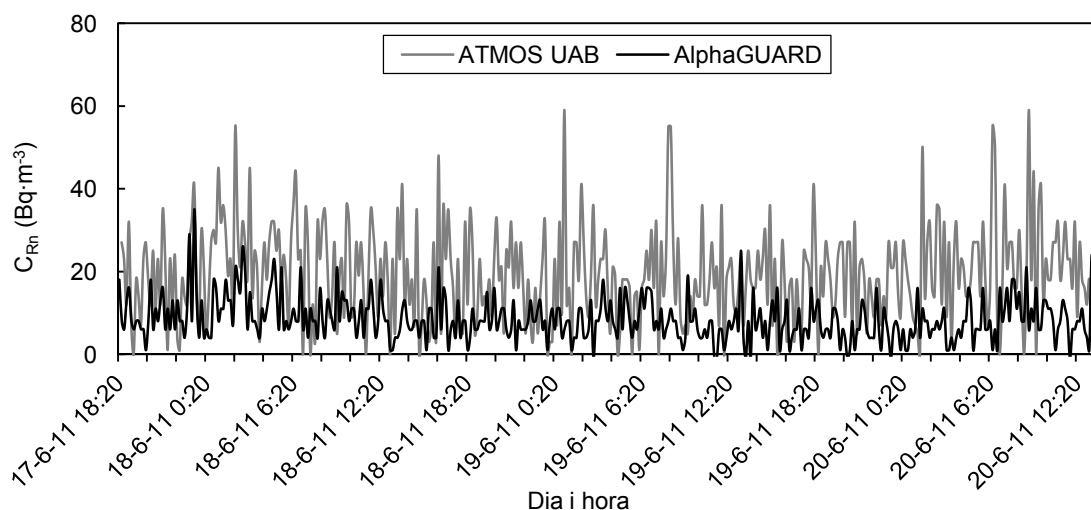


Figura 3.35. Resultats de tots els monitors actius ATMOS i AlphaGUARD mesurant simultàniament i en continu durant 4 dies l'aire d'una habitació amb baixos nivells de radó.

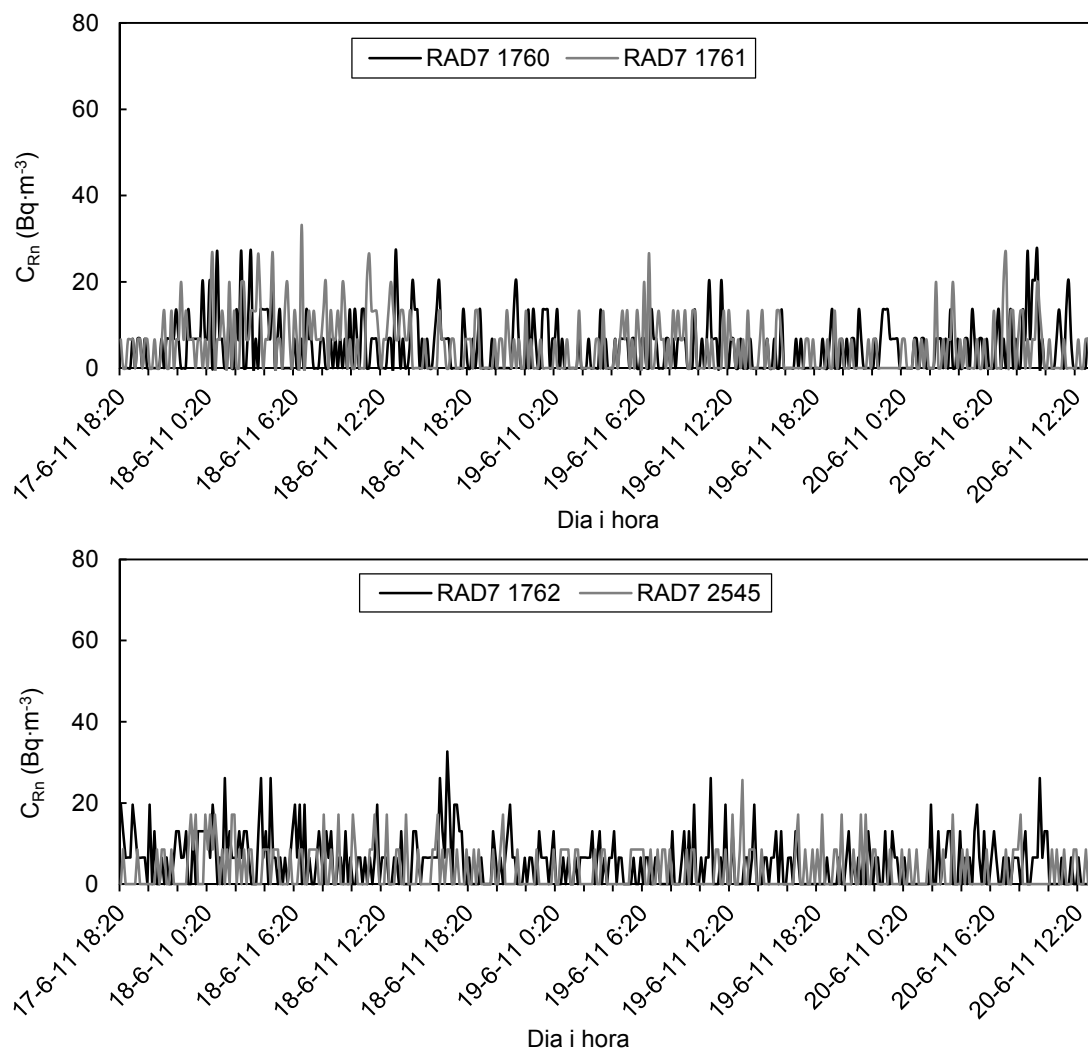


Figura 3.36. Resultats de tots els monitors RAD7 disponibles el juny de 2011 mesurant simultàniament i en continu durant 4 dies l'aire d'una habitació amb baixos nivells de radó.

Taula 3.8. Valors mitjos de la C_{Rn} de fons dels detectors actius.

Detector	C_{Rn} ($Bq \cdot m^{-3}$)
PRASSI	1.0 ± 0.8
ATMOS	19.5 ± 3.9
AlphaGUARD	8.5 ± 0.4
RAD7 1760	4.7 ± 0.4
RAD7 1761	5.0 ± 0.4
RAD7 1762	5.4 ± 0.4
RAD7 2545	3.4 ± 0.4
Clippertons	$(0.6 \pm 0.3) \cdot 10^3$

Detector de radiació gamma ambiental

El fons del detector de radiació gamma ambiental, D_b , es determina mesurant la taxa de dosi on la contribució de la radiació gamma terrestre és pràcticament negligible. S'escull fer-ho a una altitud de 0.5 km sobre el nivell del mar i a una distància de la costa on la profunditat del mar és d'uns 0.5 km. Al resultat de la mesura se li resta la taxa de dosi dels

raigs còsmics a la alçada de la mesura, $\dot{D}_c(0.5)$, obtinguda a partir de l'expressió (2.1). El valor obtingut de \dot{D}_c és (27 ± 6) nGy·h⁻¹.

3.2.3.2. Exposicions a la cambra de radó de la UAB

A l'interior de la cambra de radó de la UFR de la UAB es realitzen diverses exposicions que es poden classificar en tres grups: (i) exposicions per caracteritzar les fonts de radó de la cambra, (ii) exposicions per comparar les respostes d'equips actius, (iii) exposicions per preparar detectors de control i (iv) exposicions per analitzar membranes.

Exposicions per caracteritzar les fonts de radó de la cambra

La font de radó que s'utilitza a la cambra de la UAB són unes mostres de pechblenda, un dels principals minerals que conté urani. Aquesta pechblenda està triturada, homogeneïtzada i guardada a l'interior d'uns pots de plàstic, amb 100 g de mineral cadascun, per poder disposar de diferents fonts idèntiques. Per caracteritzar aquestes fonts, entre els anys 2006 i 2007 es realitzen una sèrie de mesures en continu de la C_{Rn} a l'interior de la cambra mitjançant el monitor RAD7 (1761), variant el nombre de pots, des d'una fins a cinc unitats (**Figura 3.37**). Després de cada exposició es procedeix a ventilar correctament tant el monitor com l'interior de la cambra durant el temps necessari perquè la C_{Rn} correspongui amb el valor de fons, que ha estat mesurat prèviament a l'exposició. Els resultats d'aquestes mesures permeten tenir una idea del valor de l'exposició que generen les diferents fonts de radó de cara a la seva utilització en futures exposicions de detectors actius i passius amb aquesta mateixa cambra i aquestes fonts.

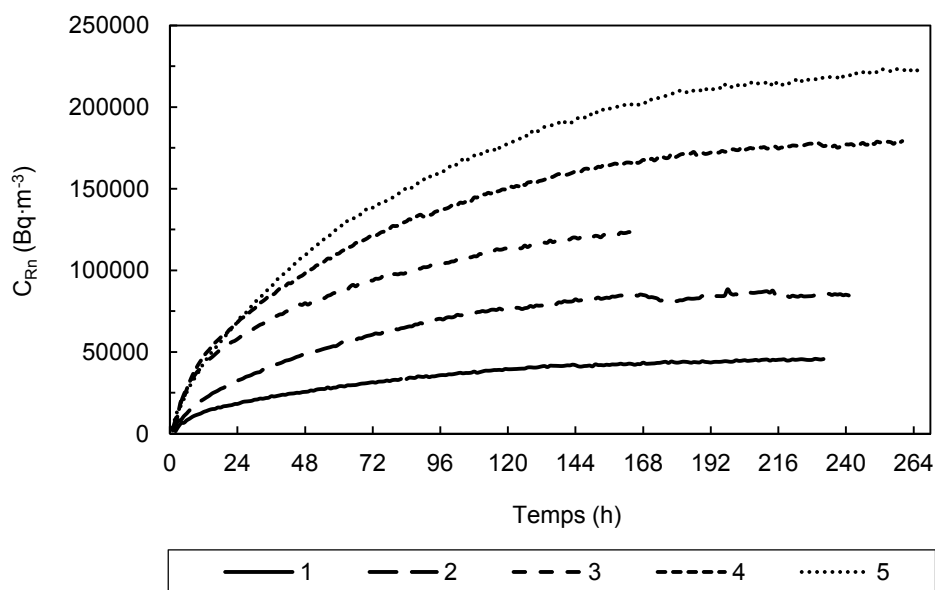


Figura 3.37. Evolucions temporals de la C_{Rn} a l'interior de la cambra d'exposició de la UAB utilitzant diferent nombre de pots de pechblenda com a fonts de radó, entre una i cinc unitats, i mesurades amb el monitor RAD7 (1761).

Exposicions per comparar les respostes de detectors actius

Aquesta exposició permet comparar la resposta de dos o més detectors actius a una o diverses concentracions de radó conegudes per veure si estan funcionant correctament i si les seves respostes coincideixen. Degut a les dimensions pròpies de la cambra de radó i dels detectors, els equips més petits poden estar en el seu interior mentre que els més voluminosos s'exposen connectats mitjançant tubs de plàstic formant un circuit tancat d'aire. Entre els anys 2004-2011 es realitzen 17 exposicions d'aquest tipus amb els diferents detectors actius que es van adquirint i que s'han descrit anteriorment. Les 7 primeres exposicions serveixen per comparar la resposta del monitor PRASSI amb les respostes de les sondes Clipperton i les 10 següents per comparar les respostes dels monitors RAD7 entre ells i amb les sondes Clipperton. Per no estendre aquest treball de forma excessiva, no es presenten els resultats de totes aquestes exposicions, ja que a l'apartat 3.3.3 es presenten els resultats obtinguts a una cambra de radó de referència. Només com a exemple es presenten els resultats d'una exposició on es compara la resposta de dos monitors RAD7 i una sonda Clipperton, amb temps d'integració d'una hora, (**Figura 3.38**) i s'observa un bon acord.

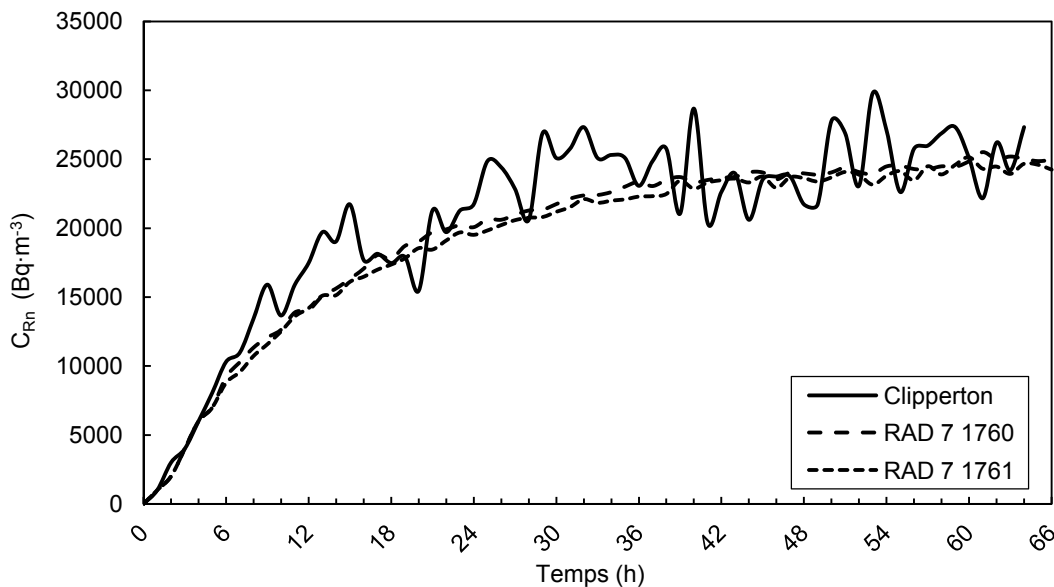


Figura 3.38. Evolució temporal de la C_{Rn} a l'interior de la cambra d'exposició de la UAB, utilitzant un pots de pechblenda com a font de radó, mesurada amb tres monitors RAD7 i una sonda Clipperton.

Exposicions per preparar detectors passius de control

Aquesta exposició serveix per disposar en un breu interval de temps d'un determinat nombre de detectors passius exposats a unes condicions conegudes de radó i que se'ls anomena detectors de control. Aquests detectors serveixen per: (i) controlar la reproductibilitat dels successius revelatges que es porten a terme en les mateixes condicions i (ii) estudiar la influència de la variació de les condicions de revelatge sobre la resposta dels detectors. Entre els anys 2004-2011 es realitzen 29 exposicions d'aquest tipus, 13 de les quals dedicades als detectors de LR115 i 16 a detectors de Makrofol. A cada exposició el nombre de detectors del mateix tipus varia entre 10 i 100 unitats, en funció

de les dimensions d'aquests i de si es realitzen exposicions de diferents tipus de detectors simultàniament o no.

L'estudi de la reproductibilitat es realitza introduint a cada revelatge un mínim de dos detectors de control junt amb la resta de detectors, la majoria dels quals han estat exposats en unes condicions desconegudes. El valor mig de la C_{Rn} mesurada amb aquests detectors es pot representar en un gràfic que serveix per controlar la variació dels resultats obtinguts (**Figura 3.39**).

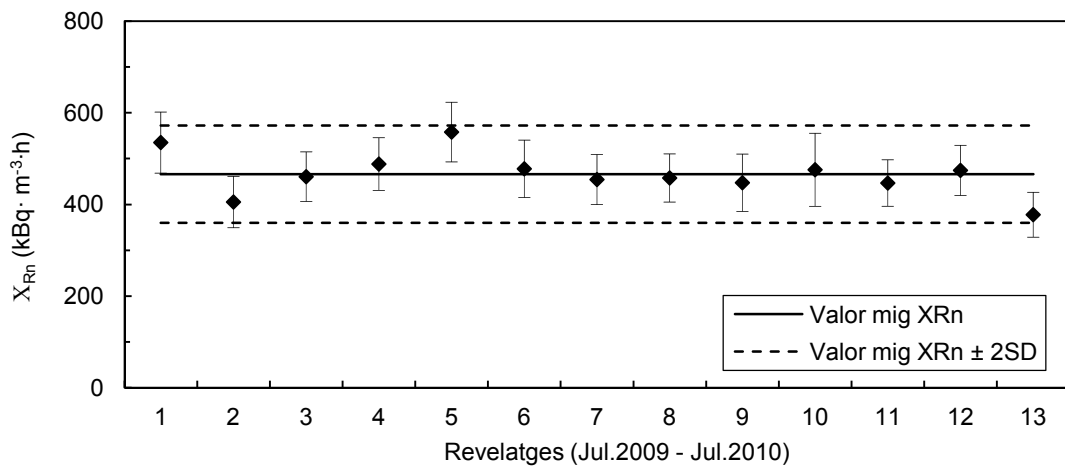


Figura 3.39. Gràfic de control dels detectors de Makrofol basat en el valor mig de la C_{Rn} corresponent als detectors de control utilitzats en els revelatges entre el juliol del 2009 i el juliol del 2010. Les barres d'incertesa corresponen a dues desviacions estàndard del valor mig dels detectors de control de cada revelatge.

Una altra eina estadística més utilitzada per detectar valors anòmals és el gràfic de control basat en el coeficient de variació (**Figura 3.40**). El coeficient de variació (**CV**) és el quocient entre la desviació estàndard i la mitjana aritmètica i es pot donar en tant per cent. Els gràfics basats en el coeficient de variació s'utilitzen quan la precisió esperada és funció de la mesura, com passa en la mesura de la C_{Rn} . Es fixa un parell de límits, anomenats límit d'avís i límit de control, tals que la probabilitat de trobar un nivell de discrepància més gran entre un parell de detectors de control sigui del 5 % i de l'1 %, respectivament. Un mètode per obtenir els percentils de la distribució dels **CVs** és aplicar el test khi-quadrat (χ^2), aproximat per mesures duplicades com:

$$\chi^2 \approx \left(2 + \frac{2}{CV^2} \right) \left(\frac{CV_n^2}{2 + CV_n^2} \right) \quad (3.18)$$

on CV_n és el coeficient de variació observat del parell de detectors i **CV** és el coeficient de variació de control. A les taules de χ^2 s'obté que, per un grau de llibertat, amb un 5 % i un 1 % de probabilitat s'excedeixen uns χ^2 de 3.84 i 6.63, respectivament (CSN, 2010).

A partir dels resultats dels detectors de calibratge i de les intercomparacions a cambres de radó de referència s'obté el valor del coeficient de variació de control (**CV**). Aquest coeficient varia entre el 5 % i el 15 %, depenent de la densitat de traces registrades, i el

seu valor mig és del 10 %. Al llarg dels últims quatre anys es preparen uns 400 detectors de control de Makrofol que permeten controlar un centenar de revelatges. En cap ocasió es supera el límit d'avís però en alguna ocasió es comprova que els detectors de control no reproduïen el valor mig de l'exposició de radó, tal i com s'observa amb l'últim revelatge de la **Figura 3.39**. Aquests gràfics permeten identificar aquells revelatges en els que hi ha hagut algun tipus de problema que pot afectar els resultats de la resta de detectors revelats en les mateixes condicions i poder aplicar un determinat factor de correcció.

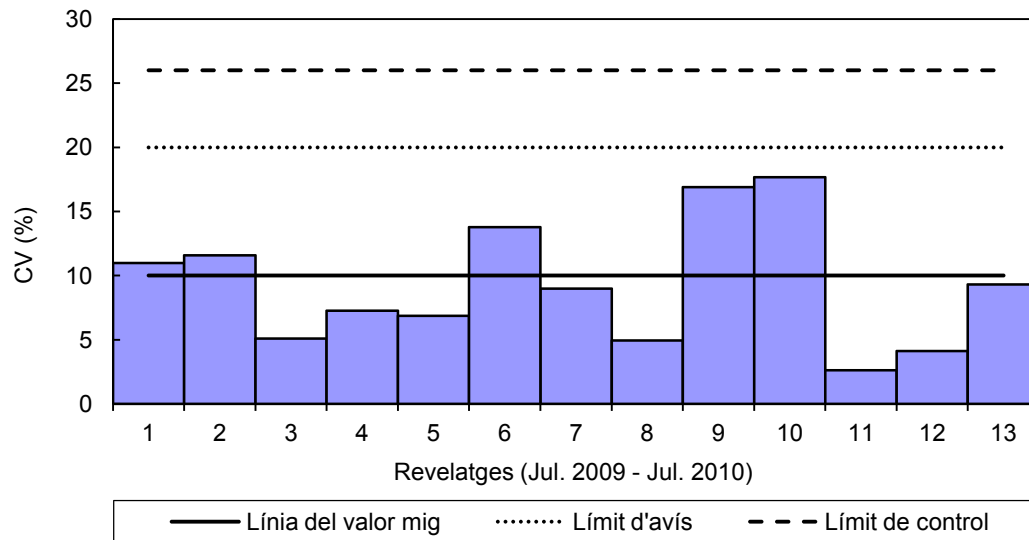


Figura 3.40. Gràfic de control dels detectors de Makrofol basat en el coeficient de variació corresponent als detectors de control utilitzats en els revelatges entre el juliol del 2009 i el juliol del 2010.

Exposicions per analitzar membranes de polietilè

Les membranes de polietilè han estat àmpliament utilitzades per evitar la influència de la humitat sobre els detectors passius de radó. Per exemple, Azimi-Garakani et al. (1988) va desenvolupar un detector segellat en una bossa de polietilè de 40 μm de gruix; la HPA l'any 2003 va adoptar el mètode de segellar els seus detectors en bosses de polietilè de 200 μm de gruix per mesures en ambients humits (Miles et al., 2009) i Tommasino et al. (2009) també va envoltar els seus detectors amb unes bosses de polietilè caracteritzades per una gran permeabilitat al radó i una petita permeabilitat al vapor d'aigua.

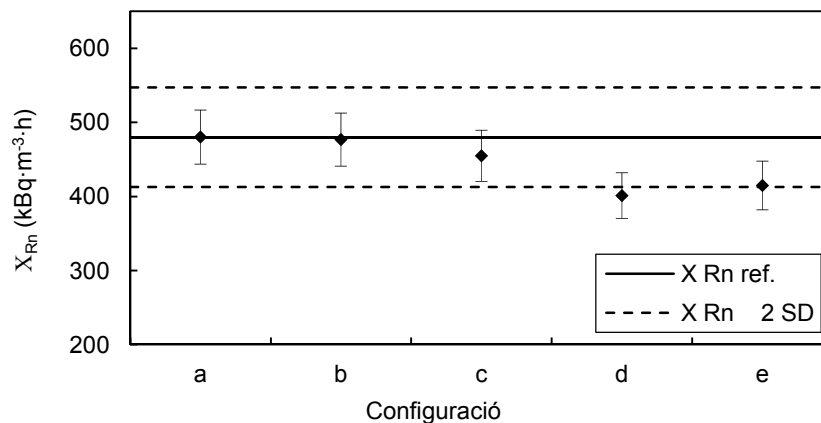
Entre els anys 2006-2011 la UFR realitza estudis per optimitzar la resposta dels detectors de Makrofol en ambients humits. Les exposicions a l'interior de la cambra de radó de la UFR permeten veure la seva resposta dels detectors passius amb diferents configuracions de filtres i bosses de polietilè en condicions normals de laboratori. Inicialment s'exposen les cinc configuracions que apareixen a la **Taula 3.8**. Per tenir mesures duplicades d'una mateixa configuració s'utilitzen detectors dobles (**Figura 3.41**) i per tenir millor estadística, es munten quatre detectors dobles de cada tipus de configuració. L'exposició té una durada de 5 dies, amb les condicions de temperatura i humitat habituals d'un laboratori, i com que no es disposa de detector actiu de referència es comparen els resultats amb el de la configuració amb filtre de fibra de vidre (a).

Taula 3.8. Característiques de les cinc configuracions analitzades inicialment per evitar la humitat.

Codi configuració	Filtre	Gruix (μm)	Bossa	Gruix (μm)
a	Fibra de vidre	350 ± 20	-	-
b	Polietilè	37 ± 2	-	-
c	Fibra de vidre + Polietilè	387 ± 20	-	-
d	Fibra de vidre	350 ± 20	Polietilè	62 ± 2
e	-	-	Polietilè	62 ± 2

**Figura 3.41.** Les cinc configuracions de detectors de Makrofol analitzades inicialment per evitar la humitat (d'esquerra a dreta: a, b, c, d i e).

A la **Figura 3.42** es pot observar que totes les configuracions presenten una resposta similar, tenint en compte les barres d'incertesa. Tot i això, la configuració *b* és la que mostra un valor mig més proper al valor de referència i, per tant, es selecciona aquesta configuració per participar, juntament amb la configuració *a*, a la intercomparació que es descriu a l'apartat 3.3.1.

**Figura 3.42.** Exposició de radó mesurada amb cadascuna de les cinc configuracions de detectors de Makrofol exposades a la cambra de radó de la UAB.

Posteriorment es fa un estudi més detallat i s'exposen les configuracions que apareixen a la **Taula 3.9** i la **Figura 3.43**. Els tres nous tipus de membrana escollits també estan fabricats de polietilè, però són de més fàcil adquisició en el mercat. Els seus noms comercials són Tyvek, Treseses i Zipdar, tenen gruixos i formes de tancaments diferents i es poden comprar en paquets de bosses de diferents mides. Això facilita la seva utilització directa en forma de bossa i poder-les retallar a la mida desitjada en forma de filtres per les cambres de difusió dels detectors passius.

Per tenir una millor estadística, es munten cinc detectors dobles de cada tipus de configuració. L'exposició es porta a terme a l'interior de la cambra de radó amb les condicions de temperatura i humitat habituals del laboratori. El temps d'exposició és $t_0 = 22$ h i la C_{Rn} es mesura de forma continua amb el monitor AlphaGUARD. L'evolució temporal de C_{Rn} es mostra a la **Figura 3.47** i l'exposició total de radó és $X_{Rn} = (901 \pm 32)$ kBq·m⁻³·h. Un cop finalitzada l'exposició es retiren les làmines de Makrofol de l'interior de les cambres de difusió, per tal d'observar l'efecte de no tenir en compte el temps de retard en l'entrada del radó per difusió a través de la membrana.

Taula 3.9. Característiques de les configuracions de filtres i bosses utilitzats a la segona exposició de detectors de Makrofol a la cambra de radó de la UAB per l'anàlisi de membranes de polietilè per evitar la humitat.

Codi	Configuració	Gruix filtre (µm)	Bossa			
			Gruix (µm)	Color/textura	Dimensions (cm x cm)	Tipus de tancament
a	Filtre fibra de vidre	350 ± 20	-	-	-	-
b	Filtre polietilè	37 ± 2	-	-	-	-
B	Filtre fibra de vidre + Bossa Tyvek	350 ± 20	115 ± 6	Blanc opac / fibrosa	13.3 x 23.0 25.5 x 38.0	Adhesiu
C	Filtre fibra de vidre + Bossa Treseses	350 ± 20	33 ± 2	Transparent / llisa	6.5 x 13.5 15.5 x 31.5 29.0 x 42.5	Manual
D	Filtre fibra de vidre + Bossa Zipdar	350 ± 20	51 ± 2	Transparent / llisa	17.8 x 20.5 26.7 x 28.0	Zip
f	Filtre de Tyvek	115 ± 6	-	-	-	-
g	Filtre de Treseses	33 ± 2	-	-	-	-
h	Filtres de Zipdar	51 ± 2	-	-	-	-



Figura 3.43. Detectors de Makrofol amb les configuracions, d'esquerra a dreta, a (sense bossa), C (bossa Treseses), D (bossa Zipdar) i B (bossa Tyvek).

Els resultats de les configuracions amb filtres de polietilè (b, f, g i h) no presenten diferències significatives respecte el de la configuració amb filtre de fibra de vidre (a) ni respecte el valor de referència de la C_{Rn} (**Figura 3.44**). Per les configuracions B, C i D es pot determinar el temps τ , a partir de l'expressió (3.9). Aquest temps permet obtenir el factor de correcció específic d'aquesta exposició $\frac{t_0}{(t_0 - \tau)}$, degut al fet d'obrir les cambres

de difusió quan s'acaba l'exposició. A partir de l'expressió (3.6) es determina el temps de retard degut a la difusió del radó a través de la membrana, τ_M , i a partir dels dos temps s'obté el factors corrector τ_M / τ , degut a que les concentracions de radó finals dins i fora de la cambra de difusió sempre són diferents. Finalment s'obté el factor corrector total, f_T ,

d'aquesta exposició, que és el producte dels dos factors anteriors. Els valors de tots aquests paràmetres es mostren a la **Taula 3.10**.

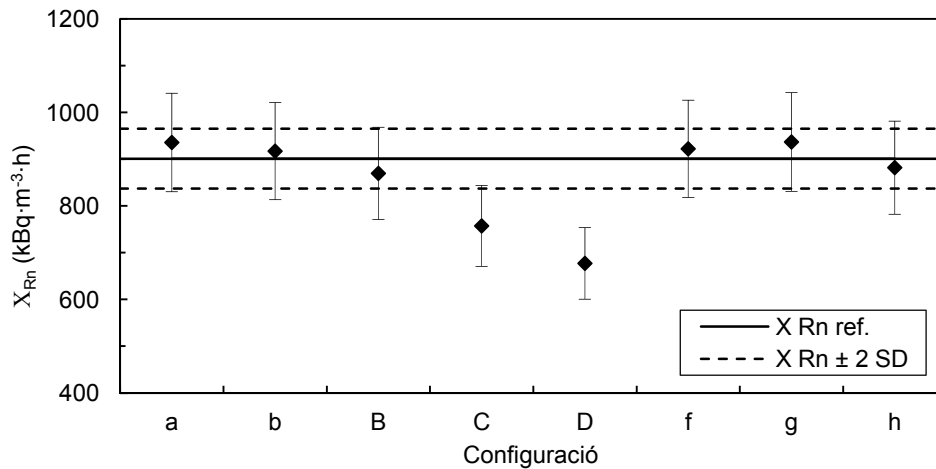


Figura 3.44. Exposició de radó mesurada amb cadascuna de les configuracions de detectors de Makrofol exposades a la cambra de radó de la UAB per l'anàlisi de membranes de polietilè per evitar la humitat.

Taula 3.10. Temps τ , temps de retard τ_M i factors correctors per les tres configuracions de bossa de polietilè seleccionades per evitar la humitat.

Codi	τ (h)	τ_M (h)	τ_M / τ	$t_0/(t_0 - \tau)$	f_T
B	0.7 ± 0.5	0.7 ± 0.5	1.01 ± 0.83	1.03 ± 0.05	1.04 ± 0.86
C	3.1 ± 0.5	3.1 ± 0.6	1.02 ± 0.18	1.16 ± 0.06	1.19 ± 0.22
D	4.8 ± 0.5	5.0 ± 0.6	1.04 ± 0.12	1.28 ± 0.07	1.33 ± 0.17

De les tres configuracions formades per bosses (B, C i D), la D és la que presenta la diferència més gran respecte el valor de referència. No és la bossa que té el gruix més gran però sí la que suposa un temps de retard més gran, (5.0 ± 0.6) h, i la que té els factors de correcció més grans. El factor $\frac{t_0}{(t_0 - \tau)}$ és significatiu degut a la curta durada de

l'exposició. A mesura que augmenta el temps d'exposició t_0 aquest factor corrector disminueix i, aleshores, el fet de no tenir en compte el temps entre la finalització de l'exposició i l'obertura de la bossa va perdent importància. Per la configuració D, perquè aquest factor corrector sigui inferior al 10 % el temps d'exposició ha de ser superior a les 53 hores. Per l'exposició mínima (de 4 dies) realitzada en un ambient humit real, apartat 3.3.4.3, aquest factor seria del 5 %.

3.2.3.3. Optimitzacions

Les principals optimitzacions que es porten a terme al llarg dels darrers anys sobre els sistemes de mesura de la C_{Rn} estan relacionades amb els processos d'emmagatzematge, transport, revelatge i lectura dels detectors passius de radó, així com també a la seguretat mentre es duen a terme les exposicions a la cambra de radó de la UAB.

En primer lloc, l'emmagatzematge dels detectors passius es veu millorat amb l'adquisició d'una màquina de fer el vuit a l'interior d'unes bosses de polietilè. Aquestes bosses permeten guardar tan els detectors nous com els ja preparats per mesurar evitant que el fons o el trànsit no es vegi incrementat mentre no s'utilitzen o mentre no arriben al punt de mesura, respectivament. En segon lloc, per la lectura de detectors de Makrofol amb la càmera CCD, es determina un interval de nivells de grisos pel qual les variacions d'intensitat de llum no afecten al nombre de traces observat. Això representa tenir controlat un possible factor d'incertesa sobre els resultats de les mesures. Aquestes dues primeres optimitzacions queden recollides de forma detallada a Moreno (2006).

També s'elaboren dues macros pel programa ImageJ d'anàlisi d'imatges que permeten automatitzar tots els passos del tractament de la imatge captada per la cambra CCD i agilitzar significativament el procés d'anàlisi dels dos tipus de detectors de traces nuclears utilitzats (Makrofol i LR115). Si l'anàlisi dels 20 detectors de Makrofol d'un revelatge utilitzant el procés estàndard (Amgarou, 2002) comporta uns 15 minuts de temps, amb la corresponent macro el temps d'anàlisi no supera el minut.

La recent adquisició d'una nova font d'alimentació, construïda expressament amb les característiques necessàries per dur a terme els revelatges electroquímics dels detectors de Makrofol en les condicions del nostre laboratori (Conesa et al., 2011), representa l'optimització més important. En primer lloc perquè assegura la continuïtat en l'elaboració de nous revelatges en el cas que la font antiga s'acabi espatllant (en els últims revelats ja presentava un comportament bastant inestable) i, en segon lloc, perquè els resultats dels primers revelats amb la nova font d'alimentació indiquen que el coeficient de variació (CV) disminueix fins al 9 % i els gràfics de control corresponents als detectors de controls presenten menys dispersió que amb la font antiga (Figures 3.45 i 3.46).

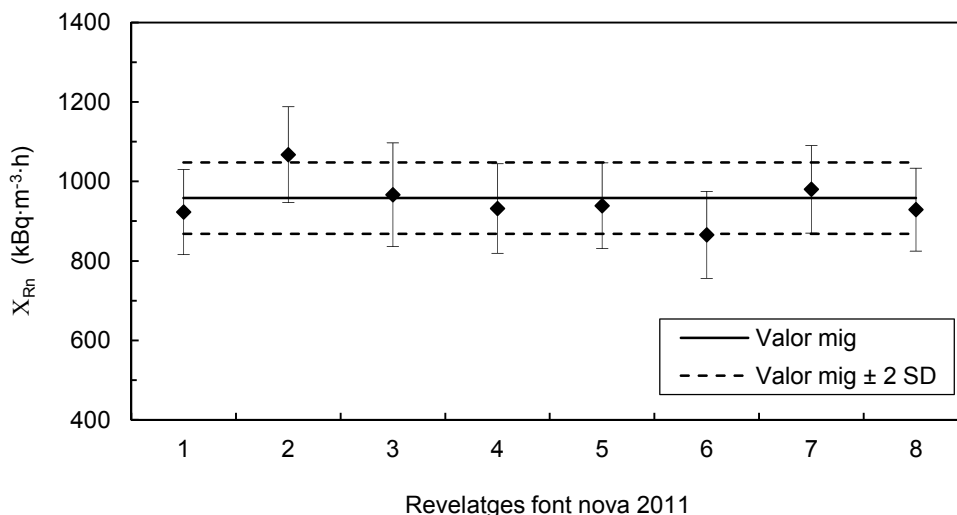


Figura 3.45. Gràfic de control dels detectors de Makrofol basat en el valor mig de la C_{Rn} corresponent als detectors de control utilitzats en els revelatges amb la nova font d'alimentació. Les barres d'incertesa corresponen a dues desviacions estàndard del valor mig dels detectors de control de cada revelatge.

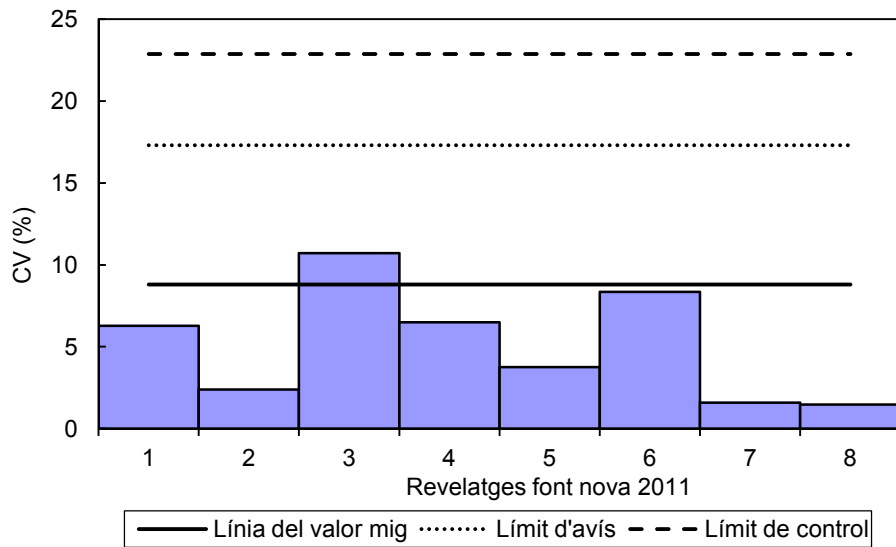


Figura 3.46. Gràfic de control dels detectors de Makrofol basat en el coeficient de variació corresponent als detectors de control utilitzats en els revelatges amb la nova font d'alimentació.

Finalment, les condicions de treball en què es porten a terme les exposicions a la cambra de radó de la UAB també s'han vist molt millorades gràcies a la introducció d'una campana extractora a l'interior del laboratori. Anteriorment es realitzaven les exposicions en un magatzem extern i més ventilat que el laboratori de radó, però amb aquesta campana es pot tenir la cambra de radó en el laboratori durant tot el procés d'exposició de detectors. Es comprova que la C_{Rn} de l'aire de l'interior del laboratori no experimenta cap augment significatiu, ni tan sols en el moment de finalitzar les exposicions, ja que el volum d'aire de l'interior de la cambra amb nivells de radó elevats és ràpidament eliminat per l'acció de l'extractor de gasos que l'envia directament a l'exterior de l'edifici (**Figura 3.47**).

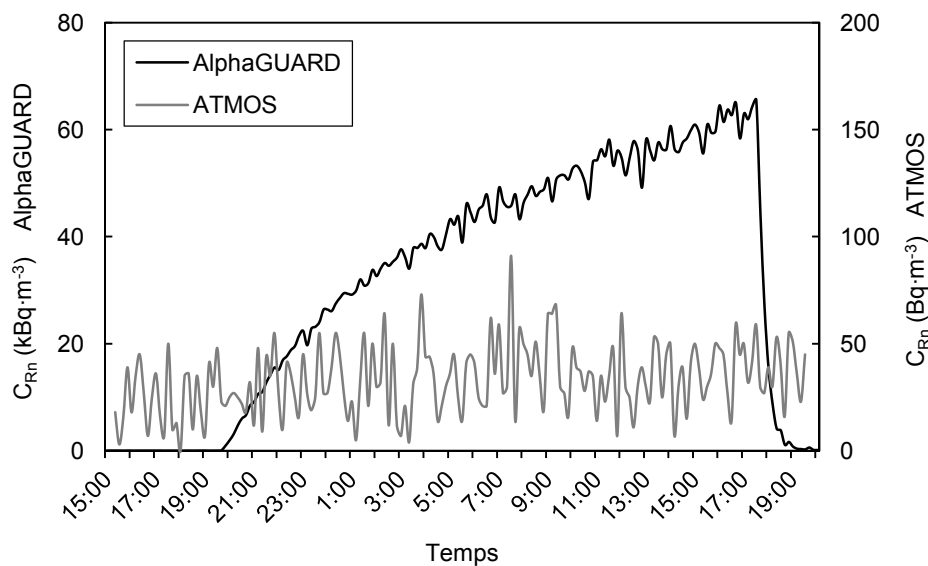


Figura 3.47. Evolució temporal de la C_{Rn} a l'interior de la cambra de radó de la UAB, mesurada amb el monitor AlphaGUARD durant una exposició de detectors de Makrofol de control, i la C_{Rn} a l'exterior de la cambra, mesurada amb el monitor ATMOS situat a fora de la campana extractora i agafant l'aire del punt on es situa el personal de laboratori quan manipula la cambra per finalitzar l'exposició.

3.3. Exposicions en condicions extremes

En aquest apartat es descriuen els estudis que es porten a terme per tal d'analitzar la resposta dels diferents detectors actius i passius de radó quan se'ls exposa a unes condicions de mesura molt diferents de les condicions en què han estat calibrats. Concretament pels detectors passius s'utilitzen les diferents membranes de polietilè analitzades prèviament en condicions normals per veure la seva eficàcia en ambients més humits.

3.3.1. Intercomparació a l'INTE

La intercomparació de sistemes de mesura integradors de la C_{Rn} a l'INTE de l'any 2005 permet analitzar la resposta dels detectors de Makrofol sota diferents condicions ambientals i fer una comparació simultània de dos tipus de filtre (fibra de vidre i polietilè). A la **Figura 3.48** apareixen els resultats obtinguts amb els detectors de Makrofol amb els dos tipus de filtres: (a) fibra de vidre i (b) polietilè; a cadascuna de les exposicions respecte els valors de referència. A la **Taula 3.11** apareixen els factors de correcció que cal aplicar al factor de calibratge per cadascuna de les condicions ambientals de temperatura i humitat relativa. Un augment de la humitat no sembla produir cap efecte significatiu sobre la resposta del detector, segurament degut a la curta durada de l'exposició, en canvi, un augment de la temperatura sí que sembla afectar la resposta ja que, amb els dos tipus de filtre, la sensibilitat del detector disminueix de l'ordre del 20 %. Tot i això, la dispersió dels resultats és tan gran que les incerteses dels factors correctors són del 15 % i, aleshores, aquesta influència queda emmascarada.

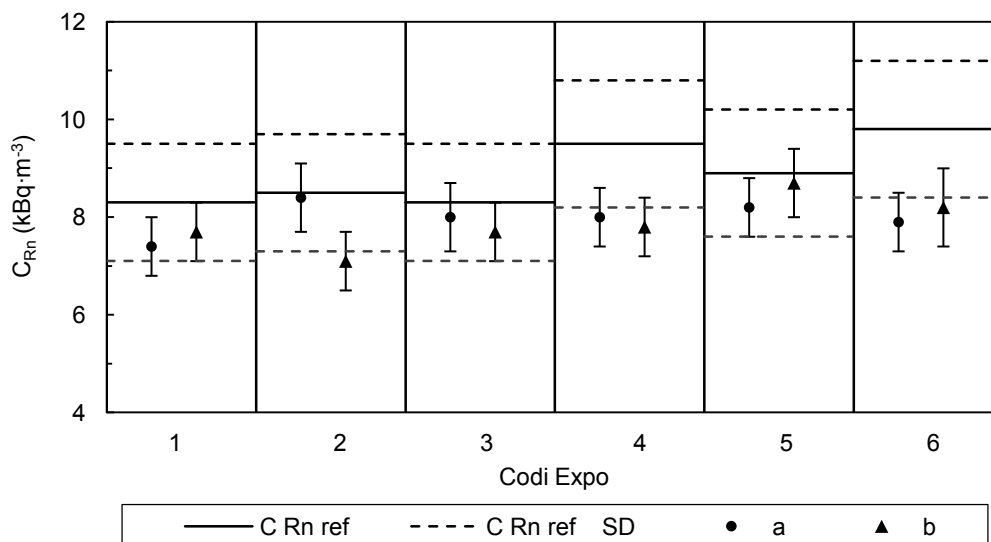


Figura 3.48. Valors de la C_{Rn} mesurats amb les configuracions a i b dels detectors de Makrofol per cadascuna de les exposicions realitzades a la cambra de radó de l'INTE amb diferents condicions ambientals.

Taula 3.11. *Valors de la temperatura, T , la humitat relativa (Hr) i el factor de correcció de les configuracions a i b dels detectors de Makrofol per les diferents exposicions realitzades en la intercomparació de detectors passius de l'INTE.*

Codi expo	T (°C)	Hr (%)	Factor corrector	
			Filtre fibra de vidre	Filtre de polietilè
1	20	45	1.12 ± 0.17	1.07 ± 0.17
2	20	30	1.02 ± 0.15	1.21 ± 0.16
3	10	45	1.04 ± 0.16	1.08 ± 0.17
4	30	45	1.19 ± 0.16	1.21 ± 0.16
5	20	80	1.09 ± 0.15	1.02 ± 0.18
6	30	80	1.23 ± 0.18	1.19 ± 0.17

3.3.2. Exposicions a les estacions científiques de la Península Antàrtica

Entre els anys 2005-2006 la UFR de la UAB participa en uns estudis experimentals relacionats amb la predicció de terratrèmols a partir de mesures de la C_{Rn} i del camp geomagnètic a l'estació ucraïniana Academician Vernadsky (AV), a la Península Antàrtica (**Figura 3.49**) (Moreno et al., 2012c). S'envia un conjunt de detectors passius de radó (Makrofol) per ser exposats a l'estació AV i al llarg d'un perfil que travessa una zona de falles entre roques volcàniques i plutòniques.

En campanyes anteriors (Ilić et al., 2005; Rusov et al., 2006) la mateixa configuració de detector del KIT d'Alemanya ja havia estat exposada al costat dels detectors de CR-39 del J. Stefan Institute (IJS) de Ljubljana, Eslovènia, però degut a l'efecte de la humitat sobre els detectors de Makrofol no havia estat possible fer la mesura de la C_{Rn} a la superfície del sòl amb aquests detectors. La UFR de la UAB intentar solucionar aquest problema utilitzant filtres de polietilè. Es preparen i posteriorment s'analitzen dos conjunts de 40 detectors, un amb filtres de fibra de vidre i l'altre amb filtres de polietilè. A cada punt de mesura s'instal·len el mateix nombre de detectors de Makrofol dels dos tipus de filtre juntament amb detectors de CR-39 de l'IJS per poder comparar els resultats. La distribució dels detectors la fa el grup del IJS. Un conjunt de 16 detectors s'instal·la a diferents alçades de la superfície del sòl, entre 1 – 7 m, a l'estació AV. Un altre conjunt de 46 detectors es reparteixen a diversos emplaçaments pròxims als punts d'observació tectonominagnètica, al llarg del perfil Barchans-Rasmussen d'11 km de longitud, l – l', que es mostra a la **Figura 3.50**. Els detectors es col·loquen a l'interior d'unes cambres d'acumulació sobre la superfície del sòl. Un tercer conjunt de 6 detectors és exposat a l'interior de les dependències de l'estació AV (Oficina base i Laboratori radó). La resta de detectors són de trànsit. El temps d'exposició de tots els detectors és d'un any. Transcorregut aquest temps els detectors són recollits pel mateix grup de l'IJS. Els detectors de Makrofol són retornats a la UAB pel seu anàlisi dins unes bosses de Climafol segellades juntament amb els detectors de trànsit.



Figura 3.49. Localització de l'estació ucraïniana Academician Vernadsky a la Península Antàrtica ($W 64^{\circ}16'$, $S 65^{\circ}15'$) (Ilić et al., 2005).

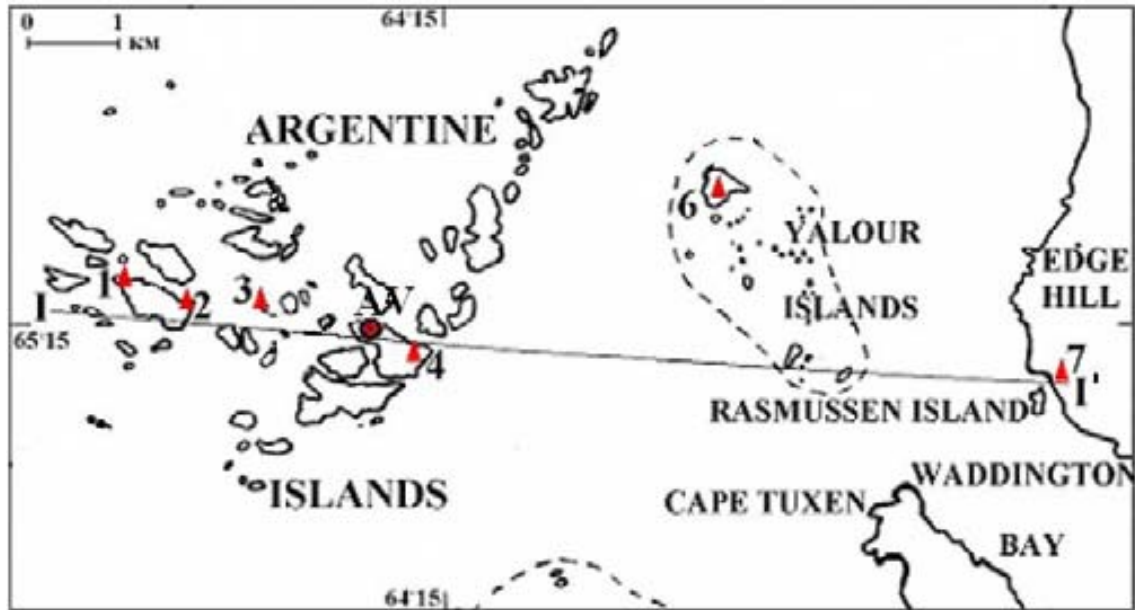


Figura 3.50. Localització dels punts de mesura del radó al llarg del perfil Barchans-Rasmussen, 1 - 7 (Rusov et al., 2006).

Els detectors de Makrofol de trànsit presenten un valor mig de la densitat de traces de $(38 \pm 5) \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}$ i una desviació estàndard, σ , de $11 \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}$, per tant, el L_D resulta ser de $47 \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}$ (segons l'expressió (3.17) de l'apartat 3.2.3.1). Tots els detectors exposats presenten $\rho > L_D$, ja que l'interval de ρ és $[121 - 535] \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}$. Els nivells de radó obtinguts a l'interior de l'Oficina base i el Laboratori radó són $(30 \pm 3) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i $(34 \pm 2) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ respectivament, els quals coincideixen amb la mitja geomètrica mundial $(30 \pm 2) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (UNSCEAR, 2008). Pot resultar curiós que donin uns valors tan elevats, precisament a un terreny que durant bona part de l'any està cobert per una capa de neu que impedeix l'exhalació del radó. Ara bé, depenent de com estiguin construïts els edificis, l'existència d'una barrera natural a l'exterior, pot afavorir l'entrada del radó cap a l'interior dels recintes a través dels seus fonaments. A més a més, també s'ha de tenir en compte que en un clima tan fred, segurament la ventilació dels edificis és baixa, per tal de mantenir la temperatura, fet que també pot afavorir l'acumulació del radó. Aquests resultats no es poden comparar amb els resultats dels detectors de CR-39 que han estat exposats de forma simultània amb els de Makrofol. Pocs mesos després de la recollida dels detectors esdevé la mort del Professor Radomir Ílic de l'IJS, investigador principal d'aquest projecte i únic contacte amb la UAB, provocant que es perdi la pista d'aquests detectors i que finalment s'hagin de donar per perduts.

En analitzar els detectors de Makrofol exposats a l'exterior i a l'interior de les cambres d'acumulació s'observa que tots presenten deteriorament de la làmina de Mylar i que els filtres de fibra de vidre també estan danyats (Figura 3.51). El deteriorament de la làmina de Mylar consisteix en una pèrdua de l'aluminitzat, quedant la làmina de Mylar transparent però sense desaparèixer. Aquest canvi segurament no afecta l'absorció de 0.5 MeV de les partícules α per part del Mylar, però en canvi, sí que pot afectar a la distribució espacial de la deposició α a la superfície del detector. Tot i això, les densitats de traces obtingudes són homogènies i, per tant, l'efecte no és perceptible. De totes formes, els deterioraments observats suggereixen la futura utilització d'un altre tipus de configuració de filtre.



Figura 3.51. Esquerra: Detectors de Makrofol exposats amb filtre de fibra de vidre i de polietilè presenten deteriorament similars de la làmina de Mylar. Dreta: Les traces d'un detector revelat que tenia la làmina de Mylar molt deteriorada presenten una distribució homogènia.

Els resultats obtinguts amb els dos tipus de filtres no mostren una diferència estadísticament significativa (**Taules 3.12 i 3.13**). Els nivells de radó a l'exterior no presenten una clara dependència amb l'altura (**Taula 3.12**). L'interval de valors de la C_{Rn} obtinguts a la superfície del sòl, [20-43] $Bq \cdot m^{-3}$, és comparable a l'interval de la campanya 2004-2005, [6-42] $Bq \cdot m^{-3}$ (Rusov et al., 2006), però exceptuant el punt de mesura 1, els resultats de la campanya 2005-2006 són superiors als de les dues anteriors. En els punts de mesura 2, 4 i 6 s'observa un increment anual al llarg de les tres campanyes (**Taula 3.13**). La comparació amb els detectors de CR-39 exposats de forma simultània amb els detectors de Makrofol hauria permès treure una conclusió més clara d'aquesta possibilitat.

Taula 3.12. Valors de la C_{Rn} a diferents altures, H (m), respecte la superfície del sòl a l'estació AV.

H (m)	C_{Rn} ($Bq \cdot m^{-3}$)	
	Fibra de vidre	Polietilè
1.4	25 ± 5	25 ± 5
1.9	34 ± 5	27 ± 5
2.4	37 ± 6	28 ± 3
2.9	27 ± 5	24 ± 4
3.9	22 ± 4	22 ± 4
4.4	29 ± 5	22 ± 4
5.4	23 ± 4	37 ± 6
6.4	27 ± 3	22 ± 6

Taula 3.13. Resultats de tres campanyes de mesura de la C_{Rn} anual a la superfície del sòl al llarg del perfil Barchans-Rasmussen. Els valors de les dues primeres campanyes s'obtenen amb detectors de CR-39 de l'IJS (Rusov et al., 2006) i els de la última campanya amb els detectors de Makrofol de la UAB.

Codi	Nom emplaçament	Distància (km)	C_{Rn} ($Bq \cdot m^{-3}$)			
			2002-03	2004-05	2005-06	
					Fibra de vidre	Polietilè
1	Illes Barhans (oest)	0	-	42	36 ± 3	33 ± 2
2	Illes Barhans (est)	0.8	8	16	43 ± 4	40 ± 7
3	Three Little Pigs (oest)	1.7	9	6	20 ± 2	21 ± 2
4	Illa Galindez Penguin Point	3.7	4	21	42 ± 3	44 ± 1
6	Illa Yalour	7.0	6	11	40 ± 8	32 ± 5
7	Cap Rasmussen	10.5	-	11	32 ± 4	30 ± 3

3.3.3. Exposicions a l'INTE

L'any 2010 la UFR de la UAB estableix un acord de col·laboració amb l'INTE de la UPC per fer un estudi experimental que permeti d'identificar les membranes més adequades per minimitzar la influència de les condicions extremes de mesura, en concret les altes humitats, sobre la resposta dels detectors passius i actius de radó. Els detectors actius utilitzats en aquest estudi són els monitors ATMOS, AlphaGUARD, sonda Clipperton, i RAD7. Els detectors passius utilitzats són els de Makrofol, LR-115, CR-39 i Electrets E-Perm amb les configuracions SLT, HLT i HLT – filtre ^{220}Rn . Els tres tipus de membrana de polietilè són les bosses utilitzades a l'apartat 3.2.3.2: Tyvek (B), Treseses (C) i Zipdar (D) (**Figura 3.51**). Els detectors s'exposen dins de la cambra de radó de l'INTE variant les condicions de temperatura entre 10 °C i 30 °C, humitat entre 45 % i 85 % i exposició de radó entre 200 kBq·h·m⁻³ i 300 kBq·h·m⁻³. Es realitzen cinc exposicions (**Taula 3.14**) i amb els detectors i les configuracions de bossa que es detallen a la **Taula 3.15**.



Figura 3.52. Detectors de LR115 amb les quatre configuracions (d'esquerra a dreta): A (sense bossa), C (Treseses), D (Zipdar) i B (Tyvek).

Taula 3.14. Condicions de les diferents exposicions a la cambra de radó de l'INTE.

Expo	$C_{\text{Rn Ref.}}$ (kBq·m ⁻³)	T (°C)	Hr (%)	Temps d'expo. (h)
1	8.5 ± 1.2	20	45	74
2	17.0 ± 2.4	20	45	67
3	20.0 ± 2.8	20	45	50
4	20.0 ± 2.8	20	85	50
5	20.0 ± 2.8	30 (10)*	85	49.5

* El valor entre parèntesis correspon a la temperatura durant les últimes quatre hores de l'exposició.

Els resultats de les tres primeres exposicions (**Figures 3.53, 3.54 i 3.55**), realitzades en condicions habituals de laboratori (20 °C de temperatura i 45 % d'humitat), mostren: (i) la influència de les bosses de polietilè sobre la resposta dels diferents tipus de detectors i (ii) permeten comprovar els factors de calibratge dels detectors de Makrofol i LR115 que no utilitzen cap bossa de polietilè. Dels resultats obtinguts es desprèn que cal aplicar un factor de correcció sobre el factor de calibratge dels dos tipus de detectors passius. La correcció dels detectors de Makrofol ja s'ha comentat anteriorment (apartat 3.2.2.2) i pels detectors de LR115 el factor de correcció obtingut és (0.85 ± 0.15).

Taula 3.15. Nombre total de detectors amb cada tipus de bossa de polietilè per a cada exposició.

Expo	Detector	Configuració				
		A	B	C	D	Altre
1	Makrofol	6	6	6	6	
	Electret – SLT	4	2	2	2	
	Electret – HLT	4	2	2	2	
	Electret – HLT – filtre ²²⁰ Rn	1	1	1	1	
2	Makrofol	6	6	6	6	
	LR115	2	2	2	2	
	Electret – SLT	4	2	2	2	
	Electret – HLT – filtre ²²⁰ Rn	4	2	2	2	
	ATMOS 12DPX	1				
	AlphaGUARD	1				
	RAD7	3				
3	Makrofol	6	6	6	6	
	LR115	3	3	3	3	
	CR-39	4	4	4	4	
	Electret – SLT	2	1	1	1	
	AlphaGUARD	1				
	Clipperton					1 ^a
4	Makrofol	6	6	6	6	
	LR115	3	3	3	3	
	CR-39	4	4	4	4	
	Electret – SLT	4	2	2	2	
	Electret – HLT – filtre ²²⁰ Rn	5	2	2	2	
	ATMOS 12DPX	1				
	AlphaGUARD					1 ^b
Clipperton					1 ^a	
5	Makrofol	6	6	6	6	
	LR115	3	3	3	3	
	CR-39	4	4	4	4	
	Electret – SLT	4	2	2	2	
	Electret – HLT – filtre ²²⁰ Rn	5	2	2	2	
	AlphaGUARD					1 ^b
Clipperton					1 ^a	

^a Bossa de polietilè negre opac que impedeix l'entrada de llum.

^b Bossa de polietilè blanc opac proporcionat per Genitron.

Els resultats obtinguts amb els detectors passius a les tres primeres exposicions realitzades en condicions normals de temperatura (20 °C) i humitat (45 %) (**Figures 3.53, 3.54 i 3.55**), mostren que les tres membranes de polietilè presenten influències diferents sobre la resposta dels detectors, degut a que tenen uns gruixos i uns coeficients de difusió diferents. Això implica la necessitat d'aplicar uns factors correctors, f_T , sobre els factors de calibratge. En general, les concentracions de radó més baixes s'observen amb les configuracions C i D i sembla que la configuració B no requereix correcció. A la primera exposició, la diferència més significativa entre la resposta dels detectors i el valor de referència s'observa amb els Electrets HLT i HLT amb filtre de toró (**Figura 3.53**). A la segona exposició, on s'incorporen els detectors de LR115, s'observa com aquests presenten una gran dispersió de resultats i que són els que mostren la diferència més gran, especialment per la configuració D (**Figura 3.54**). A la tercera exposició s'incorporen els detectors de CR-39, que semblen mostrar uns resultats superiors al valor de referència (**Figura 3.55**). Aquesta discrepància amb el valor de referència pels detectors de CR-39 pot ser deguda a problemes d'absorció del radó per part del plàstic de la cambra de

difusió. Quan el detector no es ventila suficientment i es deixa dins la cambra de difusió massa temps després de l'exposició, el radó que prèviament ha estat absorbit pel plàstic de la cambra i després se'n desprèn, continua exposant el detector i això pot afectar de forma significativa el resultat final de la mesura. Precisament els detectors de CR-39 de la tercera exposició es retornen a Gammadata tancats dins una bossa de plàstic. Una bona ventilació, ja sigui traient els detectors de l'interior de la seva cambra de difusió abans de l'enviament o fer que no viatgin en una bossa de plàstic tancada, evita aquest problema (Möre i Hubbard,1997). En el cas dels detectors de LR115 també s'observa aquest efecte a la tercera i la quarta exposició ja que van quedar muntats dins les cambres de difusió durant alguns dies abans de la seva anàlisi, per tant, aquestes dues exposicions no es tenen en compte per determinar els seus factors correctors. A partir de les tres primeres exposicions es poden calcular els valors mitjos dels factors correctors totals, f_T , de les quatre configuracions pels detectors de Makrofol i pels Electrets SLT i HLT amb filtre de toró (Taula 3.16). A la quarta (Figura 3.56) i cinquena exposició (Figura 3.57), on les condicions ambientals són més extremes, els Electrets HLT amb filtre de toró presenten el mateix comportament: la diferència més gran respecte el valor de referència es troba amb la configuració D. Per altra banda, els Electrets SLT presenten un comportament curiós, ja que a la quarta exposició la configuració més influent és la C i a la cinquena ho és la B. A aquestes dues últimes exposicions la possible influència del tipus de membrana sobre la resposta del detectors de CR-39 queda emmascarada per la dispersió de resultats i, per tant, sembla que no requereixen de factors correctors (Taula 3.16). A la cinquena exposició, on la temperatura és de 30 °C i la humitat relativa és del 90 % (Figura 3.57), els detectors de LR115 tornen a mostrar la diferència més gran respecte el valor de referència amb la configuració D. Els factors correctors de totes les configuracions per les condicions ambientals de l'exposició 5 es presenten a la Taula 3.16.

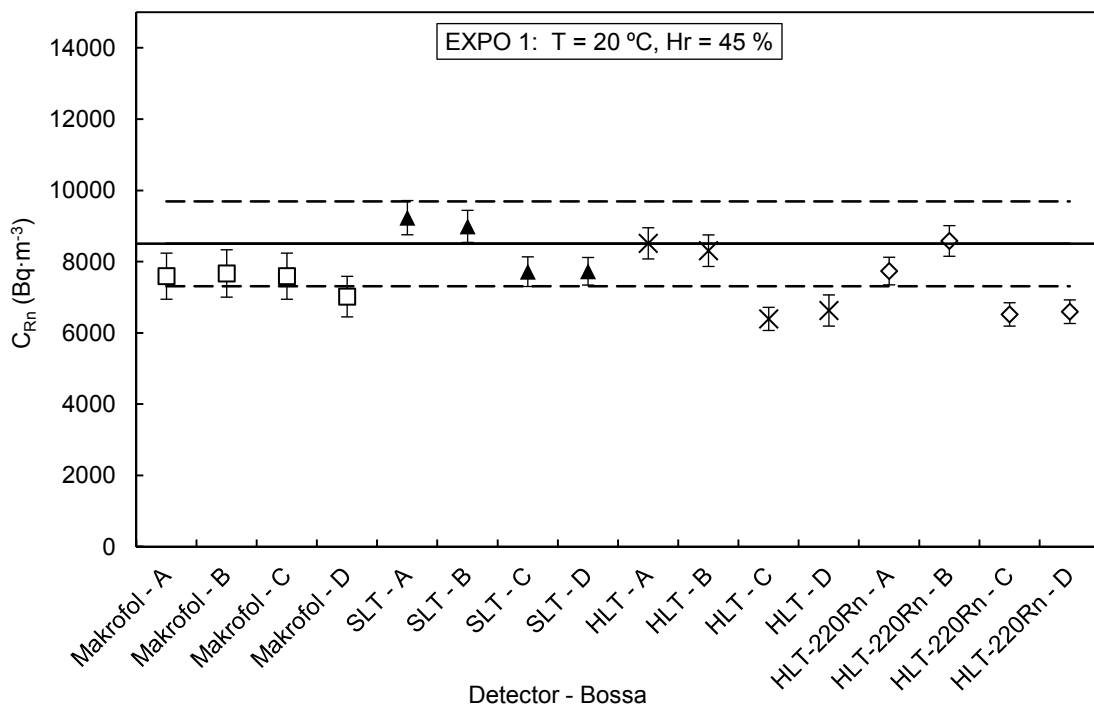


Figura 3.53. Valors mitjos de la C_{Rn} en funció del tipus de detector passiu i de bossa de polietilè comparats amb el valor de referència (línia contínua) $\pm 2\sigma$ (línies discontinúes) de la primera exposició a la cambra de l'INTE.

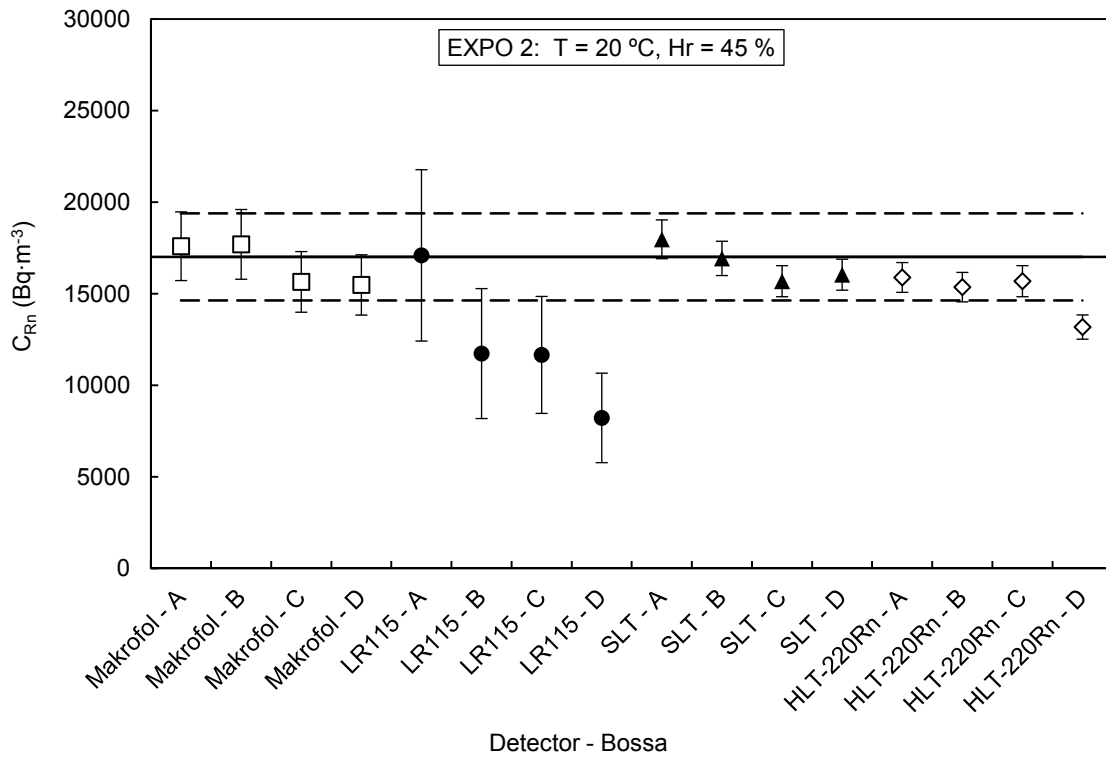


Figura 3.54. Valors mitjos de la C_{Rn} en funció del tipus de detector passiu i de bossa de polietilè comparats amb el valor de (línia contínua) $\pm 2\sigma$ (línies discontinuïques) de la segona exposició a la cambra de l'INTE.

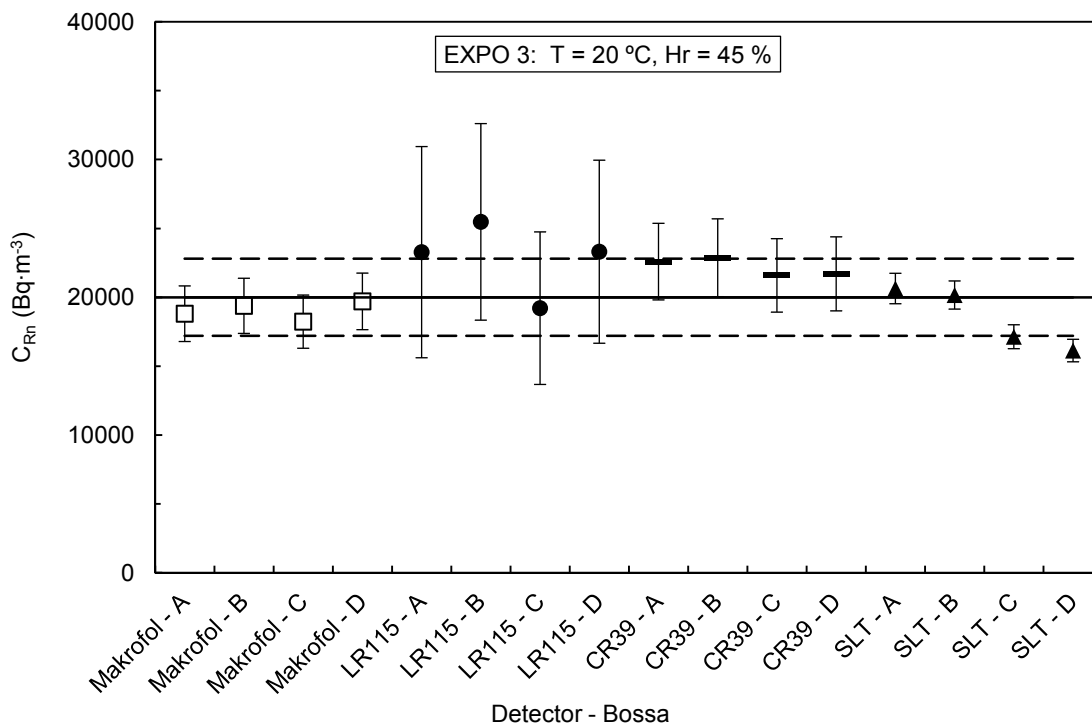


Figura 3.55. Valors mitjos de la C_{Rn} en funció del tipus de detector passiu i de bossa de polietilè comparats amb el valor de referència (línia contínua) $\pm 2\sigma$ (línies discontinuïques) de la tercera exposició a la cambra de l'INTE.

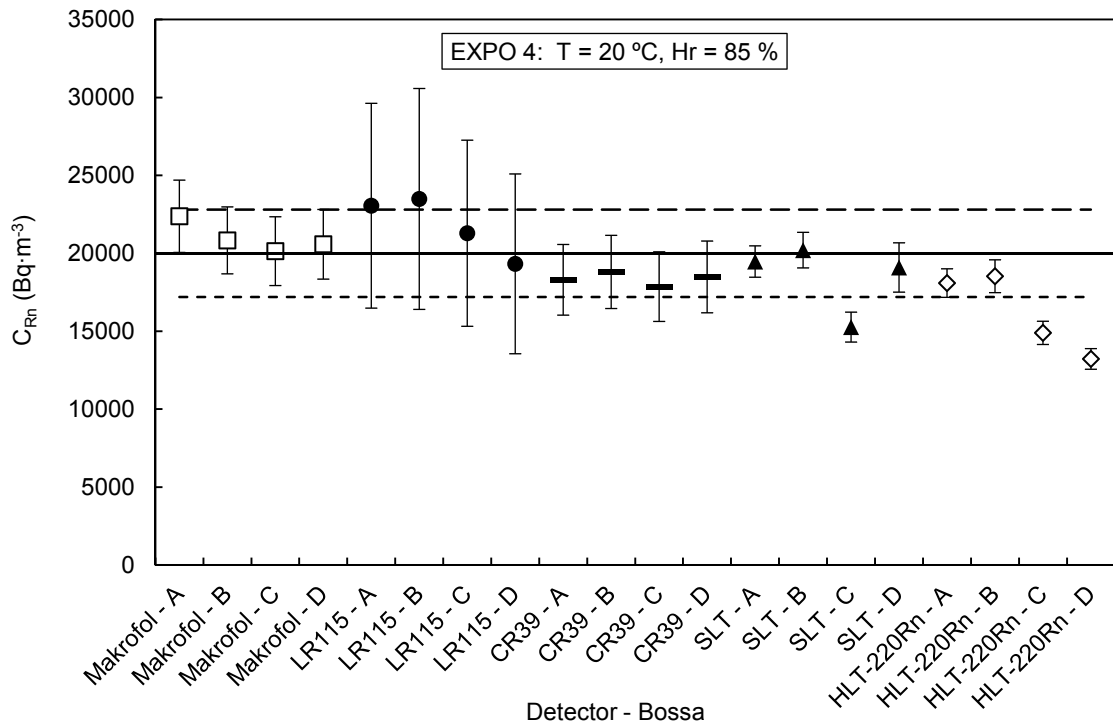


Figura 3.56. Valors mitjos de la C_{Rn} en funció del tipus de detector passiu i de bossa de polietilè comparats amb el valor de referència (línia contínua) $\pm 2\sigma$ (línies discontinües) de la quarta exposició a la cambra de l'INTE.

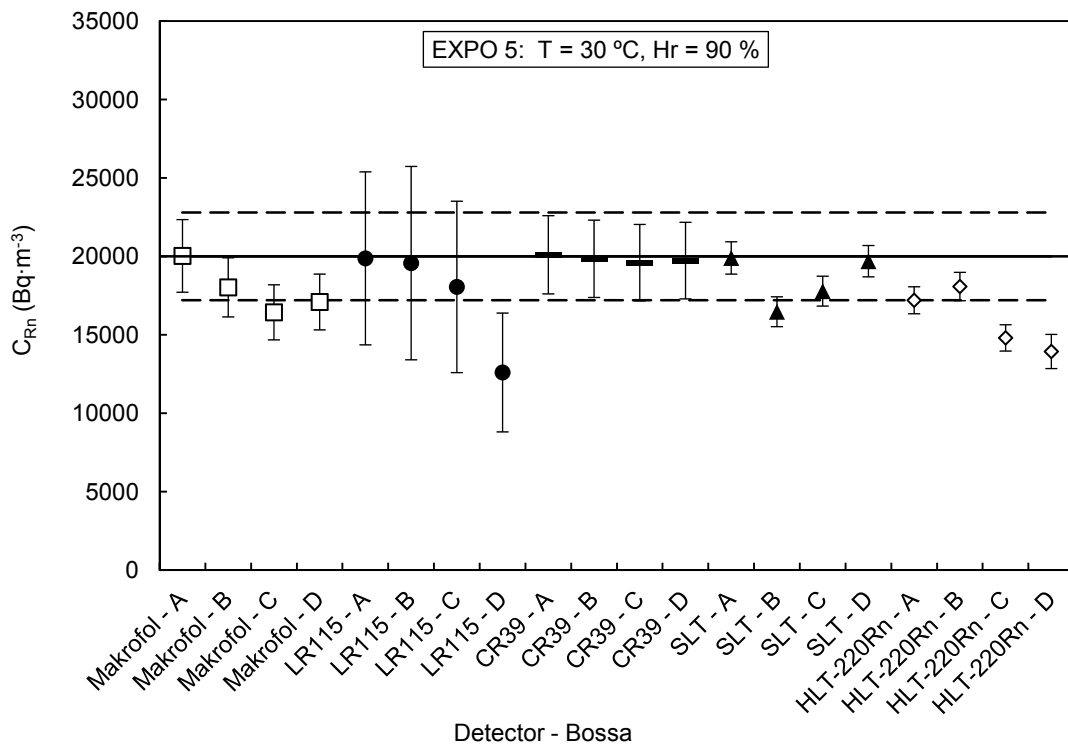


Figura 3.57. Valors mitjos de la C_{Rn} en funció del tipus de detector passiu i de bossa de polietilè comparats amb el valor de referència (línia contínua) $\pm 2\sigma$ (línies discontinües) de la cinquena exposició a la cambra de l'INTE.

Taula 3.16. Factors correctors totals, f_T , pels resultats de les quatre configuracions analitzades a les cinc exposicions a la cambra de l'INTE.

Detector	Expo	A	B	C	D
Makrofol	1	1.12 ± 0.08	1.11 ± 0.08	1.12 ± 0.08	1.21 ± 0.09
	2	0.97 ± 0.07	0.96 ± 0.07	1.09 ± 0.08	1.10 ± 0.08
	3	1.06 ± 0.07	1.03 ± 0.07	1.10 ± 0.08	1.02 ± 0.07
	Valor mig	1.05 ± 0.04	1.03 ± 0.04	1.10 ± 0.01	1.11 ± 0.06
	4	0.89 ± 0.06	0.96 ± 0.07	0.99 ± 0.07	0.97 ± 0.07
LR115	5	1.00 ± 0.07	1.11 ± 0.08	1.22 ± 0.09	1.17 ± 0.08
	2	0.99 ± 0.07	1.45 ± 0.17	1.46 ± 0.16	2.07 ± 0.35
CR-39	5	1.01 ± 0.07	1.02 ± 0.07	1.11 ± 0.08	1.59 ± 0.21
	4	1.09 ± 0.08	1.06 ± 0.07	1.12 ± 0.08	1.08 ± 0.08
Electret - SLT	5	1.00 ± 0.07	1.01 ± 0.07	1.02 ± 0.07	1.01 ± 0.07
	1	0.92 ± 0.06	0.95 ± 0.07	1.10 ± 0.08	1.10 ± 0.08
	2	0.95 ± 0.07	1.00 ± 0.07	1.08 ± 0.08	1.06 ± 0.07
	3	0.97 ± 0.07	0.99 ± 0.07	1.17 ± 0.08	1.24 ± 0.09
	Valor mig	0.95 ± 0.01	0.98 ± 0.02	1.10 ± 0.03	1.13 ± 0.05
Electret - HLT	4	1.03 ± 0.07	0.99 ± 0.07	1.31 ± 0.09	1.05 ± 0.07
	5	1.00 ± 0.07	1.21 ± 0.09	1.12 ± 0.08	1.02 ± 0.07
Electret - HLT	1	1.00 ± 0.07	1.02 ± 0.07	1.33 ± 0.09	1.28 ± 0.09
Electret – HLT- ²²⁰ Rn	1	1.10 ± 0.08	0.99 ± 0.07	1.30 ± 0.09	1.29 ± 0.09
	2	1.07 ± 0.08	1.11 ± 0.08	1.08 ± 0.08	1.29 ± 0.09
	Valor mig	1.09 ± 0.02	1.05 ± 0.06	1.19 ± 0.11	1.29 ± 0.01
	4	1.11 ± 0.08	1.08 ± 0.08	1.34 ± 0.10	1.51 ± 0.11
	5	1.16 ± 0.08	1.11 ± 0.08	1.35 ± 0.10	1.44 ± 0.11

Tots els Electrets han estat mesurats immediatament després de la finalització de l'exposició, per tant, per aquests es poden determinar el temps, τ , el temps de retard, τ_M , i els factors correctors τ_M/τ i $\frac{t_0}{(t_0 - \tau)}$ de forma anàloga a l'apartat 3.2.3.2. Els valors de τ i τ_M , i conseqüentment el factor τ_M/τ , obtinguts pels Electrets SLT amb la configuració C i D (**Taula 3.17**) coincideixen amb els valors dels detectors de Makrofol amb la configuració D de la **Taula 3.10**. En canvi, els factors correctors $\frac{t_0}{(t_0 - \tau)}$ són menors perquè la durada de l'exposició a la cambra de l'INTE ha estat més llarga. Per altra banda, pels Electrets HLT amb i sense filtre de toró aquests temps són més grans: al voltant de les 11 h per la configuració D i entre les 7 h i les 14 h per la configuració C. Per la configuració B només és possible determinar el valor d'aquests paràmetres pels Electrets HLT amb filtre de toró, ja que pels altres dos tipus d'Electrets s'obtenen temps negatius i, per tant, sense significat físic. Amb aquests resultats s'observa una clara influència de volum de detecció sobre els temps τ i τ_M , ja que aquells detectors amb cambres grans (HLT i HLT amb filtre de toró) tenen temps més grans que els detectors amb cambres més petites, com els detectors de Makrofol i els Electrets SLT.

A diferència dels Electrets, la resta de detectors passius exposats no s'han extret de les bosses de polietilè immediatament després de la finalització de l'exposició i no s'ha portat un control exacte del temps transcorregut entre la finalització de l'exposició i l'obertura de les bosses, la qual cosa impedeix determinar el corresponent factor corrector.

Taula 3.17. Temps τ , temps de retard τ_M i factors correctors τ_M/τ i $\frac{t_0}{(t_0 - \tau)}$ per les tres configuracions de bossa de polietilè seleccionades per evitar la humitat obtinguts a partir dels resultats dels Electrets a les tres primeres exposicions a la cambra de l'INTE en condicions normals de temperatura (20 °C) i d'humitat relativa (45 %).

Detector	Codi	τ (h)	τ_M (h)	τ_M / τ	$t_0/(t_0 - \tau)$
Electret - SLT	B	-	-	-	-
	C	4.5 ± 0.5	4.6 ± 0.6	1.03 ± 0.01	1.08 ± 0.02
	D	4.8 ± 1.4	5.0 ± 1.5	1.04 ± 0.01	1.09 ± 0.04
Electret - HLT	B	-	-	-	-
	C	12.6 ± 0.8	13.9 ± 0.9	1.10 ± 0.07	1.20 ± 0.03
	D	11.1 ± 0.7	12.1 ± 0.8	1.09 ± 0.07	1.18 ± 0.02
Electret – HLT- ²²⁰ Rn	B	2.0 ± 2.4	3.6 ± 2.1	1.02 ± 0.02	1.03 ± 0.04
	C	7.6 ± 4.1	6.7 ± 3.1	1.06 ± 0.04	1.12 ± 0.07
	D	10.9 ± 0.3	10.2 ± 1.8	1.09 ± 0.01	1.18 ± 0.01

Els resultats de les exposicions dels detectors actius (**Figures 3.58, 3.59, 3.60 i 3.61**) mostren que els monitors AlphaGUARD i ATMOS tenen una resposta molt semblant a totes les exposicions. No s'han representat els valors del monitor ATMOS de l'INTE (referència) perquè coincideixen amb els del monitor de la UAB (**Taula 3.18**).

A la segona exposició, els monitors RAD7 presenten valors inferiors, el 10 %, que els altres dos equips (**Taula 3.18**). Concretament durant les primeres hores el monitor RAD7 2545 presenta un comportament diferent al dels altres dos RAD7 (**Figures 3.58**) És un resultat curiós perquè, al llarg de tota l'exposició, els tres monitors romanen endollats a la xarxa elèctrica i les columnes de Drierita no s'esgoten. No podem dir que estigui mal calibrat, ja que posteriorment presenta els mateixos valor que els altres dos RAD7 i sembla que els resultats tendeixen a acostar-se als dels l'AlphaGUARD i l'ATMOS. És com si la resposta temporal d'aquest RAD7 fos més lenta o alguna cosa hagués endarrerit l'entrada del radó en el volum de detecció.

Taula 3.18. Valors mitjos de la C_{Rn} de referència i mesurats per cadascun dels detectors actius exposats a la cambra de radó de l'INTE. La incertesa és la desviació estàndard (σ).

EXPO	Equip	C_{Rn} (kBq·m ⁻³)
2	ATMOS (Referència)	17.0 ± 1.2
	ATMOS (UAB)	17.1 ± 1.2
	AlphaGUARD	17.0 ± 1.4
	RAD7 (1760)	15.9 ± 1.2
	RAD7 (1762)	15.9 ± 1.3
	RAD7 (2545)	15.5 ± 1.7
3	ATMOS (Referència)	20.0 ± 1.4
	AlphaGUARD	19.9 ± 1.6
	Clipperton	15.4 ± 8.3
4	ATMOS (Referència)	20.0 ± 1.4
	ATMOS (UAB)	19.9 ± 1.1
	AlphaGUARD	20.1 ± 1.7
	Clipperton	15.5 ± 7.9
5	ATMOS (Referència)	20.0 ± 1.4
	ATMOS (UAB)	19.9 ± 1.9
	AlphaGUARD	18.5 ± 1.8
	Clipperton	19.2 ± 8.1

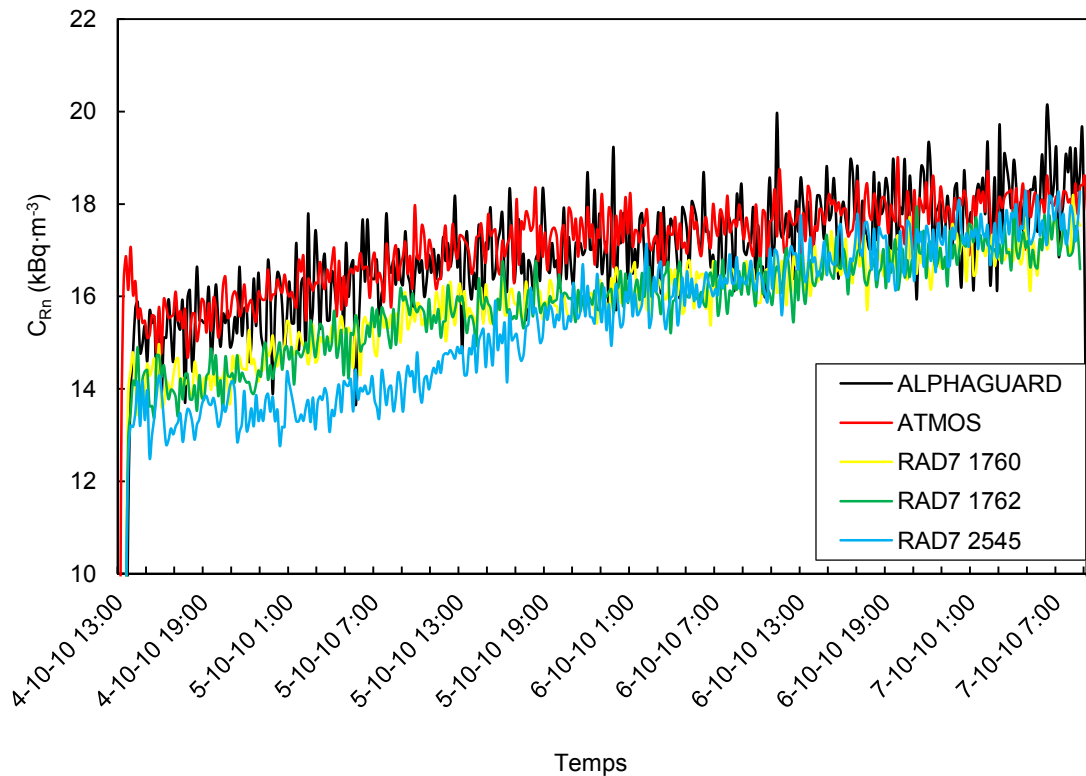


Figura 3.58. Resultats dels detectors actius de radó de la segona exposició a la cambra de l'INTE.

A la tercera exposició (**Figures 3.59**) s'observa que la sonda Clipperton no assoleix el valor de la C_{Rn} de l'AlphaGUARD fins gairebé a la meitat de l'exposició i que els seus valors presenten moltes fluctuacions. Les fluctuacions són degudes al soroll electrònic. Tot i haver restat el corresponent valor mig de fons a tot el conjunt de dades originals, les fluctuacions s'observen pel fet d'haver escollit un temps d'integració petit (10 min) amb un llindar d'acceptació massa gran (10000 %). Com que els nivells de radó normalment experimenten variacions més lentes que les provocades pel soroll electrònic de l'equip, per poder discriminar aquestes fluctuacions correctament, les mesures s'han de realitzar amb uns temps d'integració més grans (≥ 1 h) i uns llindars d'acceptació inferiors (1000 % o 100 %) (Monnin i Seidel, 1998), tal com s'observa amb les dues exposicions següents (**Figures 3.60 i 3.61**). El retard és degut a la bossa de polietilè negre, de $(44 \pm 1) \mu\text{m}$ de gruix, utilitzada per evitar l'arribada de llum sobre el detector de semiconductor. De forma anàloga que en el cas dels detectors passius, la utilització d'aquesta membrana també requereix l'aplicació d'un factor corrector f_T sobre la seva resposta. Aquest factor és 1.34 ± 0.03 per la tercera exposició, 1.33 ± 0.03 per la quarta exposició i 0.93 ± 0.02 per la cinquena exposició. La diferència del factor corrector per la cinquena exposició posa de manifest la influència de la temperatura, ja que la tercera i la quarta exposició es fan a 20°C i la cinquena a 30°C , durant la major part de l'exposició. Amb l'objectiu de provocar la condensació del vapor d'aigua sobre la superfície dels detectors, quan falten 4 h per la finalització de la cinquena exposició es produeix la disminució ràpida de la temperatura, des de 30°C fins a 10°C . Amb els resultats de la sonda Clipperton s'observa la influència significativa d'aquesta baixada de temperatura sobre la seva resposta, la qual presenta un augment dels valors mesurats de la C_{Rn} (**Figura 3.61**). Per poder quantificar correctament aquesta influència la durada de l'exposició hauria hagut de ser més gran. S'ha de tenir en

compte que en condicions reals de mesures en el camp s'utilitza un aïllant tèrmic precisament per evitar aquesta influència i també que no s'utilitza la bossa negra, perquè el detector ja es troba completament a les fosques dins el sòl i, aleshores, el retard observat no existeix. Això s'ha pogut comprovar a les exposicions realitzades a la cambra de radó de la UFR de la UAB (veure **Figura 3.38** de l'apartat 3.2.3.2).

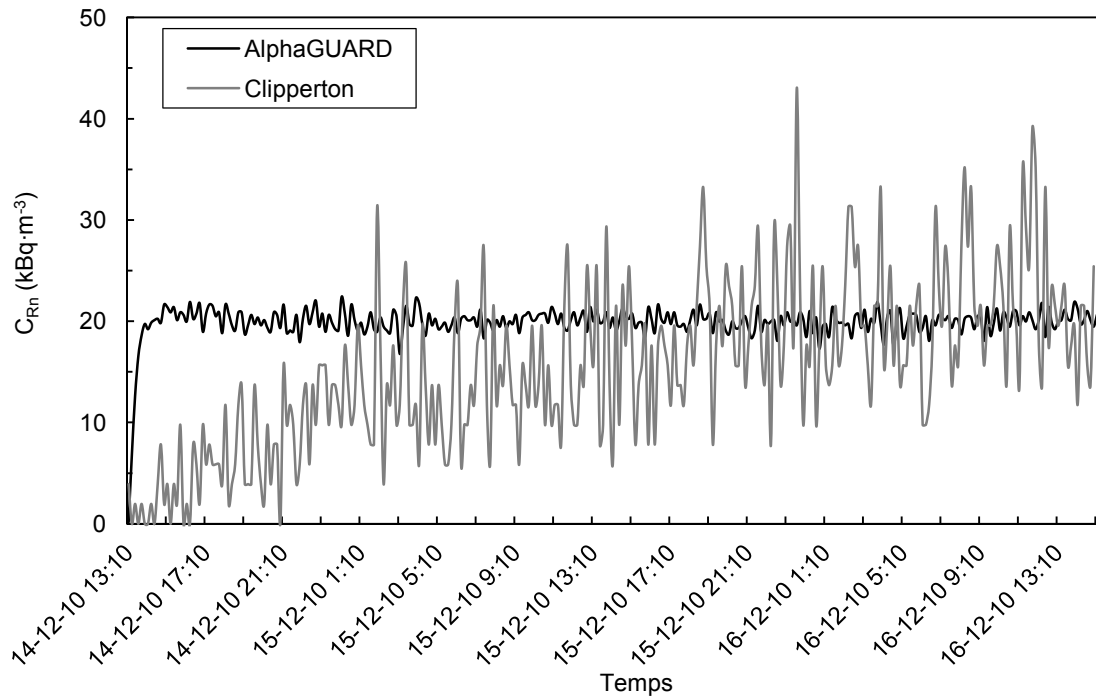


Figura 3.59. Resultats dels detectors actius de radó de la tercera exposició a la cambra de l'INTE.

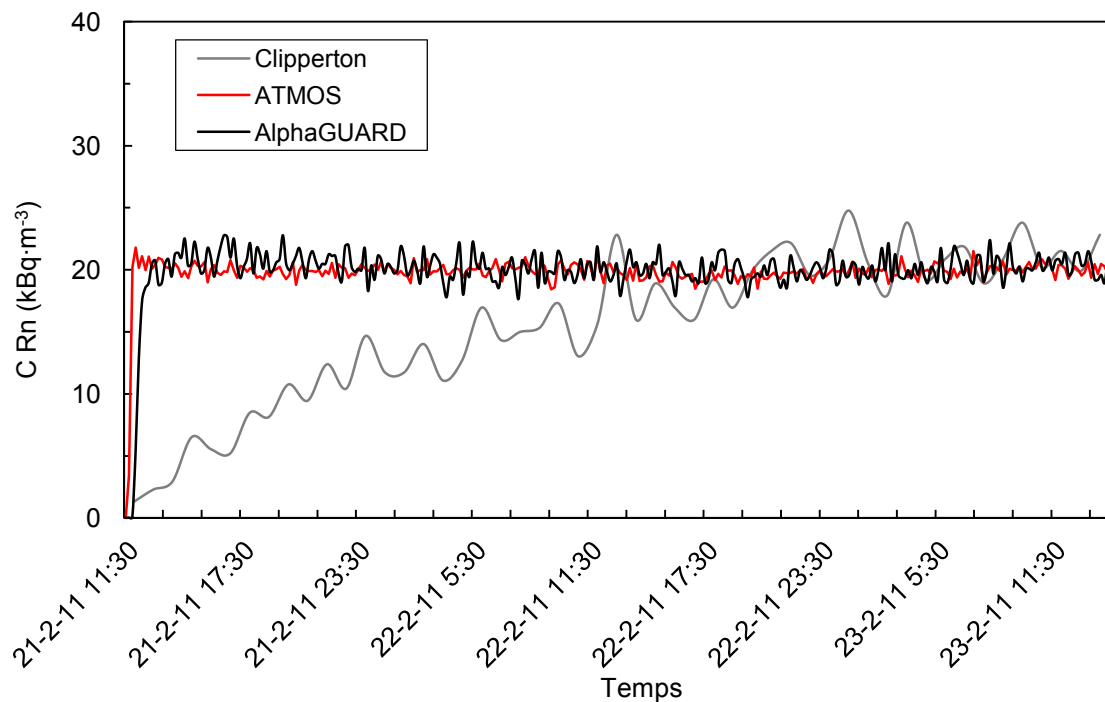


Figura 3.60. Resultats dels detectors actius de radó de la quarta exposició a la cambra de l'INTE.

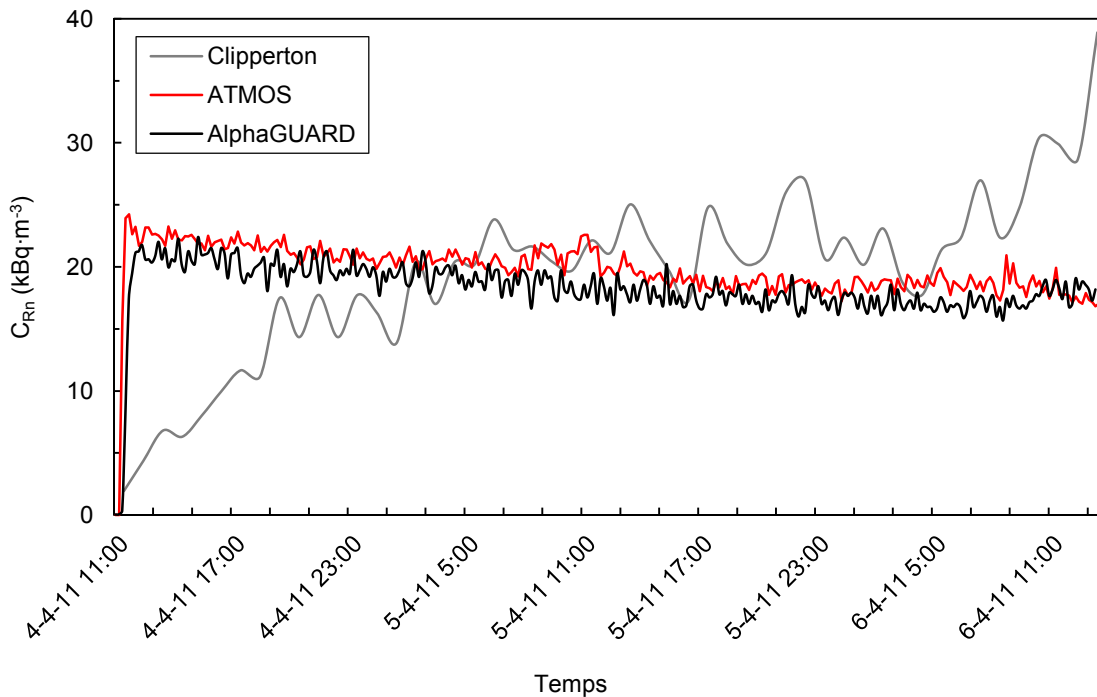


Figura 3.61. Resultats dels detectors actius de radó de la cinquena exposició a la cambra de l'INTE.

Observant amb detall les primeres hores d'exposició en aquells casos on hi ha els monitors ATMOS i AlphaGuard junts (**Figures 3.58, 3.60 i 3.61**) s'observa que el monitor AlphaGUARD assoleix el valor de la C_{Rn} del monitor ATMOS dues hores després. Aquest fet pot ser degut als diferents tipus d'entrada del radó en els dos equips: a l'AlphaGUARD per difusió i a l'ATMOS amb una bomba interna. A més, cal recordar que el monitor AlphaGUARD s'ha exposat amb la bossa de polietilè que proporciona la casa Genitron Instruments GmbH i, per tant, sembla que aquesta membrana també enredereix una mica l'entrada del radó. Només en el cas de la cinquena exposició s'observa una diferència significativa, del 8 %, entre els valors de la C_{Rn} de l'AlphaGUARD i el monitor ATMOS (**Taula 3.18 i Figura 3.61**).

Davant la dificultat tècnica d'aconseguir unes condicions d'humitat i temperatura que provoquin més condensació sobre la superfície dels detectors i poder-les mantenir durant una exposició més llarga que dos dies a l'interior de la cambra de referència de l'INTE, es decideix continuar l'estudi a l'interior d'un recinte subterrani amb alta humitat (apartat 3.3.4.3).

3.3.4. Exposicions a llocs amb alta humitat

Per tal d'analitzar la resposta dels detectors de Makrofol amb els diferents tipus de filtres i bosses i també la resposta dels detectors actius en unes condicions extremes reals i amb temps d'exposició superiors als dos dies, es realitzen exposicions a tres llocs diferents caracteritzats per tenir humitats elevades. Aquestes exposicions es desenvolupen en dues fases diferents entre els anys 2004-2011, que es troben detallades a la **Taula 3.19**.

Taula 3.19. Característiques de les exposicions de detectors de Makrofol i detectors actius de radó realitzades a l'interior de llocs amb alta humitat.

Fase	Anys	Lloc	Detectors	Config.	T (°C)	Hr (%)	C _{Rn} (kBq·m ⁻³)
I	2006 – 2009	Cova	Makrofol	a i b	6 – 16	40 – 90	0.2 – 3.0
	2004 – 2005	Mina	Makrofol	a i b	17	80 – 100	20 – 35
II	2011	Balneari	Makrofol	A, B, C i D	21 – 29	50 – 90	0.1 – 1.7
	2011	Mina	Makrofol	A, B, C i D	14 – 20	80 – 100	1 – 17
			AlphaGUARD				
			ATMOS				
			RAD7				

3.3.4.1. Exposicions a una cova

La cova analitzada és un rebost excavat a la roca de la zona volcànica de la Garrotxa. En el seu interior la C_{Rn} i la humitat presenten importants variacions estacionals, des de 3 kBq·m⁻³ i 40 % a l'estiu del 2006 fins a 0.2 kBq·m⁻³ i més del 90 % a l'hivern del 2008. La C_{Rn} es mesura durant tres anys consecutius, amb períodes d'exposició que van des de les cinc setmanes fins als quatre mesos. S'utilitzen els detectors de Makrofol amb les dues configuracions de filtre que participen a la intercomparació a l'INTE l'any 2005 (apartat 3.3.1). Amb aquestes exposicions també es veu com la humitat acaba afectant la làmina de Mylar del detector de Makrofol, independentment del tipus de filtre utilitzat. Per ambdues configuracions el deteriorament comença per la part externa del disc i no és tan important com l'observat amb els detectors exposats a l'Antàrtida (**Figura 3.51**), degut segurament a que la durada de l'exposició és inferior i a que les condicions de temperatura no són tan extremes. En aquest cas, la possible influència de la humitat sobre la densitat de traces queda emmascarada per la dispersió dels resultats, tal i com s'observa a la **Figura 3.62**, i per tant, no se'n pot treure una conclusió clara. Aquestes exposicions tornen a posar de manifest la necessitat d'utilitzar un altre tipus de protecció per evitar la humitat.

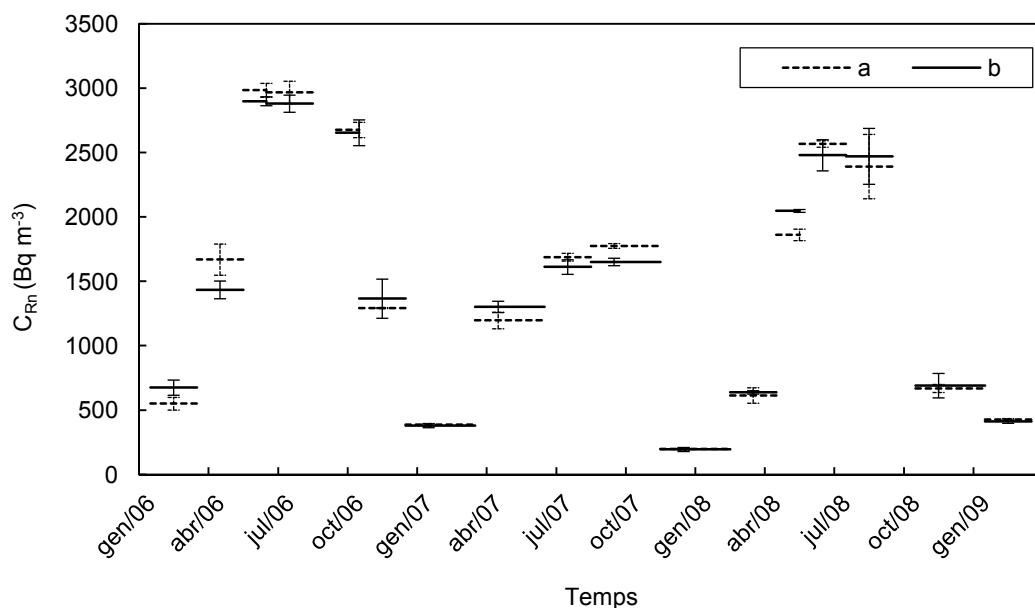


Figura 3.62. Nivells de la C_{Rn} mesurada amb els detectors de Makrofol amb filtres de fibra de vidre (a) i filtres de polietilè (b) a l'interior d'una cova de la zona volcànica de la Garrotxa amb diferents exposicions al llarg de tres anys.

3.3.4.2. Exposicions a un balneari

El balneari analitzat és un establiment que disposa de diferents tipus de sala on s'utilitzen les aigües termals pel tractament dels seus clients. Amb els detectors actius s'hi fan unes mesures puntuals i en continu de la C_{Rn} , la temperatura i la humitat i els resultats mostren que es poden fer exposicions de detectors passius de Makrofol durant diversos mesos en condicions reals extremes (veure **Taula 6.4** de l'apartat 6.2.1). Al juny de 2011 s'instal·len 12 detectors de Makrofol a tres sales diferents (2, 4 i 5). A cada sala s'instal·len 4 detectors preparats amb diferents configuracions de bosses de polietilè (A, B, C i D). L'exposició dels detectors té una durada de 4 mesos, corresponent al temps d'obertura de les instal·lacions al públic, l'estiu.

Com que no es disposa dels valors mitjos de referència de la C_{Rn} a les tres sales analitzades no es pot determinar la influència de la humitat sobre la resposta del detector amb la configuració A ni la influència de la membrana de polietilè sobre la resposta de la resta de configuracions utilitzades per protegir el detector de la humitat (**Figura 3.63**). Tot i això, s'observa que la bossa Zipdar (D) és la que protegeix millor el detector, perquè el filtre de fibra de vidre i la làmina de Mylar dels detectors que porten aquesta bossa són els que queden menys deteriorats per la humitat.

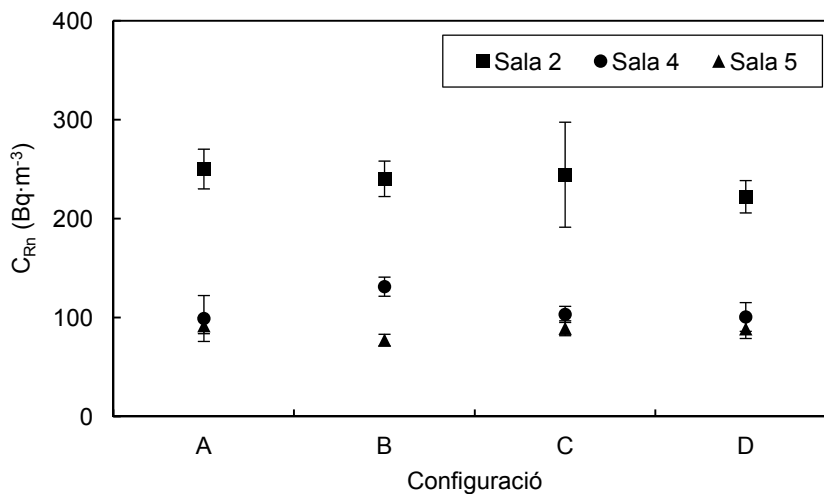


Figura 3.63. Nivells de la C_{Rn} obtinguts amb les configuracions A, B, C i D a tres sales diferents del balneari amb una exposició de 4 mesos d'estiu.

3.3.4.3. Exposicions a unes mines

A l'interior d'aquestes mines subterrànies la humitat es manté constant al llarg de l'any, per sobre del 80 %, i com que a diferents nivells de profunditat es troben valors de la C_{Rn} diferents, tot el conjunt de les mines esdevé un excel·lent laboratori per analitzar la resposta dels detectors de radó en condicions extremes. Les diferents exposicions a les dues fases de l'estudi es presenten a la **Taula 3.20**. Mitjançant el monitor AlphaGUARD es mesuren de forma continua la temperatura, la humitat i els nivells de radó.

Taula 3.20. Característiques de les cinc exposicions de detectors de Makrofol amb les diferents configuracions de filtre i bosses de polietilè realitzades a l'interior de les mines subterrànies. Els valors de referència de la C_{Rn} s'obtenen amb el monitor AlphaGUARD.

Fase	Codi Expo	Estació	$C_{Rn} \pm \sigma$ (kBq·m ⁻³)	T (°C)	Hr (%)	Nivell mina	Temps (dies)	Nº det
I	1	Estiu	-	17	80-100	-1, -2, -3	7	26
II	2	Primavera	8.4 ± 0.3*	14	80-100	0,-1,-2,-3	4	17
	3	Estiu	10.5 ± 0.3	20	89	-2	19	20
	4	Estiu	10.8 ± 0.3	20	89	-2	10	20
	5	Estiu	-	-	-	0	29	20

* Valor mig de la C_{Rn} obtingut en el nivell -3 de les mines subterrànies.

Amb les dues primeres exposicions s'observa que les diferents configuracions analitzades presenten resultats similars (**Figures 3.64 i 3.65**) però s'ha de tenir en compte que les exposicions van durar uns temps massa curts per poder observar l'efecte de la humitat sobre el Mylar i novament el possible efecte sobre la densitat de traces queda amagat per la dispersió dels resultats. Amb les següents exposicions (3, 4 i 5 de la **Taula 3.20**), també s'observa el mateix comportament per la influència del tipus de membrana sobre la resposta del detector (**Figura 3.66**). El fet d'haver augmentat el temps d'exposició redueix la dispersió dels resultats i permet observar l'efecte de la humitat, tal i com s'observa a la **Figura 3.67** on les configuracions A i B presenten deteriorament, tant en el Mylar com en el filtre de fibra de vidre. Ara bé, aquest deteriorament es troba a la part exterior del disc i no impedeix fer la lectura del detector de Makrofol, que es realitza a la part central. En el cas de tenir exposicions més llargues el deteriorament del Mylar pot esdevenir més important i interessa escollir aquella membrana que endarrereixi més l'efecte de la humitat, fet que s'aconsegueix amb la membrana més gruixuda. Per tant, entre les dues configuracions que semblen protegir més de la humitat (C i D) s'escull la D. Amb l'exposició de 10 dies el valor final de la C_{Rn} obtingut amb la configuració D és bastant proper al valor de referència, mentre que per l'exposició de 19 dies ja és possible determinar el factor de correcció, (1.25 ± 0.04).

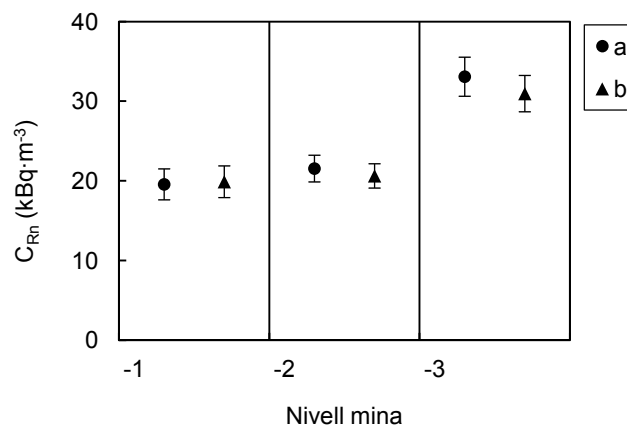


Figura 3.64. C_{Rn} mesurada amb les configuracions a i b a diferents nivells de l'interior de les mines subterrànies amb una exposició de 7 dies d'estiu.

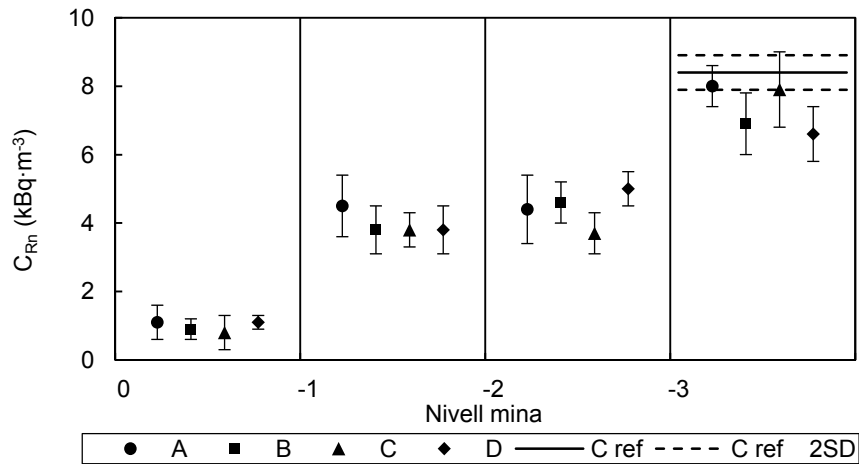


Figura 3.65. C_{Rn} mesurada amb les configuracions A, B, C i D a diferents nivells de l'interior de les mines subterrànies amb una exposició de 4 dies de primavera.

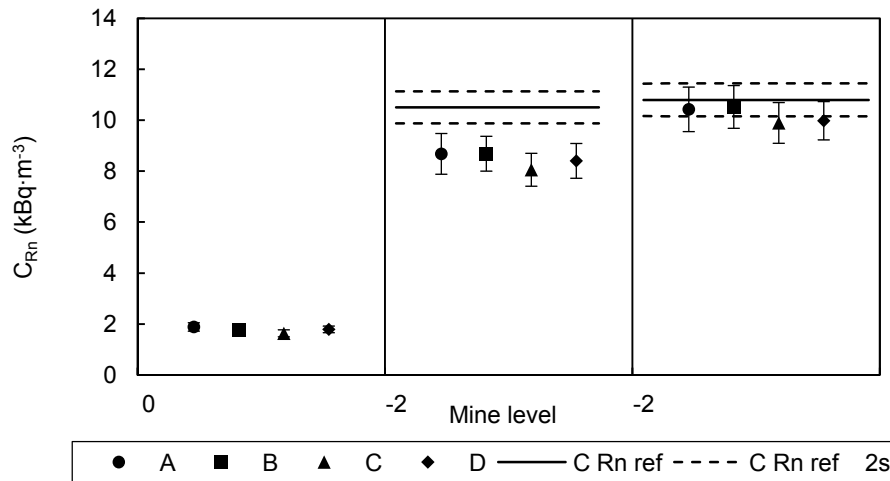


Figura 3.66. C_{Rn} mesurada amb les configuracions A, B, C i D a diferents nivells de l'interior de les mines subterrànies amb una exposició de 29 dies al nivell 0 i dues exposicions al nivell -2, de 19 dies i 10 dies, respectivament.

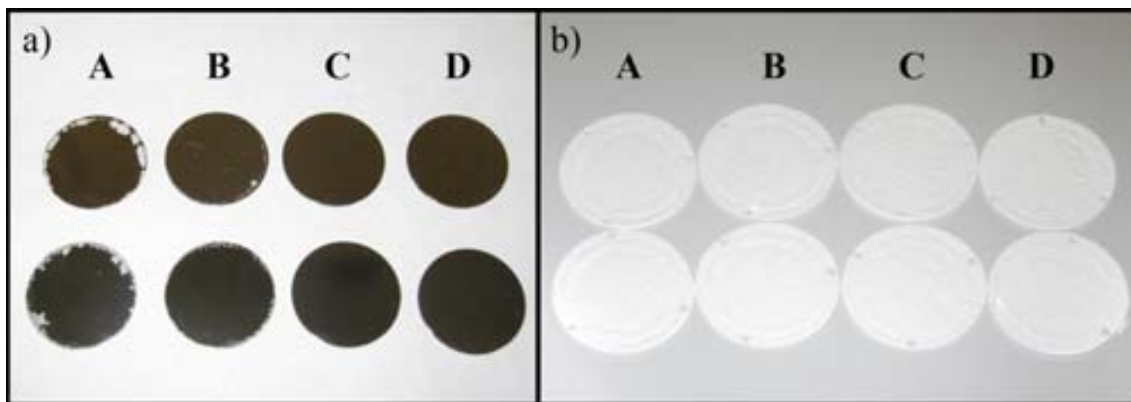


Figura 3.67. (a) Detector de Makrofol i (b) els filtres de fibra de vidre exposats amb les configuracions A, B, C i D a diferents nivells de l'interior de les mines subterrànies amb una exposició de 19 dies d'estiu al nivell -2.

A la quarta exposició s'introdueixen tots els detectors actius (ATMOS, AlphaGUARD i RAD7) per comparar la seva resposta. Es vol veure especialment com afecta la humitat sobre la resposta dels monitors RAD7 quan s'esgota la Drierita. Això té lloc unes 5 hores abans de que finalitzi el dia 6/8/2011 i a partir d'aquest moment s'observa com els tres monitors RAD7 presenten uns valors de la C_{Rn} inferiors als dels monitors ATMOS i AlphaGUARD (Figura 3.68). Una forma més clara de veure aquesta disminució és representant les diferències relatives entre els tres monitors RAD7 i el monitor ATMOS (Figura 3.69) i es comprova que hi ha una variació entre el 15 % i el 20 % en els tres casos.

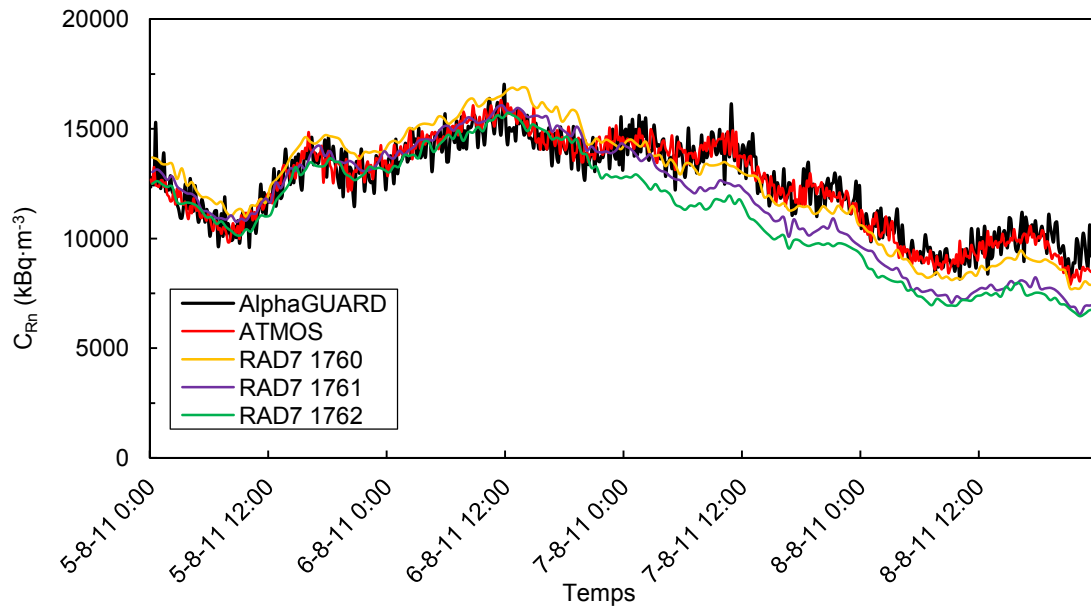


Figura 3.68. C_{Rn} mesurada amb els monitors actius de radó durant unes hores de la quarta exposició a l'interior d'una mina on la humitat és elevada.

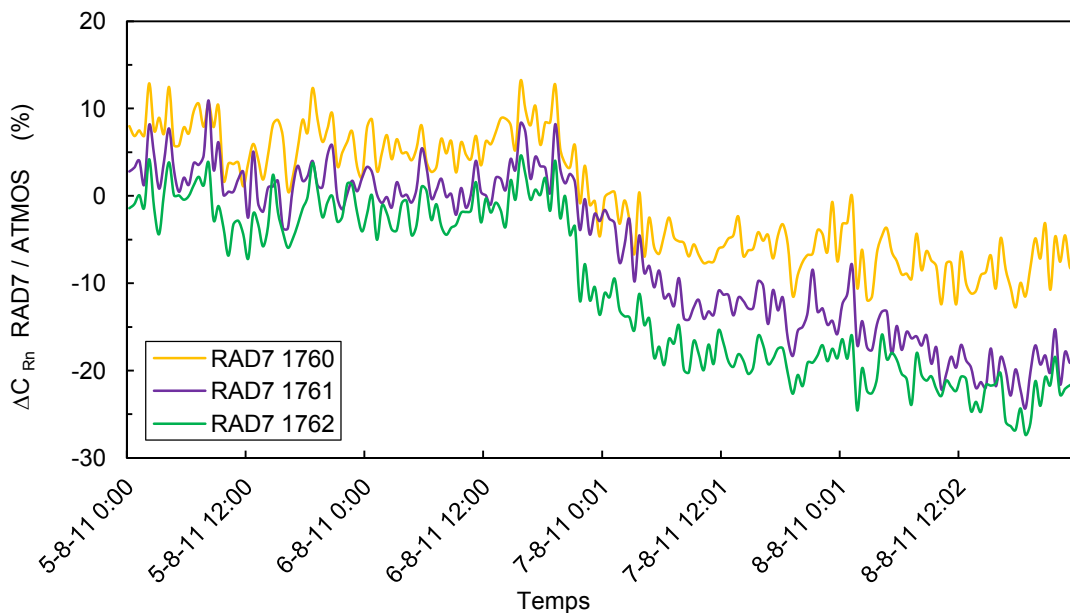


Figura 3.69. Diferència de la C_{Rn} mesurada amb els tres monitors RAD7 respecte el monitor ATMOS durant unes hores de la quarta exposició per veure l'efecte de l'esgotament de la Drierita.

3.4. Adaptació del model RAGENA al mòdul de Saelices el Chico

El mòdul experimental de Saelices el Chico està situat a Sageras del Río, Saelices el Chico, a uns escassos 300 m de les instal·lacions mineres d'extracció d'urani d'ENUSA, a la regió de Villar de la Yegua, Salamanca (**Figura 3.70**). El mòdul va ser construït l'any 2005 i consta d'una planta de 5 x 5 m² i dues alçades, una enterrada sota rasant i l'altra sobre la superfície del terreny. Està construït amb les característiques tipològiques d'Espanya i amb els materials propis de la zona, de manera que podria tractar-se de la secció d'un habitatge unifamiliar en un entorn rural. Tal com s'ha avançat en l'apartat 3.2.2.3, aquest mòdul va ser construït dins el projecte "Estudio de la viabilidad y efectividad de las acciones de remedio ante la presencia de gas radón en edificios existentes" realitzat per l'IETcc i la UC. L'objectiu principal del projecte era provar diferents solucions arquitectòniques per reduir els nivells de radó per tal de poder aplicar-les en habitatges ocupats o de nova construcció. A més a més, es va monitorar el mòdul amb diferents tipus de detectors per estudiar les variacions temporals dels nivells de radó i per caracteritzar els nivells de radi i de radó en el sòl. Un cop finalitzat aquest projecte, el CSN va encarregar a la UFR l'adaptació del model dinàmic RAGENA al mòdul, tenint en compte l'experiència de la UFR en models de radó (Font i Baixeras, 2003, Albarracín et al., 2002). En aquesta secció es descriu l'adaptació del model RAGENA al mòdul, entenent el model com una eina o un instrument que ajuda a la comprensió dels nivells de radó i a estimar la contribució relativa de cada procés d'entrada del radó. L'objectiu final d'aquesta adaptació és poder analitzar l'eficàcia de diferents mètodes de mitigació i poder complementar els resultats del projecte anterior per a la seva aplicació en el futur codi tècnic de l'edificació (Frutos et al., 2011).

El model RAGENA és un model dinàmic i global de la generació, entrada i acumulació de radó en recintes tancats (Font, 1997). Es tracta d'un model de compartiments en el que es consideren totes les fonts i processos que afecten a la dinàmica del radó a l'interior de recintes. Els diferents compartiments o sectors (sòl, materials de construcció, aigua, gas, edifici) estan relacionats entre ells i els valors dels paràmetres que tenen assignats cadascun d'ells són valors mitjos o efectius. Per exemple, en el cas del compartiment corresponent al sòl sota l'habitatge, el model obté una única C_{Rn} ; una única pressió de l'aire del sòl, considera una única permeabilitat, etc; és a dir, el model no incorpora resolució espacial. En canvi, està dissenyat per a poder incloure i predir les variacions temporals, tant dels paràmetres d'entrada com dels de sortida del model. La dinàmica dels nivells de radó en els diferents sectors s'obté a partir de les equacions diferencials que descriuen el balanç entre els fluxos d'entrada i de sortida de radó en un compartiment donat, tenint en compte també la generació i la desintegració del radó. Pot adaptar-se a qualsevol escala temporal i permet la incorporació de dades experimentals o patrons de comportament dependents del temps. La resposta del model s'ha investigat sota condicions estacionàries i dinàmiques per una configuració de referència, consistent en una casa unifamiliar amb diferents habitacions, i s'ha comprovat que el model pot aplicar-se a un ampli rang de situacions diferents (Font et al., 1999b; Font i Baixeras, 2003; Font et al., 2001).



Figura 3.70. Vista aèria de l'emplaçament del mòdul experimental de Saelices el Chico, a prop de les instal·lacions d'ENUSA, Salamanca.

A partir dels paràmetres que descriuen el sòl, els materials de construcció, el disseny del recinte, l'intercanvi d'aire amb l'exterior, l'ús de gas natural i d'aigua, el model obté els nivells de radó en els diferents compartiments i els següents fluxos d'entrada i sortida del radó: (i) entrada o sortida des del sòl per advecció (degut a gradients de pressió entre el sòl i l'habitatge), (ii) entrada des del sòl per difusió (degut a gradients de concentració), (iii) entrada des dels diferents tipus de materials de construcció per difusió (exhalació), (iv) entrada a través del consum d'aigua i de gas natural i (v) entrada o sortida degut a l'intercanvi d'aire amb l'exterior. En el cas de disposar de dades experimentals corresponents als paràmetres meteorològics (pressió atmosfèrica, velocitat del vent, pluges) i als hàbits dels ocupants (ús de sistemes de ventilació o aire condicionat, obertura de portes i/o finestres), el model disposa d'un sector que relaciona aquestes dades amb els paràmetres del model i simula les variacions temporals, tant dels nivells de radó com dels diferents fluxos d'entrada o sortida.

L'adaptació del model al mòdul experimental de Saelices el Chico es du a terme seguint el procediment descrit a Font i Baixeras (2003). Es recull tota la informació disponible del mòdul experimental per tal d'assignar el millor valor possible als paràmetres d'entrada. En funció del mètode d'obtenció del seu valor, es classifiquen els diferents paràmetres necessaris per a executar el model en dos grups:

1. **Paràmetres d'entrada:** el criteri utilitzat per seleccionar els valors d'aquests paràmetres és el següent:
 - a. si el paràmetre ha estat determinat experimentalment s'utilitza el valor obtingut a la mesura (Tipus A),
 - b. si es disposa de la informació indirecta del paràmetre se li assigna un valor típic, és a dir, conegut l'interval de valor que pot tenir el paràmetre es selecciona el valor mig de l'interval (Tipus B),
 - c. si no es té cap informació del valor del paràmetre se li assigna el valor de la configuració de referència del model RAGENA, el qual correspon a un valor típic mundial (Tipus C).

2. **Paràmetres calculats:** són els que s'obtenen a partir d'una expressió on intervenen valors d'alguns paràmetres d'entrada.

Tots els valors dels paràmetres d'entrada de la configuració de referència del model RAGENA (Tipus C), així com les expressions utilitzades per obtenir els paràmetres calculats, es poden trobar en Font (1997). En el següent apartat es donen els valors assignats a cada paràmetre i es presenten els resultats obtinguts en l'estat estacionari, mentre que l'adaptació en l'estat dinàmic es presenta en l'apartat 3.4.2. Les dades s'han obtingut a partir de l'informe final del projecte del mòdul experimental (Olaya i Quindós, 2007) i amb l'ajut dels participants en el mateix. L'annex F mostra el diagrama del model adaptat al mòdul utilitzant el programa STELLA²⁰, versió 9.1.3 (Richmond, 2004; Fisher, 2007).

3.4.1. Adaptació en l'estat estacionari

En la **Taules 3.21, 3.22, 3.23 i 3.24** es mostren, respectivament, els valors dels paràmetres corresponents al sòl, al disseny del mòdul, als materials de construcció del mòdul, i a l'intercanvi d'aire amb l'exterior. No es consideren els sectors de l'aigua ni del gas natural perquè no hi ha aquestes fonts de radó en el mòdul.

Taula 3.21. Paràmetres del sòl de Saelices El Chico (Salamanca) i del gas radó.

Símbol	Paràmetres d'entrada	Valor	Tipus	Obs.
A_{Ra}	Concentració de radi del sòl (Bq·kg ⁻¹)	1306 ± 70	A	(a)
k	Permeabilitat del sòl (m ²)	10 ⁻¹²	A	(b)
ρ_{gr}	Densitat dels grans del sòl (kg·m ⁻³)	2700	C	
d	Diàmetre mig dels grans (m)	20·10 ⁻⁶	C	
m	Fracció de saturació d'aigua	0.35	C	
μ	Viscositat dinàmica del gas del sòl (Pa·h)	5·10 ⁻⁹	C	
ε	Porositat del sòl	0.5	C	
M_{dmax}	Distància màxima de migració (m)	6.00	C	
f_{max}	Coefficient màxim d'emanació	0.3	C	
D_o	Coefficient de difusió del radó en aire (m ² ·h ⁻¹)	4.32·10 ⁻²	C	
L	Coefficient de solubilitat del radó en aigua	0.302	C	
λ_{Rn}	Constant de desintegració del radó (h ⁻¹)	7.55·10 ⁻³	C	
Símbol	Paràmetres calculats	Valor		Obs.
ρ_w	Densitat del sòl humit (kg·m ⁻³)	1525		
e_g	Porositat efectiva (gas porosity)	0.33		
F	Fracció d'àtoms que emana al gas de l'espai porós.	0.86		
f	Coefficient d'emanació	0.29		
M_d	Distància de migració (m), estat estacionari	2.44		(c)
l_a	Longitud de advecció (m), estat estacionari	2.04		(d)
l_d	Longitud de difusió (m)	1.00		(e)
D_e	Coefficient efectiu de difusió en el sòl (m ² ·h ⁻¹)	7.53·10 ⁻³		(f)
V_{DS}	Volum del sòl alterat (m ³)	268		(g)
V_{US}	Volum del sòl inalterat (m ³)	26.8·10 ⁶		(h)
C_∞	Concentració de Rn en equilibri amb el Ra en el sòl inalterat (Bq·m ⁻³)	1.52·10 ⁶		(i)

²⁰ isee systems, inc. Wheelock Office Park, 31 Old Etna Road, Suite 7N, Lebanon, NH 03766, EUA. www.iseesystems.com/software/Education/StellaSoftware.aspx

Observacions:

- a) El valor de la A_{Ra} correspon al valor mig de les 5 mostres recollides durant l'excavació dels fonaments i analitzades per la UC. Els valors obtinguts són molt superiors al valor mig mundial de concentració de radi en el sòl ($40 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$).
- b) La k és un paràmetre molt important degut a l'ampli interval de valors que pot presentar, de gairebé 10 ordres de magnitud, i que depèn principalment del tipus de sòl, la ε i el m . Segons l'informe del projecte del IETcc i la UC, el valor mig de la k és de 10^{-12} m^2 , obtingut amb l'equip RADON-JOK.
- c) La M_d és una distància típica a la qual la concentració de radó es redueix un factor $(1 - e^{-1})$ respecte la C_∞ , condició que es produeix a gran profunditat del sòl. L'expressió per determinar-la és:

$$M_d = \frac{1}{2} \left(I_a + \sqrt{I_a^2 + 4 I_d^2} \right) \quad (3.19)$$

- d) La I_a s'obté a partir de la velocitat del gas donada per la Llei de Darcy d'acord amb l'expressió:

$$I_a = \frac{k}{\mu \varepsilon \lambda_{Rn}} \nabla P \quad (3.20)$$

on ∇P ($\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$) és el gradient de pressió responsable de l'entrada del gas des del sòl alterat a l'interior del mòdul. Es determina a partir de la diferència de pressió entre el sòl i la habitació en contacte amb el sòl (soterrani) dividida per la distància que els separa.

- e) La I_d s'obté a partir de l'expressió:

$$I_d = \sqrt{D_e \lambda_{Rn}^{-1}} \quad (3.21)$$

- f) El D_e presenta un ampli interval de valors, de 10^{-10} a 10^{-5} , essent la m el factor que més afecta a aquest coeficient. L'expressió empírica utilitzada per determinar-lo és la següent (Nielson et al., 1994):

$$D_e = D_0 \varepsilon e^{-6 m \varepsilon - 6 m^{14} \varepsilon} \quad (3.22)$$

on D_0 ($\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$) és el coeficient de difusió del radó en aire.

- g) El V_{DS} s'obté a partir de la superfície del mòdul en contacte directe amb el sòl i la M_d amb l'expressió:

$$V_{DS} = 2 H M_d (2 I + M_d) + 2 I M_d + \pi M_d^2 \left(I + \frac{4}{3} M_d \right) \quad (3.23)$$

on: l (m) és la longitud del costat de la base quadrada del mòdul.
 H (m) és la profunditat del mòdul sota del nivell del sòl.

h) El V_{uS} es considera un factor 10^6 superior al valor del sòl alterat.

i) La C_∞ s'obté a partir de l'expressió:

$$C_\infty = \frac{A_{R_{aSoil}} f \rho_{gr} (1 - \varepsilon)}{\varepsilon (1 + m(L + 1))} \quad (3.24)$$

Els valors dels paràmetres d'entrada i dels paràmetres calculats del disseny del mòdul apareixen en la **Taula 3.22**.

Taula 3.22. Paràmetres del disseny del mòdul de Saelices El Chico.

Símbol	Paràmetres d'entrada	Valor	Tipus	Obs.
S_s	Base interior del soterrani (4.52 x 4.52 m ²)	20.43	A	
h_s	Altura del soterrani (m)	2.00	A	
H	Altura de la part enterrada del soterrani (m)	1.31	A	
w_f	Amplada dels fonaments (m)	0.20	A	
E_s	Base de l'espai de l'escala (4.52 x 1 m ²)	4.52	A	
h_e	Altura de l'espai de l'escala (m)	2.41	A	
S_b	Base interior de la planta baixa (4.52 x 3.52 m ²)	15.46	A	
h_b	Altura de la planta baixa (m)	2.41	A	
S_p	Superfície de les portes/finestres planta baixa (m ²)	6.15	A	
S_{sb}	Superfície soterrani en contacte amb planta baixa (m ²)	26.35	A	
w_{gr}	Amplada de les esquerdes a la base del soterrani (m)	0.001	C	
Símbol	Paràmetres calculats	Valor		Obs.
V_{ib}	Volum interior del soterrani + espai escala (m ³)	51.75		(a)
S_s	Superfície en contacte directe amb el sòl (m ²)	44.12		(b)
S_σ	Àrea oberta del soterrani (m ²)	0.02		
σ	Fracció de l'àrea oberta	$5.3 \cdot 10^{-4}$		
V_{ig}	Volum interior de la planta baixa (m ³)	37.25		

Observacions:

a) Al volum interior del soterrani (40.86 m³) se li ha afegit el volum que ocupa l'escala al pis superior (10.89 m³).

b) La superfície en contacte amb el sòl s'ha determinat considerant les dimensions interiors del mòdul (sense considerar les sabates): $(4.52 \times 4.52) \text{ m}^2 + (4 \times 1.31 \times 4.52) \text{ m}^2 = 44.12 \text{ m}^2$.

Els dos principals components dels materials de construcció del mòdul són el formigó i el totxo. Els valors dels paràmetres d'entrada i dels paràmetres calculats dels materials de construcció del mòdul apareixen a la **Taula 3.23**.

Taula 3.23. Paràmetres dels materials de construcció del mòdul de Saelices El Chico.

Símbol	Paràmetres d'entrada	Valor formigó	Valor totxo	Tipus	Obs.
A_{RaBM}	Concentració de Radi (Bq·kg ⁻¹)	50	60	C	
ρ_{BM}	Densitat (kg·m ⁻³)	2030	2000	C	
ε_{BM}	Porositat	0.20	0.25	C	
f_{BM}	Fracció d'emanació	0.15	0.05	C	
D_{eBM}	Constant de difusió efectiva (m ² ·h ⁻¹)	$1.8 \cdot 10^{-4}$	$3.6 \cdot 10^{-4}$	C	
W_{bBM}	Amplada al soterrani (m)	0.25	0.30	B	(a) (b)
W_{gBM}	Amplada a la planta baixa (m)	0.25	0.15	B	(a) (b)
ω_{CLBM}	Amplada de la capa de recobriment (m)	0.05	0.05	C	(b)
g	Factor de recobriment	0.7	0.7	C	(c)
Símbol	Paràmetres calculats	Valor formigó	Valor totxo		Obs.
l_{dBM}	Longitud de difusió (m)	0.154	0.218		
S_{bBM}	Superfície del soterrani (m ²)	40.86	61.34		
S_{gBM}	Superfície de la planta baixa (m ²)	30.92	32.12		
V_{bBM}	Volum del soterrani (m ³)	6.31	13.39		(d)
V_{gBM}	Volum de la planta baixa (m ³)	4.77	4.89		(d)
K_{DBM}/S_{BM}	Coef. transferència per difusió per unitat de superfície (m·h ⁻¹)	0.00252	0.00504		(e)

Observacions:

- a) Segons l'informe, els sòls de les dues habitacions són enrajolats de terratzo (revestiments de ciment endurit prefabricats en rajoles) que es suposa que és d'uns 0.05 m de gruix, la solera és de formigó armat de 0.20 m de gruix i el forjat del sostre està fet amb revoltó ceràmic recobert de formigó, per tant, es considera que ambdues superfícies (base i sostre) d'ambdues habitacions són de formigó.
- b) Segons l'informe, les parets del soterrani tenen doble capa de totxo de 0.152 m, per tant, una amplada total de 0.305 m. A la planta baixa les parets des de l'exterior a l'interior tenen: (i) totxo de 0.152 m, (ii) 0.05 m d'aïllant, (iii) una cambra d'aire, (iv) totxo de 0.050 m i (v) 0.010 m de guix. Per simplificar es negligeix la cambra d'aire, el totxo estret i el recobriment de guix i es considera un totxo de 0.152 m i per l'amplada de la capa de recobriment s'ha agafat un valor típic de 0.050 m.
- c) El g dels materials de construcció pot prendre un valor igual o inferior a 1 i té en compte que la capa de recobriment pot reduir de forma significativa l'exhalació radó dels materials de construcció.
- d) El volum dels materials és el producte de la superfície per l'amplada. En aquest treball s'ha multiplicat per la longitud de difusió, que normalment és menor que l'amplada del material, excepte en el cas del totxo de la planta baixa.
- e) El K_{DBM}/S_{BM} es determina a partir de l'expressió:

$$\frac{K_{DBM}}{S_{BM}} = g \frac{D_{eBM}}{\omega_{CL}} \quad (3.25)$$

Els valors dels paràmetres d'entrada de l'exterior i dels intercanvis d'aire per l'anàlisi de l'estat estacionari apareixen a la **Taula 3.24**.

Taula 3.24. Paràmetres de l'exterior i dels intercanvis d'aire en el mòdul de Saelices El Chico.

Símbol	Paràmetres d'entrada	Valor	Tipus	Obs.
C_o	Concentració d'àtoms de Rn a l'aire exterior ($Bq \cdot m^{-3}$)	5	C	
ΔP_{s-i}	Diferència de pressió sòl-interior (Pa), estat estacionari	5	C	(a)
λ_{io}	Taxa de ventilació a la planta baixa (h^{-1})	0.1	B	(b)
λ_{ij}	Taxa d'intercanvi d'aire entre soterrani i planta baixa (h^{-1})	0.01	B	(c)

Observacions:

- Inicialment es selecciona el valor de la configuració de referència ja que la diferència de pressió sòl-interior no es va determinar experimentalment.
- La planta baixa disposa d'una porta i dues finestres en contacte amb l'exterior que han estat tancades durant la major part del temps que s'han realitzat les mesures, per tant, s'ha assignat un valor típic baix per la λ_{io} d'aquesta habitació. Tot i això, es disposa d'una relació potencial per la λ_{io} que depèn de les diferències de pressió entre l'interior i l'exterior. Aquesta relació s'utilitza a l'anàlisi dels resultats dinàmics.
- El soterrani només disposa d'una porta d'accés al pis superior, que suposem que va estar tancada durant la major part del temps que s'han realitzat les mesures, per tant, s'assigna un valor baix per la λ_{ij} .

En la **Taula 3.25** es presenten els resultats obtinguts amb el model RAGENA (Valor I) i es comparen amb els valors experimentals obtinguts en el mòdul en el període de 4 mesos en el que es varen realitzar mesures dels nivells de radó abans de procedir a provar diferents solucions arquitectòniques per reduir els nivells de radó. Els resultats obtinguts no coincideixen amb els valors mitjos experimentals de la C_{Rn} (Valor exp. de la **Taula 3.25**). Aquest desacord motiva la revisió d'alguns valors dels diferents paràmetres d'entrada, que inicialment han estat seleccionats seguint el criteri descrit anteriorment. A la **Taula 3.26** es mostren els nous valors dels paràmetres modificats. Amb ells s'obté un major ajust del model als resultats experimentals del mòdul (Valor II de la **Taula 3.25**).

Els resultats obtinguts en l'estat estacionari dona una possible explicació dels nivells de radó, tant en el soterrani com en la planta baixa: la principal font de radó en el mòdul és el sòl, el qual contribueix amb un 95 % de l'entrada total al soterrani. El principal mecanisme d'entrada al soterrani a través del sòl és la difusió (67 %), mentre que l'advecció contribueix amb un 28 %. La contribució dels materials de construcció és només del 5 % i deguda al formigó. Pel que fa a la planta baixa, el nivell de radó és un factor 8 menor que en el soterrani i és degut bàsicament a l'intercanvi d'aire amb el soterrani, que suposa el 91 % de l'entrada de radó en la planta baixa. La resta és deguda bàsicament al formigó (7.2 %).

Taula 3.25. Paràmetres de sortida del model en condicions estacionàries i valors experimentals de la C_{Rn} en el mòdul de Saelices El Chico.

Paràmetres de sortida	Valor I	Valor II	Valor exp.	Obs.
Concentració de radó ($Bq \cdot m^{-3}$) en:				
Sòl	$1.5 \cdot 10^6$	$1.5 \cdot 10^6$	$0.35 \cdot 10^6$	(a)
Soterrani	$3.5 \cdot 10^3$	$42 \cdot 10^3$	$42 \cdot 10^3$	(b)
Planta baixa	556	$5.2 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$	
Taxa d'entrada de radó ($Bq \cdot h^{-1}$) al soterrani procedent de:				
Formigó	632	$1.6 \cdot 10^3$		
Totxo	477	88		
Sòl (advecció)	526	$10.3 \cdot 10^3$		
Sòl (difusió)	1284	$24.4 \cdot 10^3$		
Taxa d'entrada de radó ($Bq \cdot h^{-1}$) a la planta baixa procedent de:				
Formigó	499	$1.5 \cdot 10^3$		
Totxo	205	374		
Soterrani	$1.5 \cdot 10^3$	$19.0 \cdot 10^3$		
Flux d'entrada de radó ($Bq \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$) al soterrani procedent de:				
Formigó (taxa d'exhalació)	15	39		
Totxo (taxa d'exhalació)	8	1		
Sòl (advecció)	12	232		
Sòl (difusió)	29	552		
Flux d'entrada de radó ($Bq \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$) a la planta baixa procedent de:				
Formigó (taxa d'exhalació)	16	48		
Totxo (taxa d'exhalació)	6	12		
Soterrani (taxa d'intercanvi d'aire)	57	723		
Taxa d'intercanvi de radó ($Bq \cdot h^{-1}$) amb l'exterior procedent de:				
Planta baixa	$2.1 \cdot 10^3$	$19.3 \cdot 10^3$		

Observacions:

- El valor de la C_{Rn} en el sòl obtingut amb el model és superior al determinat experimentalment en un factor ~ 4 , però cal tenir en compte que els nivells de radó mesurats en el sòl presentaven una gran dispersió i que el valor obtingut amb el model correspon a un valor mig en tot el sòl alterat, tal com s'ha indicat abans.
- Els valors de la C_{Rn} en el soterrani i la planta baixa obtinguts amb la primera adaptació del model (Valor I) són baixos mentre que els obtinguts amb el reajustament dels paràmetres d'entrada (Valor II) coincideixen millor amb els valors experimentals.

Taula 3.26. Paràmetres d'entrada que han modificat el seu valor respecte a la configuració de referència.

Símbol	Paràmetres d'entrada	Valor	Obs.
ω_{gr}	Amplada de les esquerdes a la base del soterrani (m)	0.02	(a)
$A_{Ra-concrete}$	Concentració de radi a formigó ($Bq \cdot kg^{-1}$)	150	(b)
$A_{Ra-brick}$	Concentració de radi a totxo ($Bq \cdot kg^{-1}$)	120	(c)

Observacions:

- Amb l'objectiu d'obtenir informació addicional sobre aquest paràmetre es contacta amb membres de l'IETcc i es verifica que el seu valor ha de ser superior al valor de la configuració de referència. Inicialment el soterrani del mòdul no estava ben

aïllat del sòl; no hi havia cap material que segellés les juntes a la base del soterrani.

- b) Segons l'informe del projecte, per la construcció del mòdul es van utilitzar materials típics de la zona i es sap que els sòls de la zona es caracteritzen per uns nivells elevats de radi, per tant, es suposa que algun component del formigó (ciment, sorra, grava, aigua, etc) pot contribuir a que aquest tingui uns nivells més elevats de radi que els de l'interval de valors típics, de $10 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ a $80 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- c) El valor típic del contingut de radi dels totxos vermells és de $(78 \pm 11) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ però s'entén que les parets també contenen el ciment que uneix a els totxos. Aquest ciment, de forma anàloga al cas del formigó, també pot fer augmentar el contingut de radi de la paret.

3.4.2. Adaptació en l'estat dinàmic: l'efecte de les variacions de la pressió atmosfèrica.

L'adaptació del model en l'estat dinàmic és més complexa que en l'estat estacionari. Cal relacionar els paràmetres mediambientals obtinguts experimentalment amb els paràmetres del model. Aquesta relació es du a terme en el sector "paràmetres mediambientals" i es detalla a continuació.

Els paràmetres mediambientals mesurats de forma contínua durant els períodes en què no s'estava aplicant cap mètode de mitigació són:

1. Les temperatures i les diferències de pressió entre l'interior i l'exterior del mòdul. Aquestes van ser mesurades de forma contínua en intervals d'una hora, des del dia 18 de febrer fins el 9 de març de 2006.
2. Els paràmetres mesurats per l'estació meteorològica d'ENUSA, situada a la planta Quercus, a uns 2 km del mòdul (**Figura 3.70**), també foren proporcionats en intervals d'una hora:
 - velocitat del vent (valor mig i màxima) i la seva direcció,
 - temperatura de l'aire (valor mig i màxima),
 - humitat relativa (valor mig),
 - pressió atmosfèrica (valor mig),
 - radiació solar (valor mig i màxima),
 - pluja acumulada i evaporació.

Per entendre el procediment d'adaptació en l'estat dinàmic, cal tenir en compte les principals conclusions a que es va arribar en el projecte dut a terme entre la per l'IETcc i la UC (Olaya i Quindós, 2007; Frutos, et al., 2011) en relació als paràmetres mediambientals:

1. **Precipitació:** S'observa una correlació positiva entre la pluja i l'augment de la concentració interior de radó, tant en el soterrani com a la primera planta.
2. **Vent:** Les variacions a la C_{Rn} semblen estar correlacionades positivament amb la velocitat del vent. L'efecte del vent d'induir una diferència de pressió entre l'interior i l'exterior sembla més important que el d'afavorir l'intercanvi d'aire exterior-interior.
3. **Temperatura:** No sembla haver correlació entre cap de les temperatures mesurades i la C_{Rn} . L'efecte de les diferències de temperatura no sembla responsable de les variacions observades a la C_{Rn} .
4. **Pressió atmosfèrica:** Existeix una correlació negativa clara entre la pressió atmosfèrica i les concentracions de radó a l'interior del mòdul.

L'efecte de la precipitació es pot tenir en compte de forma dinàmica relacionant la precipitació amb la fracció de saturació d'aigua del sòl, tal com es mostra a Font (1997). La velocitat del vent i les diferències de temperatura entre l'interior i l'exterior d'un habitatge generen petites diferències de pressió entre l'interior de l'habitatge i l'exterior. El vent, a més a més, afavoreix l'intercanvi d'aire amb l'exterior. Aquests efectes, però, acostumen a produir diferències de pressió que no superen els 10-20 Pa i que es tradueixen en diferències de pressió del mateix ordre entre el sòl sota l'habitatge i la planta de l'habitatge en contacte directe amb el sòl. Així, en l'estat estacionari és habitual considerar unes diferències de pressió mitjanes d'uns 5-10 Pa entre l'interior de l'habitatge i el sòl sota seu. Aquestes diferències de pressió "estacionàries" són les responsables a llarg termini de l'entrada de radó en habitatges per advecció. En canvi, les variacions brusques de la pressió atmosfèrica poden provocar, en alguns casos, diferències de pressió entre el sòl i l'habitatge molt més elevades, de l'ordre dels 250 Pa, tal com es mostra a Hintenlang i Al-Ahmady (1992). Aquestes diferències transitòries provoquen una entrada de radó quan hi ha una caiguda de la pressió atmosfèrica i una sortida quan hi ha una pujada, de manera que el seu valor mig a llarg termini és zero i no es consideren en l'estat estacionari. Però en l'estat dinàmic poden afectar molt les variacions dels nivells de radó. Les dades experimentals trobades per l'IETcc i la UC semblen indicar que en el cas de mòdul de Saelices el Chico les variacions de la pressió atmosfèrica són les més determinants. Per aquest motiu en aquesta tesi l'adaptació del model RAGENA en l'estat dinàmic s'ha centrat en modelitzar la diferència de pressió transitòria entre el sòl i el soterrani deguda a les variacions de la pressió atmosfèrica, ja que no es disposa d'una mesura directa d'aquesta diferència. Es tracta del primer cop, pel què els membres de la UFR saben, que es du a terme una modelització d'aquest efecte en un cas real. Es deixa com a perspectiva de treball en el futur pròxim incloure l'efecte de la pluja i dels mecanismes de generació de diferències de pressió més petites (la velocitat del vent i la diferència de temperatura entre l'exterior i l'interior del mòdul).

La diferència de pressió entre el sòl i l'interior del mòdul s'estima a partir de l'expressió següent:

$$\Delta P_{s-i}(t) = P_s(t) - P_i(t) = P_{at}(t - \tau_p) - P_{at}(t) \quad (3.26)$$

on, com a primera aproximació, s'assumeix que la pressió interior canvia instantàniament amb la pressió atmosfèrica, P_{at} (Pa), i que la pressió del sòl canvia amb un temps de retard, τ_p (h), donat per l'expressió (Nazaroff, 1992):

$$\tau_p = \frac{l_p^2}{D_p} \quad (3.27)$$

on: l_p és la distància que es propaga la pertorbació de la pressió (m).
 D_p és el coeficient de difusió per pertorbacions de pressió ($\text{h}^{-1} \text{m}^{-2}$), donat per l'expressió:

$$D_p = \frac{k P_{at}}{\mu \varepsilon} \quad (3.28)$$

Quan hi ha una caiguda de la pressió atmosfèrica, la pressió dins el mòdul segueix el mateix comportament amb un endarreriment negligible, mentre que l'aire que omple l'espai porós del sòl sota el mòdul experimenta la caiguda de la pressió només quan ha passat el temps de retard. Així, durant un cert temps, la pressió de l'aire del sòl és major que la de l'aire dins el mòdul. Aquesta diferència de pressió genera un gradient de pressió negatiu que, d'acord amb la llei de Darcy, provoca un flux d'aire del sòl cap a l'interior del mòdul. Inicialment s'escull un valor de l_p de 6 m d'acord amb les dimensions del mòdul i veient la distància que ha de viatjar una pertorbació de pressió des de l'exterior fins al punt mig del sòl sota el mòdul. Fent ús de les expressions (3.21), (3.22) i (3.23) i els valors de la configuració de referència de la k (10^{-12}m^2), de la μ ($5 \cdot 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{h}$) i de la ε (0.5) s'obté un valor de τ_p de 0.96 h. Amb aquests valors s'obtenen els resultats de la C_{Rn} que segueixen aproximadament el comportament dinàmic dels valors experimentals però no s'arriba als mateixos nivells de radó observats.

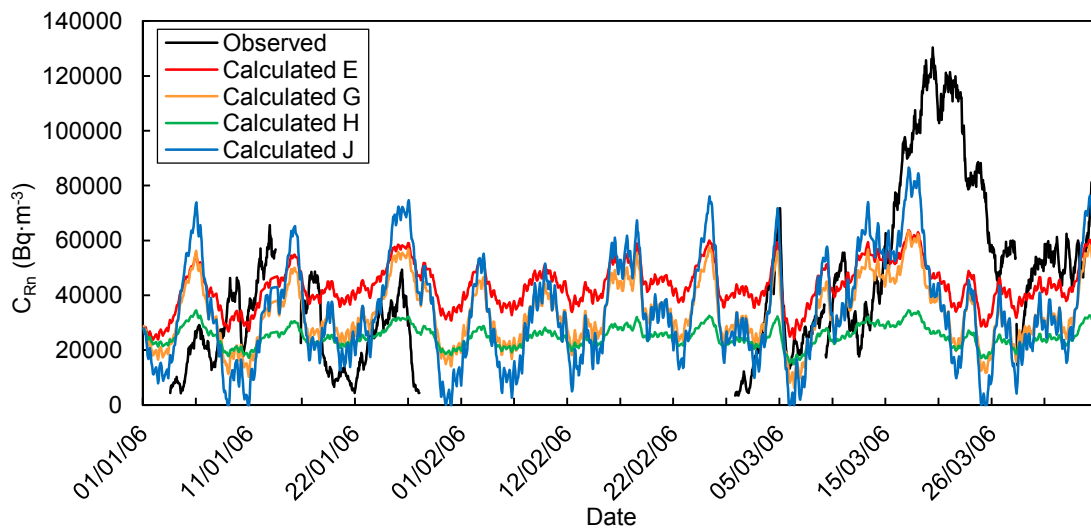
Per tal d'optimitzar els resultats es realitza un estudi de variabilitat dels paràmetres que influeixen en la determinació del valor de τ_p . D'aquesta forma es pot comprovar que les diferències de pressió entre el sòl i l'interior del mòdul que es seleccionen permeten reproduir els valors de la C_{Rn} . Variant els paràmetres l_p , k i ε dins dels intervals que es mostren en la **Taula 3.27** s'obtenen diferents valors de τ_p (**Taula 3.28**) amb els que es modelitza la C_{Rn} i es compara amb el valor experimental obtingut amb els detectors actius. A la **Figura 3.71** es comparen els resultats obtinguts utilitzant els valors de quatre casos de la **Taula 3.28** (E, G, H i J) amb les dades observades en el soterrani del mòdul.

Taula 3.27. Interval de variació dels paràmetres l_p , k i ε .

Paràmetre	Símbol	Unitat	Interval de variació
Longitud de propagació de la pressió	l_p	m	4 – 8
Permeabilitat	k	m^2	$5 \cdot 10^{-13}$ – $5 \cdot 10^{-12}$
Porositat	ε	-	0.4 – 0.6

Taula 3.28. Valors del temps de retard τ_p per diferents valors dels paràmetres l_p , k i ε .

CAS	A	B	C	D	E	F
l_p (m)	4	6	6	4	4	6
k (m ²)	$5 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$	10^{-12}	$5 \cdot 10^{-13}$	10^{-12}
ε	0.4	0.4	0.6	0.5	0.4	0.4
τ_p (h)	0.07	0.15	0.23	0.43	0.68	0.77
CAS	G	H	I	J	K	L
l_p (m)	6	4	6	8	6	8
k (m ²)	10^{-12}	$5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-13}$	10^{-12}	$5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-13}$
ε	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.6
τ_p (h)	0.96	1.02	1.53	1.70	2.30	4.09

**Figura 3.71.** Concentracions de radó modelitzades (E, G, H i J) i l'observada en el soterrani del mòdul de Saelices el Chico.

Dels 12 casos analitzats el millor ajust s'obté amb el cas F, que equival a tenir una porositat inferior a la de la configuració de referència ($\varepsilon=0.4$) i un temps de propagació de la perturbació de la pressió $\tau_p=0.77$ h. A les **Figures 3.72** i **3.73** es mostren les comparacions de la C_{Rn} modelitzada i observada en el soterrani i a la planta baixa, respectivament, per aquest cas concret. Com es pot observar, durant la major part de temps existeix un bon acord entre els resultats experimentals i els modelitzats de la C_{Rn} en el soterrani, mentre que en el període del 18 al 26 de març els resultats modelitzats no reproduïen tan bé els resultats experimentals, tot i que les tendències segueixen essent comparables. S'observa que durant aquest període es van produir episodis de pluja, els quals poden modificar els valors d'alguns paràmetres d'entrada com la permeabilitat, el coeficient de difusió, etc. Pel que fa als resultats obtinguts en la planta baixa, s'observa que el model presenta unes fluctuacions més suavitzades que les obtingudes experimentalment. Aquest fet indica que la resposta del model a les variacions dels paràmetres és massa lenta. A més a més, però, cal tenir en compte que les variacions produïdes per l'efecte de la pluja, la velocitat del vent i les diferències de temperatura no estan incloses en la simulació.

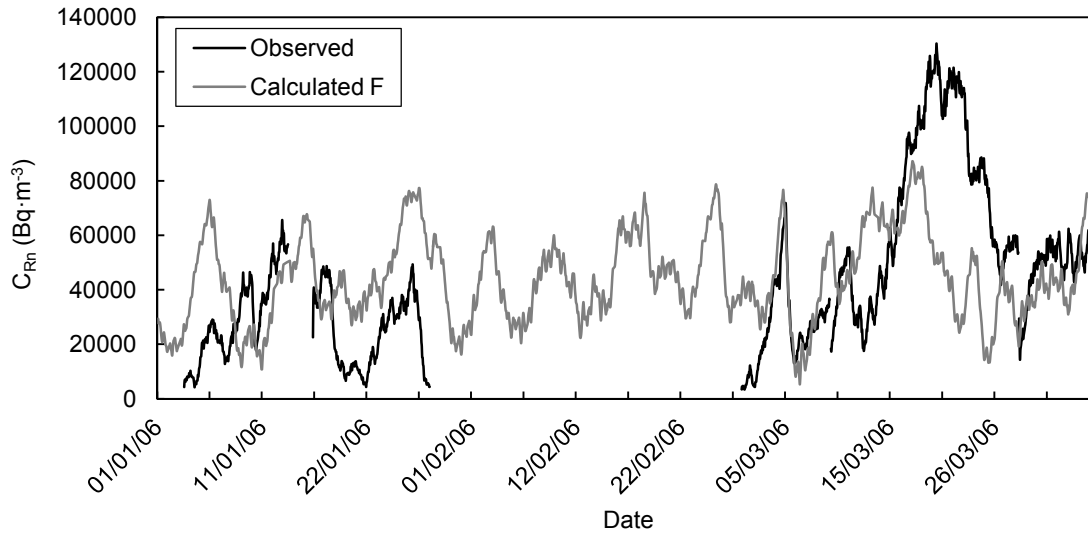


Figura 3.72. Comparació de la C_{Rn} modelitzada (cas F) i l'observada en el soterrani del mòdul de Saelices el Chico.

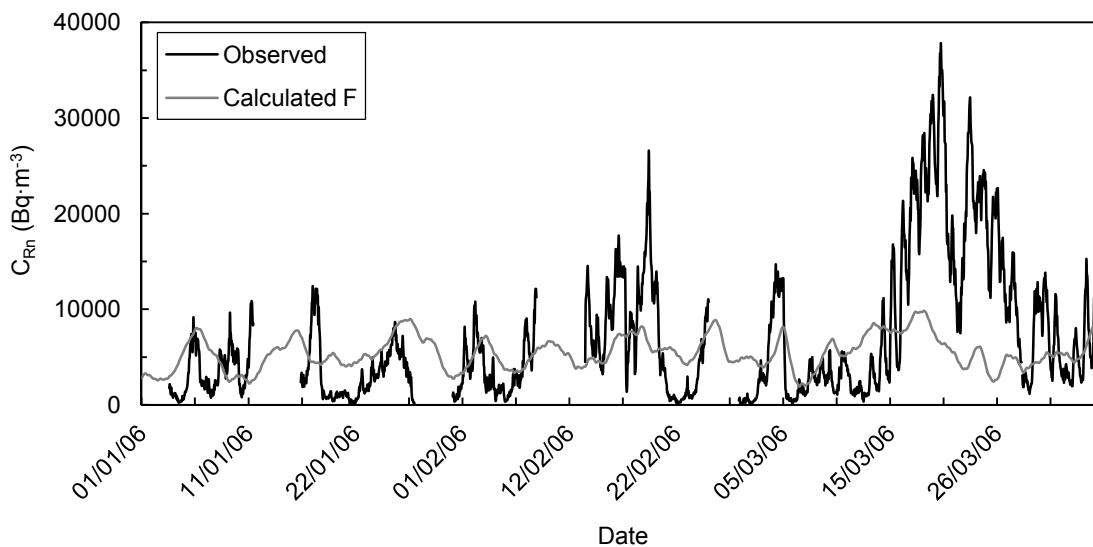


Figura 3.73. Comparació de la C_{Rn} modelitzada (cas F) i l'observada en la planta baixa del mòdul de Saelices el Chico.

3.5. Discussió

En aquest capítol s'ha descrit el conjunt de detectors de radó disponibles a la UFR i s'ha caracteritzat la seva resposta, tant en condicions normals com en condicions més extremes d'humitat i de temperatura. S'han dut a terme diferents exercicis de calibratge i d'intercomparació. Aquests estudis han permès determinar quines són les condicions òptimes d'ús de cada tipus de detector per a cada tipus de mesura de radó desitjada.

Les principals característiques, els avantatges i els inconvenients de la instrumentació utilitzada per la mesura de la C_{Rn} es resumeixen a la **Taula 3.29** (detectors actius) i **Taula**

3.30 (detectors passius). De les diferents possibilitats de mesura en diferents medis, mitjançant els diferents accessoris dels detectors actius, en negreta s'indiquen aquelles que s'han emprat en aquest treball.

Per realitzar mesures en continu de la C_{Rn} a l'aire els equips més robustos i compactes són els monitors ATMOS i AlphaGUARD. Mentre que el primer només és adequat per mesures d'interiors, en necessitar estar endollat a la xarxa elèctrica, el segon té els avantatges de ser més lleuger i portàtil, tenir bateries internes que li proporcionen una autonomia de 10 dies i mesurar paràmetres meteorològics; fets que el converteixen en l'equip més adequat per mesures tan en exteriors com en interiors sense possibilitat de connexió a la xarxa elèctrica. El seu principal inconvenient és el preu.

El PRASSI també ha estat un monitor robust i compacte, però actualment està espatllat i no es pot reparar perquè està obsolet i no es comercialitza. Cal destacar que no distingia entre el radó i el toró i la seva resposta al radó es veia afectada per la presència de toró. Només calia prendre la precaució d'allunyar-lo més de 30 cm de les parets.

El RAD7 és l'únic detector que proporciona nivells de radó i toró en aire de forma directa, és a dir, a partir de l'espectrometria. La mesura de la concentració de toró de forma continua és complicada de portar a terme degut a la necessitat de petits volums de Drierita per eliminar la humitat de l'aire mesurat. Per altra banda, representa un equip adequat per fer mesures puntuals de les concentracions de radó i toró en interiors i exteriors, i el fet de tenir un preu més assequible que la resta, ha permès que se n'hagin pogut adquirir fins a 4 unitats.

Per realitzar mesures de la C_{Rn} a l'aire del sòl, l'equip més adequat per mesures en continu és el Clipperton, però té alguns inconvenients importants: (i) que no es comercialitza, (ii) que presenti moltes fluctuacions i (iii) que la seva carcassa no és prou estanca per protegir l'electrònica de l'aigua. De les cinc unitats que es disposava inicialment, actualment només en queda una, perquè les altres s'han espatllat degut a la presència d'aigua en el sòl. Està previst adquirir un nou equip, un Barasol de Algade²¹, que no presenti aquests inconvenients per seguir realitzant aquest tipus de mesures.

Per mesures puntuals de la C_{Rn} a l'aire del sòl, els dos equips que disposen d'accessoris i permeten mesurar la concentració de toró, de forma directa i indirecta, són el RAD7 i l'AlphaGUARD, respectivament. Fins l'actualitat només s'ha treballat amb l'AlphaGUARD, ja que la necessitat de Drierita per part del RAD7 representa un inconvenient, tot i que la lectura directa del toró és un gran avantatge que redueix incerteses.

Per realitzar mesures de la C_{Rn} dissolt a l'aigua només es disposa dels accessoris del monitor RAD7, tan per mesures puntuals RADH₂O com en continu RAD-AQUA, per tant, no es pot comparar amb cap altre detector.

²¹ Algade, Ave. du Brugeaud, 1, B.P. 46, 87250 Bessines sur Gartempe, França. www.algade.com

Entre els diferents detectors passius per mesurar la C_{Rn} a l'interior de recintes la UFR de la UAB només utilitza el Makrofol. El CR-39 utilitzat a les exposicions de la cambra de radó de l'INTE s'analitza a laboratoris externs (Landauer Nordic AB) i no es té un coneixement complet de tots els avantatges i els inconvenients de la seva utilització. Respecte del detector de Makrofol cal esmentar que el fet de sotmetre'l a un revelatge electroquímic fa augmentar la mida de les traces registrades i en facilita la lectura. És un detector amb un baix fons i una sensibilitat que el fa adequat per a temps d'exposició llargs. S'han observat fluctuacions importants però la utilització d'una nova font d'alimentació ha permès millorar la reproductibilitat.

Respecte a la instrumentació utilitzada per realitzar les mesures de la taxa de dosi absorbida deguda a la radiació gamma terrestre cal esmentar que s'escull el monitor Eberline amb la sonda HPA-270 per ser l'equip més adequat disponible a la UAB en el moment de realitzar la campanya de mesura de l'apartat 4.2.5. Recentment la UFR de la UAB ha adquirit un equip que permet fer espectrometria que en aquest moment resultaria ser el més adequat. Igualment per les mesures dels paràmetres meteorològics, quan es desenvolupen les campanyes del capítol 4 es disposa d'una petita estació meteorològica per realitzar mesures puntuals i en continu de poques hores, mentre que per mesures en continu de llarga durada es sol·liciten les dades a l'Institut Meteorològic de Catalunya. Actualment, la UFR disposa d'una estació meteorològica molt més completa i que permet poder descarregar les dades mesurades de forma ràpida, la qual cosa la converteix en l'estació més adequada per les mesures de llarga durada.

Els calibratges i la participació en intercomparacions esdevenen essencials per disposar d'un bon control de qualitat de les mesures que realitza un laboratori. Són especialment rellevants els resultats de les intercomparacions dels detectors de Makrofol en dos centres de referència (HPA i INTE) realitzades entre els anys 2005-201, les quals posen de manifest una diferència del 24 % entre els factors de calibratge obtinguts en ambdós centres. Aquesta diferència pot ser deguda a fluctuacions del mètode de mesura de la UFR (generades per variacions en els lots de material de Makrofol, en les condicions de revelatge, etc.) així com també a una discrepància entre els equips dels dos centres de referència.

Una diferència del 35 % entre els resultats dels detectors de la UC i la UAB en el mòdul experimental de Saelices el Chico posa de manifest que les discrepàncies entre centres que no són de referència encara poden ser més grans. La discrepància del 46 % entre els resultats de detectors passius de radó de la UAB i la UC en una campanya de mesures en habitatges també posa de manifest que no només el detector utilitzat, sinó les instruccions que es donen als col·laboradors i la senzillesa de la instal·lació i recollida dels dosímetres són també factors que poden afectar als resultats obtinguts en un habitatge en particular i, per tant, esdevenen factors molt importants a l'hora de dissenyar la campanya.

Els deterioraments observats en alguns detectors actius i passius exposats sota condicions ambientals extremes de temperatura i humitat, sobretot aquells detectors que disposen de filtres de fibra de vidre com els de Makrofol i LR115 o que no queden ben aïllats, com els Clippertons, ha motivat l'anàlisi de diferents tipus de membranes de polietilè per evitar l'efecte de la humitat. Per les exposicions dels detectors passius a la cambra de referència

de l'INTE, s'han seguit els procediments de mesura utilitzats en mesures reals de llarga exposició i sense membranes. La gran dispersió dels resultats posa de manifest que la utilització de membranes requereix de nous procediments, especialment per exposicions curtes, i l'establiment de factors correctors o, el que és el mateix, de nous factors de calibratge per les configuracions escollides.

Els detectors integradors analitzats no mostren l'efecte de la humitat per exposicions curtes com les que es realitzen a l'INTE. Els filtres de fibra de vidre no es veuen deteriorats i tampoc la làmina de Mylar, pel cas dels detectors de Makrofol. Sí que s'observa la influència de la membrana sobre el resultat de la mesura degut a no tenir en compte el temps de difusió del radó a través de la membrana i a que les concentracions finals dins i fora de la cambra són diferents. En el cas d'utilitzar membranes de polietilè per evitar l'efecte de la humitat per mesures de curta durada, com per exemple amb els Electrets, s'ha de tenir en compte el temps de difusió del radó a través de la membrana i això implica conèixer el coeficient de difusió de la membrana o aplicar un factor corrector determinat prèviament amb una exposició en una cambra de referència.

La impossibilitat pràctica de realitzar llargues exposicions en una cambra de referència on els detectors estiguin sotmesos a condicions de condensació ha creat la necessitat d'utilitzar com a laboratoris naturals algunes activitats laborals reals amb condicions extremes. Amb les exposicions entre els 4 i els 30 dies de durada de detectors de Makrofol en ambients humits s'ha observat l'eficàcia de les membranes de polietilè C i D per evitar el deteriorament provocat per la humitat, especialment en el cas de la membrana de major gruix. A més, per exposicions d'aquestes durades, el temps de difusió del radó a través de la membrana ja no és significatiu.

L'adaptació del model RAGENA al mòdul experimental de Saelices el Chico sota condicions estacionàries permet de donar una possible explicació als mecanismes d'entrada del radó dins el mòdul i als nivells de radó obtinguts abans de dur a terme mesures de mitigació. S'ha trobat que el principal mecanisme és la difusió a través del sòl adjacent als fonaments del mòdul, contribuint en una mica més del doble que l'advecció a través del sòl. En canvi, sota condicions dinàmiques, s'ha vist que les variacions de la pressió atmosfèrica indueixen un gradient de pressió entre el sòl i el soterrani que domina les variacions temporals dels nivells de radó, especialment en el soterrani. Aquesta dependència de les variacions temporals amb l'entrada dinàmica per advecció produïda per les variacions de la pressió atmosfèrica no contradueix els resultats obtinguts en l'estat estacionari, ja que les diferències de pressió transitòria en valor mig tendeixen a zero. Es pot explicar ambdós resultats (estacionari i dinàmic) considerant: (i) una entrada per difusió dominant i sostinguda en el temps, (ii) una altra entrada advectional menys important i igualment sostinguda en el temps deguda a petites diferències de pressió produïdes per la velocitat del vent i per les diferències de temperatura entre el mòdul i l'aire exterior i (iii) una entrada o sortida advectional de radó important deguda a les variacions de pressió atmosfèrica.

S'ha dut a terme per primer cop una modelització del temps de retard aplicada a un cas real. L'estudi de la variabilitat dels paràmetres que influeixen en la determinació del temps de retard que triga una variació de la pressió atmosfèrica en propagar-se pel sòl fins a sota

del mòdul permet trobar que el millor ajust experimental s'obté amb un sòl que tingui una porositat de 0.4 i un temps de retard de 0.77 h. El valor de la porositat obtingut és lleugerament diferent del de la configuració de referència (0.5) i perfectament assumible pel tipus de sòl de Saelices el Chico. En un futur proper, i ja fora dels objectius d'aquesta tesi, es continuarà l'adaptació del model RAGENA al mòdul incloent les dades de la precipitació, la velocitat del vent i les diferències de temperatura en el període previ a les mesures de mitigació que es varen aplicar, per a continuació simular els mètodes de mitigació emprats.

Taula 3.29. Principals característiques de la instrumentació utilitzada per la mesura de la C_{Rn} (Detectors actius).

Nom del detector Model / Fabricant	Mètode de detecció	Entrada d'aire	Tipus de mesures	Medis mesurables	Avantatges	Inconvenients
PRASSI 5S / Silena	Cambrada centelleig sòlid	Filtre + Bomba interna	Puntuals i en continu	Aire i aigua	La humitat no l'afecte. Gràfica instantània. Bateria internes (8 h d'autonomia).	La presència de toró afecta la resposta. Pes (15 kg). Ja no es comercialitza.
ATMOS 12 DPX / Gammadata Instruments AB	Cambrada d'ionització	Filtre + Bomba interna	Puntuals i en continu	Aire	La humitat no l'afecte.	Pes (14 kg). Alimentació (xarxa elèctrica) Senyals elèctrics poden afectar la mesura.
AlphaGUARD PQ2000 PRO / Saphymo GmbH	Cambrada d'ionització	Filtre + Difusió o bomba externa	Puntuals i en continu	Aire, aigua i sòl	Mesura temperatura, humitat relativa i pressió atmosfèrica Mesura indirecta ^{220}Rn (sòl). Pes (4.5 kg). Bateria internes (10 dies d'autonomia).	Poques opcions de temps d'integració (10 o 60 min). Car.
RAD7 / Durrige Co	Semiconductor amb cambra d'electrodeposició	Filtre + Bomba interna	Puntuals i en continu	Aire, aigua i sòl	Mesura directa del ^{220}Rn (aire). Pes (4.4 kg + Drierita). Bateria internes (72 h d'autonomia)	Necessita Drierita. El ^{220}Rn no es pot mesurar en continu.
Clipperton II / Universitat Montpeller	Semiconductor sense polarització	Difusió	Continu	Sòl	Bateria externes. (diverses setmanes d'autonomia)	La humitat l'afecta. La llum afecta la resposta. No es comercialitza.

Taula 3.30. Principals característiques de la instrumentació utilitzada per la mesura de la C_{Rn} (Detectors passius).

Nom detector/ Fabricant	Mètode de detecció	Entrada d'aire	Tipus de mesures	Medis mesurables	Avantatges	Inconvenients
Makrofol / KIT	Detector sòlid de traces nuclears	Filtre + Difusió	Integrades	Aire	Dimensions reduïdes. Econòmic. Anàlisi intern (UFR).	La humitat elevada l'afecta.
LR115 / Dosirad Co.	Detector sòlid de traces nuclears	Filtre + Difusió	Integrades	Aire i sòl	Econòmic. Evita la detecció del toró. Anàlisi intern (UFR).	La humitat elevada l'afecta.
Electret / Rad Elec inc.	Cambra d'ionització	Filtre + Difusió	Integrades	Aire	Lectura ràpida (sense revelatges).	Car. La humitat l'afecta.
CR-39 / Landauer Nordic AB	Detector sòlid de traces nuclears	Difusió	Integrades	Aire	Arriba preparat per ser utilitzat.	Coneixement incomplet, (anàlisi a Landauer Nordic AB)