



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**

4. La zona volcànica de la Garrotxa i la falla d'Amer

Una part molt important de la recerca relacionada amb el gas radó està dedicada a la PR, però el fet de poder mesurar variacions significatives de la concentració de radó, C_{Rn} , en aire, sòl i aigua converteix aquest gas en una bona eina de treball per alguns camps de les Ciències de la Terra. Els camps on el seu estudi s'ha desenvolupat especialment són el de la Geofísica i el de la Hidrogeologia i entre les aplicacions més destacades del gas radó en aquests camps hi ha la predicció de terratrèmols i vigilància volcànica. Aquesta línia d'investigació, amb més de dues dècades de vida, està íntimament lligada amb la geodinàmica interna de la Terra (Monnin i Seidel, 1992). Els canvis de pressió en les roques, l'augment o el segellament de fissures de l'escorça terrestre, etc. són fenòmens geològics que poden afectar els mecanismes d'emanació i transport del radó en el subsòl. Per tant, mesurar unes variacions importants dels nivells de radó en el terra o les aigües pot servir per localitzar falles actives, per preveure futurs terratrèmols i per investigar l'estructura, el comportament i la dinàmica dels volcans, per tal de predir-ne futures erupcions. Recentment s'han realitzat moltes mesures de nivells de radó en aire, terra i aigües subterrànies de forma contínua en aquest sentit (Ioannides et al., 2003; Segovia et al., 2003; Immè et al., 2006). Un cas en el que es poden detectar variacions importants de la C_{Rn} és quan hi ha aqüífers amb aigües riques en radó pròximes a un sistema volcànic. Aleshores quan els gasos procedents de l'interior de la Terra, com CO_2 , H_2S , CH_4 , etc., travessen aquestes aigües subterrànies, es produeix una desgasificació del radó que hi havia dissolt. Aquest procés, que esdevé més important com més dura el pas d'aquests gasos, provoca un augment important de la C_{Rn} en els nivells superiors del terra o a les aigües més superficials i la seva detecció pot servir d'indicador de l'activitat volcànica (Garcia-Vindas i Monnin, 2005).

Fins l'any 2002 no existeixen antecedents de mesures de nivells de radiació natural a la zona volcànica de La Garrotxa. Com a conseqüència d'un projecte de recerca europeu, on es veu que els nivells de radó de la zona italiana d'origen volcànic de Lazio són més elevats que als seus voltants (Baixeras et al., 1996), la UFR de la UAB decideix dur a terme una campanya preliminar de la C_{Rn} a l'interior de recintes tancats de la ciutat d'Olot amb els següents objectius: (i) realitzar mesures a llocs de treball situats en recintes directament en contacte amb el sòl on la C_{Rn} acostuma a ser més elevada, d'acord amb el RPSRI (Real Decreto 783/2001, 2001), i (ii) fer mesures a diversos habitatges particulars considerant les característiques geològiques de la zona de la Garrotxa, per tal d'estudiar el comportament del radó en zones que són o han estat actives recentment. En alguns d'aquests habitatges es reparteix detectors per les diferents plantes per comprovar si la C_{Rn} disminueix amb l'alçada. En total es distribueixen 27 detectors passius entre 13 llocs de treball i 8 habitatges, que estan exposats durant el període Maig – Setembre. S'obté un ample rang de valors de la C_{Rn} , [14-717] Bq·m⁻³, (Baixeras et al., 2005a) i que els nivells més elevats es troben a les plantes més baixes, el què indica que la principal font de radó està en el sòl. També es troba que en els recintes construïts sobre materials volcànics els nivells de radó són més elevats que en els construïts sobre no volcànics. Els materials de la zona d'Olot no són especialment rics en radi, tal i com obté Jönsson (2002) a partir de 12 mostres de materials de la zona. L'interval de valors i el valor mig de les concentracions de radi són [24 – 99] Bq·kg⁻¹ i 46 Bq·kg⁻¹, respectivament. Per explicar els nivells de radó obtinguts es suposa que les falles més pròximes poden ser unes vies de sortida del radó procedent de la desgasificació del mantell terrestre. Per tenir una estadística de mesures més gran que permeti confirmar aquests resultats, determinar els valors mitjos anuals, analitzar les variacions estacionals i explorar els possibles orígens del gas radó es decideix continuar la recerca amb noves campanyes de mesura.

4.1. Context geogràfic i geològic

L'àrea de treball on es desenvolupen les campanyes de mesura posteriors s'estén per 5 municipis de dues comarques diferents del nord-est de Catalunya. La ciutat d'Olot i els municipis de La Vall d'en Bas, Sant Feliu de Pallerols i Les Planes d'Hostoles formen part de la comarca de la Garrotxa mentre que el municipi d'Amer està situat a la comarca de La Selva, que limita amb la Garrotxa pel nord. De la població de la Garrotxa (uns 56.000 hab.) més de la meitat viu a Olot (gairebé 34.000 hab.), que n'és la seva capital. La resta de municipis estudiats es mouen entre els 1300 i els 2900 habitants, d'acord amb l'Institut Nacional d'Estadística (INE, 2011).

Aquesta àrea comprèn una bona part de la zona volcànica de la Garrotxa, de gran interès natural i geològic. Actualment 120 km² de la seva extensió estan protegits com a Parc Natural de la Zona Volcànica de la Garrotxa (PNZVG). Es troba limitada lateralment per dues falles importants de direcció nord-oest/sud-est: la falla de Banyoles a l'est i la falla d'Amer a l'oest. A la **Figura 4.1** es pot veure la localització de les 5 zones estudiades: Olot al nord i els pobles de la Vall d'en Bas, Sant Feliu de Pallerols, Les Planes d'Hostoles i Amer que discorren paral·lels a la falla d'Amer.

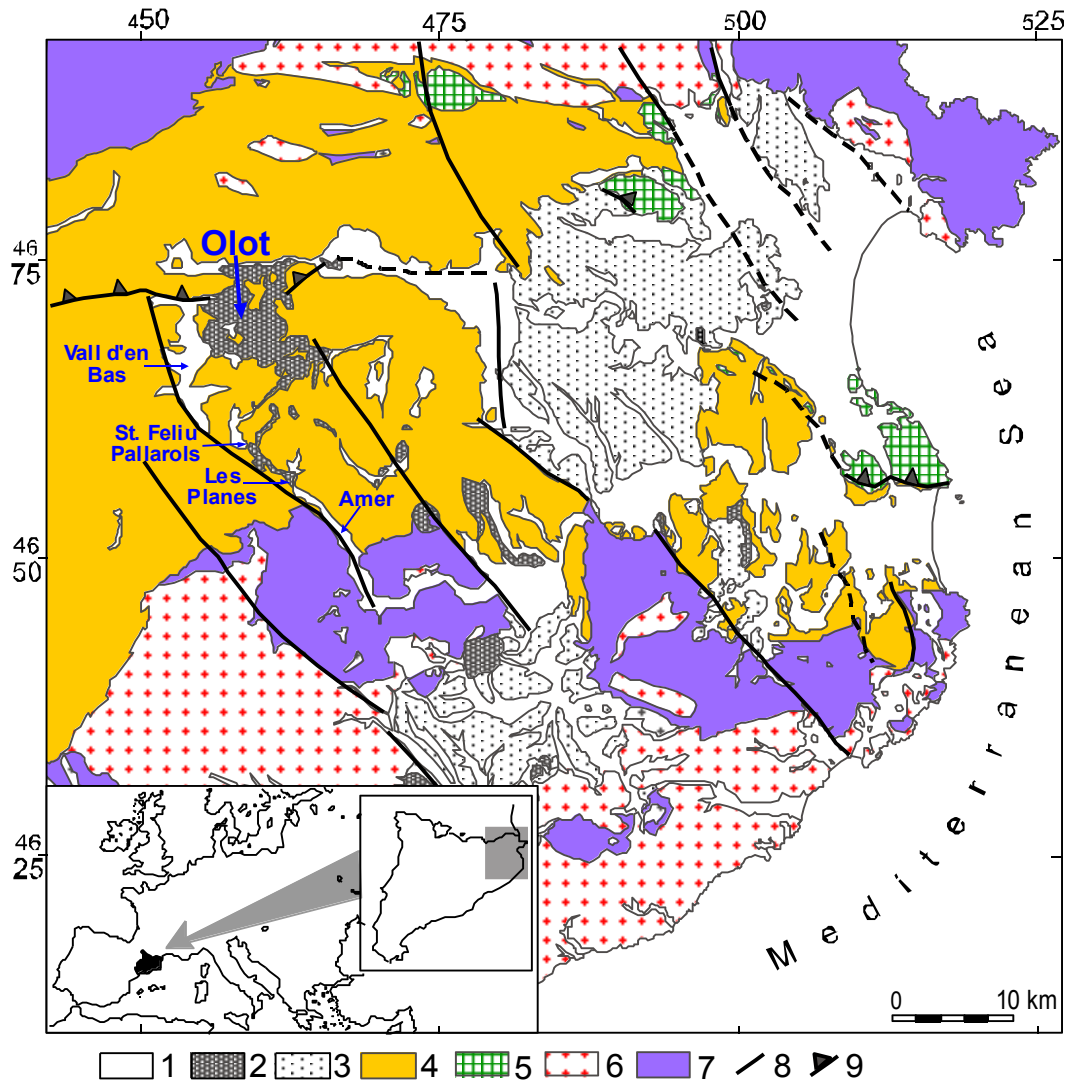


Figura 4.1. Mapa geològic simplificat del nord-est de Catalunya. 1: Sediments de Quaternari, 2: Roques volcàniques del Neogen i el Quaternari, 3: Roques sedimentàries del Neogen, 4: Roques sedimentàries del Paleogen, 5: Roques sedimentàries del Mesozoic, 6: Granits del Paleozoic, 7: Roques metasedimentàries del Paleozoic, 8: Falles, 9: Encavalcaments.

El vulcanisme de la comarca de la Garrotxa és recent, entre 350.000 i 10.000 anys (Guérin et al., 1986) i està condicionat per l'estructura tectònica i la presència de falles actives, com la falla d'Amer. En aquesta regió existeixen tres sistemes de falles de diferent direcció i importància que conformen uns blocs estructurals ben definits, alguns enlairats i d'altres enfonsats.

L'estructura geològica de la zona volcànica de la Garrotxa es caracteritza per tenir un substrat de roques sedimentàries del Terciari, situat sobre un substrat del Paleozoic. Per sobre, es situen les formacions volcàniques i els dipòsits sedimentaris del Quaternari. La majoria dels volcans, uns 40, es troben situats al damunt mateix de les falles més importants. La major part de la ciutat d'Olot s'ha construït directament sobre materials volcànics i en menor proporció sobre unes capes de sediments quaternaris que cobreixen els materials volcànics. A la plana de La Vall d'en Bas, en canvi, predominen els sediments quaternaris situats directament sobre el substrat terciari. A les zones de Sant Feliu de Pallerols i Les Planes d'Hostoles l'estructura és més complexa perquè es tornen a trobar

materials volcànics sobre el substrat terciari. Aquests materials són unes colades de lava que van baixar per la vall del Riu Brugent en diferents etapes, per tant, els materials volcànics es poden trobar alternats amb diferents capes de sediments al·luvials i col·luvials. La falla d'Amer es troba a l'oest de totes les poblacions estudiades excepte en el cas d'Amer, situada al damunt de la falla. En aquesta zona, tal i com s'observa a les **Figures 4.1** i **4.2**, es posen en contacte el substrat terciari amb el substrat de roques metasedimentàries del Paleozoic. La línia de la falla es troba recoberta pels dipòsits quaternaris que es formen a la zona d'escarpament i per les terrasses fluvials del riu Brugent.

4.1.1. Els materials

Els diferents materials presents a les zones d'estudi es poden classificar de forma general en materials volcànics o no volcànics.

4.1.1.1. Materials volcànics: piroclastos i colades basàltiques

Els volcans de la zona volcànica de La Garrotxa estan constituïts, en general, per dipòsits piroclàstics, formats a partir d'erupcions de tipus estrombolià i hidromagmàtic ([Mallarach, 1998](#)). Els materials piroclàstics són producte de la fragmentació del magma quan és expel·lit fora del cràter. Com que les explosions volcàniques poden arrencar i fragmentar la roca de la xemeneia i del substrat, els piroclastos poden contenir proporcions variables de magma i de les roques encaixants. Els dipòsits de materials piroclàstics poden tenir característiques molt diverses segons quins són els mecanismes de transport i de dipòsit responsables de llur emplaçament. Es poden diferenciar dos conjunts de dipòsits piroclàstics: els de caiguda i els de flux. Tots dos recobreixen la topografia però, mentre els dipòsits piroclàstics de caiguda formen els cons volcànics, els dipòsits piroclàstics de flux o mantell tenen tendència a acumular-se a les depressions. Segons la mida dels fragments, els materials piroclàstics es solen classificar en tres grups: cendres, lapil·lis o gredes i blocs o bombes volcàniques.

Les emissions làviques, o colades de lava, constitueixen la major part dels dipòsits volcànics i solen ocupar el fons de les valls. En alguns llocs, com a la zona d'Olot, van actuar de preses naturals, impedit el drenatge i provocant embassaments. Diferències en la composició interna, la velocitat de refredament del flux i les característiques del medi on s'emplacen han determinat l'existència de diferents tipus de laves. Segons l'aspecte de la seva superfície es poden classificar en dos grans grups: llises i rugoses. L'estructura interna pot presentar-se de forma massiva i compacte o fracturada.

D'acord amb la Carta Vulcanològica de la Zona Volcànica de la Garrotxa, es poden distingir entre els piroclasts que formen els cons volcànics (Qvc) del que es troben formant mantells (Qvm), així com dels piroclasts que tenen fragments lítics dels que no, etc. ([ICC et al., 2007](#)). En aquesta tesi, per tal de simplificar la diversitat de tipus de piroclasts, es consideren tots els tipus com una sola unitat geològica (Qv), i igualment pels diferents tipus

de laves (Qbc). Ara bé, seguint la nomenclatura de la carta, es distingeix entre els materials procedents dels diferents centres emissors, afegint les lletres que els identifiquen després d'un guió. (**Taula 4.1**). A l'apartat 4.2.5 es descriuen els criteris utilitzats per seleccionar els materials analitzats.

Taula 4.1. Codi, descripció i característiques rellevants dels materials volcànics estudiats (ICC et al., 2007).

Codi	Descripció	Característiques
Qv-cr	Piroclastos del Croscat	Activitat estromboliana
Qv-p	Piroclastos del Turó de la Pomareda	Adventici del Croscat. (11.5 ± 1.1)·10 ³ anys
Qv-ga	Piroclastos de la Garrinada	Activitat freatomagmàtica i estromboliana
Qv-mo	Piroclastos del Montolivet	Activitat estromboliana
Qv-ms	Piroclastos del Montsacopa	Activitat estromboliana
Qv-sm	Piroclastos del Santa Margarida	Activitat freatomagmàtica i estromboliana
Qbc-ba	Colada basàltica de l'altiplà de Batet de la Serra.	Capa llisa i massiva situada damunt una d'escoriàcia. (247 ± 17)·10 ³ anys
Qbc-bt	Colada basàltica del Bosc de Tosca	Rugosa i irregular, en blocs. (17.0 ± 1.6)·10 ³ anys
Qbc-cr	Colada basàltica del Croscat	Rugosa i irregular, en blocs. Presenta Tussols. (17.1 ± 1.6)·10 ³ anys
Qbc-ga	Colada basàltica de la Garrinada	Llisa i massiva. (133 ± 12)·10 ³ anys
Qbc-mo	Colada basàltica del Montolivet	Llisa i massiva. Posterior al Montsacopa
Qbc-ms	Colada basàltica del Montsacopa	Llisa i massiva. Posterior al Garrinada
Qbc-o	Colada basàltica del Pla d'Olot	Llisa i massiva. Anterior al Bosc de Tosca
Qbc-sp	Colada basàltica de Santa Pau	Centre emissor indeterminat. Posterior a la colada que davalla pel riu Ser.
Qbc-t	Colada basàltica del Traiter	Capa massiva situada damunt una altra d'escoriàcia. (46.3 ± 4.0)·10 ³ anys

4.1.1.2. Materials no volcànics.

Les roques sedimentàries del substrat del Terciari estan constituïdes per diversos materials com ara conglomerats (roques formades per còdols arrodonits d'altres roques units per un ciment), gresos (roques formades per sorres cimentades), margues (roques compostes per una fracció argilosa i una fracció carbonatada) i lutites (roques formades de grans de mida inferior al 1/16 de mil·límetre). Aquestes roques s'interpreten com dipòsits al·luvials (sediments formats per una gran varietat de materials i acumulats per l'acció de l'aigua i fora del mar formant una unitat litològica), de front deltaic (sediments acumulats per l'acció d'un riu quan desemboca al mar) o de plataforma marina (sediments acumulats al fons del mars i oceans per l'acció dels corrents marins).

Les roques metamòrfiques del substrat del Paleozoic estan constituïdes per l'alternança de gresos i lutites. Les capes gresoses contenen quars i feldespats mentre que els trams lutífics són de cornianes (roques de microestructura desordenada) i fil·lites pigallades (roques tacades que presenten foliació) (ICC et al., 2007).

Durant el Quaternari l'activitat fluvial va donar lloc a formacions al·luvials en el fons de les valls, que en alguns casos s'han intercalat amb els materials d'origen volcànic. Aquests dipòsits estan constituïts per fragments de diferents mides, procedents de les formacions del substrat terciari o paleozoic, que han estat transportats per l'acció dels rius i torrenteres cap al fons de les valls. Segons la forma que tenen d'acumular-se es poden distingir tres tipus diferents de dipòsits: terrasses fluvial (formada per l'erosió al llarg de la vall d'un riu i que es troba molt per sobre del nivell actual), terrasses de rebliment (formades per l'acció de l'aigua en una vall que ha estat obstruïda) i els cons de dejecció torrencials o ventalls al·luvials (formats per l'acció de rius o torrents secundaris en arribar al curs principal).

A les zones on les colades de lava van actuar de preses naturals també es va establir una sedimentació de tipus lacustre que va anar omplint aquests embassaments. Aquests nivells estan constituïts per alternances d'argiles i llims amb nivells torbosos i algunes capes de sorres o materials piroclàstics intercalats. El seu gruix és variable i arriben a una fondària màxima de 25 m. A la **Taula 4.2** es distingeixen els diferents materials no volcànics que s'analitzen.

Taula 4.2. Codi, descripció i antiguitat dels materials no volcànics estudiats (ICC et al., 2007).

Codi	Descripció	Període geològic	Antiguitat (·10 ⁶ anys)
Ecg	Conglomerats i gresos amb nivells de lutites.		
Egm	Alternança de gresos amb margues o lutites.	(Terciari)	65 - 2
Eg	Gresos	Paleocè-Eocè	
Em	Margues i lutites amb nivells de gresos.		
Qacb	Dipòsits al·luvials i col·luvials de barratge.	(Quaternari)	2 – present
Qc	Col·luvions del relleu adjacent.	Plistocè-Holocè	
Qlb	Llims i nivells de torbes lacustres		

4.1.2. La falla d'Amer

La falla d'Amer forma part del sistema de falles normals de direcció NO-SE que durant el Neogen més recent van enfonsar els blocs orientals en el NE de Catalunya i van donar lloc a les Serres Transversals i a l'aparició de la fossa neògena de l'Empordà (Fleta et al., 2001). Té un traçat complex amb varies fractures paral·leles i una longitud que supera els 30 km. La inclinació del pla de falla és d'uns 60° i el desplaçament màxim varia entre 1000 m i 1400 m (Saula et al., 1996). Presenta dos trams, el situat al nord de direcció NNO-SSE que limita per l'oest la plana de la Vall d'en Bas i es situa proper a la ciutat d'Olot; i el tram situat al sud de direcció NO-ES que segueix per l'oest la vall del riu Brugent, on es situa la resta de les zones estudiades (**Figura 4.1**). Tal i com s'ha comentat, en aquesta zona es posen en contacte el substrat terciari amb el substrat de roques metamòrfiques del Paleozoic. La línia de la falla es troba recoberta pels dipòsits quaternaris que es formen a la zona d'escarpament i per les terrasses fluvials del riu Brugent (**Figura 4.2**).

Segons diversos autors, la falla d'Amer presenta una activitat més recent que la resta de falles de la zona per diferents motius. En primer lloc perquè les últimes colades de lava relacionades amb volcans situats al llarg de la falla d'Amer estan datades de fa un 10.000

4.1.3. Els bufadors

El terme *bufador* s'utilitza per anomenar a la petita cavitat o forat del sòl que presenta un flux d'aire perceptible en alguna època de l'any. Des del punt de vista geològic els bufadors es poden considerar semblants a les fonts d'aigua, és a dir, punts per on la xarxa porosa i permeable del subsòl surt a la superfície terrestre, amb la diferència que en aquest cas el fluid no és aigua, sinó l'aire que ocupa l'espai porós del subsòl no saturat d'aigua, també anomenat zona d'aireig. Les formacions volcàniques poden ser propenses a tenir bufadors perquè presenten nivells escoriacis que solen tenir porositats altes per les pròpies característiques del dipòsit i, nivells molt fracturats dins les colades de lava que també poden ser relativament porosos i permeables. Les colades, que durant el seu procés de formació van tenir una solidificació més ràpida a la part superior que la interior, poden tenir conductes parcialment buits i zones escoriàcies que constitueixen nivells permeables amb una gran continuïtat espacial. Els bufadors de la zona volcànica de La Garrotxa, o volcans d'aire segons els primers autors que els descriuen (Mallarach, 1998; Aragonès, 2001), es poden classificar en funció de la formació geològica a la que apareixen (**Figura 4.3**) (Bach et al., 2007a). La majoria estan situats damunt de colades de lava i solament alguns d'ells ho fan en la base de cons volcànics. Els tres grans grups de bufadors són: (1) bufadors de les colades dels plans d'Olot i Batet, (2) bufadors del volcans Garrinada i Montsacopa i (3) bufadors de les colades del Bosc de Tosca.

4.1.3.1. Els bufadors de les colades del Pla de Batet i del Pla d'Olot

L'origen d'aquest conjunt de bufadors està lligat a l'existència de les colades basàltiques que llisquen cap a l'oest procedents de l'altiplà de Batet, al llarg d'uns 3 km i amb un desnivell de més de 200 m. La seva aparició va lligada a petits ressals del terreny, naturals o antròpics, que corresponen a l'erosió de la part alta del nivell superior de la colada, de manera que queda al descobert un petit tall de la colada. En aquests talls, de 2 a 3 m d'alçada, s'observa la presència d'un nivell superior de lava basàltica relativament compacte i amb una disposició contínua i ondulada (**Figura 4.4**). Sota d'aquest nivell es troba un altre de molt escoriaci i fragmentat que és on apareixen els bufadors. Alguns tenen grans dimensions, ja sigui per l'erosió natural d'aquest nivell més feble o fruit de la intervenció antròpica que els ha engrandit per tal d'aprofitar-los com a petits magatzems. Aquest conjunt de característiques permeten considerar que els fluxos d'aire aprofiten la porositat dels nivells més escoriacis, que permeten l'existència d'una xarxa de conductes, situats per sota del nivell més compacte, que forma la part superior d'aquestes colades de superfícies llises i que actua com a sostre impermeable al moviment de l'aire. Així, quan de manera natural o antròpica es posa al descobert el nivell escoriaci, l'aire pot sortir a l'exterior, de manera semblant a una font d'aigua.

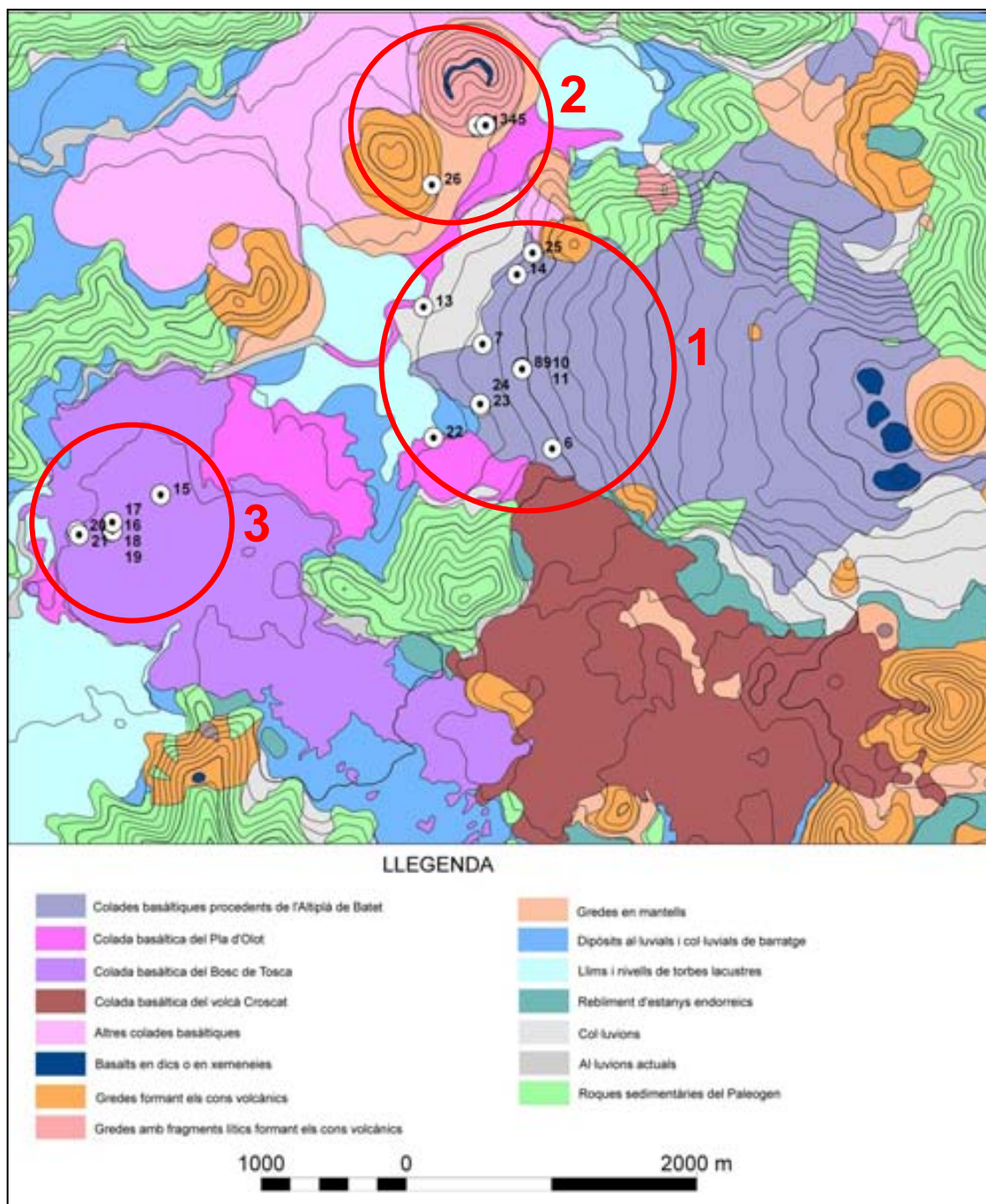


Figura 4.3. Situació dels bufadors en les unitats litològiques en base a la Carta Vulcanològica de la Zona Volcànica de la Garrotxa (ICC et al., 2007). S'indica la classificació en els tres grups: (1) Bufadors de les colades de lava del Pla de Batet i del Pla d'Olot, (2) bufadors dels volcans de la Garrinada i Montsacopa i (3) bufadors de les colades de lava del Bosc de Tosca.

4.1.3.2. Els bufadors del volcans Garrinada i Montsacopa

La zona del volcà de la Garrinada és la que té els bufadors més coneguts, pel fet que aquest fenomen ha donat nom a dos dels masos que es troben al peu d'aquest volcà: mas Bufador vell i mas Bufador nou. S'ha localitzat bufadors al marge sud del cràter inferior del volcà la Garrinada i a l'interior d'un dels masos (**Figura 4.5**). Es situen damunt de materials molt fragmentats: acumulació de blocs, bombes i gredes, considerats dipòsits de caiguda

hidromagmàtica i que presenten zones de porositat alta, per on circula de manera preferent l'aire fins sortir a l'exterior, possiblement en connexió amb nivells permeables situats per sota.

En el volcà Montsacopa solament s'ha trobat un bufador situat a l'interior d'un edifici i, per tant, no es poden observar directament els materials per on surt l'aire. De tota manera, la seva situació general a la base del volcà, a una cota d'uns 458 m, permet considerar que es troba entre els materials piroclàstics que formen el con volcànic i els materials escoriacis que formen el subsòl, reconeguts en els pous propers al bufador.

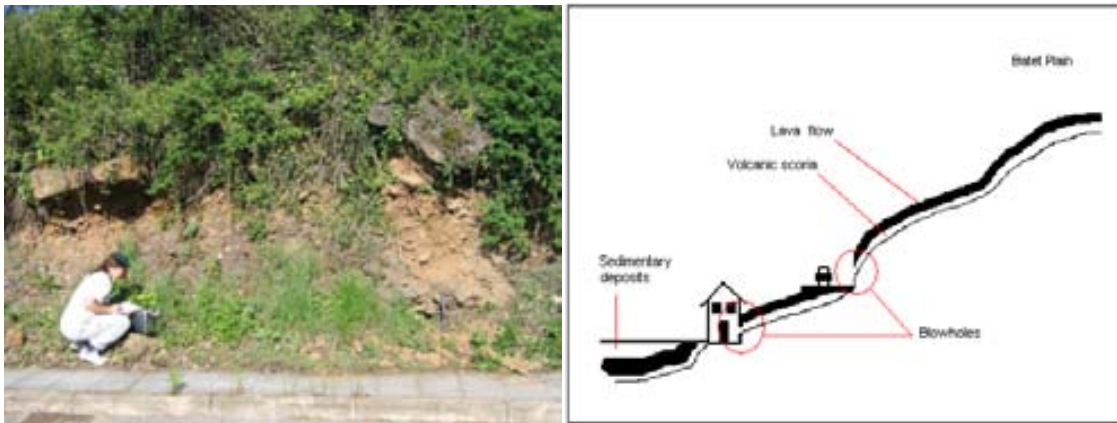


Figura 4.4. Esquerra: Aflorament amb bufadors a la zona de les colades del Pla de Batet. Dreta: Esquema de les colades del Pla de Batet amb un nivell de lava massiu superior i un nivell escoriaci inferior, on es poden trobar els bufadors (blowholes).



Figura 4.5. Situació dels bufadors exteriors del cràter inferior del volcà de la Garrinada.

4.1.3.3. Els bufadors de les colades del Bosc de Tosca

Aquests bufadors es situen directament damunt la colada basàltica que s'estén pel Bosc de Tosca. Aquesta colada s'estén per un pendent relativament suau i presenta uns trets morfològics diferents al de les colades esmentades procedents de l'altiplà de Batet. En la seva superfície s'observa un relleu molt irregular amb un entapissat de blocs i la presència de protuberàncies anomenades tossols, generades pel bombament i trencament de la crosta superficial en augmentar la pressió dels gasos dins de la colada. El paisatge actual és el resultat de la neteja de blocs per poder tenir zones de conreu, anomenades artigues, construint murs gruixuts que les van separant. A les parts baixes d'aquests murs es troben uns forats que considerem bufadors, tot i que no sempre es percep de manera clara el flux d'aire (**Figura 4.6**). Segurament la superfície trencada de la colada al llarg de tot el seu recorregut i el pendent relativament suau, amb un desnivell d'uns 70 m en un recorregut d'uns 3 km, fan que l'aire dels nivells més porosos i permeables es pugui bescanviar amb l'atmosfera en múltiples punts i per tant no generi uns conductes tan singulars com en el cas de les colades de Batet.

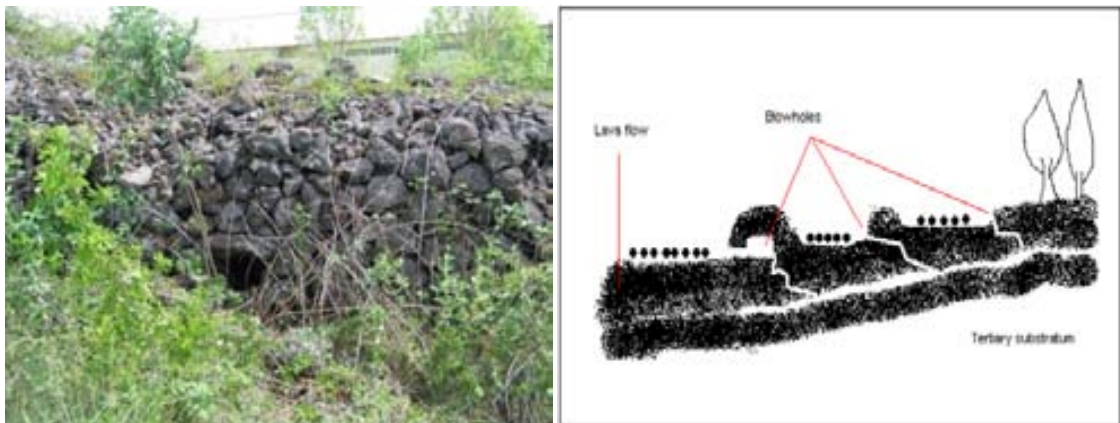


Figura 4.6. *Esquerra: Bufador de la zona del Bosc de Tosca, on s'observa el forat a la part inferior del mur. Dreta: Esquema de la colada del Bosc de Tosca amb la presència de bufadors als marges dels murs que limiten les zones de conreu.*

4.1.4. Les aigües subterrànies

Les aigües subterrànies de la zona volcànica de la Garrotxa es localitzen en aqüífers formats per materials quaternaris i eocens. Dins dels materials quaternaris es consideren dues grans categories d'aqüífers, segons la litologia dels materials que els integren: aqüífers al·luvials i aqüífers al·luvial-volcànics (**Figura 4.7**) (Bach et al., 2007b).

4.1.4.1. Aqüífers al·luvials (A)

Els aqüífers A estan relacionats amb la dinàmica fluvio-torrencial del sistema conca, però que en aquest cas, presenten un desenvolupament molt superior, degut a la interacció amb els episodis volcànics que ocasionen un barratge de la xarxa de drenatge i una

posterior sedimentació que tendeix al rebliment de l'embassament. Des del punt de vista hidrogeològic, aquestes formacions al·luvials formades per acumulacions de sorres i llims, amb nivells de grava, constitueixen relativament bons aqüífers. Presenten porositat intergranular i permeabilitats altes en els nivells de sorres i grava. A la **Figura 4.7** es distingeixen; (i) l'aqüífer del Fluvià a la Vall d'en Bas, des de la Pinya fins a Codella; (ii) l'aqüífer de la riera de Bianya fins el Pla dels Socarrats i (iii) l'aqüífer de la riera de Riudaura fins al Pla de Dalt. Actualment els aqüífers (i) i (ii) tenen una explotació molt important per a ús agrícola.

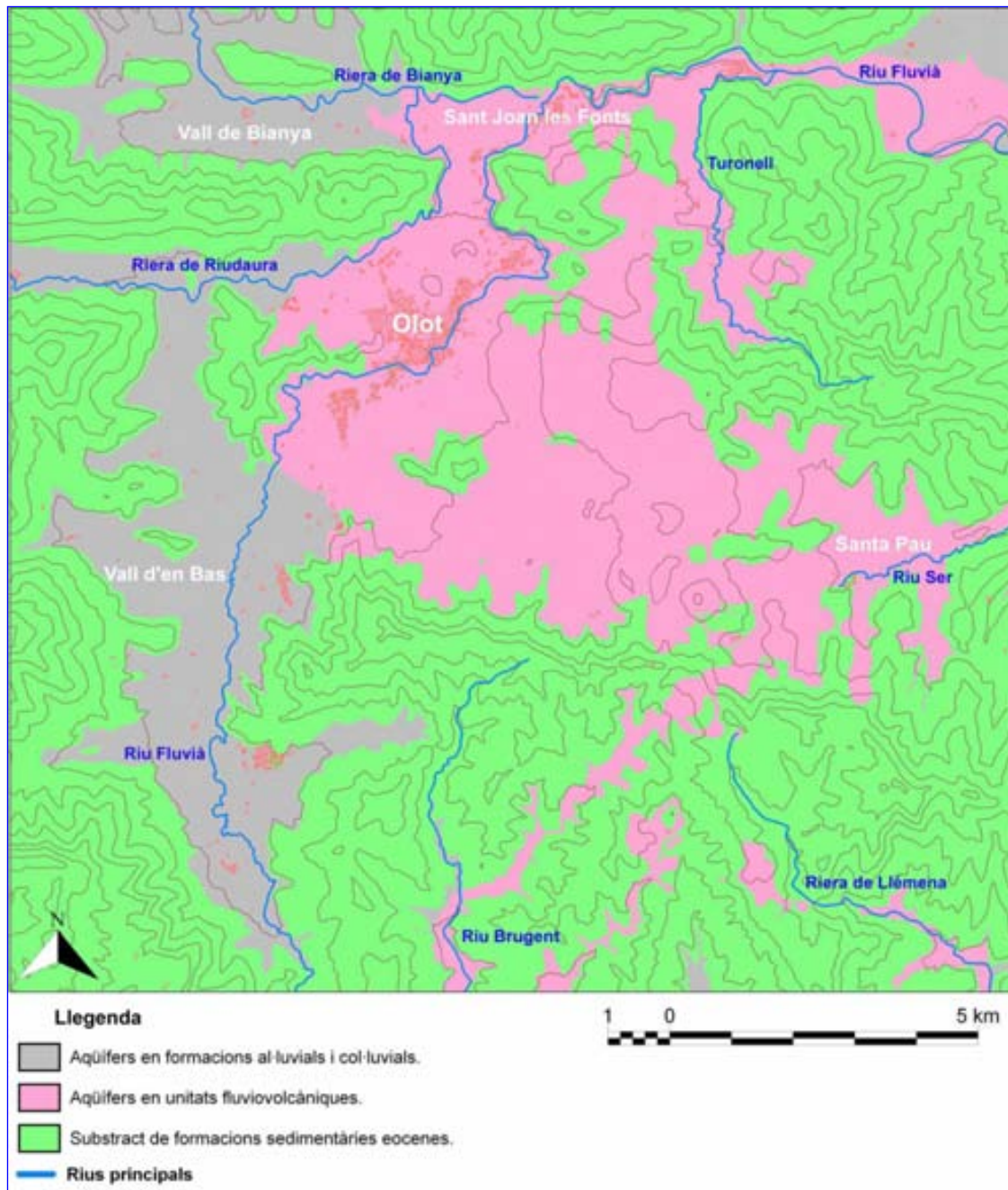


Figura 4.7. Mapa de les unitats hidrogeològiques quaternàries de la zona d'estudi.

4.1.4.2. Aqüífers al·luvial-volcànics (AV)

L'aqüífer AV és aquell que està situat a una zona amb presència de materials volcànics que tenen, en general, interacció amb la dinàmica fluvio-torrencial, donant lloc a intercalacions entre materials volcànics i materials al·luvials o col·luvials. L'interès hidrogeològic d'aquesta unitat correspon als nivells al·luvials que es troben fossilitzats sota dels nivells volcànics. Es a dir, els nivells de llims i argiles de plana d'inundació o de sedimentació lacustre en els rebliments provoquen un confinament dels nivells permeables de sorres i graves inferiors. Així, a tota la zona de materials quaternaris es poden diferenciar uns nivells permeables superficials, que constitueixen aqüífers de tipus lliure, i uns nivells permeables situats a més profunditat, que tenen diferent grau de confinament, en funció de la zona on es troben i dels materials situats al seu damunt. Per la seva banda, els nivells de llims actuen localment com a aqüítards (formacions impermeables que limiten per sobre o per sota amb un aqüífer i que deixen passar l'aigua molt lentament). Aquest conjunt de materials són els que presenten un nivell d'explotació més gran a l'actualitat. La majoria dels pous de la zona del pla d'Olot es localitzen en aquestes formacions. A la **Figura 4.7** es distingeixen, per una banda, el conjunt de l'aqüífer de la vall principal del Fluvià i la vall del Ser i, per l'altra, l'aqüífer de la vall del Brugent.

4.1.4.3. Aqüífers eocens (E)

Els materials eocens, que conformen el substrat dels materials quaternaris, també tenen nivells aqüífers explotables. Des del punt de vista hidrogeològic, cal esperar comportaments molt diferents de tots els materials eocens. Algunes formacions, com les constituïdes per calcàries o per gresos calcaris, poden ser aqüífers aprofitables degut a presentar porositat per fissuració i carstificació, però la complexitat de l'estructura geològica dificulten el coneixement de la seva situació espacial. Actualment hi ha poques captacions que els explotin.

4.2. Campanyes de mesura

A la zona volcànica de la Garrotxa i la falla d'Amer, entre els anys 2004-2010, es realitzen set campanyes de mesura diferents, que tenen els temps de durada que s'indiquen a la **Taula 4.3**. La primera està dedicada a la determinació dels nivells de radó a l'aire de l'interior de recintes tancats, la segona a la mesura de la C_{Rn} al sòl de la falla d'Amer, la tercera a la caracterització dels bufadors de la zona, la quarta a la determinació dels nivells de radó a les aigües subterrànies, la cinquena a la determinació dels nivells de radiació gamma terrestre a l'exterior i l'interior de recintes, la sisena a la determinació dels radionúclids emissors gamma dels materials de sòl i la setena a la mesura del radó, el toró i el CO₂ en el sòl d'Amer. Una part important dels resultats d'aquestes campanyes ja està publicada (Baixeras et al., 2005a; Font et al., 2008b; Moreno et al., 2008; Moreno, 2009; Moreno et al., 2009a; Zarroca et al., 2012) i en els següents apartats es presenten els resultats complets de totes les campanyes.

Taula 4.3. Principals característiques de les diferents campanyes de mesura que es realitzen a la zona volcànica de la Garrotxa i la falla d'Amer entre els anys 2004-2010.

Tipus de campanya	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Punts de mesura	Mesures per punt	Tipus de mesura
Radó – Aire interiors								125	2 – 4	Integrades
Radó – Sòl falla d'Amer								27 (5 perfils)	39	Continues i integrades
Radó i Toró – Aire bufadors								26	3	Puntuals i integrades
Radó – Aigües subterrànies								53	2 – 4	Puntuals
Radiació gamma – Interiors i exteriors								158	1	Puntuals
Radionúclids – Materials del sòl								26	1 – 2	Puntuals
Radó, Toró i CO ₂ – Sòl falla d'Amer								50 (3 perfils)	1	Puntuals

4.2.1. Radó a l'aire de llocs de treball i habitatges

Entre els anys 2004-2005 es porten a terme una campanya de mesura de la C_{Rn} a l'interior de recintes tancats dels 5 municipis esmentats de la zona volcànica de la Garrotxa i la falla d'Amer (Baixeras et al., 2005a; Moreno, 2006; Moreno et al., 2008). Els objectius són: (i) comprovar els nivells de radó obtinguts a la campanya preliminar d'Olot de l'any 2002, (ii) comparar els nivells obtinguts amb els nivells d'acció recomanats a la ICRP 65 (1993) i per la CEC (1990), (iii) analitzar les variacions estacionals i les fluctuacions diàries de la concentració en els llocs amb nivells de radó més elevats i, (iv) confirmar la possible influència dels materials volcànics i d'una falla recentment activa sobre la C_{Rn} . Es seleccionen 125 recintes tancats: 58 a Olot, 19 a La Vall d'en Bas, 17 a Sant Feliu de Pallerols, 14 a Les Planes d'Hostoles i 17 a Amer. Per mantenir la confidencialitat dels resultats obtinguts no es proporcionen els noms ni les adreces dels col·laboradors i els recintes analitzats s'identifiquen amb un codi numèric (Figures 4.8, 4.9 i 4.10). S'instal·la un total de 361 detectors de Makrofol, distribuïts en 4 períodes d'exposició (Abril – Juliol, Juliol – Novembre, Novembre – Març i Març – Juny). Els recintes seleccionats estan en contacte amb el sòl (plantes baixes i soterranis) i són llocs on les persones hi passen un temps significatiu o que tenen alguna característica interessant des del punt de vista de la Geofísica, com la presència de bufadors. Els emplaçaments dels detectors són punts apartats de les parets, sostre, fonts de calor, humitat i sistemes de ventilació. La classificació dels recintes estudiats segons el tipus de sòl i de subsòl es fa a partir de la informació que proporcionen els mapes geològics de l'Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC). La distància a la falla de cada recinte estudiat es calcula a partir de les seves coordenades geogràfiques i de la posició teòrica de la falla, que proporciona el mapa geològic de la zona (ICC, 1997). En aquell lloc de treball i en aquell habitatge on s'obtenen els valors més elevats de la C_{Rn} es realitzen mesures en continu, mitjançant el monitor PRASSI, per analitzar les fluctuacions de la C_{Rn} .

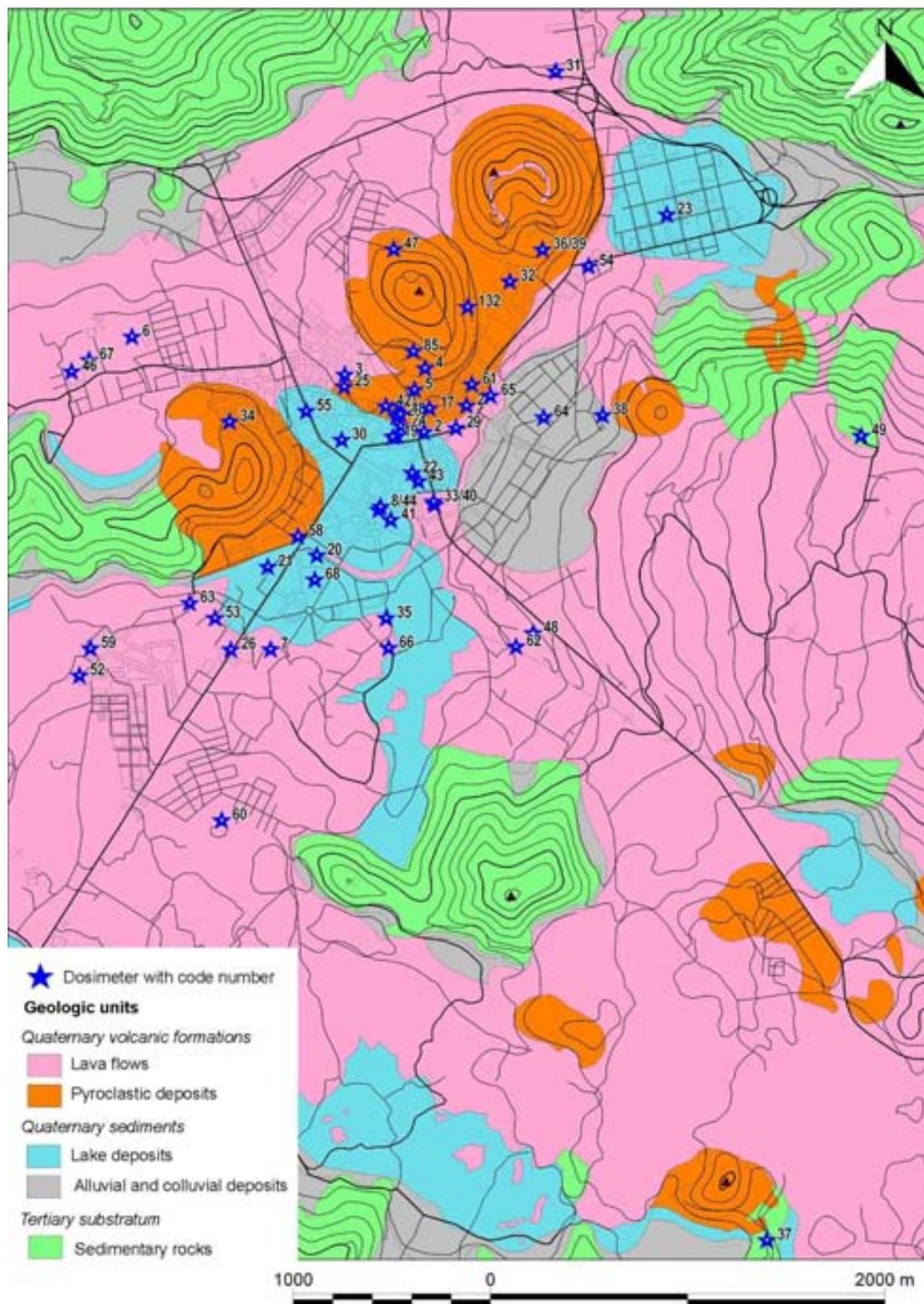


Figura 4.8. Mapa geològic d'Olot on s'observa la distribució dels recintes estudiats.

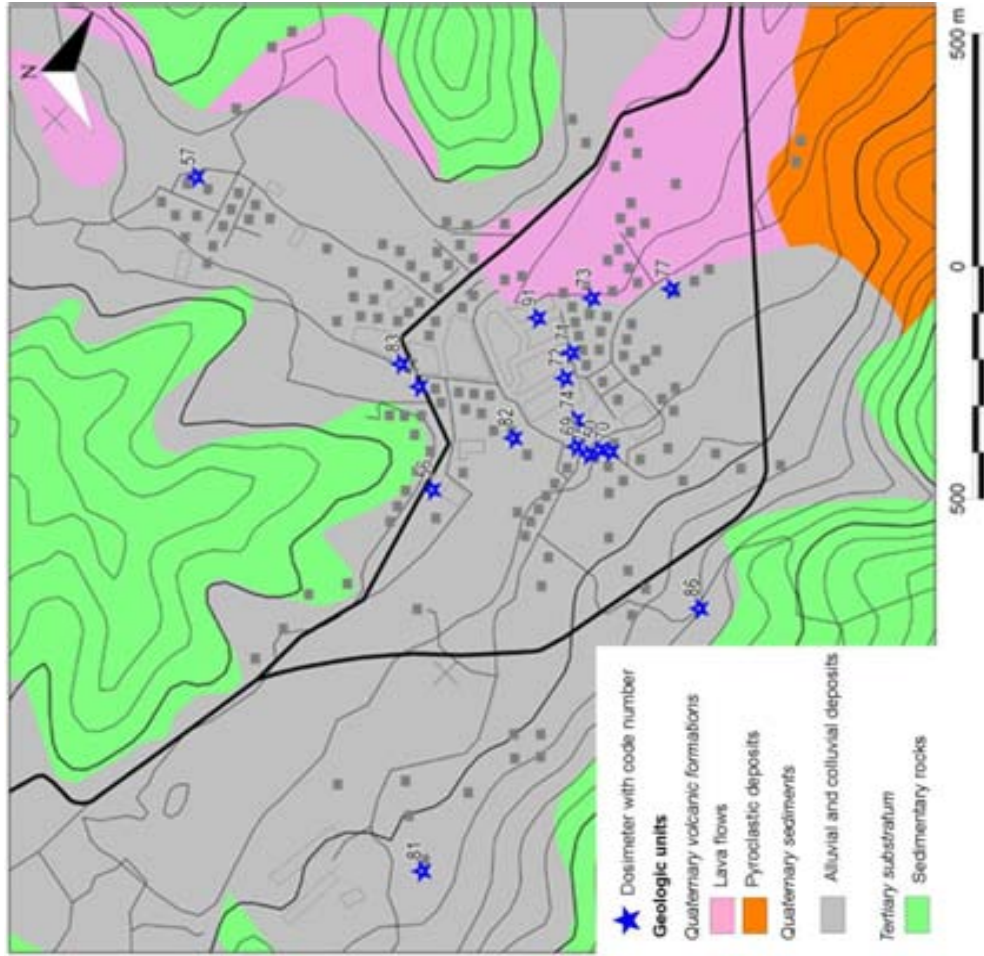
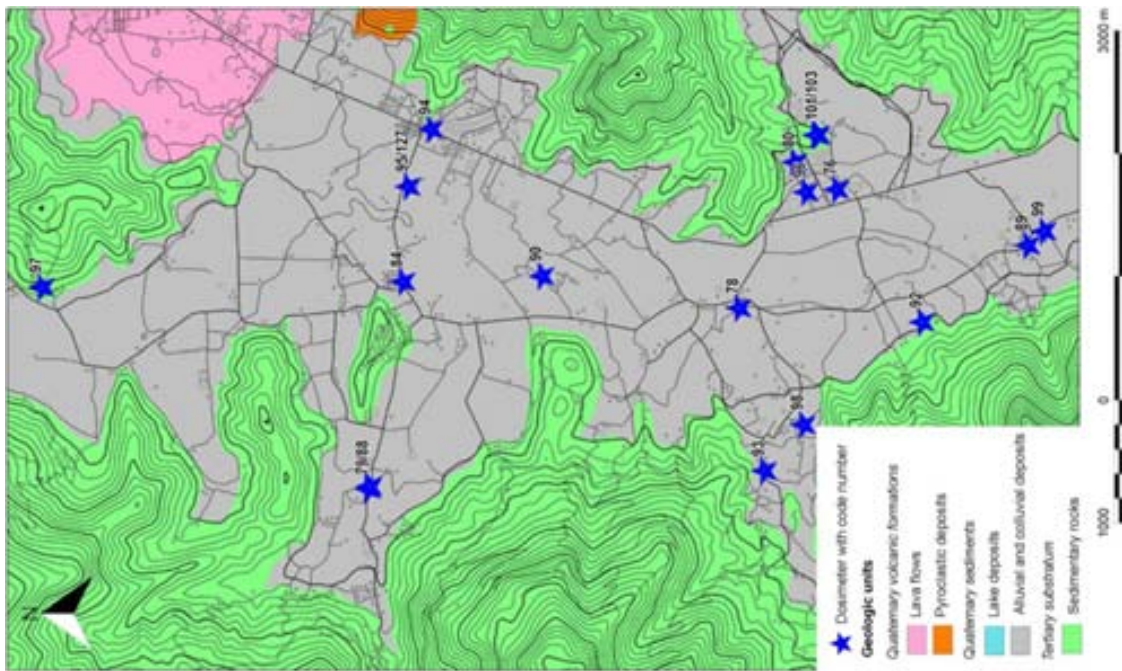


Figura 4.9. Mapes geològics de La vall d'en Bas (esquerra) i de Sant Feliu de Pallerols (dreta) on s'observen les distribucions dels recintes estudiats d'aquestes dues zones.



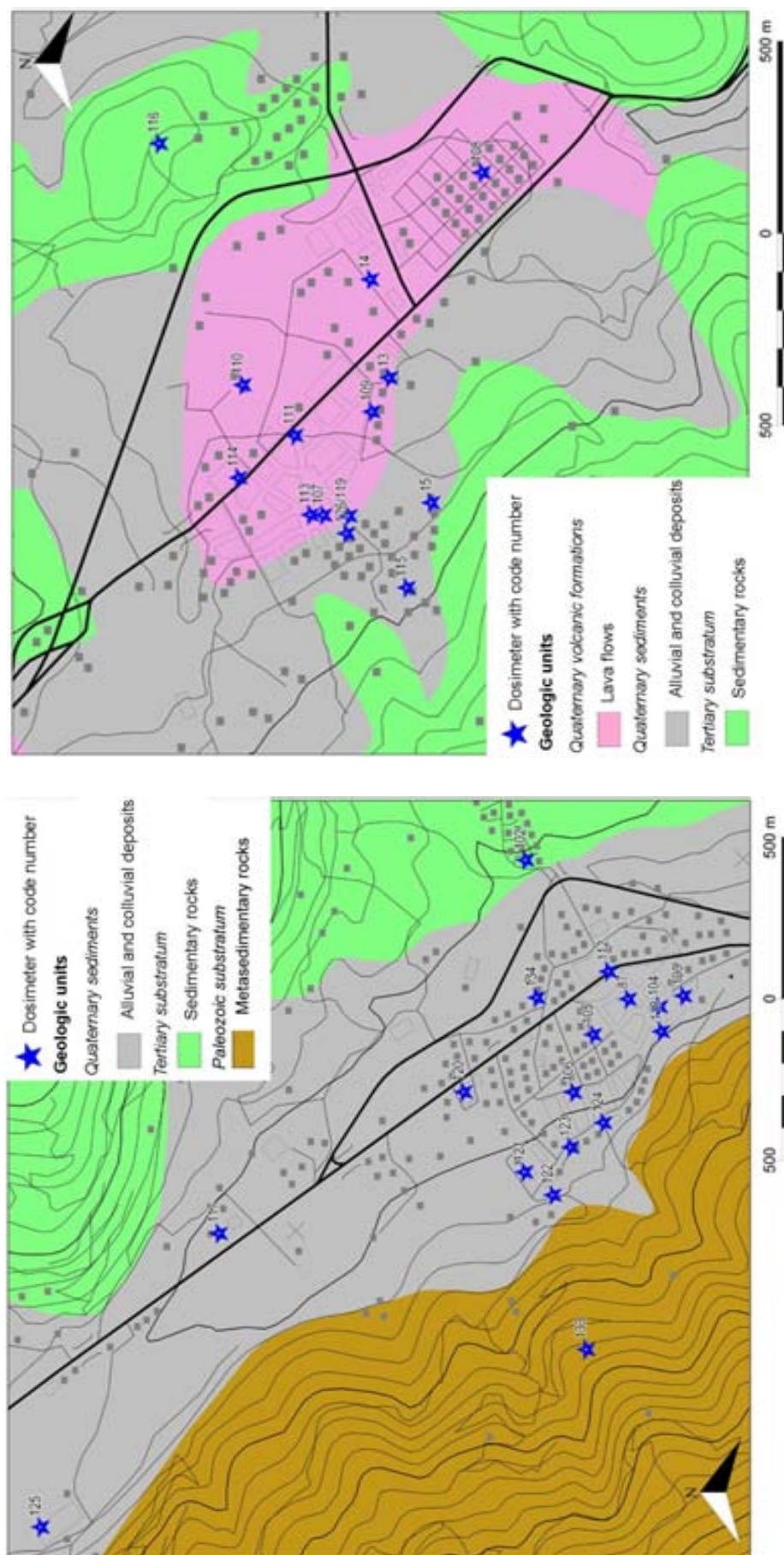


Figura 4.10. Mapes geològics de Les Planes d'Hostoles (esquerra) i Amer (dreta) on s'observen les distribucions dels recintes estudiats en aquestes dues zones.

La C_{Rn} obtinguda a l'interior dels 125 recintes tancats analitzats presenta un ampli interval de valors, [15 – 1464] $Bq \cdot m^{-3}$, que segueixen una distribució lognormal (**Figura 4.11**). Els resultats obtinguts a cadascun dels recintes analitzats, els codis que els identifiquen a les **Figures 4.8, 4.9 i 4.10** i les principals característiques d'aquests recintes apareixen a la **Taula A.1** de l'annex A. La mitjana geomètrica de les concentracions de radó és (63 ± 2) $Bq \cdot m^{-3}$. Aquest valor és lleugerament més gran que el de Barcelona²², però és semblant al trobat en altres zones volcàniques, com les Illes Canàries²³. Quan es comparen resultats de diferents campanyes s'ha de tenir en compte els objectius que han perseguit cadascuna d'aquestes (**Font, 2009**). En el nostre cas la majoria dels recintes estudiats estan situats en plantes baixes (82 %) i soterranis (18 %) i, per tant, l'objectiu no era trobar el valor mig de la C_{Rn} al qual estava sotmesa tota la població de l'àrea estudiada, ja que d'haver estat així els detectors de Makrofol haurien estat distribuïts en funció del cens de la població dels 5 municipis i repartits de forma aleatòria entre diferents tipus de recintes, situats a diferents nivells del terra, etc. Aleshores, probablement, la mitja geomètrica hauria estat inferior al valor obtingut.

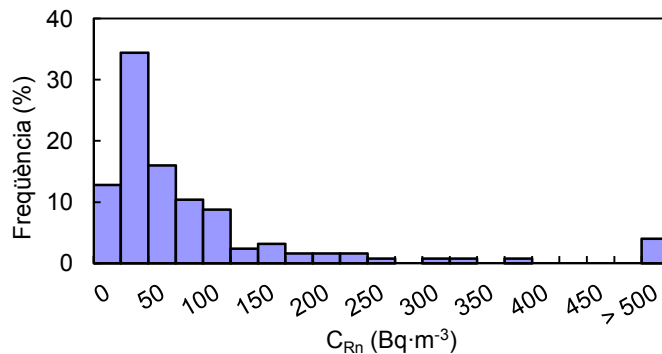


Figura 4.11. Concentracions de radó d els recintes de la zona volcànica de La Garrotxa i la falla d'Amer.

Els nivells de radó més elevats es troben a Olot, sobretot en els habitatges (**Taula 4.4**). Es comprova que els nivells de radó dels recintes d'Olot coincideixen amb els de la campanya preliminar del 2002 (**Baixeras et al., 2005a**). En el moment que s'obtenen aquests resultats el nivell d'acció recomanat per la ICRP 65 (1993) és $1500 Bq \cdot m^{-3}$ de concentració mitjana anual en llocs de treball, i per tant, no hi ha cap lloc de treball que superi aquest valor. Actualment el nivell de referència recomanat pel CSN per la protecció dels treballadors és $600 Bq \cdot m^{-3}$ i pels membres del públic en els llocs de treball amb llarga permanència és $300 Bq \cdot m^{-3}$ (**CSN, 2012**). Aleshores hi ha un lloc de treball d'Olot que supera els $600 Bq \cdot m^{-3}$ (codi 8) i un d'Amer que supera els $300 Bq \cdot m^{-3}$ (codi 124). Pel què respecta als habitatges, la majoria dels valors obtinguts estan per sota dels $400 Bq \cdot m^{-3}$, excepte el d'un habitatge de Les Planes d'Hostoles (codi 15) i quatre d'Olot (codis 36, 40, 48 i 62). Els recintes d'Olot són magatzems i cellers soterranis d'habitatges antics on les persones hi passen poc

²² La campanya de mesura de la concentració de radó a Barcelona (**Baixeras et al., 1996**) es va dur a terme amb l'objectiu de mesurar el valor mig al qual estava sotmesa la població i la mitjana geomètrica obtinguda ($28 Bq \cdot m^{-3}$) es representativa.

²³ A les illes de Tenerife i Fuerteventura es va obtenir unes mitjanes geomètriques de 69 i 59 $Bq \cdot m^{-3}$, respectivament (**Martín Matarranz, 2004**).

temps i, per tant, els nivells de radó no representen un risc radiològic significatiu. Aquests recintes presenten algunes característiques interessants des del punt de vista geofísic: dos tenen bufadors (codis 36 i 62), el recinte 48 està excavat directament a la roca volcànica i el recinte 40 té un pou interior.

Taula 4.4. Nivells de radó dels recintes analitzats agrupats per poble i tipus de recinte. Intervalls de valors, mitjanes aritmètica i geomètrica de les concentracions de radó obtingudes.

Poble	Nº recintes	Tipus recinte	C_{Rn} (Bq·m ⁻³)			
			Interval	Mitjana aritmètica	Mitjana aritmètica	Mitjana geomètrica
Olot	49	Lloc de treball	17 - 742	104 ± 18	157 ± 36	81 ± 3
	9	Habitatge	22 - 1464	(45 ± 18)·10 ¹		
La Vall d'en Bas	15	Lloc de treball	17 - 165	55 ± 12	56 ± 9	44 ± 2
	4	Habitatge	19 - 80	58 ± 14		
Sant Feliu de Pallarols	13	Lloc de treball	15 - 247	67 ± 17	67 ± 13	52 ± 2
	4	Habitatge	41 - 96	64 ± 13		
Les Planes d'Hostoles	6	Lloc de treball	30 - 207	96 ± 28	83 ± 23	58 ± 2
	8	Habitatge	18 - 317	73 ± 35		
Amer	11	Lloc de treball	16 - 309	85 ± 29	71 ± 19	51 ± 2
	6	Habitatge	26 - 66	49 ± 67		

A l'habitatge 40 i en el lloc de treball 8, per ser dels recintes que presenten valors més elevats de la C_{Rn} , s'hi realitzen mesures de radó de forma contínua amb el monitor PRASSI durant vuit i setze dies, respectivament (**Figures 4.12 i 4.13**). A l'habitatge 40 la concentració de radó es manté per sobre dels 300 Bq·m⁻³ i experimenta variacions diàries fins a superar els 800 Bq·m⁻³ (**Figura 4.12**). Els valors màxims s'observen durant les tardes i els mínims durant els matins. Els increments més importants s'observen de forma diària a partir de les 12 del migdia. Aquest patró de comportament pot estar regulat pels canvis de pressió deguts a les diferències de temperatura entre l'interior i l'exterior del recinte durant aquests vuit dies de principis d'hivern.

Al lloc de treball 8 la C_{Rn} experimenta variacions diàries dins l'interval de 40 Bq·m⁻³ i 2000 Bq·m⁻³ (**Figura 4.13**). S'observa un patró setmanal amb els augments més importants durant els caps de setmana, quan no hi ha treballadors. Durant els dies de mesura les finestres de què disposa el recinte romanen tancades i es comprova que la ventilació diària a través de la porta d'accés al recinte és el factor que influeix sobre els nivells de radó obtinguts. A més, el valor mig de la C_{Rn} mesurada durant les hores laborables dels 16 dies és (358 ± 12) Bq·m⁻³ mentre que el valor mig durant totes les hores és (973 ± 14) Bq·m⁻³, un factor 2.7 més gran. Per tant, el nivell de radó mesurat amb el dosímetre passiu durant el període d'exposició de tres mesos, (819 ± 70) Bq·m⁻³, està sobreestimant la concentració a la que estan exposats realment els treballadors. Aquest fet justifica la necessitat de dur a terme mesures en continu per conèixer la C_{Rn} real a que estan sotmesos els treballadors, com s'ha fet en aquest cas.

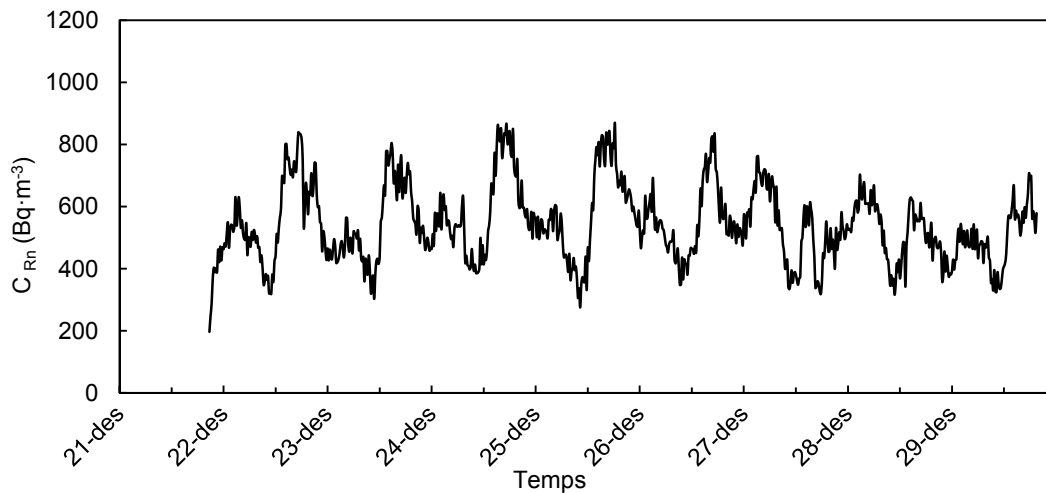


Figura 4.12. Els nivells de radó mesurats en continu durant 8 dies amb el monitor PRASSI a l'interior de l'habitatge 40.

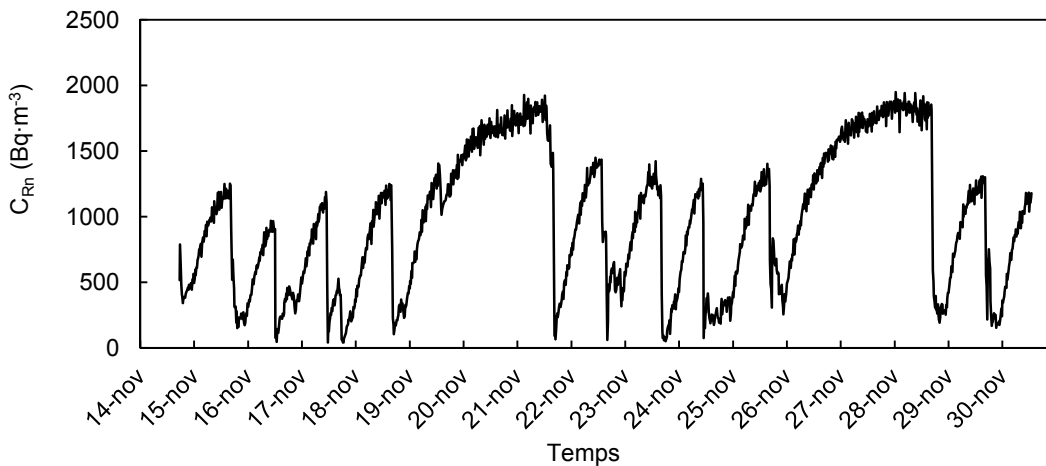


Figura 4.13. Els nivells de radó mesurats en continu durant 16 dies amb el monitor PRASSI a l'interior del lloc de treball 8.

Dues tercers parts dels recintes analitzats estan construïts sobre subsòl volcànic (**Taula 4.5**). Es confirma que els recintes construïts directament sobre materials volcànics presenten els nivells de radó més elevats. Aquesta influència del tipus de sòl és consistent amb la hipòtesis de que el radó pot provenir de grans distàncies a través de materials fracturats com els volcànics.

Taula 4.5. Nivells de radó a l'aire de tots els recintes analitzats i agrupats segons el tipus de sòl. Interval de valors, mitjanes aritmètica (M. A.) i geomètrica (M. G.) de les concentracions de radó.

Nº recintes	Tipus de sòl	C _{Rn} (Bq·m ⁻³)			Tipus de subsòl	C _{Rn} (Bq·m ⁻³)	
		Interval	M. A.	M. G.		M. A.	M. G.
51	Materials volcànics	18 - 1464	144 ± 37	75 ± 3	Volcànic	133 ± 26	72 ± 3
30	Dipòsits sedimentaris	15 - 742	113 ± 29	68 ± 2			
35	Dipòsits sedimentaris	16 - 327	68 ± 13	48 ± 2	No volcànic	67 ± 11	49 ± 2
9	Substrat terciari o paleozoic	18 - 165	64 ± 16	51 ± 2			

Dels 125 recintes analitzats, 53 van ser mesurats en 4 períodes consecutius. A la **Figura 4.14** es representen els nivells mitjos de radó de cada període respecte l'hivern distingint entre subsòl volcànic i no volcànic. Es comprova que existeix una influència del tipus de sòl en la variació estacional de la C_{Rn} . Els recintes construïts sobre subsòl volcànic presenten els nivells de radó més elevats a l'estiu i més baixos a l'hivern. Aquest comportament és diferent del què era d'esperar, ja que normalment en els recintes tancats la C_{Rn} és més gran a l'hivern que a l'estiu, degut a la menor ventilació dels recintes durant els mesos freds de l'any. La variació estacional més important s'ha obtingut en els recintes que tenen bufadors.

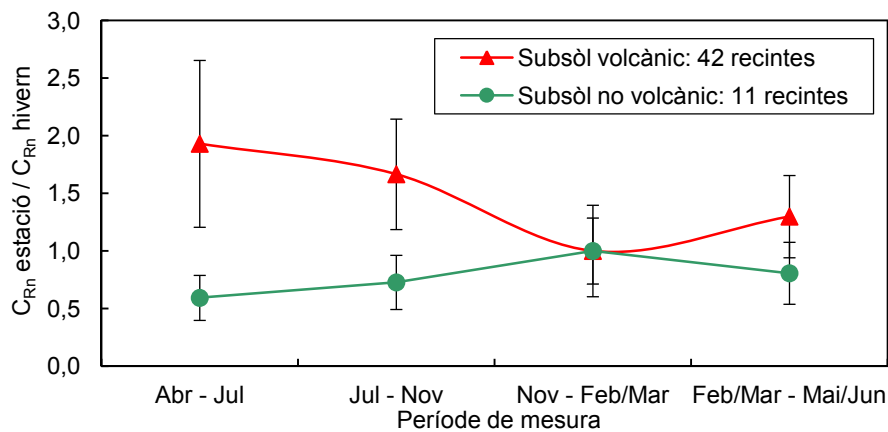


Figura 4.14. Mesures trimestrals de la C_{Rn} en relació a la mesura de l'hivern de tots els recintes agrupats segons el tipus de subsòl sobre el que estan construïts.

Els dos habitatges (codis 36 i 48) que presenten nivells anuals de radó similars o superiors als $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, són soterranis privats excavats en els materials volcànics que tenen bufadors en el seu interior: el bufador 1 està situat a l'habitatge 36 i el bufador 2 està en el 48. A la **Figura 4.15** es mostra la variació estacional de la C_{Rn} en aquests dos recintes i s'observa que els nivells de radó són més elevats durant l'estiu, precisament quan a la sortida del bufador es percep un corrent d'aire important. Aquest resultat posa de manifest que la presència de bufadors és la responsable dels nivells elevats de radó durant els mesos càlids de l'any. Amb l'estudi dedicat als bufadors s'analitza amb més detall aquesta variació estacional i els fluxos d'aire del subsòl.

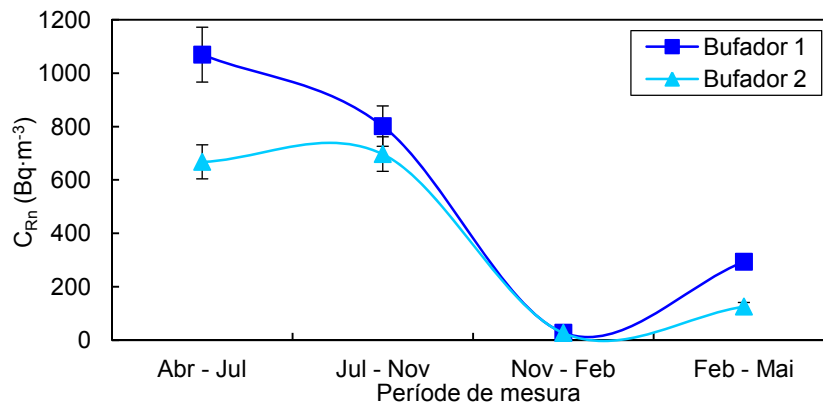


Figura 4.15. Variació estacional de la C_{Rn} a l'interior de dos recintes amb bufadors. El bufador 1 està situat en el punt 36 i el bufador 2 en el punt 48.

En general, els resultats obtinguts en els 4 pobles més pròxims a la falla d'Amer no mostren una influència clara de la falla en els nivells de radó a l'interior de recintes tancats. Només en el cas dels recintes de la Vall d'en Bas que estan construïts sobre un mateix tipus de sòl (dipòsits sedimentaris quaternaris) sembla que la distribució de concentracions de radó té una relació amb la distància a la falla d'Amer (**Figura 4.16**). L'observació d'aquesta possible influència esdevé complicada degut a tres tipus d'inconvenients: en primer lloc, no disposar d'una estadística de recintes prou gran en cadascun dels municipis estudiats, en segon lloc, no poder controlar tot el conjunt de paràmetres que influeixen en els nivells de radó a l'interior d'un recinte tancat; i finalment, els materials que recobreixen la falla al llarg del seu recorregut no són del mateix tipus i això pot provocar que la influència de la falla no sigui la mateixa a diferents punts. Els dos primers inconvenients poden eliminar-se fent una campanya de mesures del radó directament en el sòl.

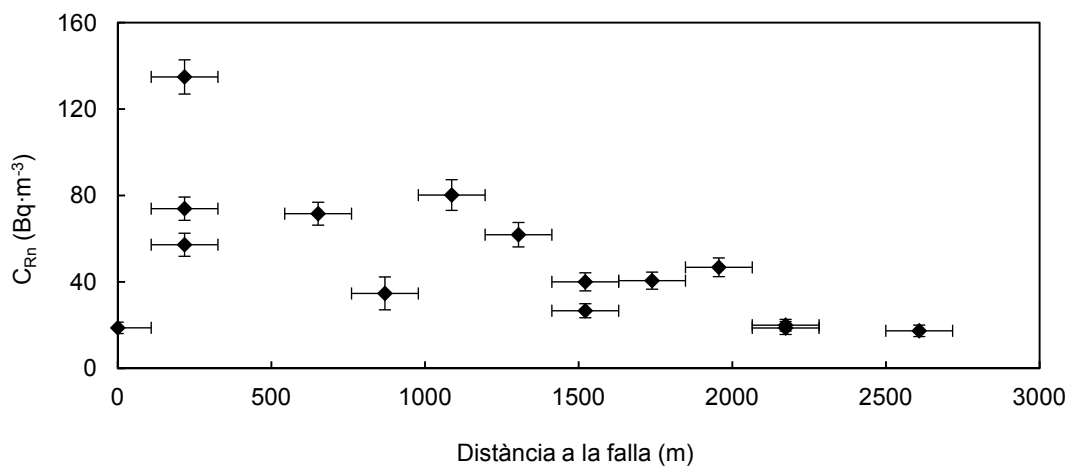


Figura 4.16. Concentracions de radó en funció de la distància a la falla d'Amer de 15 recintes de La Vall d'en Bas amb la mateixa geologia en el subsòl, tot estan sobre dipòsits sedimentaris quaternaris.

4.2.2. Radó al sòl

Entre els anys 2005-2009 es realitza una gran campanya de mesura de la C_{Rn} directament en el sòl d'Amer amb la que es pretén estudiar la possible influència de la falla d'Amer en els nivells de radó i analitzar les seves variacions temporals (Font et al., 2008b). Amb l'objectiu de seguir estudiant l'activitat de la falla d'Amer, durant l'any 2010 es realitza una nova campanya de mesures en el sòl d'Amer que, integra diferents tècniques i mètodes geofísics (Zarroca et al., 2012).

4.2.2.1. La campanya 2005-2009

Dins el terme municipal d'Amer es seleccionen 27 punts de mesura distribuïts en 5 línies perpendiculars a la trajectòria de la falla. En aquests punts s'instal·len tres sondes Clipperton i 24 detectors passius de LR115, quedant situats a diferents distàncies de la falla (entre 0 i 300 m), tal i com s'observa a la **Figura 4.17**.

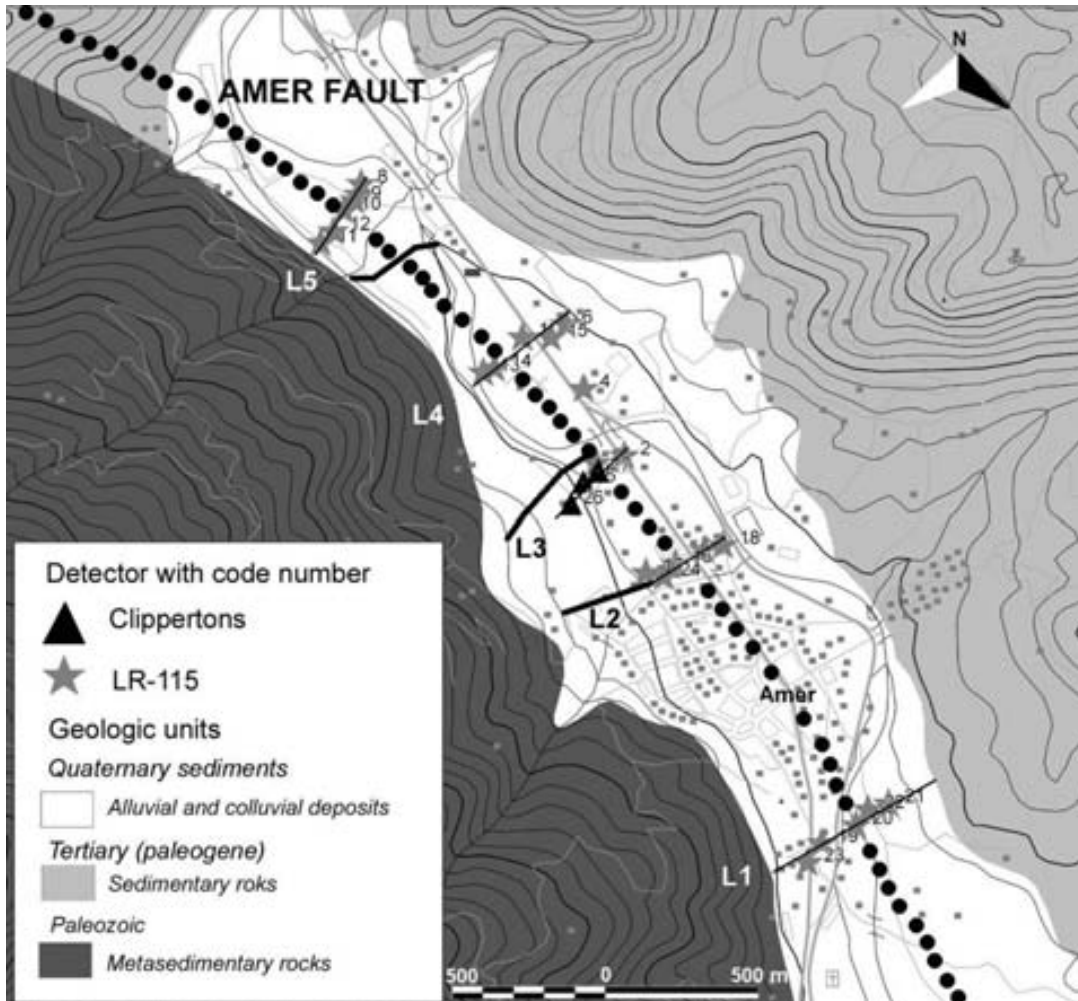


Figura 4.17. Distribució dels 27 punts de mesura de la C_{Rn} en el sòl amb detectors de LR-115 i Clippertons formant cinc línies (L1, L2, L3, L4 i L5) transversals a la posició estimada de la falla d'Amer i senyalitzada amb la línia de punts. Els trams de línia gruixuda situats a prop dels perfils L5, L3 i L2 corresponen als tres perfils estudiats posteriorment amb mesures puntuals (Perfil del Pla de la Font d'en Fàbregues, Perfil del Mont i Perfil Urbà).

Els resultats obtinguts permeten veure la possible influència de la falla directament sobre els nivells de radó en el sòl, sense la influència dels diferents factors que afecten l'acumulació del radó a l'aire dels recintes tancats com tenim a les campanyes anteriors. Aquest cop el rang de valors de la C_{Rn} és $[1 - 150] \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$. A Font et al. (2008b) es presenten els resultats dels dos primers anys de mesures i aquí es presenten els resultats dels quatre anys complets.

Els valors mitjos de les concentracions de radó dels cinc perfils en funció de la distància a la falla presenten els valors més elevats al damunt de la falla i disminueixen en distanciar-se'n (Figura 4.18). Al costat sud-oest de la falla es troba una dispersió de valors de la C_{Rn} més gran que al costat nord-est, tal i com indiquen les barres d'incertesa. S'ha de tenir en compte que, com a primera aproximació, es considera l'existència d'una única fractura, quan en realitat n'hi pot haver més d'una o fins i tot hi pot haver zones on el substrat estigui més intensament fracturat que en altres. A més, els materials que cobreixen la falla n'impedeixen la seva observació directa i aleshores la posició de la falla, o fractura principal, no està determinada de forma exacta, sinó que es treballa amb una posició

estimada. Finalment, els sediments que recobreixen la falla no són homogenis al llarg dels cinc perfils i aleshores el transport del radó i els nivells mesurats no han de ser iguals a totes les zones estudiades, tal i com s'observa a les **Figures 4.19** i **4.20**. En els perfils L3, L4 i L5 s'observen valors màxims de la C_{Rn} al voltant de la posició estimada de la falla, a diferència del què passa en els perfils L1 i L2. Aquesta diferència també pot ser deguda al fet que els dos primers perfils (L1 i L2) estan situats a unes zones amb una major influència antròpica que pot afectar els nivells de radó en el sòl.

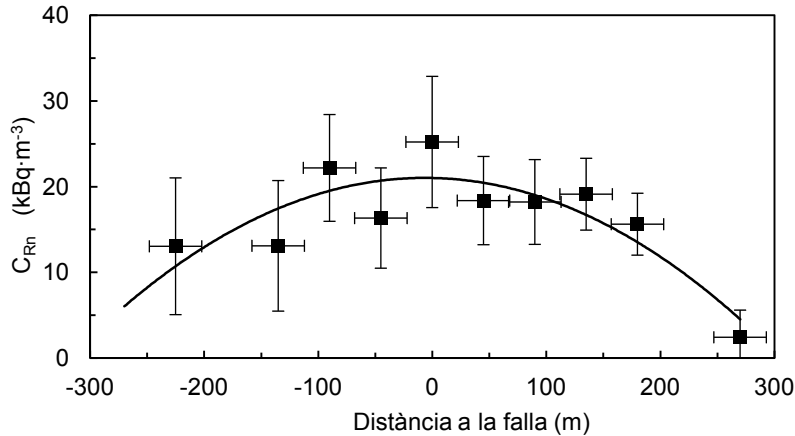


Figura 4.18. Valors mitjos de la C_{Rn} de tots els punts de mesura amb detectors passius de LR115 entre els anys 2005 i 2009.

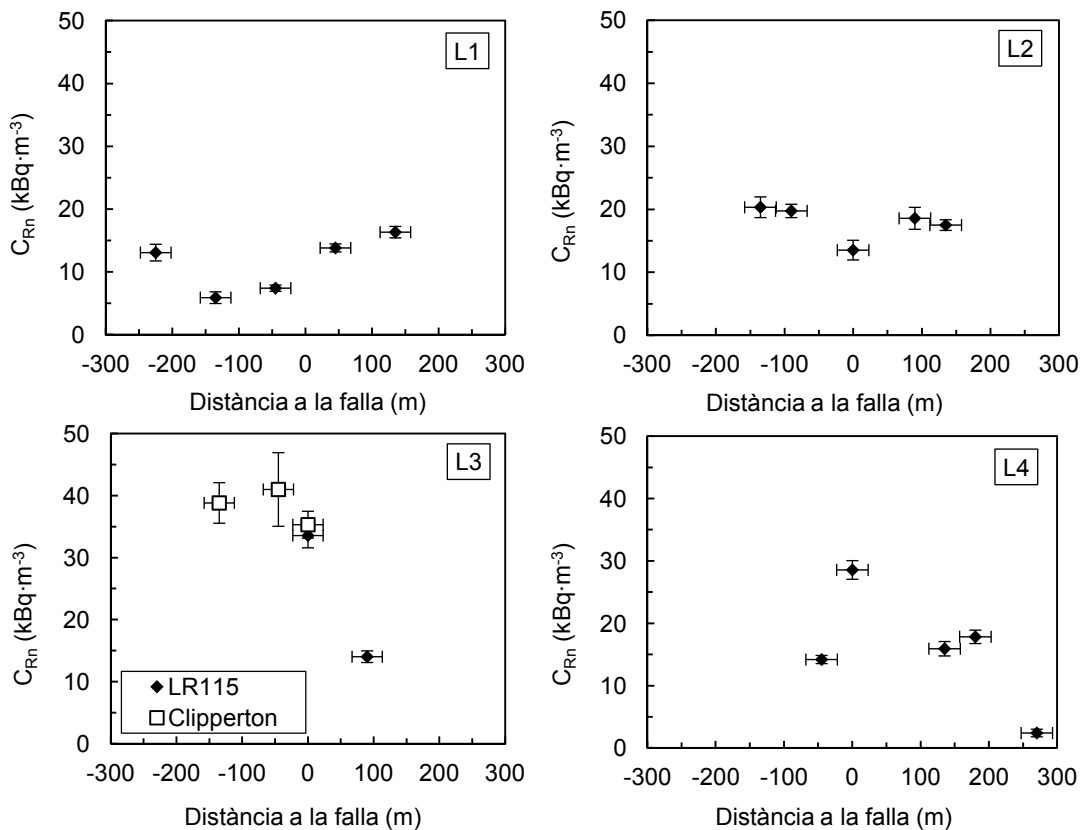


Figura 4.19. Distribució de valors mitjos de la C_{Rn} en funció de la distància de la falla d'Amer pels perfils L1, L2, L3 i L4 entre els anys 2005 i 2009. Les distàncies positives indiquen els punts situats a l'est (respecte la posició estimada de la falla) i les distàncies negatives indiquen els punts de l'oest.

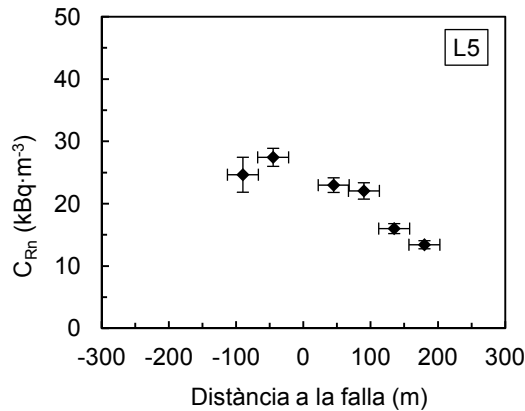


Figura 4.20. Distribució de valors mitjos de la C_{Rn} en funció de la distància de la falla d'Amer pel perfil L5 entre els anys 2005 i 2009. Les distàncies positives indiquen els punts situats a l'est (respecte la posició estimada de la falla) i les distàncies negatives indiquen els punts de l'oest.

En els tres punts on s'han realitzat mesures en continu s'observa una variació estacional important de la C_{Rn} , amb uns nivells 10 vegades més grans a l'estiu que a l'hivern (**Figura 4.21**). Aquest comportament està d'acord amb el dels nivells de radó dels recintes sobre materials volcànics. Aquests resultats són consistents amb la hipòtesis de que el radó viatja a través del medi fracturat i que pot procedir de zones allunyades.

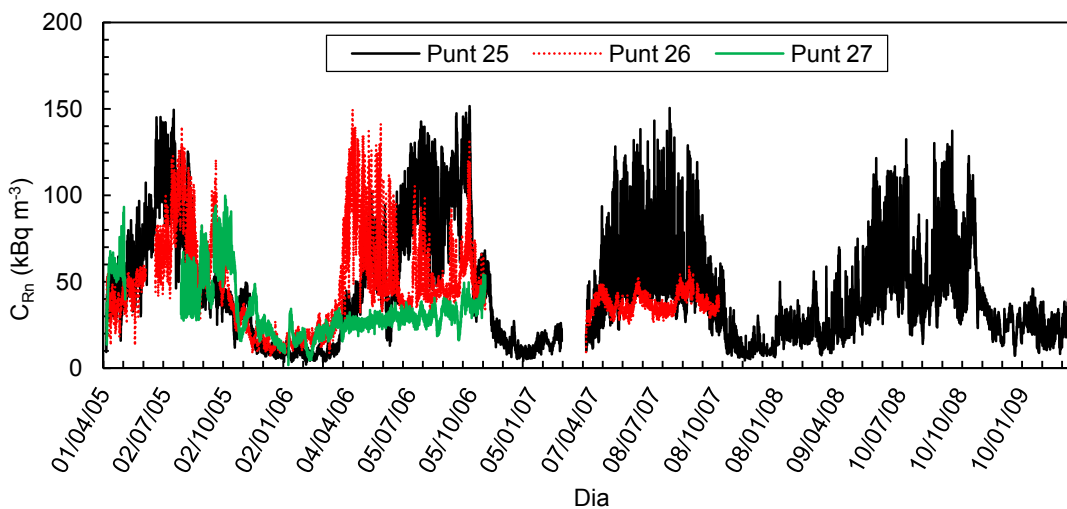


Figura 4.21. Sèrie temporal del radó en el sòl mesurat amb els 3 Clippertons entre els anys 2005 i 2009.

4.2.2.2. La campanya 2010

Dels cinc perfils estudiats a la campanya 2005-2009 es seleccionen els tres que presenten unes característiques més interessants des del punt de vista de la Geofísica o de la PR. Dos perfils es troben en zones despoblades de la vall que presenten indicadors geomorfològics i hidrogeològics més clars d'activitat tectònica mentre que el tercer perfil està situat en una zona amb una major densitat de població. El primer, anomenat Perfil del Pla de la Font d'en Fàbregues, està situat a la zona on es concentren la majoria de surgències d'aigua subterrània riques en CO_2 . Està a uns 200 m al SE del perfil L5 i té uns

300 m de longitud (**Figura 4.17**). El segon perfil, anomenat Perfil del Mont, està situat a una zona on hi destaquen els nombrosos escarpaments existents i que afecten als dipòsits quaternaris. Es troba a uns 100 m al NO del perfil L3 i té uns 400 m de longitud. El tercer perfil se l'anomena Perfil Urbà per estar a una zona poblada. Ressegueix el perfil L2 i s'estén cap a l'oest fins a completar uns 600 m, travessant diverses parcel·les de terra cultivades o enjardinades i passant a escassos metres de camins o carrers asfaltats. A cadascun dels tres perfils es seleccionen entre 14 i 17 punts de mesura, separats de 20 m a 50 m entre ells. També es realitzen algunes mesures als voltants de l'Esquerda de l'Infern i de la Font Pudosa. Les mesures de la concentració de radó en el sòl es fan de forma puntual mitjançant el monitor AlphaGUARD i els seus accessoris pel sòl. Les mesures es fan entre el 7 de maig i el 28 de juliol de 2010. De forma simultània es mesuren tres paràmetres addicionals: la concentració de toró, el flux de CO₂ i la resistivitat elèctrica. La mesura de la concentració de toró es realitza amb el mateix monitor que el radó, l'AlphaGUARD i els seus accessoris pel sòl. El flux de CO₂ es determina mitjançant el mètode de la cambra d'acumulació i un espectròmetre d'infrarojos portàtil i la resistivitat elèctrica es determina amb la tècnica de tomografia de resistivitat elèctrica (ERT). Aquestes dues tècniques estan descrites en detall a Zarroca et al. (2012). La determinació del flux de CO₂ és especialment interessant perquè aquest gas també pot tenir un origen profund, per desgasificació directe del mantell, i pot actuar com a portador, a més a més del radó, d'altres components minoritaris, també d'origen volcànic com el H₂S, CH₄, CO, etc. (Pizzino et al., 2002).

Els resultats d'aquesta campanya permeten analitzar amb més detall la distribució de concentracions de radó al llarg de tres perfils transversals a la falla d'Amer i compararla amb la distribució de concentracions de toró i de fluxos de CO₂. A la **Taula 4.6** es presenten els intervals de valors de la concentració de radó, de toró i del flux de CO₂ en els tres perfils, els voltants de la Font Pudosa i a l'Esquerda de l'Infern.

Taula 4.6. *Intervals de valors de la concentració de radó, de toró i del flux de CO₂ en els tres perfils del sòl d'Amer i altres zones d'interès analitzades a la campanya del 2010.*

Punts de mesura	Cn ²²² Rn (kBq·m ⁻³)	Cn ²²⁰ Rn (kBq·m ⁻³)	Flux CO ₂ (g·m ⁻² ·d ⁻¹)
Perfil Pla de la Font d'en Fàbregas	0.4 – 31.5	6.2 – 19.0	27 – 267
Perfil del Mont	0.2 – 51.4	0.0 – 19.1	11 – 226
Perfil Urbà	2.6 – 43.3	4.5 – 39.6	–
Voltants de la Font Pudosa	50.2 – 53.7	51.2 – 143.4	66 – 70
Esquerda de l'Infern	1.7 ± 0.1	0.4 ± 0.7	36 ± 2

En el Perfil del Pla de la Font d'en Fàbregas, a uns escassos 200 m del perfil L5 de la campanya anterior, els valors de la concentració de radó són més elevats a la part central del perfil (al voltant dels 30 kBq·m⁻³), coincidint amb els resultats obtinguts amb els detectors passius al perfil L5 de la campanya 2005-2009 (**Figura 4.18**). El toró presenta un comportament semblant al radó i el CO₂ es caracteritza per una gran variabilitat de valors presentant també els més elevats a la part central (al voltant dels 250 g·m⁻²·dia⁻¹) (**Figura 4.22 (a)**). Aquestes grans fluctuacions podrien ser degudes a la dispersió dels gasos en el si d'uns sediments molt permeables i a la influència del sistema hidrològic, ja que en aquesta zona hi ha importants punts de bombeig d'aigua subterrània. Ara bé, el fet que el

radó i el CO_2 presentin uns màxims a la part central del perfil ja és indicatiu de que els dos gasos endògens procedeixen de les fractures situades sota els sediments quaternaris.

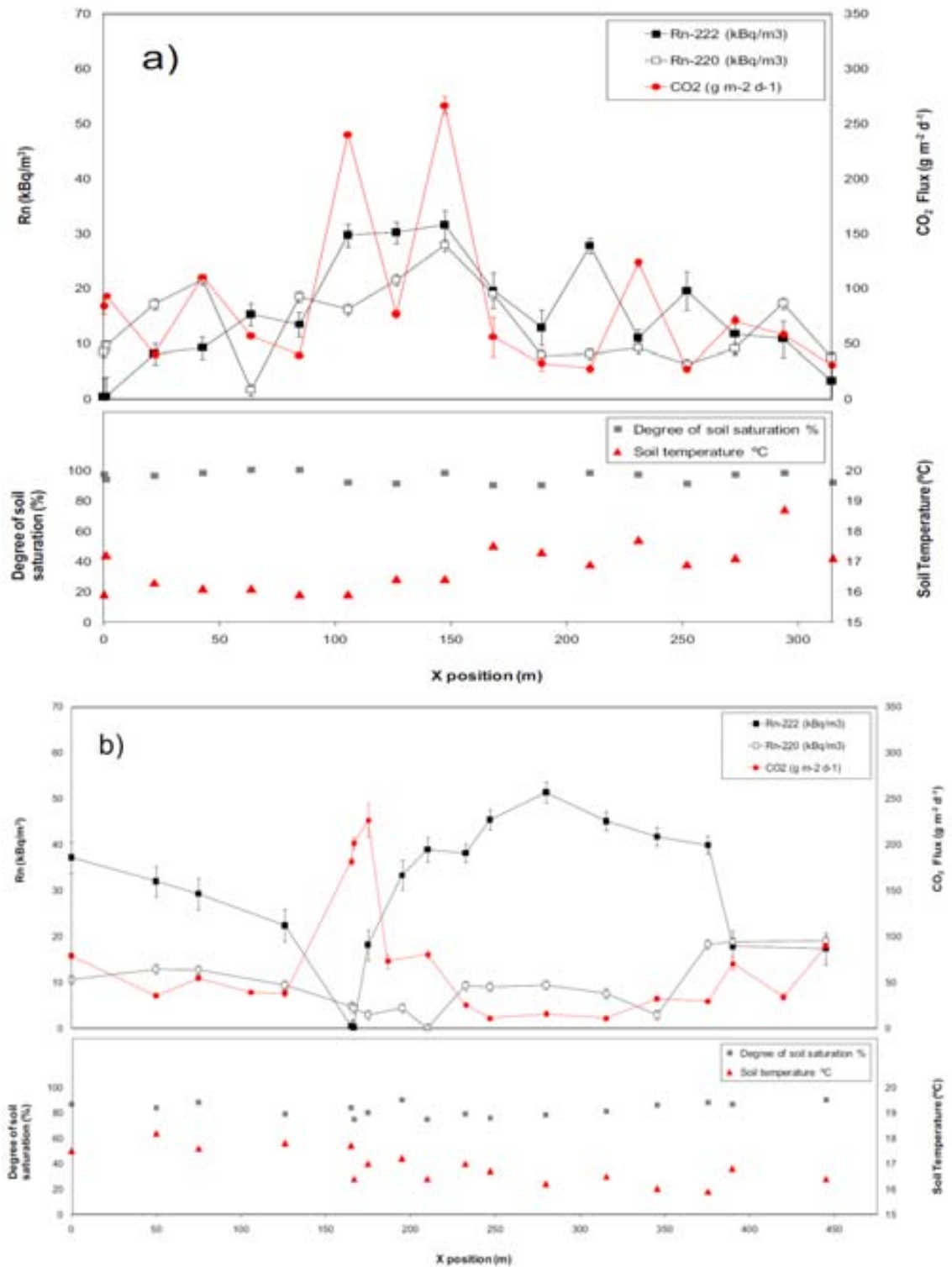


Figura 4.22. Distribució de la concentració de radó, de toró, del flux de CO_2 , de la temperatura i de la humitat en el sòl en el Perfil del Pla de la Font d'en Fàbregas (a) i en el Perfil del Mont (b) (Zarroca et al., 2012)

En el Perfil del Mont, situat a uns 100 m del perfil L3, s'observa un comportament diferent. Presenta valors alts de radó, fins a $(51 \pm 2) \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$, però tant el radó com el CO_2 no fluctuen tant, excepte en una zona bastant localitzada del perfil, on el radó presenta el seu valor mínim (al voltant de $0.3 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$) i el CO_2 el seu màxim (al voltant de $210 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$). La relació inversa entre els radó i el CO_2 d'aquesta zona pot ser deguda a un efecte de dilució del radó provocat per la important sortida de CO_2 . A la resta del perfil, quan els nivells de radó són elevats els de CO_2 són baixos. Pel què respecte al toró, presenta valors baixos (al voltant dels $10 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$) al llarg de tot el perfil, excepte a la part de l'est on presenta els valors màxims, fins a $(19 \pm 2) \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ (**Figura 4.22 (b)**). La tendència i els valors obtinguts en el tram oest del perfil coincideix amb els valors mitjans de les mesures realitzades al llarg del perfil L3 de la campanya 2005-2009 amb detectors actius i passius (**Figura 4.18**).

El Perfil Urbà no té dades de flux de CO_2 i els seus punts de mesura estan més separats que en els altres dos perfils, uns 46 m de valor mig. Presenta uns comportaments i uns intervals de valors de les concentracions de radó i toró semblants, fins a $(43 \pm 2) \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ i $(40 \pm 2) \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivament (**Taula 4.6**). La variació més grans de valors de la concentració de radó s'observa al tram oest del perfil (**Figura 4.23**). En el tram est, que correspon amb el perfil L2 (**Figura 4.17**), els nivells de radó no varien tant i coincideixen amb els resultats obtinguts amb els detectors passius (al voltant dels $20 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$) a la campanya 2005-2009 (**Figura 4.18**).

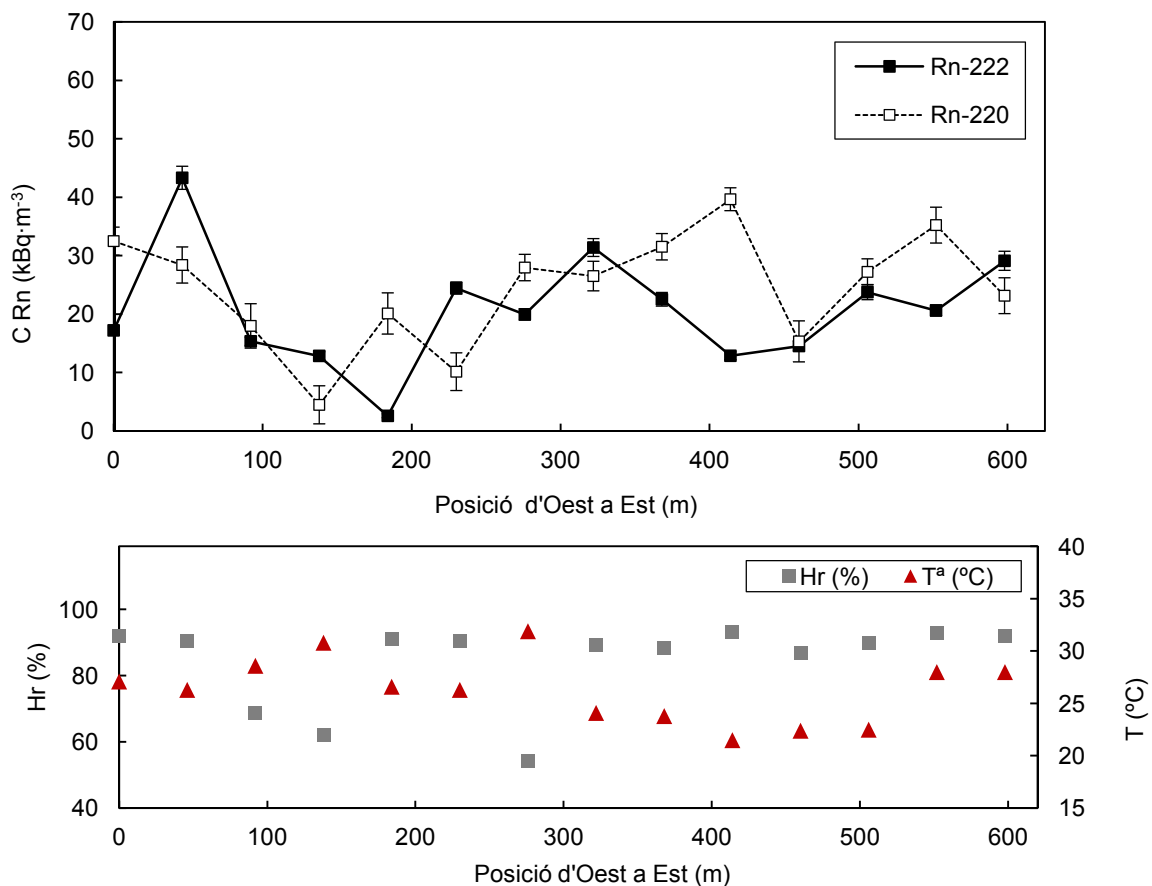


Figura 4.23. Distribució de la concentració de radó, de toró, de la temperatura i de la humitat en el sòl del Perfil Urbà.

Les mesures realitzades a l'Esquerda de l'Infern presenten valors baixos pels tres gasos analitzats (**Taula 4.6**), en canvi, les mesures realitzades als voltants de la Font Pudosa mostren els nivells de radó i toró més elevats de la campanya 2010, fins a $54 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ i $143 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivament.

Una relació inversa semblant entre el radó i el flux de CO_2 associada a un possible efecte de dilució del radó pel CO_2 s'ha observat a altres contextos geològics semblants, és a dir, amb presència de fonts riques en CO_2 i falles actives, com és el cas de la zona volcànica del Mont Etna, a Sicília, Itàlia ([Giammanco et al., 2009](#)). En contextos geològics on no existeixen emanacions de CO_2 , també s'ha observat anomalies negatives de radó sobre falles actives degudes a la presència recobriments de materials impermeables ([Seminsky i Bobrov, 2009](#)). Tuccimei i Soligo (2008) també han explicat les correlacions inverses entre radó i CO_2 com uns artefactes instrumentals per haver utilitzat un monitor RAD7, però que que en el nostre cas no tenen aplicació, ja que el principi físic de detecció del radó amb l'AlphaGUARD (Cambra d'ionització) és diferent al del RAD7 (detector de semiconductor). Es considera que el CO_2 pot produir un efecte de neutralització de la càrrega elèctrica a l'interior de la cambra d'electrodeposició del RAD7, mentre que no influeix a la detecció amb una cambra de ionització.

A partir de les imatges obtingudes amb la mesura de la resistivitat elèctrica i la seva superposició amb els resultats anteriors es fa una descripció més detallada de la possible dinàmica dels diferents fluxos de gas en el sòl de la falla d'Amer ([Zarroca et al., 2012](#)). Els resultats obtinguts posen de manifest que la permeabilitat i grau d'aireig de les formacions superficials que recobreixen les zones de falles actives juguen un paper molt important sobre la sortida de gasos endògens procedents del sòl.

4.2.3. Radó i toró en els bufadors

Durant l'any 2007 es duu a terme una campanya de mesures puntuals de la C_{Rn} en els bufadors de la zona volcànica de la Garrotxa ([Moreno et al., 2009a](#)) els objectius de la qual són: (i) identificar el màxim nombre de bufadors de la zona volcànica de la Garrotxa, (ii) estudiar les característiques geològiques dels bufadors, (iii) determinar els paràmetres rellevants per moviment d'aire en els bufadors, (iv) mesurar les concentracions de radó i toró de l'aire dels bufadors i (v) analitzar el possible risc radiològic en els llocs de treball i els habitatges amb bufadors. La localització dels bufadors es fa mitjançant recerca bibliogràfica i buscant directament en el camp. La caracterització dels bufadors consisteix en determinar la seva posició geogràfica (**Figura 4.24**), les seves dimensions, els tipus de materials volcànics adjacents i algunes propietats de l'aire que en surt (velocitat, temperatura, humitat i nivells de radó i toró). Les mesures es fan en tres períodes diferents: 5 Maig – 30 Juny, 19 Juliol – 13 Setembre i 21 – 24 Novembre. S'utilitza l'estació meteorològica TFA, el cabalímetre i detectors de radó actius (PRASSI i RAD7) per fer mesures puntuals d'una hora aproximadament. Per fer les mesures integrades de la C_{Rn} en els edificis que tenen bufadors en el seu interior s'utilitzen els detectors de Makrofol exposats entre els mesos de juliol i novembre.

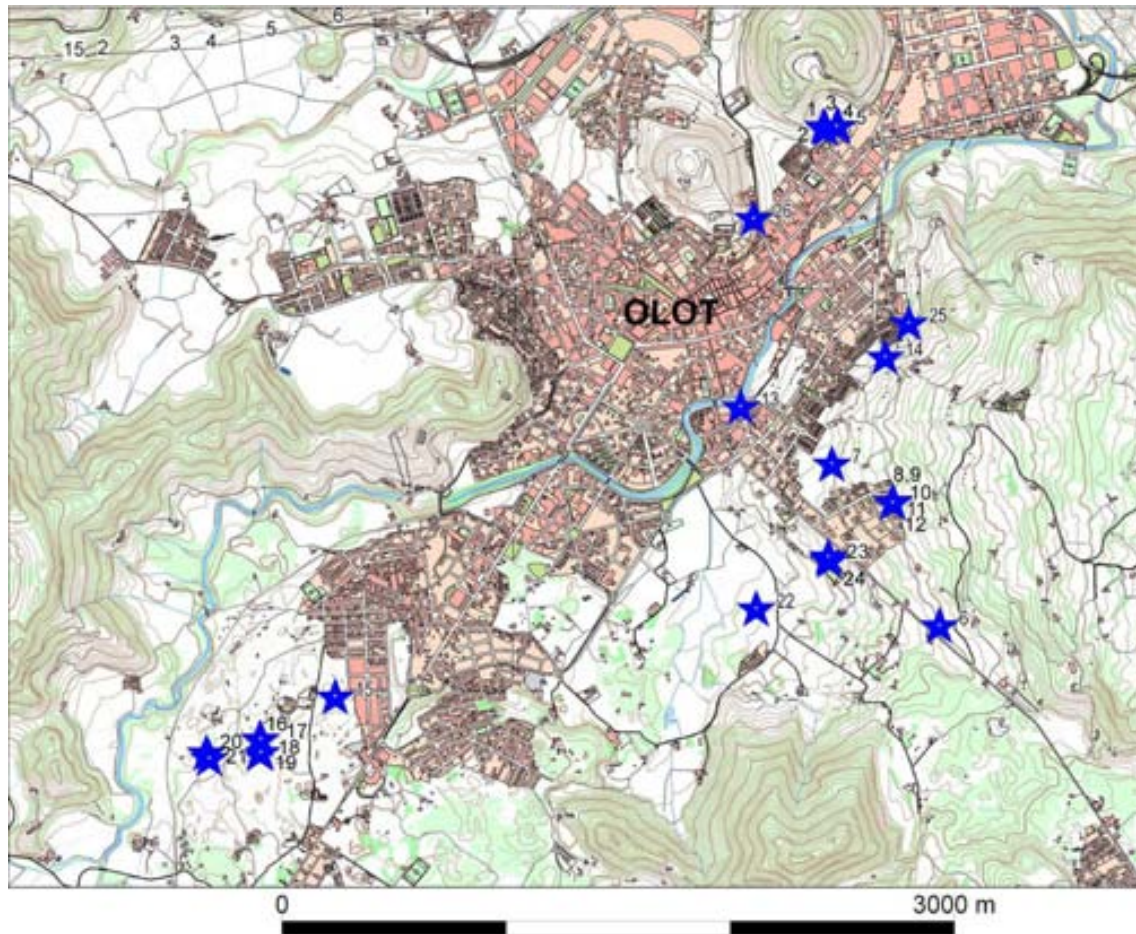


Figura 4.24. Situació dels bufadors identificats a la zona volcànica de la Garrotxa.

El bufador estudiat de forma més detallada (codi 23 de la **Figura 4.24**) i que motiva la realització d'aquesta recerca des del principi és el bufador de l'interior d'un antic mas. Des de l'any 2002 es mesuren els nivells de radó de forma regular amb detectors passius de Makrofol, penjats a 0.5 m sobre el bufador i a 0.3 m de la paret, tal i com s'observa a la **Figura 4.25**. A partir de l'any 2005 s'instal·len més detectors a la mateixa alçada del bufador però a nou distàncies diferents de la paret per obtenir la variació dels nivells de radó amb la distància. Addicionalment es mesura la concentració de gas radó de forma contínua amb monitors actius (PRASSI i RAD7), situats davant del bufador durant diversos períodes: la primavera/estiu del 2005 (18 Maig - 13 Setembre), l'hivern del 2006 (18 Gener - 24 Març), la tardor del 2007 (16 - 24 Novembre) i entre el 23 de Maig del 2008 i el 8 de Juliol del 2009.

En aquesta campanya s'identifica un total de 26 bufadors, la major part dels quals són exteriors i 7 estan localitzats a l'interior d'edificis (Moreno et al., 2009a). Les seves dimensions, determinades mitjançant una cinta mètrica, presenten un ampli interval de valors, amb superfícies de sortida de 0.0028 m² a 6.460 m², i profunditats de 0.17 m a 7.75 m. A la **Taula B.1** de l'annex B es presenten les principals característiques dels bufadors analitzats així com els resultats obtinguts a cada mesura. Tal i com s'ha descrit a l'apartat 4.1.3, els bufadors s'han trobat en tres unitats geològiques diferents: colades de lava del Pla de Batet i el Pla d'Olot (unitat 1), volcans de la Garrinada i Montsacopa (unitat 2) i colades de lava del Bosc de Tosca (unitat 3) (ICC et al., 2007) (**Figura 4.3**).



Figura 4.25. El bufador 23, situat a l'interior d'un antic mas, amb detectors de Makrofol a 0.5 m per sobre de la seva sortida mesurant la C_{Rn} a l'aire.

Els resultats obtinguts mostren que els bufadors d'una mateixa unitat, en general, tenen propietats i comportaments semblants i això pot suggerir diferències en l'origen del radó i del toró entre bufadors de diferents unitats. A la **Taula 4.7** es presenten els valors mitjos dels resultats de cada període de mesura agrupant els bufadors per unitats geològiques i la relació que existeix entre les concentracions de toró i radó, C_{Rn-220}/C_{Rn-222} . Dins dels bufadors d'una mateixa unitat s'observa que durant els mesos d'estiu s'obtenen les velocitats d'aire i les concentracions de radó més elevades. La detecció d'uns determinats nivells de toró amb unes baixes concentracions de radó i baixes velocitats, com passa amb els bufadors de la unitat 3, es pot explicar amb una font de toró pròxima a la sortida del bufador. Un aire en moviment fa augmentar el volum de col·lecció en el sòl i aleshores unes concentracions de radó significatives en un aire que té una velocitat $>0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ permet que el radó viatgi més distància (fins a 35 km en 4 dies) i, per tant, que tingui un origen més llunyà, com s'observa en els bufadors de la unitat 1. En aquesta situació, hi ha dues possibles explicacions sobre l'origen de l'aire que surt pels bufadors: i) que els canals siguin bàsicament superficials i que tinguin una o diverses sortides a l'exterior on s'incorpori aire i ii) que els canals estiguin connectats a fractures més profundes del sistema volcànic per on pugui haver-hi una incorporació de radó degut a la presència de substrats rics en radi o a la desgasificació del mantell. Amb els resultats obtinguts creiem que la combinació dels dos escenaris és possible. Per tal de veure quina de les dues explicacions té més força, o bé per distingir entre diferents tipus de bufadors segons l'origen del seu radó, caldria mesurar altres gasos, com el CO_2 , l'He, etc., (Pizzino et al., 2002; Hernández et al., 2004). Per ambdues possibles explicacions, els gradients de temperatura poden ser els responsables dels fluxos d'aire convectius des del canal subterrani cap a l'aire exterior i la presència d'aigua pot frenar aquesta circulació d'aire, dificultant la incorporació del radó cap a l'aire del canal (Washington i Rose, 1990).

Del total de bufadors inventariats, 7 estan situats a l'interior d'edificis (dos habitatges, dos rebosts i un lloc de treball) (**Taula 4.8**). Els valors més elevats de la concentració de radó s'han trobat en els rebosts, ja que es tracta de recintes de reduïdes dimensions que tenen una ventilació molt baixa o nul·la.

Taula 4.7. Valors mitjos de la temperatura (T), humitat relativa (Hr) i la velocitat de l'aire (v_{aire}) mesurats amb el velocímetre *VelociCalc Plus* i els valors mitjos de la concentració de radó (C_{Rn-222}) i toró (C_{Rn-220}) mesurats amb el monitor *RAD7* pels bufadors de les tres unitats geològiques en els tres períodes de mesura del 2007. La incertesa correspon a la desviació estàndard del valor mig.

Període de mesura	T (°C)	Hr (%)	v_{aire} ($m \cdot s^{-1}$)	C_{Rn-222} ($kBq \cdot m^{-3}$)	C_{Rn-220} ($kBq \cdot m^{-3}$)	C_{Rn-220}/C_{Rn-222}
Unitat 1						
Maig – Juny	11.8 ± 0.7	90 ± 3	0.19 ± 0.13	5.4 ± 1.0	0.71 ± 0.22	0.1
Juliol – Setembre	13.5 ± 0.5	96 ± 3	0.32 ± 0.07	5.3 ± 0.6	1.14 ± 0.19	0.2
Novembre	8.1 ± 0.8	83 ± 2	0.16 ± 0.04	2.4 ± 0.7	1.03 ± 0.26	0.4
Unitat 2						
Maig – Juny	9.2 ± 1.2	86 ± 3	-	0.82 ± 0.11	0.31 ± 0.04	0.4
Juliol – Setembre	11.9 ± 1.0	91 ± 3	0.13 ± 0.06	0.57 ± 0.08	1.01 ± 0.21	1.8
Novembre	9.1 ± 0.9	83 ± 2	0.09 ± 0.03	0.03 ± 0.01	0.09 ± 0.03	3.0
Unitat 3						
Maig – Juny	14.3 ± 0.6	89 ± 3	0.04 ± 0.01	0.016 ± 0.003	0.36 ± 0.11	22.5
Juliol – Setembre	21.4 ± 0.6	85 ± 2	0.03 ± 0.01	0.026 ± 0.012	0.70 ± 0.09	26.9
Novembre	9.0 ± 0.1	-	-	0.020 ± 0.012	0.56 ± 0.23	28.0

Taula 4.8. Valors mitjos dels nivells de radó (C_{Rn-222}) dels bufadors interiors obtinguts amb els detectors passius exposats durant alguns mesos del 2007 pròxims a les sortides dels bufadors.

Codi bufador	Unitat geològica	Ús de l'edifici	Període de mesura	C_{Rn-222} ($kBq \cdot m^{-3}$)
3, 4, 5	2	Habitatge	Juliol – Novembre	0.67 ± 0.08
22	3	Rebost	Juliol – Novembre	2.66 ± 0.47
23	3	Habitatge	Juliol – Novembre	0.48 ± 0.04
24	3	Rebost	Juliol – Novembre	1.61 ± 0.31
26	2	Lloc de treball	Juliol – Novembre	0.43 ± 0.05

El bufador estudiat en detall durant més de sis anys correspon al codi 23 i a la **Figura 4.26** es poden veure els valors mitjos de la concentració obtinguts amb els detectors de Makrofol situats a uns 60 cm de la sortida del bufador (Moreno et al., 2008; 2009a). Els nivells de radó a l'estiu són més elevats que a l'hivern i d'un any a l'altre hi ha variacions significatives.

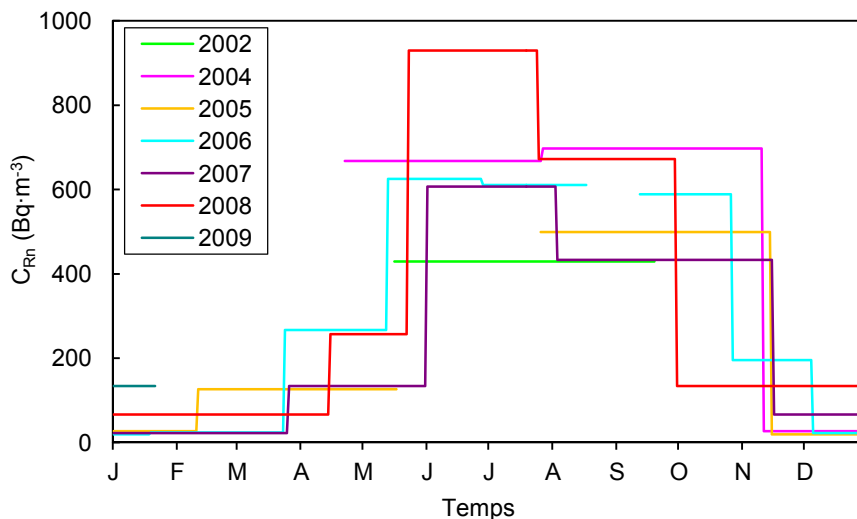


Figura 4.26. Nivells de radó obtinguts amb detectors passius entre els anys 2002-2009 en el bufador 23.

La **Figura 4.27** mostra els nivells de radó mesurats amb els detectors de Makrofol a diferents distàncies del bufador en dues estacions diferents: a l'estiu amb nivells elevats i a l'hivern amb nivells baixos. El valor mig anual de la C_{Rn} és $(171 \pm 24) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, un valor menor que el nivell de referència recomanat, confirmant que no hi ha un risc radiològic significatiu pels habitants d'aquest habitatge.

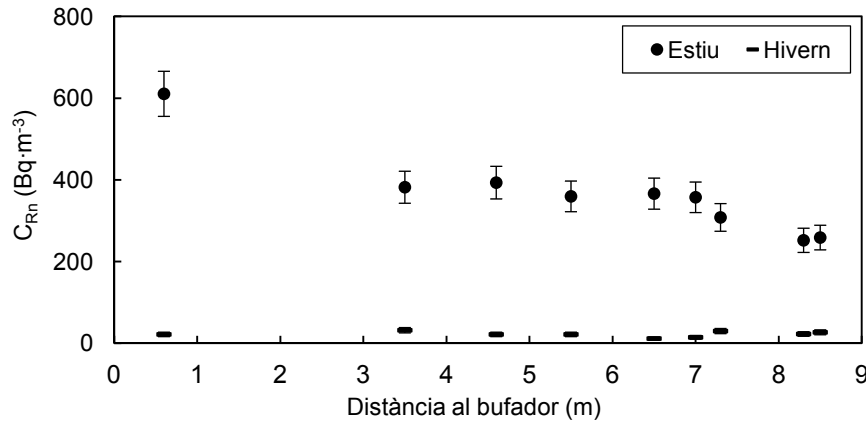


Figura 4.27. Nivells de radó obtinguts amb detectors passius a diferents distàncies del bufador 23 durant l'estiu i l'hivern del 2006. Les barres d'error representen la desviació estàndard del valor mig.

Les mesures en continu realitzades entre els anys 2005-2009 en aquest bufador mostren importants variacions diàries i estacionals i que els valors assolits durant l'estiu són molt més elevats que durant l'hivern (**Figures 4.28 i 4.29**). La **Figura 4.28** correspon a les mesures amb el monitor PRASSI situat a 60 cm del bufador, mentre que la **Figura 4.29** correspon als nivells de radó mesurats just a la sortida del bufador, els quals són més elevats. L'increment de la C_{Rn} mesurada s'explica per la major proximitat a la sortida del bufador i també per la detecció del toró.

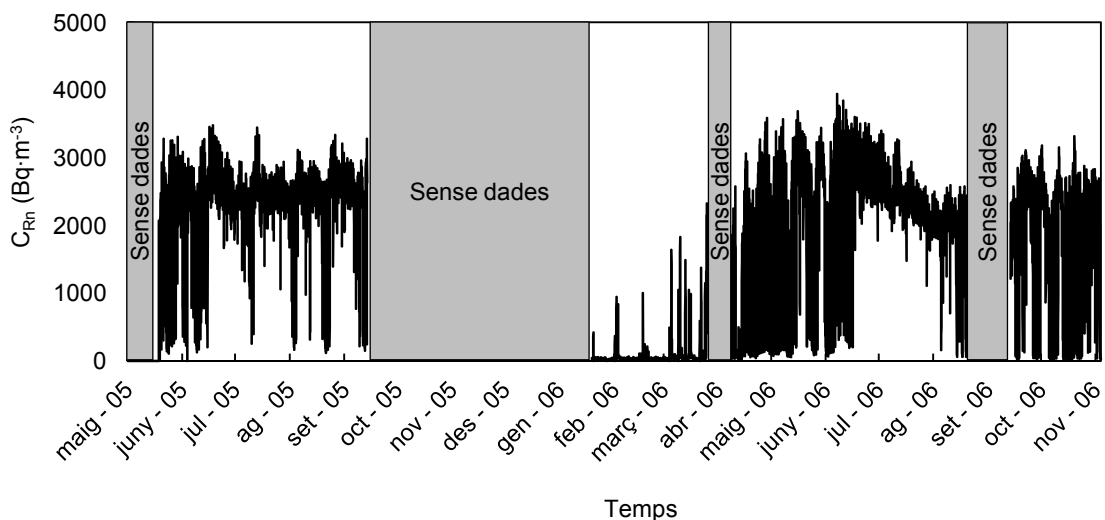


Figura 4.28. Variacions temporal de la C_{Rn} en el bufador 23 mesurat amb el monitor PRASSI durant 4 mesos del 2005 i 10 mesos del 2006.

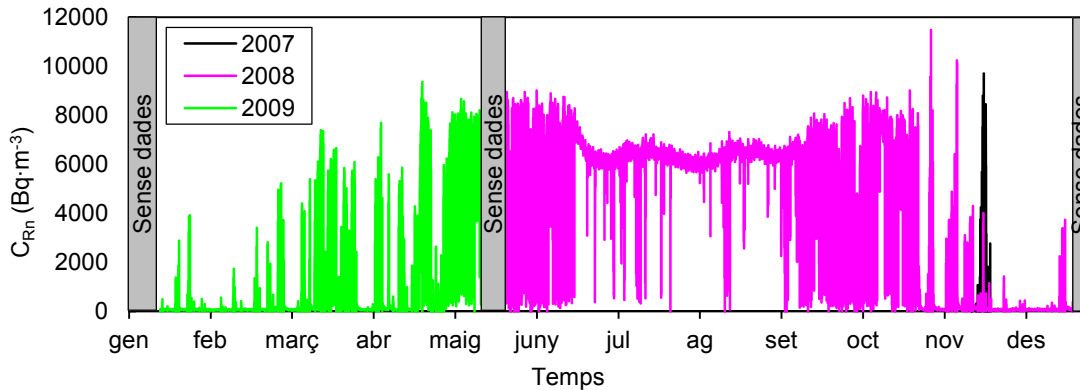


Figura 4.29. Variacions temporal de la C_{Rn} en el bufador 23 mesurat amb el monitor PRASSI entre els anys 2007-2009 just a la sortida del bufador.

Les mesures realitzades durant 6 dies de novembre del 2007 amb els monitors PRASSI i RAD7 just a la sortida del bufador (**Figura 4.30**) permeten observar una diferència significativa entre els resultats obtinguts amb els dos detectors. Aquesta diferència és deguda al fet que l'aire que surt pel bufador té tant radó (^{222}Rn) com toró (^{220}Rn) i que el PRASSI no distingeix entre ambdós isòtops mentre que el RAD7 sí. Amb una mesura en continu de diversos dies com la realitzada, el toró no es pot mesurar directament amb el monitor RAD7 perquè el volum de Drierita necessari per reduir la humitat de l'aire ha de tenir unes dimensions molt reduïdes per evitar que el toró es desintegri abans d'arribar al detector i això suposaria haver d'estar canviant la Drierita amb molta freqüència. Tal i com s'ha vist a l'apartat 3.2.2.1, la mesura de la concentració de radó amb el monitor PRASSI, C_{Rn}^{PRASSI} , es veu afectada un factor 1.73 ± 0.03 amb presència de toró. Com que es disposa de les dades de la concentració de radó mesurades amb el RAD7, C_{Rn-222}^{RAD7} , a partir de la diferència entre els resultats dels dos equips es pot fer una estimació dels nivells de toró, C_{Rn-220} , a partir de l'expressió:

$$C_{Rn-220} = \frac{C_{Rn}^{PRASSI} - C_{Rn-222}^{RAD7}}{1.73} \quad (4.1)$$

Els nivells de toró estimats també es mostren a la **Figura 4.30** i la relació C_{Rn-220}/C_{Rn-222} de tota la mesura en continu és del 31 %. Aquesta relació és consistent amb la que segueixen els diferents bufadors de la mateixa unitat geològica (**Taula 4.7**).

Analitzant detalladament els resultats de les mesures del PRASSI s'observa que hi ha una diferència significativa entre els nivells obtinguts abans i després de mesurar concentracions elevades. Concretament, entre el 17/11/07 i el 20/11/07 els nivells mesurats pels dos equips són baixos, mentre que els dies 22/11/07 i 23/11/07 quan el RAD7 mesura valors inferiors als $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ el PRASSI mesura valors al voltant dels $500 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Aquest factor 5 de discrepància indica que després de mesura nivells elevats de radó durant algunes hores el monitor PRASSI queda contaminat pels descendents de vida curta dels dos isòtops. Aquest fet s'ha de tenir en compte, especialment en aquelles situacions que presenten grans variacions diàries dels nivells de radó, per no realitzar una sobreestimacions important d'aquests.

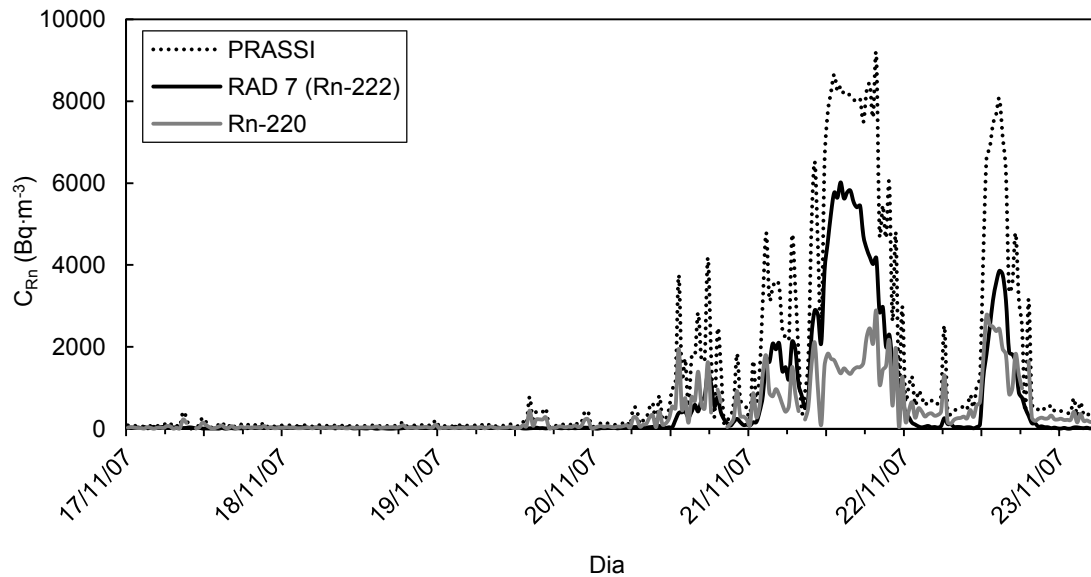


Figura 4.30. Evolució temporal de la concentració de radó mesurada amb els monitors PRASSI i RAD7 durant 6 dies de novembre del 2007 a la sortida del bufador 23. També es mostra l'evolució temporal de la concentració de toró estimada a partir dels resultats dels dos equips.

A la **Figura 4.31** es mostren les variacions de la concentració del radó i la temperatura exterior²⁴ (T_{out}) obtingudes en quatre períodes representatius de les quatre estacions de l'any 2008. S'observen clarament tres comportaments diferents: (i) durant l'hivern els nivells de radó es mantenen principalment per sota dels $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, a excepció d'uns pocs episodis en que la C_{Rn} pot superar els $2000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i tornar a baixar al valor mig de l'hivern en unes poques hores; (ii) a l'estiu, els nivells de radó fluctuen al voltant dels $7000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, i (iii) a la primavera i la tardor els nivells de radó fluctuen diàriament entre els nivells de l'hivern fins a valors que poden superar els $10000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. A la **Figura 4.31** també s'inclou una línia horitzontal que indica la temperatura típica del gas del sòl de la regió (Mallarach, 1998), $T_{thres} = T_{soil} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$. S'observa que si la temperatura de l'aire es manté per sobre d'aquest valor llindar un mínim de tres hores la C_{Rn} experimenta un increment important per sobre dels $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. L'habitació del bufador no està ben aïllada i no té cap sistema de ventilació forçat, calefacció ni aire condicionat. Per tant, la temperatura de l'aire interior és similar a la temperatura de l'exterior. Durant l'hivern T_{out} normalment és inferior a T_{soil} , el bufador pràcticament no bufa i els nivells de radó són baixos. A l'estiu T_{out} es manté gairebé sempre per sobre de la T_{soil} i hi ha un flux d'aire sostingut amb nivells de radó elevats. A la primavera i la tardor la T_{out} fluctua al voltant de la T_{soil} i conseqüentment l'entrada d'aire i els nivells de radó es comporten de la mateixa forma. Aquest comportament confirma la hipòtesis que els gradients de temperatura poden ser els responsables dels fluxos d'aire convectius des del canal subterrani cap a l'aire exterior. L'aire del canal es mou cap a les altes temperatures, és a dir, al llarg del gradient de la densitat d'aire decreixent, i al llarg del seu recorregut incorpora radó procedent de les parets del canal o de les fractures més profundes. Comportaments semblants s'han

²⁴ La temperatura exterior ha estat mesurada per l'estació meteorològica d'Olot del Servei Meteorològic de Catalunya. www.meteocat.com

observat en canals subterranis de dimensions més grans, com per exemple amb l'aire de l'interior de túnels (Barbosa et al., 2010).

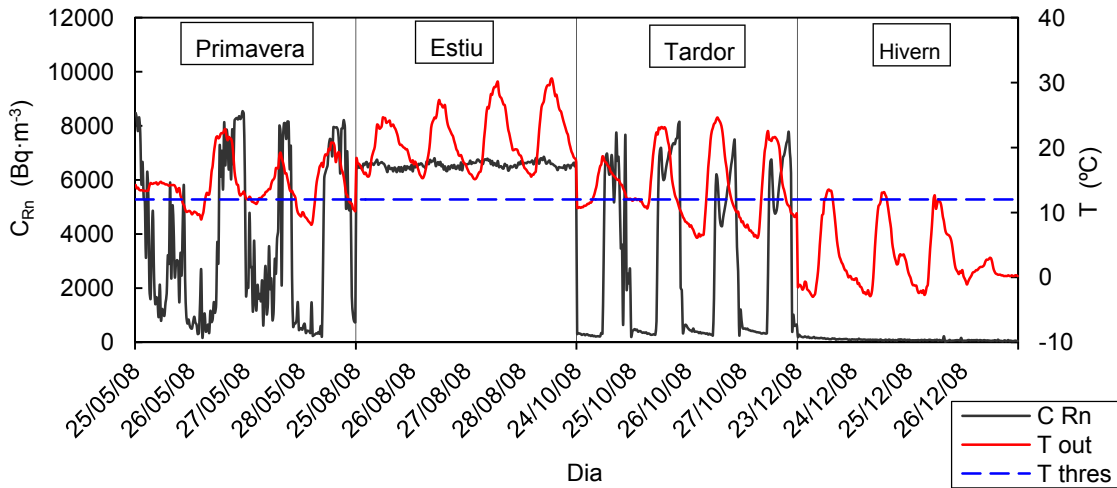


Figura 4.31. Quatre períodes significatius de la mesura en continu de la C_{Rn} a la sortida del bufador 23 i la temperatura exterior durant l'any 2008.

4.2.4. Radó a les aigües subterrànies

L'interès per analitzar el radó de les aigües subterrànies de la zona volcànica de la Garrotxa és doble. En primer lloc, des del punt de vista de la PR interessa conèixer si els nivells de radó són elevats i si representen un risc per la població de la zona que consumeix les aigües. En segon lloc, aquest anàlisi permet seguir explorant la hipòtesis de la desgasificació del mantell. En el supòsit que la principal procedència del radó són els nivells inferiors de l'escorça terrestre, durant el seu ascens cap a la superfície, el radó pot interceptar nivells aquífers on dissoldre's i, aleshores, les concentracions de radó d'aquestes aigües poden ser un indicador de l'activitat de la zona.

Durant l'any 2007 es realitza una campanya de mostreig amb la qual s'intenta analitzar el màxim nombre de pous i fonts cobrint els diferents aquífers de la zona. Els objectius són: (i) mesurar els nivells de radó a les aigües subterrànies utilitzades pel consum de la població, d'acord amb la recomanació de la CEC (2001) i (ii) relacionar els nivells de radó obtinguts amb el tipus d'aqüífer i amb la seva proximitat a les falles actives de la zona (Moreno et al., 2012a). La selecció dels punts de mostreig es fa aprofitant la xarxa de punts de control de qualitat de les aigües subterrànies de que disposa el PNZVG (Bach, 2005) i finalment s'escull un total de 53 punts (42 pous i 11 fonts). Inicialment, entre els mesos de maig a setembre, es mesura un total de 32 punts (23 pous i 9 fonts) cobrint l'aqüífer AV. Posteriorment, entre els mesos d'octubre a novembre, es mesuren 51 punts (40 pous i 11 fonts), tornant a mesurar 21 dels 23 pous mesurats inicialment, les mateixes fonts i 19 pous i 2 fonts addicionals, per tal d'incorporar punts dels aquífers A, tant de la capçalera del Fluvià, a la Vall d'en Bas, com de la Vall de Bianya (Figura 4.32).

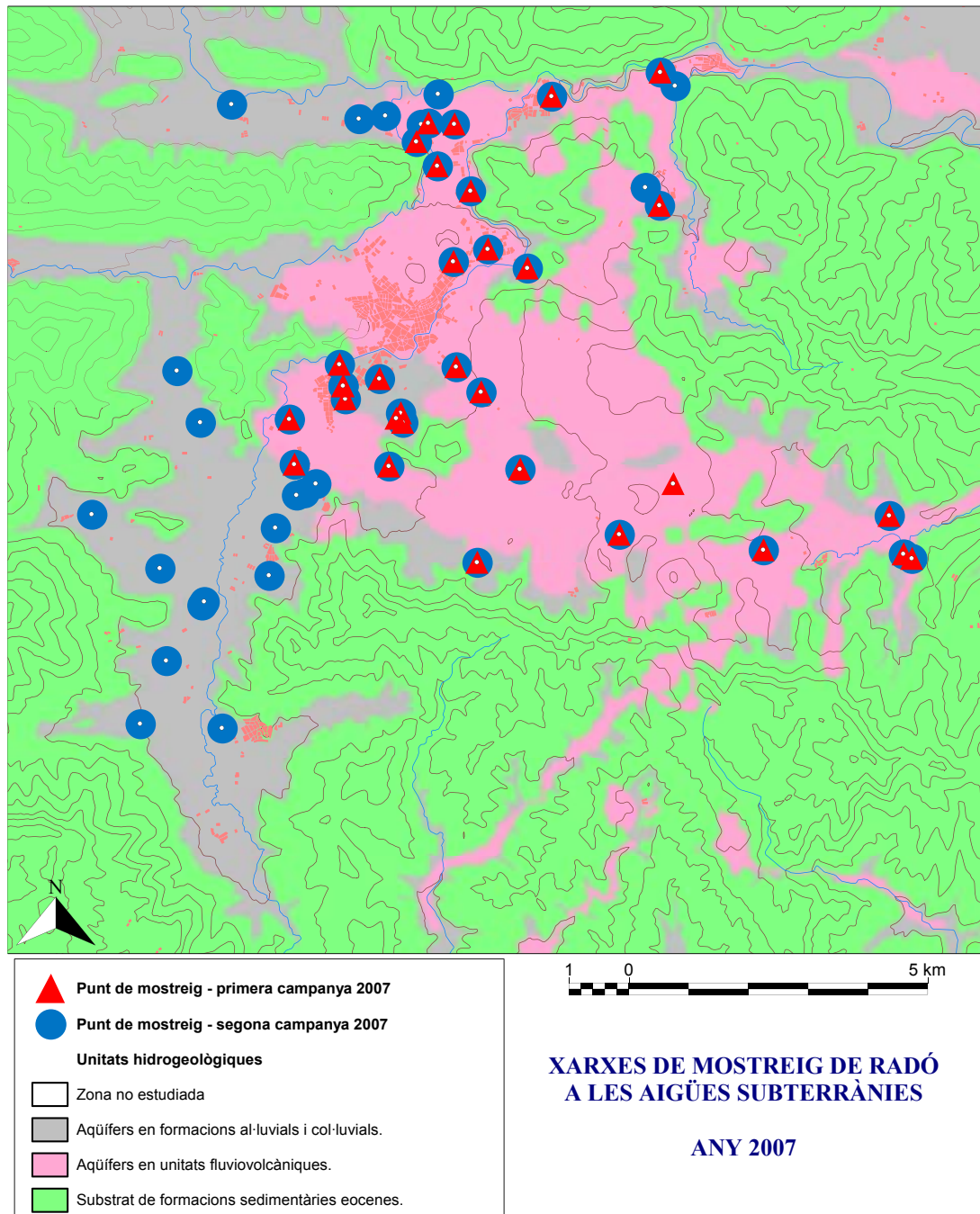


Figura 4.32. Situació dels punts de mostreig d'aigua subterrània sobre un mapa hidrogeològic simplificat de la zona volcànica de La Garrotxa.

La recollida de mostres d'aigua dels pous comporta la determinació inicial del nivell d'aigua mitjançant una sonda de nivell, sempre que l'orifici del pou és accessible. Pels pous amb profunditats més grans de 35 m o en els que no es pot introduir les bombes, per tenir orificis de dimensions molt petites o estar tapats, s'utilitza la pròpia bomba del pou. En aquests casos es procura obtenir l'aigua de l'aixeta més pròxima possible al punt d'extracció, per tal d'evitar agafar aigua molt airejada que haurà perdut radó. Les mesures de temperatura i conductivitat es realitzen mitjançant el conductímetre i la C_{Rn} dissolt es mesura amb els monitors RAD7 i els seus accessoris RAD H₂O. Les característiques i els resultats dels paràmetres mesurats (nivell d'aigua, temperatura, conductivitat i C_{Rn}) de les 53 mostres d'aigua subterrània recollides en els dos períodes de mesura apareixen a les

Taules C.1 i C.2 de l'annex C i els valors mitjos dels dos períodes a la **Taula 4.9** (pous) i **Taula 4.10** (fonts). La temperatura i la conductivitat es mouen en els intervals [9.5 – 16.0] °C i [300 – 1200] $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, respectivament, per tant, les aigües analitzades són fredes i poc salines. La C_{Rn} està en l'interval de [0.8 – 26.0] $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$, amb un valor mig de (11.4 ± 0.8) $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$. Aquests resultats són comparables amb els nivells de radó en aigua d'altres zones volcàniques, com la regió del volcà Etna, Itàlia, (D'Alessandro i Vita, 2003) o Síria (Othman i Yassine, 1996). Per altra banda, són valors més elevats que els obtinguts a regions volcàniques de Mèxic (Segovia et al., 2007), a l'illa de la Reunió a l'oceà Índic (Barillon et al., 1993) i a Taiwan (Weng i Lin, 1995) (**Taula 4.11**).

Taula 4.9. Característiques i valors mitjos dels paràmetres mesurats (nivell d'aigua (WL), temperatura (T), conductivitat elèctrica (EC) i concentració de radó (C_{Rn})) a les aigües dels pous analitzats.

Codi punt	Municipi	Sistema aqüífer	Prof. (m)	WL (m)	T (°C)	EC ·10 ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	C_{Rn} ($\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$)
1	Olot	AV	38	27.5 ± 0.2	12.1 ± 0.1	47 ± 9	9.4 ± 0.5
2	Olot	AV	110	45.2 ± 0.1	13.8 ± 0.1	44 ± 9	9.8 ± 0.5
6	St. Joan les F.	AV	60	31.0 ± 0.1	15.0 ± 0.2	73 ± 15	19.2 ± 0.5
7	St. Joan les F.	AV	43	4.9 ± 0.3	14.3 ± 0.2	77 ± 17	26.0 ± 0.6
8	Olot	A	9	6.5 ± 0.2	12.0 ± 0.2	68 ± 13	12.9 ± 0.4
9	Sta. Pau	A	9	7.1 ± 1.4	13.1 ± 0.3	94 ± 21	0.8 ± 0.1
12	Olot	AV	4	2.2 ± 0.1	11.6 ± 0.1	37 ± 7	7.3 ± 0.4
14	Les Preses	AV	17	16.0 ± 0.6	9.6 ± 0.1	38 ± 10	7.2 ± 0.4
15	Olot	AV	108	65.6 ± 0.2	12.2 ± 0.1	39 ± 2	11.0 ± 0.6
16	Olot	AV	28	15.0 ± 0.2	12.0 ± 0.4	34 ± 7	6.4 ± 0.3
18	Les Preses	AV	32	13.2 ± 1.0	14.1 ± 0.7	66 ± 13	7.4 ± 0.5
19	Olot	AV	107	-	13.2 ± 0.1	69 ± 16	15.5 ± 0.6
20	Sta. Pau	AV	97	-	13.8 ± 0.7	67 ± 14	10.7 ± 0.5
21	Sta. Pau	AV	57	5.7 ± 0.1	14.1 ± 0.3	77 ± 17	21.2 ± 0.6
24	Sta. Pau	AV	97	88.0 ± 0.1	14.5 ± 0.4	58 ± 13	1.9 ± 0.2
25	Olot	AV + E	244	-	13.5 ± 0.1	72 ± 14	9.2 ± 0.7
26	Olot	AV	35	17.9 ± 0.2	14.9 ± 0.1	49 ± 10	16.2 ± 0.6
27	St. Joan les F.	AV	13	8.6 ± 0.3	15.1 ± 0.9	102 ± 23	10.5 ± 0.5
28	Sta Pau	AV + E	212	-	12.1 ± 0.1	41 ± 3	5.5 ± 0.3
29	St. Joan les F.	AV	23	-	14.3 ± 1.7	81 ± 2	20.6 ± 0.5
30	Olot	AV	120	12.5 ± 0.9	15.5 ± 0.4	70.3 ± 0.2	5.0 ± 0.3
31	Olot	AV	44	-	15.3 ± 0.6	61 ± 5	1.6 ± 0.2
32	St. Joan les F.	AV	89	-	14.9 ± 0.1	60 ± 12	22.9 ± 0.6
33	Les Preses	AV	29	7.4 ± 0.1	13.8 ± 0.1	66 ± 13	11.7 ± 0.7
34	Les Preses	AV	35	9.0 ± 0.1	13.2 ± 0.1	68 ± 14	16.9 ± 0.8
35	Les Preses	AV	52	-	13.0 ± 0.1	66 ± 13	18.0 ± 0.9
36	Les Preses	AV	6	5.0 ± 0.1	12.6 ± 0.1	80 ± 16	2.2 ± 0.3
37	St Joan les F.	AV	130	-	15.2 ± 0.1	68 ± 14	9.3 ± 0.6
38	Vall d'en Bas	A + E	25	18.6 ± 0.1	14.2 ± 0.1	82 ± 16	1.6 ± 0.2
39	Vall d'en Bas	A	52	19.3 ± 0.1	14.5 ± 0.1	68 ± 14	16.7 ± 0.6
40	Vall d'en Bas	A	12	3.3 ± 0.1	15.2 ± 0.1	113 ± 23	11.1 ± 0.5
41	Vall d'en Bas	A	54	-	14.4 ± 0.1	68 ± 14	17.5 ± 0.6
42	Vall d'en Bas	A	32	14.2 ± 0.1	12.7 ± 0.1	51 ± 10	14.6 ± 0.5
43	Vall de Bianya	A	50	-	13.9 ± 0.1	55 ± 11	12.2 ± 0.7
44	Vall de Bianya	A	15	8.8 ± 0.1	13.0 ± 0.1	44 ± 9	1.3 ± 0.3
45	Vall de Bianya	A	50	10.0 ± 0.1	13.6 ± 0.1	55 ± 11	11.2 ± 0.7
46	Vall d'en Bas	A + E	90	-	12.1 ± 0.1	55 ± 11	18.9 ± 0.9
47	Vall d'en Bas	A	36	29.7 ± 0.1	12.9 ± 0.1	43 ± 9	10.1 ± 0.7
48	Vall d'en Bas	A + E	62	17.4 ± 0.1	14.0 ± 0.1	73 ± 15	14.8 ± 0.8
49	Vall d'en Bas	A	51	10.0 ± 0.1	14.2 ± 0.1	72 ± 14	13.9 ± 0.8
50	Les Preses	A	50	11.7 ± 0.1	14.1 ± 0.1	69 ± 14	7.6 ± 0.6
51	Vall de Bianya	A	25	-	14.5 ± 0.1	62 ± 12	13.4 ± 0.8

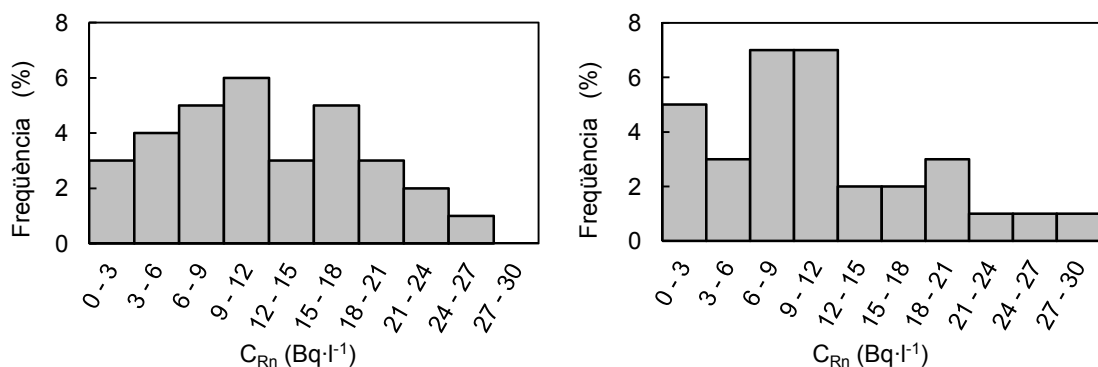
Taula 4.10. Característiques i valors mitjos dels paràmetres mesurats (nivell d'aigua (WL), temperatura (T), conductivitat elèctrica (EC) i concentració de radó (C_{Rn})) a l'aigua de les fonts analitzades.

Codi Punt	Municipi	Sistema aqüífer	T (°C)	EC ·10 ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	C_{Rn} ($\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$)
3	Castellfollit de la Roca	AV	14.6 ± 0.1	60 ± 12	18.2 ± 0.5
4	St. Joan les Fonts	AV	14.2 ± 0.1	58 ± 12	7.2 ± 0.4
5	Olot	AV	13.3 ± 0.1	47 ± 9	16.4 ± 0.5
10	Olot	AV	12.1 ± 0.1	46 ± 7	8.2 ± 0.8
11	Olot	AV	11.7 ± 0.3	42 ± 6	9.3 ± 0.4
13	Olot	AV	12.5 ± 0.3	54 ± 5	5.6 ± 0.3
17	Olot	E	14.0 ± 0.7	41 ± 6	8.7 ± 0.4
22	Sta. Pau	AV	14.5 ± 0.7	79 ± 18	12.1 ± 0.5
23	Sta. Pau	AV	14.1 ± 0.2	71 ± 16	19.8 ± 0.6
52	St. Joan les Fonts	AV	14.4 ± 0.1	75 ± 15	16.8 ± 0.9
53	St. Joan les Fonts	AV	12.9 ± 0.1	61 ± 12	1.2 ± 0.2

Taula 4.11. Nivells de radó a les aigües de diferents regions volcàniques del món.

Lloc	Procedència aigua	C_{Rn} ($\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$)		Referència
		Interval	Valor mig	
La Garrotxa (Espanya)	Pous i fonts	0.8 – 26.0	11.4 ± 0.8	Aquest estudi.
Volcà Etna (Itàlia)	Galeries drenatge, fonts i pous	1.8 – 52.7	11.8 ± 0.8	D'Alessandro i Vita, 2003
Illa la Reunió (França)	Galeries de drenatge	0.2 – 8.5		Barillon et al., 1993
Transilvània (Romania)	Superfície, fonts i pous	0.5 – 129.3	15.4 ± 0.4	Cosma et al., 2008
Sud i centre de Síria	fonts pous		7.6 ± 0.9	Othman i Yassine, 1996
			12.7 ± 3.8	
Nord de Veneçuela	Fonts calentes	1 – 560		Horváth et al., 2000
Mèxic	Pous i fonts	58 % menys de 2.4 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$, màxim 11.3 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$		Segovia et al., 2007
Taiwan	fonts	0.4 – 15.7	3.7 ± 3.0	Weng i Lin, 1995

Comparant els valors obtinguts en els dos períodes de mostreig no s'observen diferències significatives entre els dos valors mitjos: (11.4 ± 1.2) $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ i (11.9 ± 1.4) $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ per la primera i la segona respectivament. Aquests valors mitjos s'han calculat a partir dels resultats dels 30 punts de mesura que han estat mesurats en els dos períodes (**Figura 4.33**). L'objectiu de l'estudi no era analitzar les variacions estacionals sinó determinar els valors típics. S'ha de tenir en compte el primer mostreig es fer durant un període de temps més llarg, que inclou mesos de primavera i estiu, mentre que el segon mostreig es realitza al llarg de dos mesos de tardor.

**Figura 4.33.** Distribucions de les concentracions de radó de les aigües subterrànies obtingudes en els dos períodes de mostreig: primer (esquerra) i segon (dreta).

Els punts que presenten una potencial variació estacional, ja que mostren una variació del nivell de radó superior al 50 % entre els dos períodes de mostreig, són els pous 15 i 18. A ambdós pous s'hi realitza una tercera mesura addicional i a la **Taula 4.12** es mostren tots els seus resultats. El pou 18 és un pou de poca profunditat pel qual el nivell d'aigua, la temperatura, la conductivitat i la C_{Rn} disminueixen d'estiu a tardor. Aquest comportament sembla estar d'acord amb els resultats d'un estudi recent on es monitoritza durant tot un any unes aigües subterrànies poc profundes i s'observa una clara dependència del nivell de radó amb l'altura del nivell freàtic (De Francesco et al, 2010). També cal esmentar que l'any 2007 va ser un any especial en quan a precipitacions ja que el final de la primavera i l'estiu van ser molt més humits que la tardor, a diferència del què és habitual. El pou 15, per altra banda, és un pou profund que manté més constants el nivell d'aigua, la temperatura i la conductivitat, mentre que presenta els nivells de radó més elevats durant l'estiu. Aquest pou està localitzat en una zona caracteritzada per la presència de bufadors, els quals presenten variacions estacionals importants, bufant aire fresc amb elevades concentracions de radó durant els mesos d'estiu (Moreno et al., 2009a). El fet que les variacions estacionals d'aquests dos pous semblin degudes a dos processos diferents desperta interès cap a un estudi futur sobre aquesta dinàmica.

Taula 4.12. Valors dels paràmetres mesurats (nivell d'aigua (WL), temperatura (T), conductivitat elèctrica (EC) i concentració de radó (C_{Rn})) obtinguts en aquells punts de mesura que presenten una variació dels nivells de radó més gran del 50 % entre els dos períodes de mostreig.

Codi punt	Data	WL (m) (± 0.01)	T (°C) (± 0.1)	EC ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) (± 20 %)	C_{Rn} ($\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$)
15	13/09/2007	66.01	12.3	415	22.4 ± 0.5
	22/10/2007	65.18	12.2	412	6.4 ± 0.5
	22/11/2007	-	12.0	406	6.1 ± 0.4
18	25/07/2007	11.23	15.4	914	14.2 ± 0.8
	23/10/2007	13.48	13.8	527	0.8 ± 0.2
	24/11/2007	14.75	13.0	527	0.2 ± 0.1

La distribució espacial de les concentracions de radó es mostra a la **Figura 4.34**. Els valors de radó obtinguts s'han agrupat en quartils. Des del quartil inferior al superior, cadascun està compost per 10 pous i 2 fonts, 13 pous i 4 fonts, 9 pous i 2 fonts i 10 pous i 3 fonts, respectivament. S'observa que els valors més elevats que $16.7 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ (quartil superior) estan localitzats a tres zones diferents. La primera zona està al nord, la part final de La Vall de Bianya i Sant Joan les Fonts, la segona zona a l'est, a la vall del Ser, i la tercera zona al sud-oest, a La Vall d'en Bas. Els punts del nord (2 fonts i 4 pous) i de l'est (1 font i 1 pou) del quartil superior corresponen a aqüífers AV mentre que els punts de mesura del sud-oest corresponen a un aqüífer A. Una altra característica geològica que tenen en comú aquests punts és la seva proximitat a alguna de les falles principals o secundàries de la zona. A l'est hi ha la falla de Llorà, a l'oest la falla d'Amer i entre aquestes dues n'hi ha altres de secundàries.

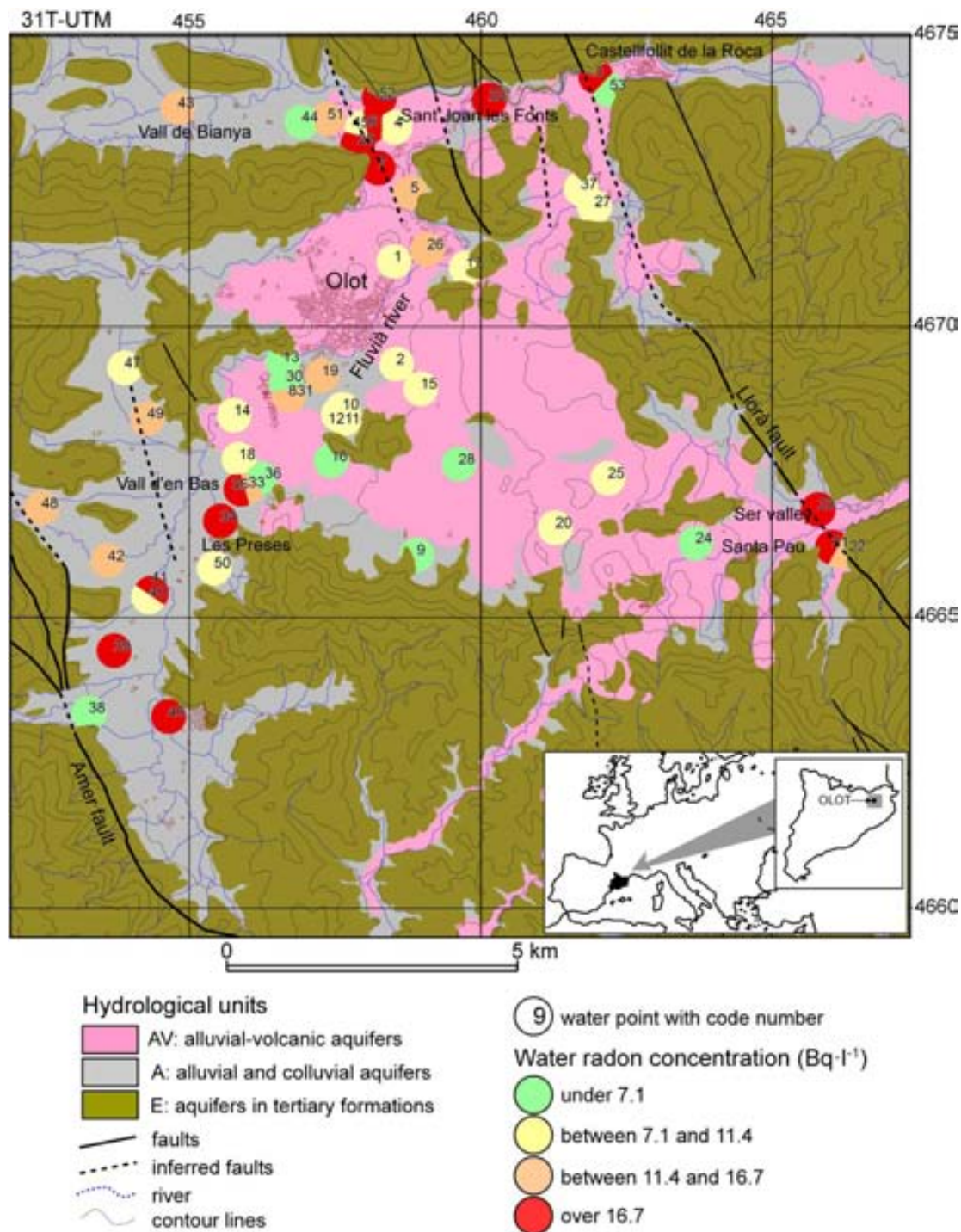


Figura 4.34. Mapa hidrogeològic simplificat de la zona estudiada amb la distribució espacial de la C_{Rn} dels 53 punts de mostreig d'aigua subterrània. La informació de les falles s'ha extret del mapa geològic 1:25000 de l'IGC i ICC (2002).

Analitzant els resultats obtinguts d'acord amb les altres característiques dels punts de mesura, hem de distingir pous i fonts per separat. La majoria dels pous del quartil superior tenen una profunditat superior als 35 m. Els valors mitjos de les mostres procedents dels pous profunds (des de 35 m) i dels pous més superficials (menys de 35 m) són $(12.6 \pm 1.2) Bq \cdot l^{-1}$ i $(8.9 \pm 1.5) Bq \cdot l^{-1}$, respectivament. La diferència entre els valors és petita però pot indicar una possible tendència a que les aigües dels pous profunds presentin valors de radó més elevats que les aigües dels menys profunds. Aquesta tendència està d'acord

amb la hipòtesis que els aqüífers profunds puguin estar més fàcilment en contacte amb alguna de les falles del sistema. Una altra possible explicació, que no exclou l'anterior, és que l'aigua dels aqüífers més profunds té un temps de permanència a l'aqüífer superior que en els superficials i, aleshores, pot acumular molt més radi i radó. Alguns dels pous profunds del quartil superior (codis 32, 34, 35 i 46) tenen una explotació anual important (més de 60000 m³) i això indica que l'aigua analitzada prové d'un volum important de l'aqüífer. Per altra banda, les tres fonts del quartil superior (3, 23 i 52) estan localitzades a la perifèria de la zona volcànica (al nord i a l'est) i presenten uns fluxos regionals, és a dir, associats a les valls principals de la regió, amb recorreguts més llargs i majors temps de permanència. En aquest cas, hi ha una major probabilitat de que aquestes aigües estiguin en contacte amb alguna de les fractures del substrat, per on hi pot haver una incorporació de radó addicional. A la **Figura 4.34** precisament s'observa que aquests punts de mesura amb valors més alts tenen falles secundàries molt a prop.

4.2.5. Mesures complementàries: contingut de radionúclids i radiació gamma terrestre

Per completar els estudis dels nivells de radó a l'aire, al sòl i a les aigües subterrànies de la zona volcànica de la Garrotxa i la falla d'Amer i ampliar el coneixement del context radiològic de tota la zona es realitzen una sèrie de mesures complementàries: la determinació del contingut de radionúclids i del nivell de radiació gamma terrestre. És especialment interessant conèixer el contingut de radi dels materials del sòl, per ser un paràmetre influent en els nivells de radó obtinguts. Per altra banda, i des del punt de vista de la PR, si el radó és la font natural de radiació amb major contribució a la dosi rebuda per la població en general, també és interessant conèixer la segona font natural de radiació en importància, la radiació gamma terrestre.

La campanya de mesura es realitza durant l'any 2009 i els principals objectius són: (i) mesurar els nivells de radiació gamma terrestre a l'interior i a l'exterior dels edificis situats al damunt de diferents tipus de materials de la zona volcànica de la Garrotxa, (ii) determinar el contingut de radi i altres radionúclids emissors gamma en els diferents materials i (iii) estudiar la relació amb els nivells de radó i els nivells de radiació gamma obtinguts en els llocs o zones on s'analitza els materials del sòl ([Moreno et al., 2012a](#)).

Es realitza un total de 158 mesures de la taxa de dosi absorbida de radiació gamma a l'aire, **D**: 61 mesures són a l'interior de 55 edificis (44 llocs de treball i 11 habitatges) (**Figures D.1, D.2 i D.3** de l'annex D) i 97 són mesures exteriors (52 en materials volcànics i 45 en no volcànics, incloent els punts de mostreig) (**Figures D.4 i D.5** de l'annex D). Els interiors seleccionats són recintes pròxims al sòl (plantes baixes i soterranis) on els ocupants hi passen un temps significatiu. Mitjançant el monitor Eberline E-600 i la sonda HP-270, es realitzen mesures puntuals (d'una hora aproximadament) a 1 m de la superfície del sòl.

Per la identificació de radionúclids dels materials del sòl es recullen mostres de material d'una sèrie de sòls identificats a partir de la carta vulcanologia de la zona volcànica de la

Garrotxa (ICC et al., 2007). El criteri de selecció consisteix en escollir els tipus de sòls que cobreixen una major fracció de l'àrea estudiada o que tenen una major densitat de població al seu damunt. Es mostreja un total de 26 sòls: 15 de materials volcànics (6 piroclàstics i 9 colades de lava) i 11 de materials no volcànics (**Figura 4.35**). El procediment per recollir i processar la mostra es troba a l'annex E. L'espectrometria gamma de les mostres es realitza mitjançant el detector coaxial de Germani d'alta puresa de la UFR de la UAB.

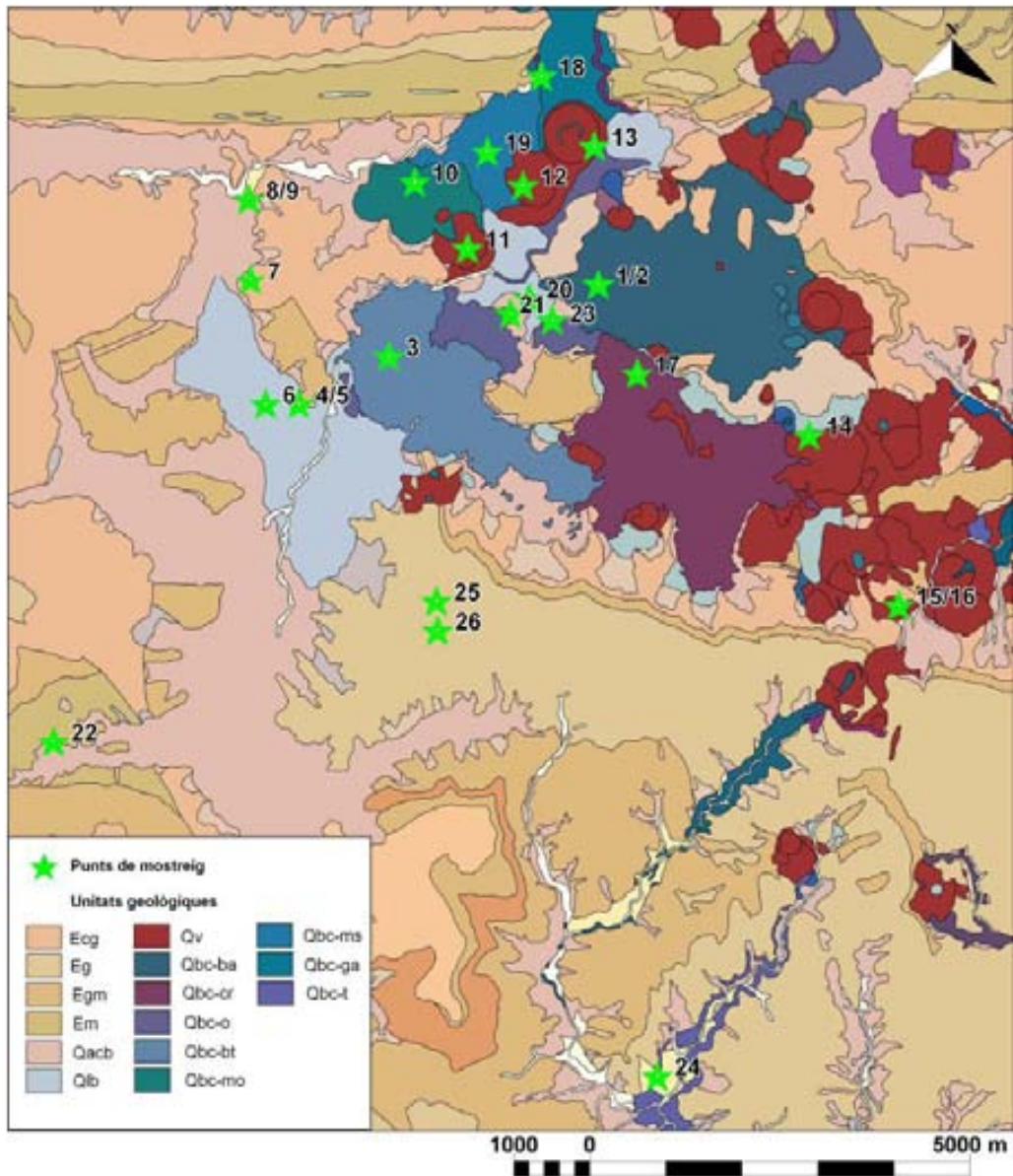


Figura 4.35. Distribució dels punts de mostreig de materials sobre la Carta Vulcanològica de la zona volcànica de la Garrotxa (ICC et al., 2007).

A partir del contingut de radionúclids de les mostres de sòl analitzades es pot calcular la taxa de dosi absorbida en aire, $\dot{D}'_{t,out}$ ($\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$), a 1 m sobre el nivell del sòl degut a la presència de radionúclids naturals utilitzant la fórmula (UNSCEAR, 2000):

$$\dot{D}'_{t,out} = 0.0417 C_{^{40}\text{K}} + 0.462 C_{^{226}\text{Ra}} + 0.604 C_{^{232}\text{Th}} \quad (4.2)$$

on $C_{^{40}\text{K}}$, $C_{^{226}\text{Ra}}$ i $C_{^{232}\text{Th}}$ són les concentracions d'activitat expressades en $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ de ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th , respectivament. Aquesta expressió permet comparar els resultats obtinguts amb aquestes dues tècniques de mesura.

La **Taula 4.13** recull els intervals de valors i els valors mitjos dels paràmetres analitzats: les alçades dels punts de mesura (determinades amb un GPS), les taxes de dosi absorbida deguda a la radiació còsmica, \dot{D}_c , (obtinguts a partir de l'expressió (2.1) de l'apartat 2.1) i les taxes de dosis absorbides degudes a la radiació gamma terrestre neta a l'exterior, $\dot{D}_{t,out}$, i a la radiació gamma terrestre neta a l'interior, $\dot{D}_{t,in}$, (calculats a partir de l'expressió (3.12) de l'apartat 3.1.4). Els resultats de l'exterior estan d'acord amb els nivells indicats en el Mapa MARNA, al voltant de $70 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$ (Suárez et al, 2000). Segons García-Talavera et al. (2007) en general existeix una relació lineal entre $\dot{D}_{t,in}$ i $\dot{D}_{t,out}$, amb un valor mig del seu quocient de 1.4 i en el nostre cas aquesta relació es compleix.

Taula 4.13. *Intervals de valors i valors mitjos (la incertesa és la desviació estàndard del valors mig) de les alçades dels punts de mesura (z) i de les taxes de dosi absorbida en aire degudes a la radiació còsmica (\dot{D}_c), a la radiació gamma terrestre neta a l'exterior ($\dot{D}_{t,out}$) i a la radiació gamma terrestre neta a l'interior ($\dot{D}_{t,in}$).*

Paràmetre	Interval	Valor mig
z (km)	0.35 – 0.84	0.48 ± 0.08
\dot{D}_c ($\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$)	33 – 39	34.6 ± 0.1
$\dot{D}_{t,out}$ ($\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$)	27 – 91	55 ± 1
$\dot{D}_{t,in}$ ($\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$)	40 – 115	76 ± 2

Els habitatges i els llocs de treball dels diferents municipis de la regió estudiada presenten valors de taxa de dosi absorbida similars, tal i com es pot observar a la **Taula 4.14**. No s'ha pogut estudiar la influència dels factors estructurals dels edificis sobre els resultats degut a la poca estadística de les mesures en punts interiors. Per altra banda, s'han analitzat els resultats dels punts exteriors tenint en compte el tipus de sòl. La **Taula 4.15** presenta els intervals de valors i els valors mitjos de $\dot{D}_{t,out}$ obtinguts per cada tipus de sòl. Aquests resultats mostren que els sòls formats per dipòsits sedimentaris del Quaternari presenten unes taxes de dosi absorbida en aire elevats i especialment aquells que estan compostos de dipòsits al·luvials i col·luvials (Qacb). Els materials volcànics i els substrats del Terciari presenten valors força semblants. Tot i tenir una baixa estadística de mesures en cadascun dels diferents tipus de substrats terciaris, els resultats semblen indicar que les roques compostes de margues (Em i Egm) presenten valors més elevats que les altres. Entre els materials volcànics, els materials del Montolivet (mo), Traiter (t) i Bosc de Tosca (bt) presenten els valors més elevats. Les diferents zones volcàniques de la Terra presenten un ampli interval de valors de la dosi absorbida en aire deguda a la radiació gamma terrestre. Els resultats obtinguts a la Garrotxa són semblants als de l'illa de Tenerife, a les Illes Canàries, amb un valor mig de $67 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$ (Fernández-Aldecoa et al, 1992), però són inferiors als nivells d'algunes regions d'Itàlia, com Lazio, Campania, Orvieto o el sud de la Toscana, on es troben valors superiors a $150 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$, o a la illa Niue, al sud de l'oceà Pacífic, que presenta valors superiors als $1000 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$ (UNSCEAR, 2000).

Taula 4.14. Interval de valors i valors mitjos de les taxes de dosi absorbida a l'interior dels edificis, $\dot{D}_{t,in}$, classificats per municipis i per tipus d'ús (habitatges o llocs de treball).

Municipi	Tipus recinte	Nº mesures	$\dot{D}_{t,in}$ (nGy·h ⁻¹)	
			Interval	Valor mig
Olot	Habitatge	8	60 – 103	76 ± 4
	Lloc de treball	31	40 – 98	75 ± 3
La Vall d'en B.	Habitatge	4	72 – 90	82 ± 4
	Lloc de treball	11	56 – 91	72 ± 4
Les Preses	Lloc de treball	1	–	70 ± 12
St Feliu de P	Lloc de treball	2	82 – 85	83 ± 2
Les Planes d'H.	Lloc de treball	4	80 – 115	91 ± 11

La **Taula 4.15** també presenta els valors mitjos de les concentracions de ⁴⁰K, ²²⁶Ra i ²³²Th, C (Bq·kg⁻¹ de pes sec), de totes de mostres analitzades i la **Taula 4.16** compara els valors obtinguts a la Garrotxa amb altres regions d'Espanya i altres regions volcàniques del món. Es pot observar que els resultats de la zona volcànica de la Garrotxa són inferiors que els obtinguts a les Illes Canàries occidentals i comparables als valors mitjos mundials. Els valors de la concentració de ²²⁶Ra obtinguts en aquesta campanya són consistents amb els valors obtingut per Jönsson (2002), amb un valor mig de (46 ± 7) Bq·kg⁻¹ i un interval de [24 – 99] Bq·kg⁻¹.

Si comparem els diferents tipus de materials observem que els dipòsits sedimentaris del Quaternari, en general, presenten concentracions dels radionúclids analitzats superiors als materials volcànics i a les roques del Terciari. Aquests dos últims presenten nivells comparables de ²³²Th, mentre que els materials volcànics presenten un ampli interval de concentracions de ²²⁶Ra, [14 - 77] Bq·kg⁻¹. Comparant entre els diferents volcans s'observa que les colades de lava del Montolivet (Qbc-mo) són les que tenen concentracions de ²²⁶Ra més altes, seguit per les colades de Batet (Qbc-ba), Croscat (Qbc-cr) i Bosc de Tosca (Qbc-bt). Aquestes dues últimes formacions volcàniques tenen les concentracions de ²³²Th més elevades mentre que els piroclastos del Montolivet (Qv-mo) i el Croscat (Qv-cr) també presenten les concentracions més elevades de ⁴⁰K. Amb les mostres de dipòsits sedimentaris del Quaternari s'ha obtingut unes concentracions de radionúclids que semblen estar relacionades amb la mida de les partícules dels sediments ja que aquelles compostes dels materials més fins, argiles lacustres (Qlb), presenten valors de concentracions de ⁴⁰K, ²²⁶Ra i ²³²Th més elevats que els compostos per partícules més grans (Qacb). Una tendència semblant s'observa amb les mostres dels substrats terciaris, les roques compostes per grans més fins (Em) són les que presenten les concentracions de radionúclids més elevades. Aquests resultats estan d'acord amb l'existència de processos naturals que poden concentrar els radionúclids en determinades formacions. Les condicions hidrològiques i climàtiques del Quaternari poden haver afavorit els moviments d'aquests radionúclids, per exemple, poden haver estat transportats per l'acció de l'aigua discorrent pels sòls i materials superficials, i llavors haver-se acumulat en els dipòsits lacustres. També poden haver precipitat en les roques sedimentàries per l'acció de les aigües subterrànies que s'infiltra a través d'elles (Walton et al., 1981; Hobday i Galloway, 1999; Nash, 2010).

Taula 4.15. Taxes de dosi absorbides en aire degudes a la radiació gamma terrestre, $\dot{D}_{t,out}$, i concentracions de radionúclids de les mostres analitzades, C (pes sec), classificats segons el tipus de sòl utilitzant la nomenclatura de ICC et al. (2007). Totes les incerteses són la desviació estàndard del valor mig.

Tipus sòl	Nº mesures	$\dot{D}_{t,out}$ (nGy·h ⁻¹)		Codi mostra	C_{40K} (Bq·kg ⁻¹)	C_{226Ra} (Bq·kg ⁻¹)	C_{232Th} (Bq·kg ⁻¹)
		Interval	Valor mig				
Materials volcànics			51 ± 2		364 ± 31	30.2 ± 3.5	17.8 ± 0.9
Qv-mo	3	59 – 77	70 ± 6	11	544 ± 7	29.0 ± 0.2	20.8 ± 0.5
Qbc-mo	3	54 – 78	65 ± 7	10	440 ± 6	76.9 ± 0.5	20.4 ± 0.8
Qv-cr	3	46 – 51	48 ± 2	14	519 ± 7	28.4 ± 0.3	21.1 ± 0.5
Qbc-cr	3	32 – 42	38 ± 4	17	472 ± 6	43.6 ± 0.2	21.8 ± 0.5
Qv-ms	3	42 – 67	56 ± 6	12	448 ± 6	30.0 ± 0.3	19.7 ± 0.6
Qbc-ms	5	46 – 60	51 ± 4	19	419 ± 9	17.3 ± 0.2	16.9 ± 0.3
Qv-ga	3	38 – 55	47 ± 5	13	367 ± 5	17.1 ± 0.2	13.7 ± 0.2
Qbc-ga	3	41 – 59	48 ± 5	18	387 ± 5	24.3 ± 0.3	15.5 ± 0.6
Qv-sm	4	27 – 46	39 ± 4	15/16	406 ± 5	21.1 ± 0.2	20.6 ± 0.7
Qbc-ba	4	40 – 47	43 ± 2	1/2	180 ± 12	43.5 ± 2.8	13.2 ± 0.9
Qbc-bt	5	42 – 65	58 ± 4	3	234 ± 28	41.0 ± 2.0	21.9 ± 0.3
Qbc-o	5	42 – 51	47 ± 2	23	425 ± 7	18.9 ± 0.5	17.0 ± 0.9
Qbc-t	4	34 – 81	63 ± 10	24	232 ± 5	14.0 ± 0.4	12.5 ± 0.2
Qv-p	1	-	41 ± 4	-	-	-	-
Qbc-sp	3	36 – 46	42 ± 3	-	-	-	-
Dipòsits sedimentaris del Quaternari			62 ± 2		448 ± 70	35.4 ± 4.8	37.8 ± 5.4
Qlb	14	42 – 74	56 ± 3	6/20	476 ± 27	43.5 ± 2.3	45.4 ± 1.2
Qacb	16	53 – 91	67 ± 3	8/9/21	404 ± 6	26.6 ± 0.6	28.3 ± 0.8
Substrats del Terciari			53 ± 4		333 ± 69	24.7 ± 3.1	20.0 ± 3.7
Eg	5	38 – 49	44 ± 2	25/26	328 ± 5	17.6 ± 0.4	19.5 ± 0.7
Ecg	3	44 – 60	50 ± 5	7	174 ± 12	23.9 ± 0.8	9.7 ± 0.5
Em	3	46 – 71	62 ± 8	22	509 ± 7	34.1 ± 0.4	26.3 ± 0.6
Egm	4	40 – 81	59 ± 8	4/5	319 ± 13	23.1 ± 0.3	24.6 ± 0.8

Taula 4.16. Concentracions de radionúclids de diferents zones d'Espanya i de zones volcàniques del món. Es presenta l'interval de valors i el valor mig entre parèntesis.

Regió	C_{40K} (Bq·kg ⁻¹)	C_{226Ra} (Bq·kg ⁻¹)	C_{238U} (Bq·kg ⁻¹)	C_{232Th} (Bq·kg ⁻¹)	Referència
Zona volcànica de La Garrotxa, Espanya	174 – 636 (377)	12 – 74 (30)	-	10 – 51 (22)	Aquest estudi.
Costa Nord-est, Espanya	136 – 1087	-	5 – 19	5 – 44	Rosell et al., 1991
Illes Canàries occidentals, Espanya (Volcànic)	58 – 1489 (573)	6 – 104 (40)	-	9 – 112 (50)	Fernández de Aldecoa, 2000
Espanya	25 – 1650 (470)	6 – 250 (32)	-	2 – 210 (33)	UNSCEAR, 2000
Illes Shetland, Western Antàrtida Oest (Volcànic)	125 – 810 (317)	3 – 14 (8)	5 – 36 (16)	4 – 31 (13)	Navas et al., 2005
Mont Cameroon, Cameroon (Volcànic)	43 – 201 (103)	11 – 17 (14)	-	22 – 36 (30)	Ngachin et al., 2008
Món	140 – 850 (400)	17 – 60 (35)	16 – 110 (35)	11 – 64 (30)	UNSCEAR, 2000

Utilitzant l'expressió (4.2) i els valors de les concentracions de ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th de la **Taula 4.15** s'ha calculat $\dot{D}'_{t,out}$ per tots els sòls analitzats i el valor mig obtingut és (44 ± 3) nGy·h⁻¹. Aquest resultat és lleugerament inferior que el valor mig obtingut amb els resultats de les mesures directes, (55 ± 1) nGy·h⁻¹ (**Taula 4.13**). Aquesta diferència pot ser deguda

a un procés d'absorció de la radiació gamma per la pròpia mostra de sòl situada dins la geometria Marinelli quan és mesurada per espectrometria gamma i que caldria recalibrar per veure si cal aplicar algun factor de correcció. A la **Figura 4.36** es comparen els resultats calculats amb els mesurats i, en general, els valors calculats són una mica inferiors als valors experimentals. En un parell de casos la discrepància dels resultats és superior al 33 %: els materials del Traiter (t), amb una discrepància del 62 %, i els materials Ecg amb el 52 %. S'ha de tenir en compte que els resultats calculats s'han obtingut en general, a partir dels resultats d'una única mostra i que s'ha utilitzat una expressió empírica, els coeficients de la qual es van ajustant regularment (UNSCLEAR, 2000). Per tant es pot concloure que, encara que el mostreig no ha estat suficientment representatiu per cada tipus de material, hi ha un acord raonable entre aquestes dues tècniques de mesura.

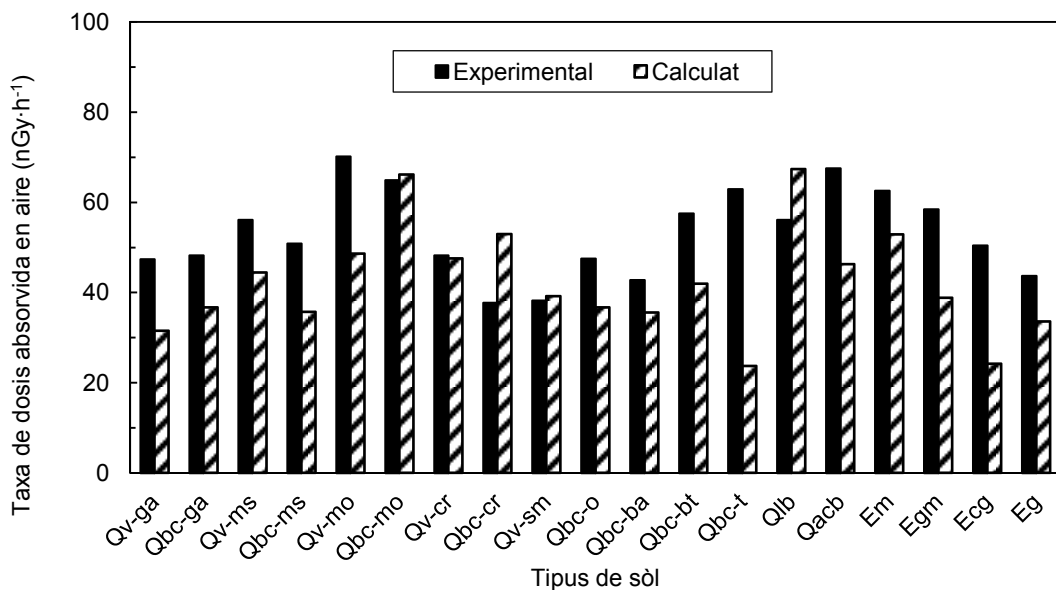


Figura 4.36. Comparació de les taxes de dosi absorbida en aire obtinguts amb mesures directes (Experimental) i a partir de l'anàlisi del contingut de radionúclids i l'ús d'una expressió analítica (Calculat).

4.3. Discussió

Les mesures realitzades en diferents medis de la zona volcànica de la Garrotxa i rodalies (aire dels recintes tancats, aire dels bufadors, aigües subterrànies i materials del sòl), han permès ampliar el coneixement radiològic d'aquesta zona volcànica. Una zona, que per les seves característiques geològiques i la presència de falles que encara poden ser actives, es pot identificar pel potencial que tenen els seus recintes tancats (especialment plantes baixes i soterranis) a presentar nivells de radó superiors a la mitjana nacional i per tenir una variació estacional diferent de la que és habitual en altres zones del territori.

Des del punt de vista de la PR, en general, els nivells de radó obtinguts als recintes estudiats no representen un risc significatiu per la població. L'anàlisi dels resultats posa de manifest la influència dels materials volcànics en els nivells de radó i en les seves

variacions estacionals. Els nivells de radó dels edificis construïts sobre materials volcànics són més elevats degut, principalment, a l'augment de la C_{Rn} durant l'estiu, fet que no es produeix en els recintes sobre materials no volcànics.

Els resultats suggereixen diferents possibles explicacions sobre l'origen del radó: els propis sòls volcànics, els substrats inferiors més rics en radi (materials granítics) i els nivells inferiors de l'escorça (hipòtesis de la desgasificació del mantell), però també posen clarament de manifest que les característiques dels subsòls volcànics faciliten el transport del gas radó fins als recintes que presenten nivells de radó més elevats.

La variació estacional anòmala en els recintes construïts sobre materials volcànics es pot explicar amb l'existència de fluxos d'aire convectius entre el sòl i l'interior de recintes a través d'un sistema de fractures i canals presents en els materials volcànics, que en arribar a la superfície del sòl donen lloc als bufadors. Aleshores, durant els mesos més secs i calorosos, el transport del radó es veu afavorit per la menor presència d'humitat en el sòl i pels gradients de temperatura entre el sòl i l'aire exterior, i això permet que aquest gas pugui viatjar distàncies més llargues i que tingui un origen més profund. Durant els mesos freds i humits, en canvi, la saturació dels sòls i els pocs gradients de temperatura frenen aquest transport i, aleshores, l'origen del radó clarament s'ha de relacionar amb el contingut de radi dels propis materials del sòl i dels materials de construcció dels recintes mesurats. L'estudi detallat d'un recinte amb un bufador en el seu interior ha permès constatar la dependència dels nivells de radó i els fluxos d'aire amb la diferència de temperatures entre l'aire exterior i l'aire del sòl.

A partir de les mesures de radó a l'interior de recintes no s'ha observat un efecte clar de la presència de la falla d'Amer. En canvi, amb les mesures directament en el sòl damunt d'aquesta falla s'ha pogut observar la influència en els nivells de radó. Les mesures en continu mostren un clar efecte estacional en els nivells de radó, amb els valors més elevats durant l'estiu. Aquests resultats estan en acord amb el comportament estacional dels nivells de radó en els materials del sòl més porosos i fracturats, com s'observa amb els materials volcànics.

Amb les mesures de la C_{Rn} a les aigües subterrànies de la zona s'obtenen uns valors baixos que no representen cap risc per les persones que utilitzen aquestes aigües en els seus habitatges i llocs de treball. En general no s'observen variacions estacionals molt significatives de la C_{Rn} dissolt en aquestes aigües. Tampoc hi ha una clara influència del tipus de material de l'aquífer, tot i que s'observa una possible influència de les característiques del flux d'aigua. Les aigües subterrànies amb fluxos regionals, de més llarg recorregut, major profunditat i major temps de permanència en el subsòl, presenten els nivells de radó més elevats. Els seus nivells lleugerament més elevats també es poden explicar per la seva major proximitat amb les fractures del substrat, a través de les quals hi pot haver una aportació addicional de radó. Amb l'estudi dels bufadors hem arribat a un resultat similar. Aquells canals subterrànies que tenen uns recorreguts més llargs i que poden estar connectats en algun punt amb fractures profundes del sistema volcànic són els que presenten els nivells de radó més elevats a l'aire que expulsen. Bufadors i fonts es poden entendre com punts de la superfície del sòl on els fluids (aire i aigua

respectivament) sorgeixen des del subsòl, arrossegant minerals i gasos com el radó i el CO₂ que s'han incorporat al llarg del seu viatge subterrani.

La determinació de radionúclids dels materials del sòl posa de manifest que les concentracions de radi obtingudes són comparables als valors d'altres zones volcàniques i al valor mig mundial. Els materials que presenten els valors més elevats de radi són les colades basàltiques i els sediments lacustres. Aquests dos tipus de materials es poden trobar intercalats amb altres materials més porosos, que poden afavorir el transport del radó que generen cap a la superfície. A més, les colades també presenten fissures, que poden donar lloc als bufadors, per tant, esdevenen les fonts de radó superficials més importants de la zona. Les mesures de la radiació gamma terrestre a l'exterior i a l'interior de recintes de la zona mostren uns nivells normals de dosis a que està sotmesa la població. Els valors obtinguts estan d'acord amb els resultats previstos a partir de l'anàlisi dels radionúclids de les mostres de materials del sòl.

5. Radó en altres activitats laborals

D'acord amb el RPSRI ([Real Decreto 783/2001, 2001](#)) i la seva recent modificació ([Real Decret 1439/2010, 2010](#)), les activitats laborals que poden presentar nivells elevats de radó i dels seus descendents són: (i) els llocs de treball subterranis (coves, mines, túnels, galeries i qualsevol altre tipus de recinte subterrani), pel fet de tenir una major superfície en contacte directe amb el sòl; (ii) les activitats laborals que utilitzen les aigües subterrànies pel desenvolupament de la seva activitat (establiments termals, plantes potabilitzadores, depuradores, etc), pel fet de que aquestes aigües en general tenen uns nivells de radó més elevats que les superficials; i (iii) les activitats laborals, subterrànies o no subterrànies, situades en àrees identificades per tenir uns nivells elevats de radiació natural en el sòl o a les aigües subterrànies.

La generació, l'entrada i l'acumulació del gas radó a l'interior de recintes en general depèn de molts factors i quan es tracta d'un recinte subterrani o que utilitzen aigües subterrànies les característiques geològiques i radiològiques del sòl esdevenen factors especialment importants. Les característiques estructurals del recintes (dimensions, esquerdes, etc), així com el tipus de ventilació (natural o forçada) també poden determinar que l'acumulació del gas radó en el seu interior sigui més o menys important. Finalment, la presència d'aerosols i les seves característiques, així com el temps de permanència dels treballadors en el seu interior és el que acaba de determinar si existeix un increment en la dosi deguda a la inhalació del radó i dels seus descendents que es pugui considerar significatiu o no des del punt de vista de la PR. La mesura del valor mig de la C_{Rn} en els llocs de treball en general ja presenta dificultats ([Kávási et al., 2006](#)) i quan es tracta de llocs de treball subterranis o que utilitzen aigües d'origen subterrani se n'hi poden afegir de noves, degudes a les especials condicions ambientals d'alguns d'aquests recintes. Davant la dificultat de mesurar tots els paràmetres influents, en molts casos, es realitzen algunes aproximacions i suposicions pels recintes que presenten característiques similars. Algunes d'aquestes aproximacions fan referència al factor d'equilibri utilitzat per calcular la dosi, d'altres al factor estacional, en el cas que no s'hagi mesurat la C_{Rn} al llarg de totes les estacions de

l'any, etc. En aquest últim cas, cal anar en compte, perquè es poden cometre errors. Tal i com s'ha comprovat amb els nivells de radó d'alguns recintes de la zona volcànica de la Garrotxa, les característiques del subsòl, provoquen que la variació estacional tingui un comportament oposat al que és habitual als habitatges, amb nivells de radó més elevats a l'estiu que a l'hivern.

En el marc de dos projectes de recerca finançats pel CSN: "Estudio del riesgo asociado a la inhalación de descendientes del radón en diferentes actividades laborales y en viviendas" i "Estudio de la instrumentación de vigilancia radiológica ambiental y de medida de radón en condiciones ambientales extremas", la UFR de la UAB ha mesurat de forma sistemàtica diferents llocs de treball subterranis de Catalunya i balnearis espanyols. En el capítol anterior s'ha presentat una part del primer projecte, concretament els estudis realitzats en els llocs de treball i els habitatges de la zona volcànica de la Garrotxa i la falla d'Amer (Baixeras et al., 2005a; Moreno et al., 2008). En aquest capítol es descriuen els estudis realitzats en llocs de treball subterranis de la resta de la geografia catalana analitzats entre els anys 2004-2007 i publicats parcialment a Font et al. (2008a) i Baixeras et al. (2005b). També es presenten els estudis de radó realitzats en dos establiments termals que treballen amb aigües subterrànies riques en radó. I finalment es descriu la campanya de mesura de la C_{Rn} en activitats laborals i exteriors de la marjal de Peñíscola, una àrea identificada per tenir uns nivells elevats de radiació natural en el sòl i a les aigües subterrànies.

5.1. Llocs de treball subterranis de Catalunya

A la literatura es troba una àmplia varietat d'estudis de radó a l'interior de llocs de treball subterranis de tot el món. Molts estan relacionats amb les variacions temporals de la concentració de radó influïdes per les condicions meteorològiques (Wilson et al., 1991; Gammage et al., 1992; Buecher, 1999; Richon et al., 2005; Finkelstein et al., 2006; Li et al., 2006; Perrier et al., 2007; Viñas et al., 2007; Espinosa et al., 2008). A Espanya es troben llocs de treball subterranis de naturalesa molt diversa, com mines d'urani (Quindós Poncela et al., 2004), coves turístiques (Lario et al., 2005; Dueñas et al., 2011), coves volcàniques (Pinza-Molina et al., 1999), etc.

Els llocs de treball subterranis de Catalunya analitzats per membres de la UFR de la UAB entre els anys 2004-2007 són mines en explotació, antigues mines que ara són museus, coves turístiques, estacions i cotxeres subterrànies del Metro de Barcelona i aparcaments subterranis de Barcelona. La campanya que es porta a terme té per objectiu identificar llocs de treball subterranis amb nivells de radó elevats, d'acord amb el Reial Decret 783/2001 (2001). A la **Taula 5.1** es presenta la relació de llocs de treball classificats en funció de l'activitat que desenvolupen. Per tal de mantenir la confidencialitat, no s'indiquen els noms de les activitats laborals de les que no tenim permís per a publicar les seves dades, ni tampoc es fa una descripció geològica de la zona on es localitzen aquestes activitats laborals. Per identificar els diferents llocs de treball analitzats s'utilitzen codis numèrics.

Taula 5.1. Principals característiques dels llocs de treball subterranis mesurats de Catalunya.

Tipus	Codi	Breu descripció	Ventilació
Mines en explotació	1	Dues entrades a diferents nivells separades per una galeria principal.	Forçada
	2	Dues entrades al mateix nivell. Diverses galeries a diferents nivells de profunditat.	Forçada
	3	Dues galeries paral·leles (accés i explotació).	Natural
Antigues mina museu	4	Galeries a poca profunditat. Visitable amb guia.	Forçada
	5	Galeries a diferents profunditats. 700 m visitables amb guia.	Natural
	6	Galeries tortuoses. Dimensions reduïdes. Nivells a diferents profunditats.	Natural, escassa
	7	Galeria recta i poc profunda. 450 m visitables amb guia.	Forçada
	8	Galeries tortuoses i poc profunda. Visitables amb guia.	Natural
Coves turístiques	9	Galeries tortuoses. Dimensions variables. Visitables amb guia.	Natural
	10	Galeries amples. Visitables amb i sense guia.	Natural
Metro	M	7 estacions i 2 cotxeres	Natural i forçada
Aparcaments	P	14 aparcaments	Natural i forçada

La metodologia de treball utilitzada per a la mesura dels nivells de radó a l'interior dels diferents llocs de treball és la següent:

1. En primer lloc es porta a terme una reunió informativa amb els responsables de l'activitat laboral per tal d'introduir-los a la problemàtica del gas radó i a l'interès de realitzar mesures en aquests tipus de recintes.
2. Es realitza una primera visita a les diferents instal·lacions de l'activitat laboral per identificar els llocs de treball més interessants per ser analitzats. Es recull el màxim d'informació de cada lloc de treball per tal d'interpretar millor els resultats obtinguts i analitzar el possible risc dels treballadors.
3. A continuació es fan unes primeres mesures puntuals de la C_{Rn} , mitjançant un o més detectors actius. En aquest moment només es disposa del monitor PRASSI. També es determinen les condicions ambientals (temperatura i humitat) mitjançant l'estació meteorològica. Aquestes mesures inicials permeten fer una estimació del temps que poden estar exposats els detectors passius sense que es saturin.
4. Tot seguit es procedeix a la instal·lació dels detectors passius (detectors de Makrofol sense cap tipus de membrana per evitar la humitat). Es deixen exposats durant diversos dies, setmanes o mesos per tal de fer una mesura integrada de la C_{Rn} .
5. Transcorregut el temps d'exposició dels detectors passius, es recullen i s'analitzen en els laboratoris de la UFR de la UAB.
6. S'informa dels resultats de les mesures als responsables de l'activitat laboral i, en funció dels resultats obtinguts, es valorar si cal realitzar un estudi més detallat. Aquest estudi pot consistir en realitzar noves mesures integrades o mesures en continu de la C_{Rn} per analitzar les possibles variacions temporals (diàries, estacionals, etc.) i la influència de les condicions meteorològiques, taxes de ventilació, etc.

7. El valor mig anual de la C_{Rn} s'obté sense contemplar cap factor de correcció estacional. En cas de tenir més d'un període d'exposició de diferents durades, el valor mig es calcula fent una ponderació dels resultats d'acord amb la durada de cada període. Quan hi ha una variació molt significativa del nivell de radó durant les hores laborals es pot aplicar una correcció sobre el valor mig anual que contempli l'exposició real durant les hores de permanència del treballador en el seu lloc de treball.

Els resultats obtinguts als llocs de treball subterranis de Catalunya analitzats entre els anys 2004-2007 es presenten a la **Taula 5.2**. Els temps d'exposició dels detectors de Makrofol varien entre 5 dies i 9 mesos, depenent del valor de la C_{Rn} obtingut a partir de la mesura puntual inicial amb el monitor PRASSI. En tots els casos, excepte a les mines 6 i 7, els valors obtinguts amb el PRASSI són baixos ($< 200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) i, per tant, els detectors passius (detectors de Makrofol) poden estar exposats durant diversos mesos.

Taula 5.2. Resultats de les mesures puntuals i integrades obtingudes en els llocs de treball subterranis analitzats de Catalunya. S'indica el valor de la concentració de radó (C_{Rn}) obtingut a partir de la primera mesura puntual amb el monitor PRASSI, els valors puntuals de la temperatura (T) i la humitat relativa (Hr) obtinguts amb l'estació meteorològica, el nombre d'exposicions dels detectors de Makrofol (N_{expo}), la seva durada (T_{expo}), els períodes de l'any en que es realitzen les exposicions, el nombre de detectors de Makrofol (N_{det}) i el valor mig anual de la C_{Rn} obtingut amb els detectors de Makrofol.

Codi	PRASSI C_{Rn} ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)	T ± 1 ($^{\circ}\text{C}$)	Hr ± 1 (%)	N_{expo}	T_{expo}	Període de l'any	N_{det}	Makrofol C_{Rn} ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)
1	41 ± 2	13	51	1	9 mesos	Gen. – Des. 05	6	139 ± 6
2	38 ± 2	21	53	1	4 mesos	Oct. 04 – Feb. 05	6	17 ± 2
3	22 ± 6	11	60	1	9 mesos	Gen. – Oct. 05	4	$(0.52 \pm 0.04) \cdot 10^3$
4	22 ± 3	17	70	1	4 mesos	Oct. 04 – Feb. 05	7	28 ± 2
5	78 ± 16	15	78	1	4 mesos	Des. 04 – Abr. 05	4	91 ± 6
6-I	-	-	-	3	3 mesos	Oct. 04 – Jul. 05	3	686 ± 38
6-II	-	-	-	3	3 mesos	Oct. 04 – Jul. 05	3	$(1.6 \pm 0.1) \cdot 10^3$
6-III	$(11.6 \pm 0.5) \cdot 10^3$	22	79	4	5-7 dies	Oct. 04, Gen.,	28	$(9 \pm 2) \cdot 10^3$
6-IV	$(12.9 \pm 2.3) \cdot 10^3$	21	73	4	5-7 dies	Abr. i Jul. 05	23	$(13 \pm 3) \cdot 10^3$
7	4 ± 2	14	84	2	3 set.- 9 mes.	Gen. – Des. 05	9	$(1.1 \pm 0.1) \cdot 10^3$
8	< 2	13	73	1	9 mesos	Gen. – Oct. 05	4	49 ± 3
9	172 ± 21	-	90	1	4 mesos	Nov. 04 – Mar. 05	8	95 ± 4
10	58 ± 3	-	-	1	4 mesos	Des. 04 - Abr. 05	2	65 ± 6
10	187 ± 12	15	92	1	4 mesos	Des. 04 - Abr. 05	2	125 ± 10
M	[5 – 84]	-	-	1	6 mesos	Oct. 04 – Abr. 05	17	21 ± 9
P	[6 – 31]	-	-	1	10 mesos	Gen. – Oct. 06	14	28 ± 9

S'identifiquen dues activitats laborals (codis 6 i 7) on el valor mig anual de la C_{Rn} és superior als $600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, considerats pel CSN com el nivell de protecció dels treballadors exposats al radó en els seus llocs de treball (CSN, 2012). A la resta de llocs de treball el valor és inferior i, per tant, no existeix un augment significatiu del risc degut a la inhalació del radó i els seus descendents.

A continuació es presenten els estudis detallats que es realitzen a les dues activitats amb nivells de radó més elevats (les mines 6 i 7), juntament amb un estudi detallat en el Metro de Barcelona (M).

5.1.1. Les mines 6

Les mines 6 estan formades per quatre recintes diferents (I, II, III i IV). Els recintes I i II són una planta baixa i un semisoterrani, respectivament, i els recintes III i IV són galeries subterrànies que s'estenen a diferents nivells de profunditat en el subsòl. Els estudis detallats en aquestes mines consisteixen, en primer lloc, en repetir les mesures integrades en diferents períodes de l'any per veure les variacions espacials i estacionals de la C_{Rn} a l'aire de l'interior i, posteriorment, fer mesures en continu de la C_{Rn} , la temperatura i la humitat per estudiar-ne les variacions diàries. En aquest segon estudi s'utilitza la mina IV com a laboratori natural per dur a terme exposicions de diferents tipus de detectors actius i passius en condicions ambientals extremes (humitat elevada) (apartat 3.3.4.2).

5.1.1.1. Primer estudi: variacions espacials i estacionals

Les concentracions de radó obtingudes amb el monitor PRASSI a l'interior d'aquestes dues mines són les més elevades de tota la campanya de mesura. Per tal d'evitar la saturació dels detectors de Makrofol, s'estableix un temps d'exposició d'entre 5 i 7 dies, pels punts amb concentracions de radó més elevades i de tres mesos pels punts amb nivells més baixos. Per a tenir una bona estimació del valor mig anual de la C_{Rn} , s'ha seleccionat un període d'exposició de cada estació de l'any (Octubre, Gener, Abril i Juliol). Inicialment els recintes I i II no es mesuren però a la llum dels resultats obtinguts en el primer període en els recintes subterranis adjacents es decideix realitzar mesures en aquests recintes al llarg dels tres períodes següents i s'obtenen uns nivells de radó gens menyspreables, presentant els valors màxims durant l'estiu (**Taula 5.3**). A la **Figura 5.1** s'ha representat els valors mitjos estacionals dels quatre recintes. Els recintes III i IV presenten variacions estacionals importants de la C_{Rn} , sent els valors màxims també durant l'estiu. A les **Figures 5.2** i **5.3** es mostren els valors mitjos estacionals dels diferents nivells dels recintes III i IV, respectivament.

Taula 5.3. Valors de la C_{Rn} als llocs de treball subterranis 6. Dins un mateix recinte els resultats estan ordenats per nivell de profunditat del punt de mesura.

Recinte	Nivell	C_{Rn} (kBq·m ⁻³)				
		Octubre 2004	Gener 2005	Abril 2005	Juliol 2005	Anual
I	0	-	0.29 ± 0.03	0.8 ± 0.1	1.0 ± 0.1	0.69 ± 0.04
II	-0.5	-	0.45 ± 0.04	1.1 ± 0.1	3.2 ± 0.6	1.6 ± 0.1
III	-1	5.8 ± 0.6	3.9 ± 0.4	4.7 ± 0.4	20 ± 2	9 ± 2
	-1	4.7 ± 0.4	4.6 ± 0.4	5.4 ± 0.5	21 ± 2	
	-1	5.6 ± 0.5	4.0 ± 0.4	7.4 ± 0.7	36 ± 5	
	-1	3.9 ± 0.4	3.1 ± 0.3	4.2 ± 0.4	12 ± 1	
	-2	12 ± 1	4.6 ± 0.4	4.7 ± 0.4	16 ± 2	
	-2	11 ± 1	3.7 ± 0.4	4.0 ± 0.4	16 ± 2	
	-2	13 ± 1	3.9 ± 0.4	4.6 ± 0.4	16 ± 2	
IV	-1	15 ± 1	0.5 ± 0.1	4.3 ± 0.4	20 ± 2	13 ± 3
	-2	18 ± 2	0.7 ± 0.1	7.0 ± 0.6	22 ± 2	
	-2	17 ± 2	0.7 ± 0.1	5.0 ± 0.4	21 ± 2	
	-2	15 ± 1	0.8 ± 0.2	5.4 ± 0.5	22 ± 2	
	-3	37 ± 4	0.9 ± 0.2	5.3 ± 0.5	33 ± 4	
	-3	-	0.8 ± 0.2	5.4 ± 0.5	33 ± 5	

En general, els valors obtinguts són molt elevats, la majoria estan molt per sobre dels $600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. El valor màxim ha estat de $(37 \pm 4) \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$, obtingut al nivell -3 del recinte IV. Si s'observa la distribució de la C_{Rn} en aquest recinte es veu clarament que els valors augmenten amb la profunditat (**Figura 5.3**). Aquest resultat és el que cal esperar si la C_{Rn} és el resultat d'un procés d'entrada a través del sòl i que es va diluint en aproximar-se a la superfície. Amb els resultats del recinte III, es veu el mateix comportament amb les dades d'octubre, però una disminució del nivell de radó amb la profunditat el juliol (**Figura 5.2**). Cal dir que aquest recinte està molt més aïllat de l'exterior que la resta, així doncs és possible que la redistribució del radó dins del recinte depengui d'altres factors, com les variacions de temperatura, les diferències de pressió, etc. Tanmateix, també és possible que l'entrada de radó no sigui uniforme, per exemple, per l'existència de fissures en el terreny, on l'exhalació de radó acostuma a ser molt més gran, com s'ha vist a alguns recintes de la zona volcànica de La Garrotxa.

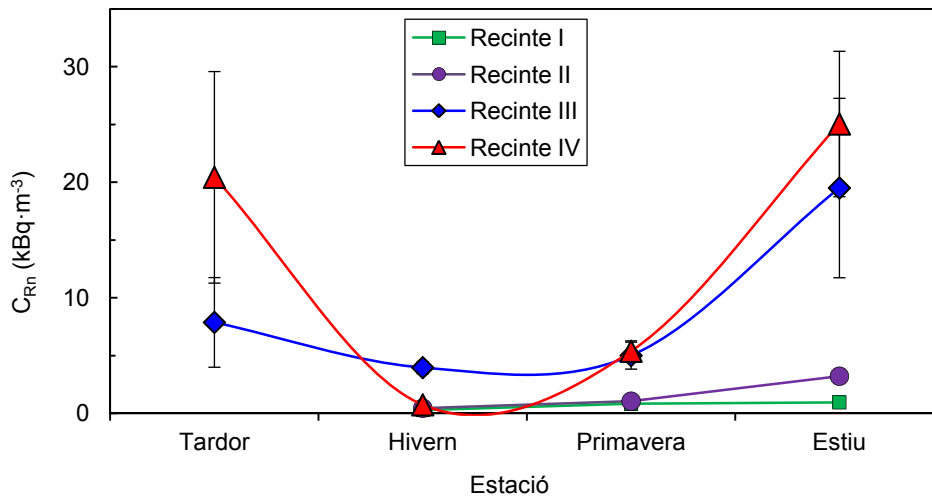


Figura 5.1. Variació estacional de la C_{Rn} dels quatre recintes analitzats de les mines 6.

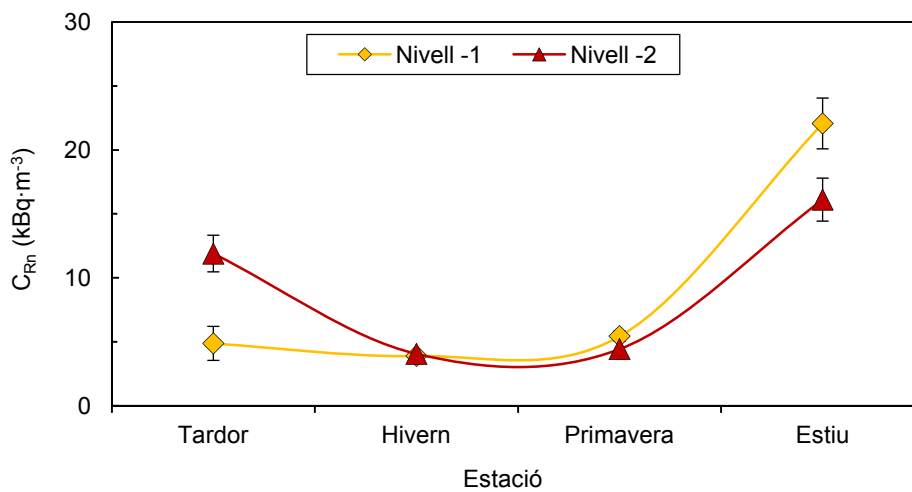


Figura 5.2. Variació estacional de la C_{Rn} dels dos nivells del recinte III de les mines 6.

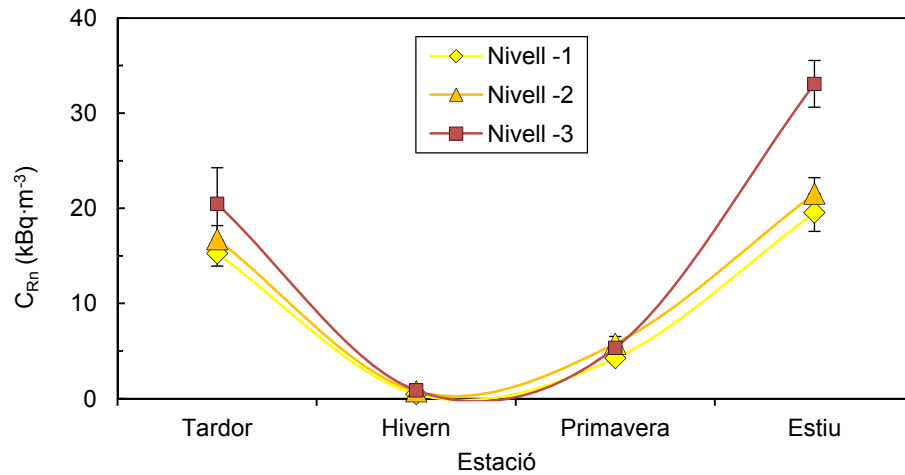


Fig. 5.3. Variació estacional de la C_{Rn} dels tres nivells del recinte IV de les mines 6.

5.1.1.2. Segon estudi: variacions diàries

La C_{Rn} a l'interior del recinte IV (nivell -3), mesurada amb el monitor AlphaGUARD durant quatre dies del maig del 2011, experimenta variacions diàries molt importants, presentant els màxims durant els vespres/nits i els mínims durant els matins, o dit d'una altra forma, durant les hores del dia la concentració augmenta i durant les nits disminueix (Figura 5.4). Per altra banda, la temperatura i la humitat relativa es mantenen constants al llarg dels quatre dies de mesura. Durant la matinada del dia 19 algun fenomen provoca que la C_{Rn} no experimenti la mateixa disminució que els dies anteriors i que el dia següent però, en canvi, la temperatura i la humitat relativa no es veuen afectats.

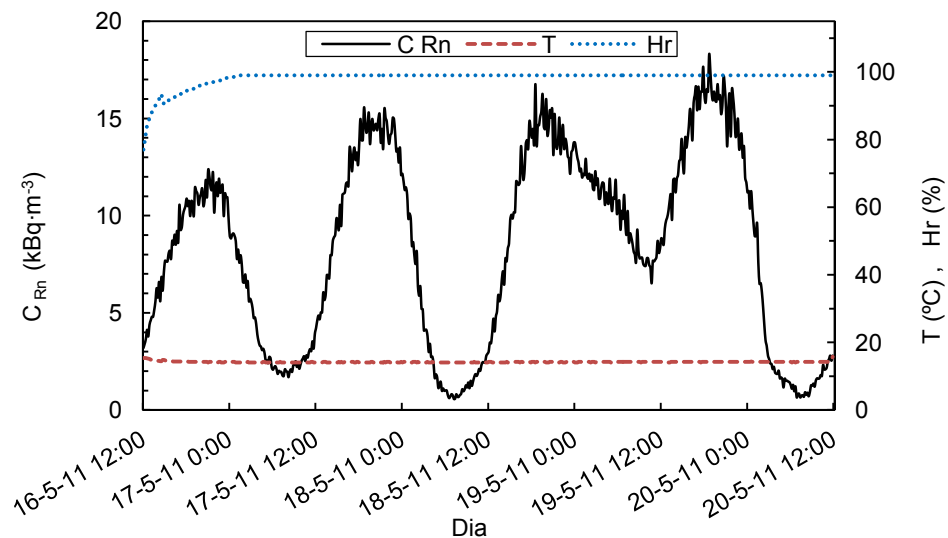


Fig. 5.4. Variació diària de la concentració de radó (C_{Rn}), la temperatura (T) i la humitat relativa (Hr) obtingudes amb el monitor AlphaGUARD al nivell -3 de l'interior del recinte IV durant quatre dies del maig del 2011.

Pel què respecte a la C_{Rn} mesurada durant 29 dies d'estiu del 2011 en el nivell -2 del recinte IV (**Figura 5.5**) s'observa que les variacions diàries no són tan importants, llevat d'unes poques ocasions en que la C_{Rn} disminueix fins a valors inferiors als $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

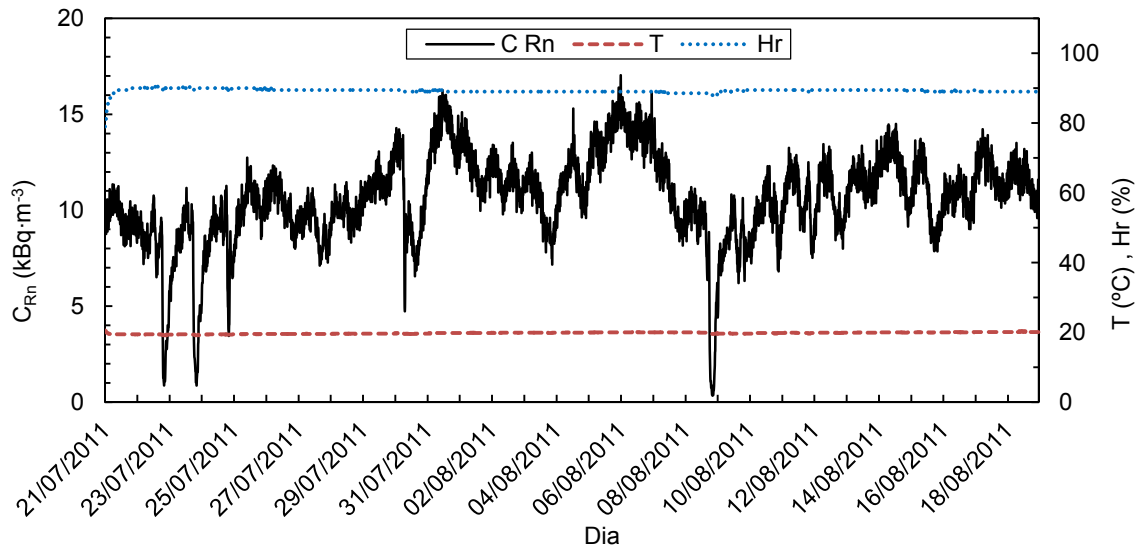


Fig. 5.5. Variació diària de la concentració de radó (C_{Rn}), la temperatura (T) i la humitat relativa (Hr) obtingudes amb el monitor AlphaGUARD al nivell -2 de l'interior del recinte IV durant 29 dies de l'estiu del 2011.

Els resultats d'aquestes dues mesures, amb nivells de radó fluctuant durant la primavera i valors més constants i elevats durant l'estiu, recorden el comportament dels nivells de radó a l'aire dels bufadors de la zona volcànica de la Garrotxa (**Figura 4.28**). Segurament aquest comportament també està governat per les diferències de temperatura entre l'aire de l'exterior i de l'interior del recinte. Un estudi més detallat i disposant de les dades meteorològiques de l'aire exterior ha de permetre confirmar aquesta dependència.

5.1.2. La mina 7

Amb la mesura puntual de la C_{Rn} realitzada inicialment amb el monitor PRASSI a l'interior de la mina 7 s'obté un valor molt baix, $(4 \pm 2) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Conseqüentment, els detectors de Makrofol es deixen exposats durant un període de 9 mesos. En analitzar-los, però, s'observa que presenten saturació en la densitat de traces. Tot i que la densitat de traces obtinguda ($2400 \text{ tr}\cdot\text{cm}^{-2}$) és molt superior als valors amb que s'obté la corba de calibratge de la **Figura 3.24**, es fa l'estimació dels valors mitjos de la C_{Rn} a la que han estat exposats els detectors (**Taula 5.4**). Posteriorment es porta terme una segona mesura de la C_{Rn} durant un temps d'exposició de 3 setmanes i els valors obtinguts són aproximadament una sisena part del valor obtingut en el període de 9 mesos. Aquest resultat no és sorprenent ja que posa de manifest un comportament dels nivells de radó semblant a l'obtingut a altres mines, on els períodes més freds de l'any presenten uns nivells de radó més baixos que el valor mig anual.

Els detectors s'exposen al llarg d'una galeria de 450 m, estant el detector amb el codi 1 al punt més interior de la galeria, i el 5 a prop de l'entrada. S'observa, especialment en els resultats corresponents al període de tres setmanes, que la C_{Rn} augmenta al entrar cap a l'interior de la galeria.

Taula 5.4. Resultats obtinguts en els dos períodes d'exposició en la galeria del lloc de treball 7.

Codi	C_{Rn} (kBq·m ⁻³)	
	9 mesos (Gener - Octubre 2006)	3 setmanes (31 Novembre - 21 Desembre 2006)
1	1.14 ± 0.41	0.30 ± 0.05
2	1.15 ± 0.22	0.25 ± 0.04
3	1.08 ± 0.19	0.24 ± 0.04
4	1.00 ± 0.16	0.13 ± 0.03
5		0.07 ± 0.02
6		0.06 ± 0.02
Valor mig mina	1.17 ± 0.13	0.20 ± 0.02

El 26 d'octubre de 2005, mentre es recullen els detectors de Makrofol exposats durant 9 mesos, es realitza una segona mesura puntual de la C_{Rn} amb el monitor PRASSI durant una hora. La primera lectura dona 3600 Bq·m⁻³ i en el transcurs de l'hora, la concentració baixa ràpidament fins els 400 Bq·m⁻³. La mina disposa d'un sistema de ventilació forçada que es posa en funcionament una hora abans que entrin les primeres visites del dia i que s'apaga quan aquestes finalitzen. La primera mesura es fa quan només han transcorregut 10 minuts des del moment en què es posa en funcionament el sistema de ventilació forçada. Aquesta ràpida disminució dels nivells de radó sembla posar de manifest que el sistema de ventilació és molt eficaç. Per veure la possible influència d'aquest sistema de ventilació i analitzar les variacions diürnes es decideix fer una mesura en continu de la C_{Rn} amb el mateix monitor PRASSI al llarg de tres setmanes. També s'instal·la un detector de Makrofol addicional al costat de PRASSI (codi 5), per comparar els resultats obtinguts amb els dos detectors durant el temps d'exposició, i també es deixa un detector de Makrofol a l'interior de l'edifici annex a la mina (codi 6). El valor mig obtingut amb el PRASSI durant les 3 setmanes (**Figura 5.6**) és de (112 ± 8) Bq·m⁻³, valor que és del mateix ordre que l'obtingut amb el detector de Makrofol (codi 5 de la **Taula 5.4**). En el comportament de la C_{Rn} en el període estudiat no s'observa l'efecte del sistema de ventilació forçada que s'espera trobar després dels resultats de la segona mesura puntual amb el PRASSI. A més, els dies en que hi ha els valors més elevats no coincideixen amb dies en què el recinte no té visites i que no funciona el sistema de ventilació. El fet de que els valors de la C_{Rn} en aquest període siguin molt menors que els obtinguts en el període d'exposició de 9 mesos es pot interpretar, novament, com un comportament semblant a l'observat en l'estudi dels bufadors ([Moreno et al., 2009a](#)) o en altres galeries subterrànies ([Barbosa et al., 2010](#)). En tots aquests casos, els valors màxims de la C_{Rn} s'observen durant els mesos d'estiu i els mínims durant l'hivern. Per confirmar aquesta hipòtesi s'haurien de fer un mínim de dues mesures estacionals, una d'estiu i una altra d'hivern, i en el millor dels casos una a cada estació de l'any.

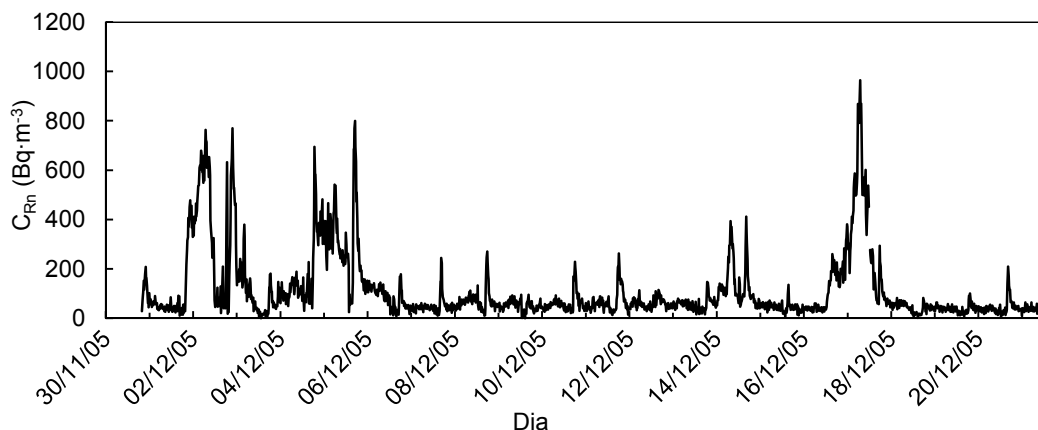


Figura 5.6. Variació de la C_{Rn} en la mina 7 mesurada amb el monitor PRASSI durant 3 setmanes del 30 de novembre al 21 de desembre de 2003.

5.1.3. Estacions i cotxeres del metro de Barcelona

El Metro o ferrocarril metropolità de Barcelona constitueix una extensa xarxa de galeries, estacions i cotxeres construïda en el subsòl de la ciutat de Barcelona, que actualment té 165 estacions i més de 123 km de recorregut. Per determinar els nivells de radó a l'aire d'alguns dels recintes on els treballadors hi passen un temps significatiu es seleccionen set estacions i dues cotxeres. S'escullen algunes estacions situades a zones pròximes a les formacions muntanyoses del nord de la ciutat on es troben roques granítiques, més riques en radi, i unes altres en zones de materials sedimentaris, per comprovar la possible influència del tipus de sòl en els nivells de radó obtinguts. S'instal·la detectors de Makrofol en un total de 16 llocs de treball diferents i es deixen exposats durant 6 mesos (**Figura 5.7**). A les dues cotxeres a més s'hi fa mesures en continu de la C_{Rn} mitjançant dos monitors actius, un AlphaGUARD de l'Institut Nacional de Seguretat i Higiene en el Treball i el monitor PRASSI de la UFR de la UAB (**Figura 5.8**) (Baixeras et al., 2005b).



Figura 5.7. Detectors de Makrofol dins de les estacions del Metro de Barcelona.



Figura 5.8. Detectores actius (AlphaGUARD i PRASS) mesurant en continu dins d'una cotxera.

Els nivells de radó obtinguts amb els detectors de Makrofol (**Taula 5.5**) són baixos, similars als obtinguts en habitatges, el què indica que els sistemes de ventilació existents són adequats i que no existeix un risc significatiu pels treballadors ni pels membres del públic en general. S'observa una possible influència del tipus de sòl, ja que les estacions situades en formacions granítiques tenen valors lleugerament més elevats que les situades en formacions sedimentàries. No s'ha detectat una influència de la profunditat del lloc de treball en els nivells de radó.

Taula 5.5 Concentració de radó dels 16 llocs de treball subterranis de la xarxa del metros de Barcelona.

Tipus de sòl	Lloc	Nivell	C_{Rn} ($Bq \cdot m^{-3}$)	C_{Rn} ($Bq \cdot m^{-3}$)
Cotxeres				
	Roquetes	-1	12 ± 3	
	Sant Genís	-1	20 ± 4	
Estacions				
	Fondo	-1	13 ± 3	
		-2	18 ± 4	
Granit	Torres i Bages	-1	32 ± 5	24 ± 9
		-2	47 ± 6	
	Trinitat Nova	-1	23 ± 4	
		-2	19 ± 4	
	Trinitat Vella	-1	20 ± 4	
		-2	26 ± 4	
Vall d'Hebron	-1	30 ± 5		
	-2	23 ± 4		
Sediments	Drassanes	-1	11 ± 3	14 ± 3
		-2	18 ± 4	
	Universitat	-1	17 ± 4	
		-2	11 ± 3	

Els resultats de les mesures en continu amb els dos detectors actius presenten les mateixes fluctuacions diàries de la C_{Rn} , tot i que existeix una petita discrepància de valors (**Figures 5.9 i 5.10**). Aquesta discrepància pot ser deguda a la influència del toró sobre la resposta del monitor PRASSI en els resultats de la cotxera de Roquetes. Els valors mitjos obtinguts amb els dos detectors actius a les dues cotxeres són lleugerament superiors als obtinguts amb els detectors passius (**Taula 5.6**). Cal dir que els temps d'exposició dels detectors passius és molt superior que les dues setmanes de mesura en continu amb els

detectors actius, per la qual cosa els valors obtinguts no han de ser necessàriament els mateixos.

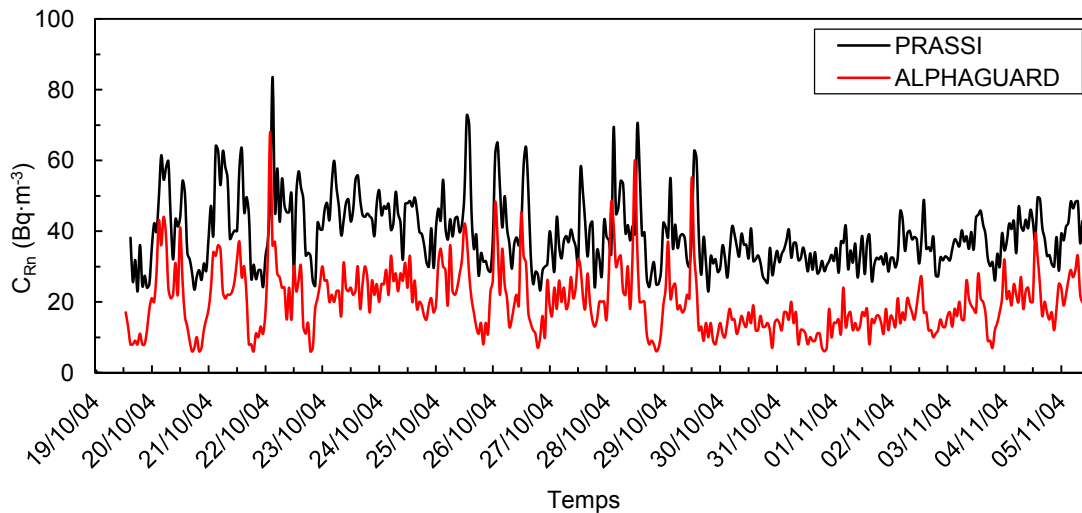


Figura 5.9. Evolució temporal de la C_{Rn} a la cotxera Roquetes de la xarxa del Metro de Barcelona mesurada durant 17 dies amb dos detectors actius.

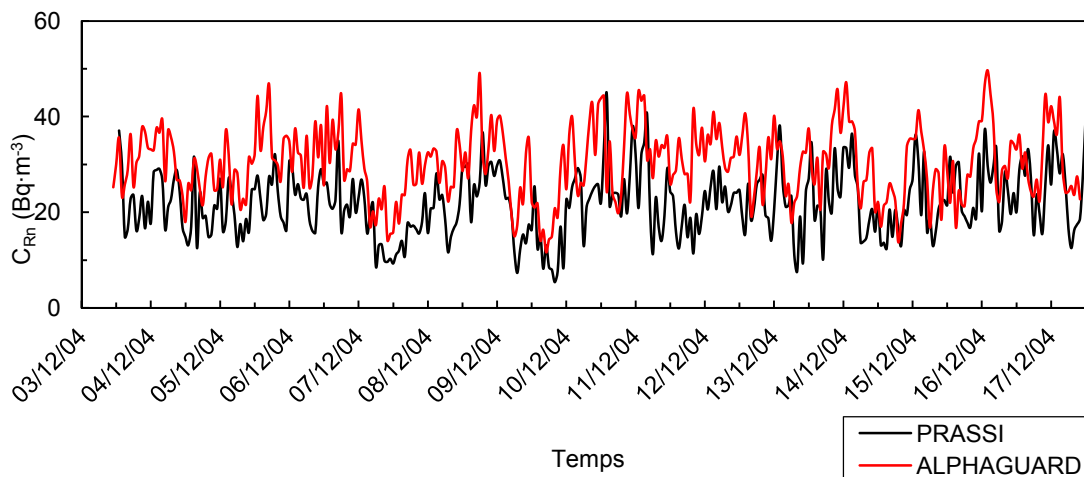


Figura 5.10. Evolució temporal de la C_{Rn} a la cotxera Sant Genís de la xarxa del Metro de Barcelona mesurada durant 14 dies amb dos detectors actius.

Taula 5.6. Valors mitjos i intervals de valors de la C_{Rn} de les dues cotxeres de la xarxa del metros de Barcelona mesurades amb detectors actius.

Cotxera	C_{Rn} (Bq·m ⁻³)			
	AlphaGUARD		PRASSI	
	Interval	Valor mig	Interval	Valor mig
Roquetes	6 – 68	20 ± 9	23 – 84	39 ± 10
Sant Genís	14 – 50	30 ± 7	5 – 45	22 ± 7

5.2. Establiments termals

Els establiments termals també estan considerats activitats laborals on els treballadors poden estar exposats a altes concentracions de radó pel fet d'utilitzar aigües d'origen subterrani que poden tenir elevats continguts de radó dissolt. Existeixen estudis dels nivells de radó a l'interior de balnearis de tot el món (Szerbin, 1996; Horváth et al., 2000; Geranios et al., 2004; Song et al., 2005). Fins i tot s'han desenvolupat i aplicat models per descriure el comportament del radó i els seus descendents a l'interior d'aquests recintes, caracteritzats per unes condicions ambientals extremes de temperatura i humitat (Nikolopoulos i Vogianis, 2007). A Espanya s'han realitzat campanyes de mesura de la C_{Rn} dissolt en aigües subterrànies (Ródenas et al., 2008) i algunes mesures de la C_{Rn} a l'aire de l'interior de balnearis, arribant a trobar nivells fins a $5200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (Soto et al, 1995; Dueñas et al., 1998; Soto i Gómez, 1999). En aquests estudis no s'han tingut en compte les variacions temporals de la C_{Rn} , que poden arribar a ser molt importants (Vogianis et al., 2004), ni tampoc s'ha determinat la concentració de descendents de vida mitja curta, que són de gran importància per estimar la dosis rebuda pels treballadors i pels usuaris d'aquests establiments (Nikolopoulos et al., 2010).

A Catalunya es disposa de poques mesures de la C_{Rn} a l'aire de l'interior d'establiments termals. A més a més, amb els diferents contactes que s'han realitzat es troba que existeix una certa reticència per part dels seus responsables a que es realitzin aquests estudis, segurament degut a la por a que els resultats arribin a fer-se públics i que es perdin clients temorosos a la radiació. Tot i això, entre els anys 2010-2011 la UFR de la UAB comença a fer les seves primeres mesures de radó en un parell de balnearis, que per qüestions de confidencialitat, no se'n detalla l'emplaçament ni la geologia de la zona on es troben.

La metodologia seguida per determinar la C_{Rn} en aquests recintes és bastant semblant que la descrita a l'apartat 5.2. Hi ha una variació important, però, respecte del procediment per realitzar les primeres mesures amb els detectors actius. En aquelles sales on l'ús de l'aigua termal es fa de forma puntual (dutxes, banyeres, etc.), en comptes de fer-se mesures puntuals es realitzen mesures en continu durant més de dues hores. Es pretén veure la influència de l'ús de les aigües sobre la C_{Rn} a l'aire de les sales i, per tant, la mesura inclou hores prèvies a una sessió de tractament, durant l'estona que duri aquest i algunes hores posteriors per veure com evolucionen els nivells de radó assolits. A les sales on l'ús de l'aigua ja es fa de forma permanent (piscines, saunes, jacuzzis, etc.) es segueixen fent mesures puntuals. Una altra diferència en la metodologia està motivada per les grans variacions de les condicions ambientals que es poden produir a l'interior d'algunes de les sales de tractament al llarg d'una jornada laboral. Quan es fa una mesura integrada amb detectors passius aquests estan exposats a les condicions extremes de temperatura i humitat molt variables i normalment es produeixen successives condensacions i evaporacions a les seves superfícies. Per tal de reduir els efectes d'aquestes condicions sobre la resposta dels detectors s'utilitzen les bosses de polietilè analitzades a l'apartat 3.3.3.

5.2.1. Balneari 1

El balneari 1 és un petit establiment que disposa de quatre sales de tractament: (1) banyera d'hidromassatge, (2) dutxa V (combinació de dutxa horitzontal i massatge), (3) sala de massatges (amb una dutxa vertical) i (4) sala amb piscina, jacuzzi i sauna.

En tres ocasions diferents entre els anys 2010-2011 es realitzen mesures puntuals, en continu i integrades de la C_{Rn} a l'aire de l'interior de les sales de tractament i a les aigües termals utilitzades. Els objectius d'aquestes mesures són: (i) analitzar si els treballadors estan exposats a un valor mig anual de la C_{Rn} superior als $600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, (ii) determinar la font de radó a l'aire del seu interior i (iii) utilitzar les condicions ambientals de l'aire de l'interior de l'establiment per comprovar l'eficàcia de les membranes de polietilè per exposicions de diversos mesos de durada de detectors passius de radó. Com que l'establiment només està obert durant alguns mesos de primavera i estiu, les mesures només es realitzen durant aquestes dues estacions dels dos anys consecutius.

A principis de setembre de 2010 es realitza una mesura preliminar de la C_{Rn} de l'aire interior del balneari amb els detectors actius ATMOS i RAD7. La presa d'aire dels dos detectors es col·loca en un mateix punt de la sala 2, on el client rep un tractament d'aigua calenta ($38 \text{ }^\circ\text{C}$) procedent d'unes dutxes horitzontals durant uns 30 minuts i després rep una sessió de massatges. L'evolució temporal de la C_{Rn} obtinguda amb aquesta primera mesura ja suggereix que el radó dissolt a les aigües termals utilitzades fa incrementar de forma significativa el nivell de la C_{Rn} a l'aire d'aquesta sala, des de valors inferiors als $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ fins a valors superiors als $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (**Figura 5.11**). Es comprova que els dos detectors actius segueixen la mateixa tendència en els nivells de radó mesurats durant les 8 hores. Els valors mitjos de la C_{Rn} obtinguts amb els dos equips, $(384 \pm 58) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ amb el RAD7 i $(310 \pm 46) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ amb l'ATMOS, coincideixen dins els intervals d'incertesa.

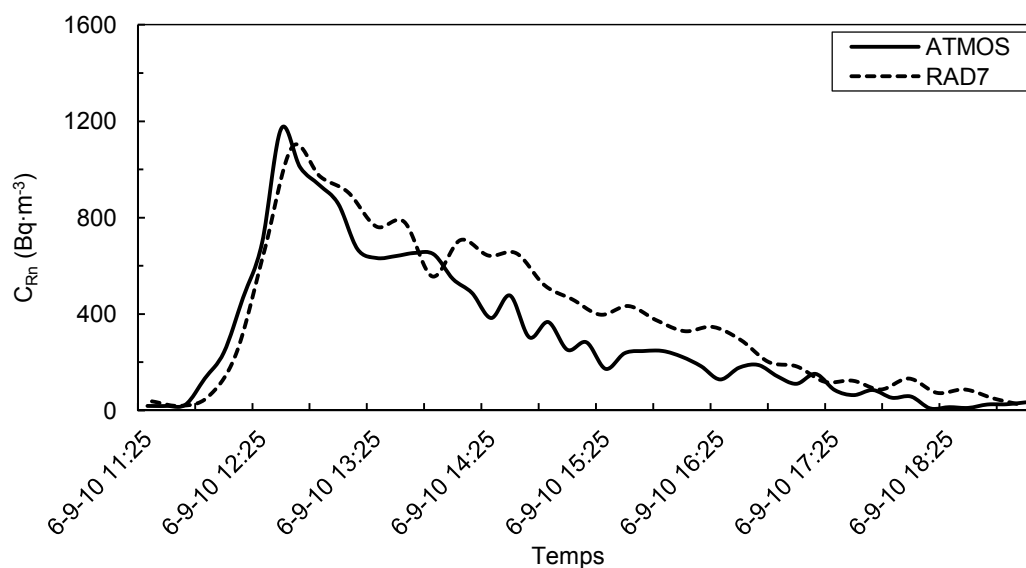


Figura 5.11. Evolució temporal de la C_{Rn} a la sala de tractament amb aigua calenta durant 30 minuts (setembre 2010). Durant els primers 30 minuts no s'utilitza aigua, en els següents 30 minuts les aixetes estan obertes i la resta del temps estan tancades.

A finals d'abril de 2011 es fan noves mesures puntuals i en continu de la C_{Rn} a les quatre sales del balneari. També es recullen mostres d'aigua termal en dues sales de tractament diferents per determinar la C_{Rn} dissolt a l'aigua. Aquestes mesures es realitzen durant uns dies festius en què el balneari està obert però després tanca per obrir novament les portes al públic a principis de juny. Amb les mesures puntuals i en continu a les sales del balneari s'observa que les sales 2 i 3 presenten valors de la C_{Rn} superiors als $600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ durant períodes laborals (**Taula 5.7**), però això no vol dir que aquest sigui el valor mig anual de la C_{Rn} al què estan exposats els treballadors. Això només es determina amb el coneixement precís dels horaris del personal i de les hores de permanència a l'interior de les diferents sales de tractament.

Taula 5.7. Valors mitjos de la C_{Rn} a l'aire de les sales del balneari 1.

Sala	Descripció	C_{Rn} ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)	Temps mesura (h)	Detector actiu
1	Massatges	198 ± 15	1	RAD7
2	Dutxa V	692 ± 43	25	ATMOS
3	Banyera hidromassatge	735 ± 54	5	RAD7
4	Piscina, sauna i jacuzzi	41 ± 6	2	RAD7

A la sala 1 es realitzen massatges i hi ha una dutxa que normalment no s'utilitza i que durant la mesura roman tancada. El resultat obtingut representa el valor de fons de l'interior de la sala quan no s'estan utilitzant aigües termals. La sala 4 és un recinte annex a l'edifici principal, on hi ha una piscina, un jacuzzi i una sauna coberts per una estructura de plàstic que proporciona un cert aïllament de l'aire exterior. La ventilació d'aquesta sala és més elevada que a l'interior del balneari ja que per la part inferior de l'estructura, existeixen obertures que permeten l'intercanvi d'aire amb l'exterior. Això explica que la C_{Rn} mesurada a l'aire del seu interior sigui tan baixa.

A la sala 2 els valors inicials de la C_{Rn} fluctuen al voltant dels $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (**Figura 5.12**). Amb un tractament de 30 minuts amb la dutxa V (franja blava) i a continuació obrint la porta de la sala, la C_{Rn} arriba a $1200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i en tres hores disminueix al valor inicial. Amb un segon tractament de 30 minuts i tenint la porta tancada durant les hores posteriors (franja taronja) els nivells de radó arriben als $1600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i després baixen fins els $800 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Durant les hores posteriors la sala no està controlada però suposem que va romandre amb la porta tancada fins a primeres hores del matí, quan la C_{Rn} disminueix bruscament per sota dels $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Posteriorment s'observa una fluctuació important que pot ser deguda a un nou ús de la sala.

A la sala 3 hi ha una banyera d'hidromassatge doble. El valor inicial de la C_{Rn} en aquesta sala és d'uns $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i quan la banyera està plena d'aigua amb el sistema de bombolleig en funcionament la C_{Rn} arriba fins a $1100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (**Figura 5.13**). Transcorregudes les dues primeres hores es para el bombolleig i durant les tres hores posteriors la C_{Rn} disminueix fins el valor inicial.

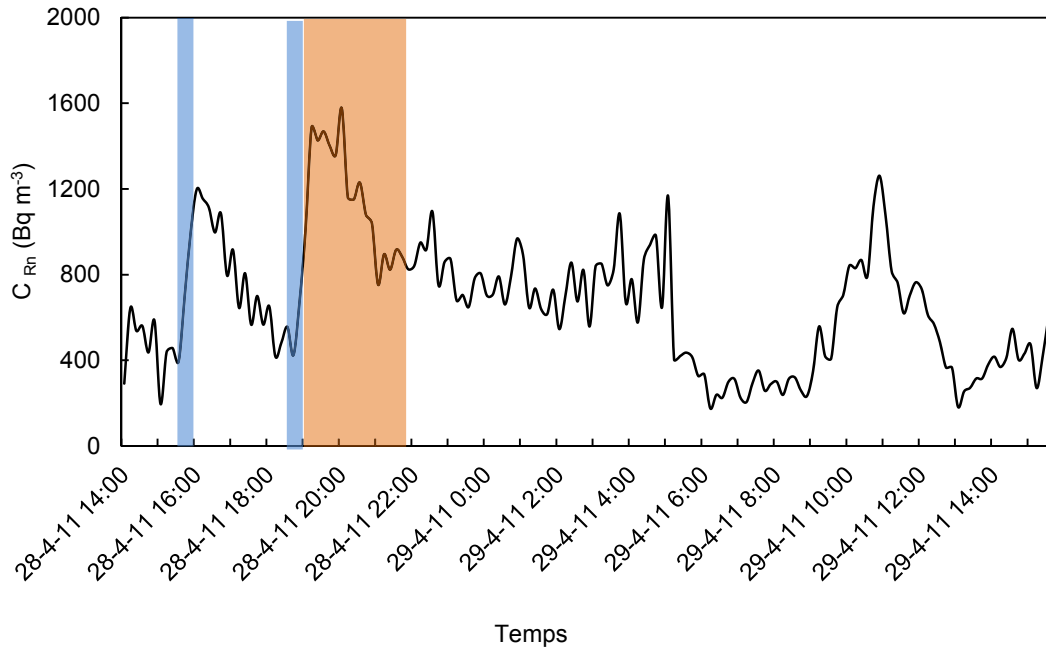


Figura 5.12. Evolució temporal de la C_{Rn} a l'aire de la sala 2 entre els dies 28 i 29 d'abril de 2011. Les franges vermelles corresponen a l'estona que dura el tractament i la franja groga a l'estona durant la qual es controla que la porta de la sala està tancada.

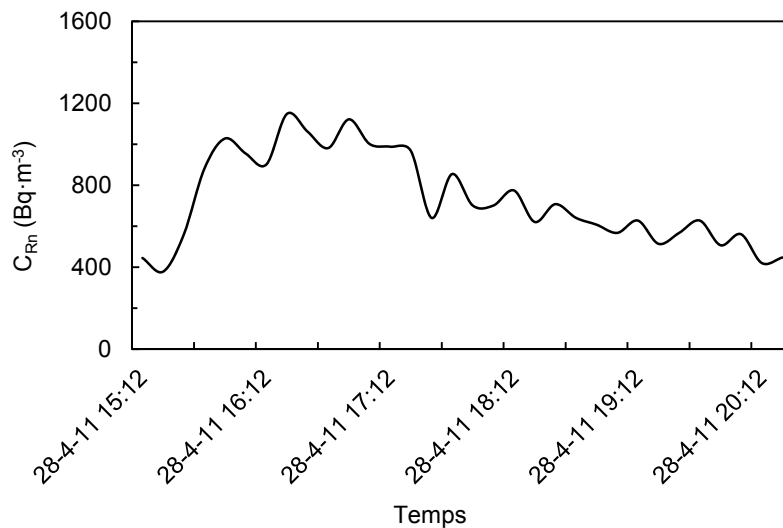


Figura 5.13. Evolució temporal de la C_{Rn} a la sala 3 durant 5 hores. Els primers 30 minuts no s'utilitza aigua a la sala, després s'omple la banyera i durant dues hores funciona el bombolleig. La resta de temps el sistema de bombolleig està tancat.

Les mesures de la C_{Rn} de les aigües es realitzen recollint mostres de 250 ml de les sales 2 i 3 i analitzant-les amb el detector RAD7 i el seu accessori RAD H₂O. El valor obtingut a la sala 3 és tres vegades més gran que el de la sala 2 (**Taula 5.8**), fet que posa de manifest la importància del tipus de flux d'aigua en el moment de recollir la mostra. A la sala 2 s'agafa la mostra d'aigua que surt de la dutxa Vichy. En aquest punt l'aigua forma uns raigs de gotes a pressió que, a mesura que omplen l'ampolla de 250 ml, provoquen una important desgasificació del radó dissolt en ella. A la sala 3, en canvi, l'aigua s'agafa de l'aixeta de la banyera, per on aquesta brolla formant un flux molt més laminar.

Taula 5.8. Valors de la C_{Rn} en les aigües utilitzades a dues sales del balneari 1.

Sala	Lloc de mostreig	^{222}Rn ($\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$)
2	Dutxa	26 ± 2
3	Banyera	75 ± 4

Al juny de 2011 s'instal·len 12 detectors passius de Makrofol a dues sales de tractament (2 i 4) i a la cuina (sala 5) on també s'utilitzen les aigües termals. A cada sala s'instal·len 4 detectors preparats amb diferents configuracions de bosses de polietilè, amb l'objectiu de comprovar l'efecte de la humitat sobre la resposta del Makrofol, així com la influència de la bossa de polietilè. Els detectors estan exposats durant el període de 4 mesos que l'establiment està obert al públic. La comparació dels resultats obtinguts amb les diferents membranes està a l'apartat 3.3.4.2, d'on es desprèn que la membrana més adequada per evitar la humitat amb exposicions de diversos mesos de durada és la bossa de Zipdar de $(51 \pm 2) \mu\text{m}$ de gruix. A la **Taula 5.9** es presenten els resultats obtinguts amb els detectors exposats amb aquesta bossa i s'observa que tots els valors mitjos de la C_{Rn} són inferiors als $600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

El setembre de 2011 es repeteixen les mesures en continu de la C_{Rn} a les sales 2, 3 i 4 i s'afegeix la sala 6, que és la recepció de l'establiment, per ser un lloc pròxim a les sales de tractament interiors i on els treballadors passen un temps significatiu. S'allarguen els temps de mesura fins a completar les 24 hores i mitjançant l'estació meteorològica es realitzen mesures de la temperatura i la humitat relativa. Els resultats indiquen que les sales 2 i 3 presenten uns valors mitjos pròxims als $600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ durant les 24 hores de mesura (**Taula 5.9**). La sala 2 presenta un nivell de radó un factor 2.6 més elevat que l'obtingut amb la mesura integrada durant 4 mesos. S'ha de tenir en compte que aquesta sala no té el mateix ús al llarg de tots els dies que l'establiment està obert. Durant la mesura en continu de 24 hores es realitzen dos tractaments (franges blaves de la **Figura 5.14**), un pel matí i l'altre a la tarda i posteriorment es deixa la porta oberta perquè es ventili la sala. Amb el segon tractament els valors de la C_{Rn} arriben als $1660 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i després baixen fins al voltant dels $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. La humitat arriba al 90 % i tarda tota la nit a baixar fins a valors entre el 50 % i el 60 %. La temperatura roman constant al voltant dels $22 \text{ }^\circ\text{C}$, a excepció de l'hora posterior a cada tractament en què arriba fins als $29 \text{ }^\circ\text{C}$.

Taula 5.9. Valors mitjos de la C_{Rn} a l'aire de les sales del balneari 1 obtinguts amb detectors de Makrofol exposats durant 4 mesos d'estiu i amb mesures en continu durant 24 h amb detectors actius. També es mostren els valors mitjos de la temperatura i la humitat relativa a l'aire de dues sales mesurats durant 24 h.

Sala	Descripció	C_{Rn} ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) (4 mesos)	C_{Rn} ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) (24 h)	T ($^\circ\text{C}$) (24 h)	Hr (%) (24 h)
2	Dutxa V	222 ± 16	623 ± 65	22 ± 1	77 ± 2
3	Banyera hidromassatge	-	608 ± 41	21 ± 1	65 ± 1
4	Piscina, sauna i jacuzzi	101 ± 15	125 ± 8	-	-
5	Cuina	89 ± 10	-	-	-
6	Recepció	-	128 ± 11	-	-

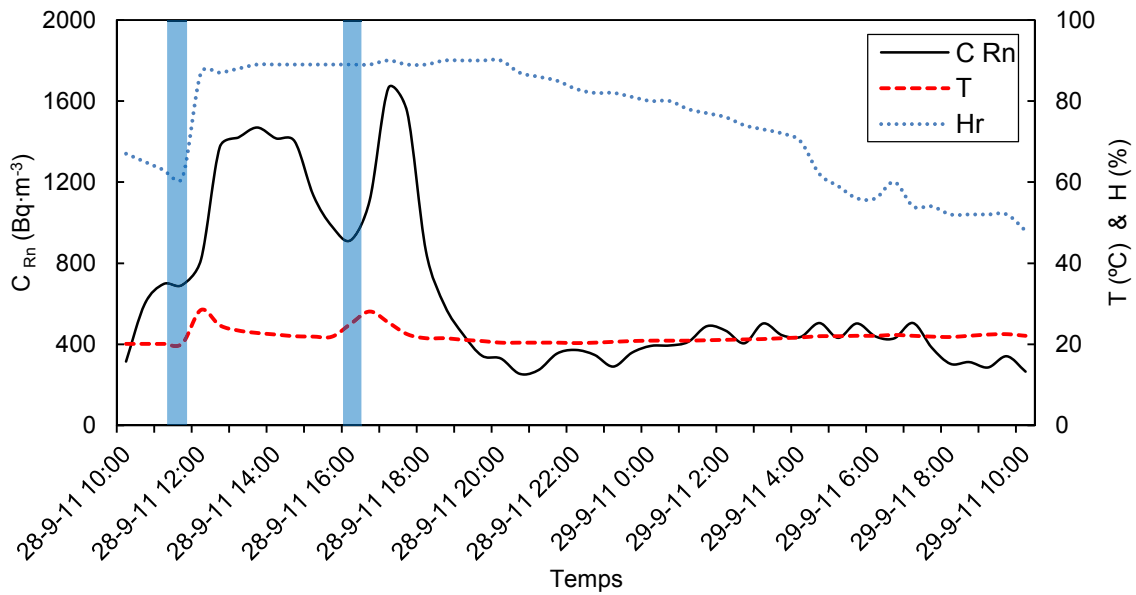


Figura 5.14. Evolució temporal de la C_{Rn} , la temperatura (T) i la humitat relativa (Hr) a l'aire de la sala 2 mesurada amb el monitor RAD7 i l'estació meteorològica entre els dies 28 i 29 de setembre de 2011. Les franges blaves corresponen a les estones que duren els tractaments.

A la sala 3 novament s'omple la banyera d'hidromassatge i es deixa que el bombolleig funcioni durant 1.5 h (franja blava), es deixa 2 h la porta tancada (franja taronja) i posteriorment s'obra perquè es ventili la sala. Els valors de la C_{Rn} arriben als $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i quan s'obra la porta baixen fins al voltant dels $600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (Figura 5.15). La humitat arriba al 86 % però al cap d'unes tres hores ja torna a estar al voltant del 60 %. La temperatura roman pràcticament constant al voltant dels $21 \text{ }^\circ\text{C}$ durant tot el dia.

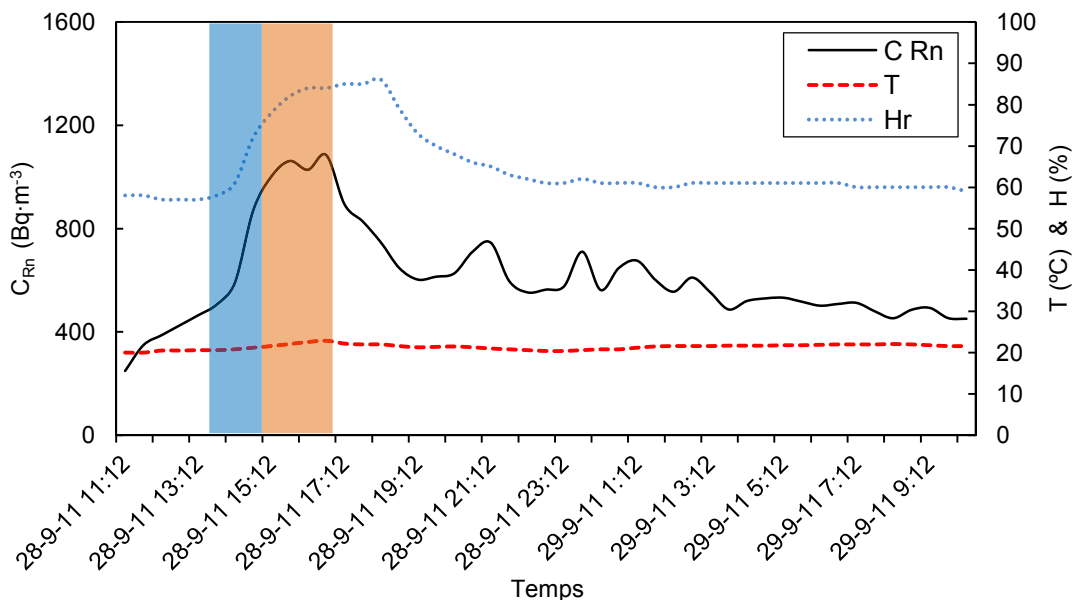


Figura 5.15. Evolució temporal de la C_{Rn} , la temperatura (T) i la humitat relativa (Hr) a l'aire de la sala 3 mesurada amb el monitor RAD7 i l'estació meteorològica entre els dies 28 i 29 de setembre de 2011. La franja blava corresponen a l'estona que dura el bombolleig a la banyera i la franja taronja a l'estona que la porta roman tancada.

A la sala 4 els valors de la C_{Rn} fluctuen entre $60 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i $224 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (Figura 5.16). Els pics que s'observen poden ser deguts als usos puntuals del jacuzzi per part dels clients de l'establiment, però no es controla en quin moment tenen lloc al llarg de la mesura. A la recepció de l'interior de l'establiment la C_{Rn} experimenta pics que poden arribar a superar els $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i que poden estar relacionats amb la ventilació de les sales de tractament a través de les portes del passadís que les uneix amb la recepció (Figura 5.17).

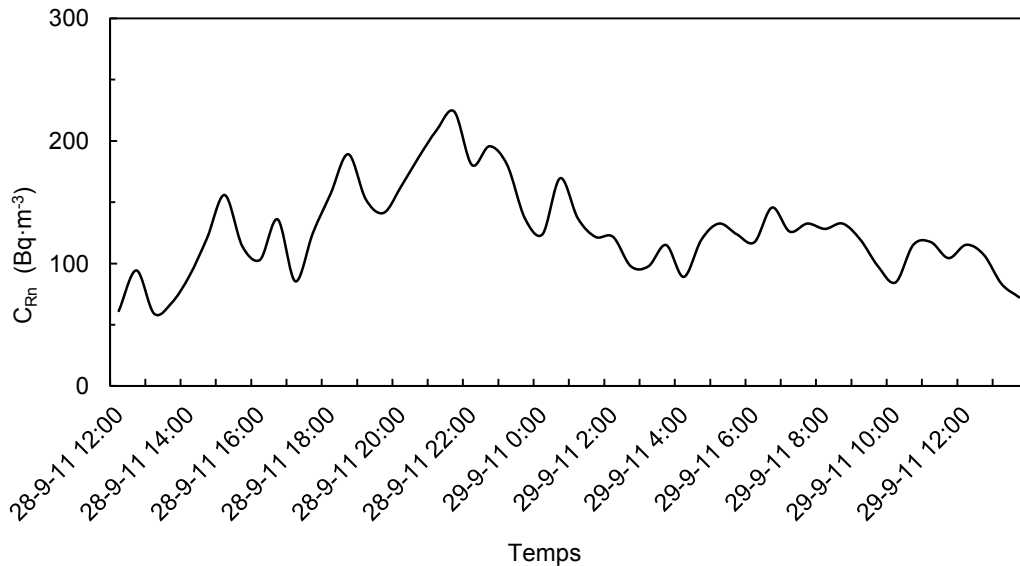


Figura 5.16. Evolució temporal de la C_{Rn} a l'aire de la sala 4 mesurada amb el monitor RAD7 entre els dies 28 i 29 d'abril de 2011.

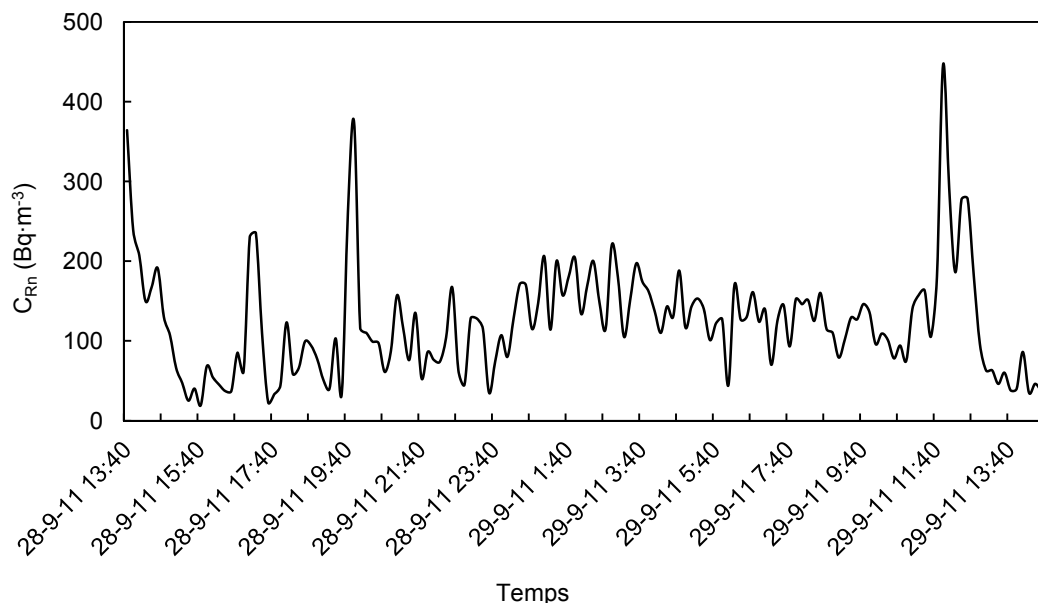


Figura 5.17. Evolució temporal de la C_{Rn} a l'aire de la recepció del balneari mesurada amb el monitor ATMOS entre els dies 28 i 29 d'abril de 2011.

5.2.2. Balneari 2

El balneari 2 és un gran establiment termal amb més de 30 sales de tractament. Els objectius de les mesures en aquest establiment són: (i) analitzar els nivells de radó a que estan sotmesos els treballadors i (ii) caracteritzar la font de radó.

El juny de 2011 es realitzen mesures puntuals i en continu de la C_{Rn} a l'aire a diferents sales de tractament (**Taula 5.10**) i s'observa que la sala 1 durant les hores de tractament presenta valors especialment elevats, fins a $7 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$. Aquesta sala és un sauna on la temperatura supera els $43 \text{ }^\circ\text{C}$ i on la humitat relativa és del 100 %. A la resta de sales el valor mig de la C_{Rn} està per sota dels $600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i només es supera aquest valor de forma puntual, tal com s'observa amb les evolucions temporals de les **Figures 5.18** i **5.19**. Les aigües termals són la principal font de radó a les sales de tractament del balneari, ja que a les quatre sales on es fan mesures en continu s'obtenen els valors màxims de la C_{Rn} immediatament després dels inicis dels tractaments (**Figures 5.18**, **5.19**, **5.20**). Les sales de l'Spa tenen un comportament diferent perquè es tracta de sales que tenen unes piscines amb uns grans volums d'aigua que no s'està renovant constantment i on el radó dissolt s'està desgasificant i desintegrant contínuament (**Figura 5.21**).

Taula 5.10. Concentració de radó a l'aire del balneari 2 entre els dies 22 i 23 de juny de 2011.

Codi sala	Nom sala	C_{Rn} ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)	Durada mesura (h)	Detector
1	Vaporari (en ús)	$(7.1 \pm 0.5) \cdot 10^3$	0,5	AlphaGUARD
10	Massatge termal (en ús)	201 ± 21	20,5	RAD7
11	Massatge termal (sense ús)	110 ± 16	3,0	AlphaGUARD
14	Bany termal petit	113 ± 8	20,5	RAD7
16	Dutxa de doll	78 ± 10	19,5	RAD7
19	Vaporari (ventilat)	49 ± 4	0,5	AlphaGUARD
20	Spa – Dutxes	70 ± 8	1,5	AlphaGUARD
21	Spa – Piscines	257 ± 19	21	ATMOS

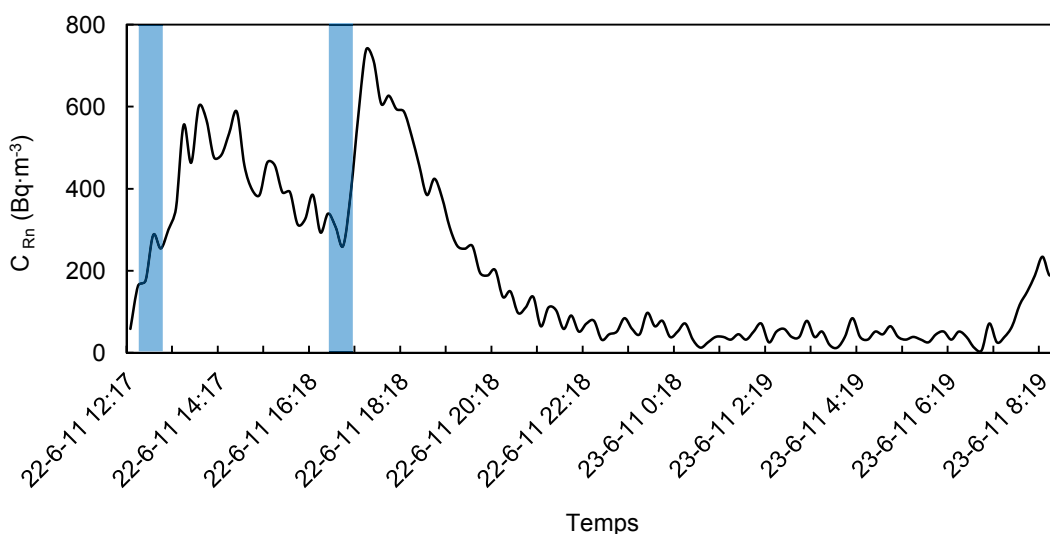


Figura 5.18. Evolució temporal de la C_{Rn} d'una dutxa de massatge termal mesurada amb un monitor RAD7. Les franques blaves corresponen a l'estona que duren els tractaments.

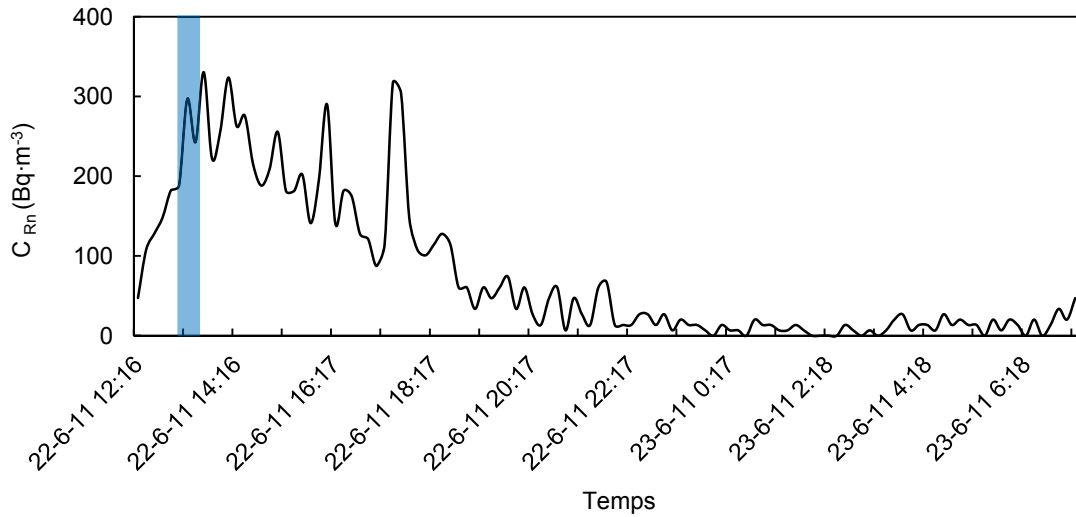


Figura 5.19. Evolució temporal de la C_{Rn} d'una dutxa de doll mesurada amb un monitor RAD7. Les franja blaves correspon a l'estona que dura el tractament.

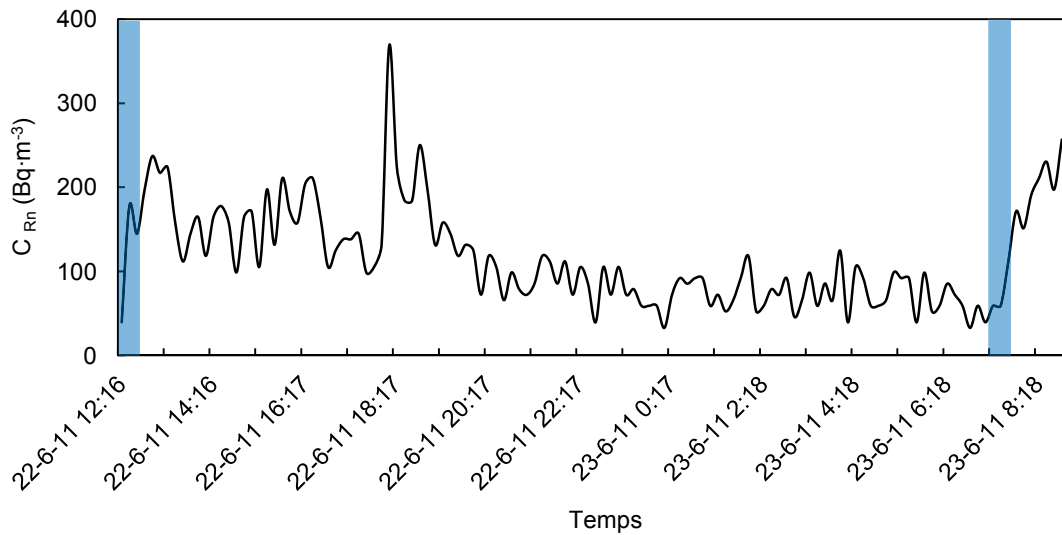


Figura 5.20. Evolució temporal de la C_{Rn} d'un bany termal mesurada amb un monitor RAD7. Les franjes blaves corresponen a l'estona que duren els tractaments.

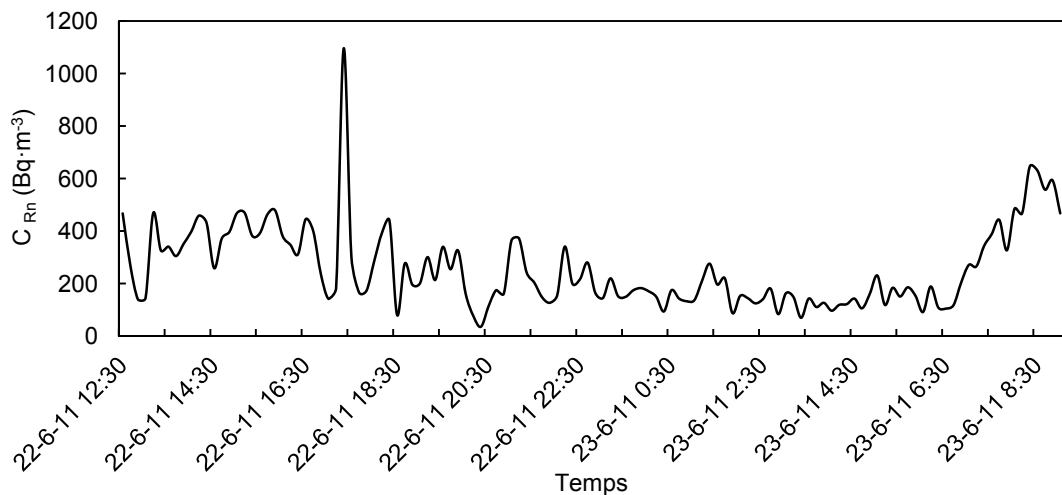


Figura 5.21. Evolució temporal de la C_{Rn} del Spa mesurada amb el monitor ATMOS.

També es recullen mostres de 250 ml d'aigua per determinar la C_{Rn} dissolt. Els punts de mostreig són les sales on es troben les surgències que proporcionen l'aigua termal al balneari (surgència vella i surgència nova) i dues sales que utilitzen aquesta aigua: Spa i Bany termal (**Taula 5.11**). La C_{Rn} a l'aigua de les sales és significativament inferior a la de les surgències degut a que s'utilitza barrejada amb aigua prèviament refredada en uns dipòsits, on es desgasifica i desintegra part del radó dissolt en ella. En el punt de surgència l'aigua té una temperatura de 44 °C i a la sala de tractament és d'uns 36 °C, perquè els pacients puguin suportar-la.

Taula 5.11. Concentració de radó a les aigües del balneari 2 entre els dies 22 i 23 de juny de 2011.

Punt de mostreig	Data i hora mostreig	C_{Rn} (Bq·l ⁻¹)	Detector
Surgència nova	23/6/2011 11:00	128 ± 7	RAD7
Surgència vella	22/6/2011 20:40	82 ± 4	RAD7
Termes – Bany termal	23/6/2011 9:20	29 ± 2	RAD7
Spa – Coll de cigne	23/6/2011 9:20	11 ± 1	RAD7

També es realitzen mesures integrades amb detectors de Makrofol a 22 punts de l'interior del balneari (**Taula 5.12**). En els ambients humits es protegeix el detector amb la bossa de polietilè (Zipdar), considerada la més adequada per les mesures integrades de llarga durada en les condicions ambientals d'un balneari, tal com es comenta a l'apartat 3.3.4.2

Taula 5.12. Valor mig de la C_{Rn} a l'aire de diferents dependències del balneari 2 mesurat amb detectors de Makrofol entre els mesos de juny a octubre de 2011.

Codi sala	Nom sala	²²² Rn (Bq·m ⁻³)	Durada mesura
1	Vaporari (en ús)	(1.3 ± 0.2)·10 ³	11 dies (juny)
		(1.4 ± 0.2)·10 ³	21 dies (set.- oct.)
2	Surgència vella	(1.4 ± 0.2)·10 ³	11 dies (juny)
		(1.1 ± 0.1)·10 ³	21 dies (set.- oct.)
3	Galeria surgència vella	171 ± 78	11 dies (juny)
		101 ± 44	21 dies (set.- oct.)
4	Surgència nova	824 ± 124	21 dies (set.- oct.)
5	Galeria surgència nova	61 ± 73	21 dies (set.- oct.)
6	Despatx de direcció	577 ± 60	4 mesos
7	Sala d'espera termes	36 ± 14	4 mesos
8	Galeria principal termes	140 ± 22	4 mesos
9	Galeria principal termes	73 ± 17	4 mesos
10	Massatge termal 1	115 ± 20	4 mesos
11	Massatge termal 2	67 ± 16	4 mesos
12	Dutxa cervical 1	135 ± 21	4 mesos
13	Dutxa cervical 2	141 ± 22	4 mesos
14	Bany termal petit	113 ± 20	4 mesos
15	Bany termal gran	90 ± 18	4 mesos
16	Dutxa circular i de doll 1	130 ± 21	4 mesos
17	Dutxa circular i de doll 2	140 ± 22	4 mesos
18	Galeria termes	116 ± 20	4 mesos
19	Vaporari (ventilat)	140 ± 22	4 mesos
20	Spa – Dutxes	132 ± 21	4 mesos
21	Spa – Piscines 1	248 ± 31	4 mesos
22	Spa – Piscines 2	224 ± 29	4 mesos

A partir dels resultats de les mesures puntuals amb els detectors actius es fa una estimació del temps d'exposició dels detectors passius. El temps d'exposició oscil·la entre els 11 dies i els quatre mesos (de juny a octubre de 2011). Les dependències que presenten uns valors mitjos de la C_{Rn} superiors als $600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ són les sales 1, 2 i 4, és a dir, els dos punts de surgència de les aigües termals i a la sala del vaporari, on es poden arribar a superar els $7 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ de forma puntual. A cap d'aquestes 3 sales el personal hi roman de forma continuada durant la seva jornada laboral i el temps de permanència no és superior a la mitja hora diària. Suposant que un treballador està diàriament 30 minuts a dins del vaporari amb una C_{Rn} de $7 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$, el valor mig anual de la concentració al que està exposat realment és d'uns $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Com que tampoc hi ha cap client que faci un tractament diari en aquesta sala al llarg de tot un any, es pot concloure que, els nivells de radó que s'assoleixen a l'interior d'aquest establiment termal no representen un risc pels seus treballadors ni pels membres del públic en general.

5.3. La marjal de Penyíscola

La marjal de Penyíscola forma part de la comarca del Baix Maestrat, situada a la part septentrional del litoral mediterrani de la Comunitat Valenciana. Una marjal és una zona humida litoral on conflueixen aigües de diferent procedència i el funcionament de la qual ve determinat pels fluxos hídrics que hi intervenen. Es caracteritza per ser un dels ecosistemes més productius del planeta, ja que sustenta una gran diversitat d'espècies d'animals i de plantes. En els països mediterranis s'ha produït una important pèrdua i degradació d'aquest tipus de zona humida. La principal causa ha estat la forta pressió urbanística a què estan sotmeses, ja que les planes litorals, on estan situades, allotgen la major part de la població de la regió. L'alta densitat d'habitants és responsable de la contaminació que pateixen els aqüífers així com de l'abús de captacions hídriques que provoquen importants descensos del nivell de l'aigua dolça, que faciliten la intrusió marina i la conseqüent salinització de l'aqüífer (Domenech, 2003). La marjal de Penyíscola té una extensió de 1.05 km^2 , on s'inclou íntegrament la zona humida i una franja de protecció mediambiental formada per alguns cultius. En aquesta superfície es diferencien tres canals principals (Sèquia Templera, Sèquia del Rei i Sèquia de la Sangonera) que conflueixen abans de desembocar al mar.

Durant el 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) es va realitzar un estudi preliminar de la distribució dels radionúclids naturals en el sòl de la marjal de Penyíscola (Rodellas, 2008). En aquest estudi es va observar que el radi (^{226}Ra) presentava una gran variabilitat espacial amb un ampli interval de concentracions en el sòl, $[20-780] \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, comparat amb els valors mitjos mundials (Taula 4.16). Aquestes elevades concentracions específiques dels sòls s'atribueixen a dos factors combinats: la presència d'una zona minera rica en altes concentracions d'urani i l'acumulació del radi en el procés de formació de la terra rosa (sòl humit ric en òxids de ferro i alumini). Les concentracions d'urani (^{238}U) observades en els sòls de la marjal són massa reduïdes per generar les concentracions de radi trobades. La hipòtesi més viable es basaria en un

transport selectiu del ^{226}Ra en detriment del ^{238}U , derivat de les diferències en l'afinitat d'aquests radionúclids per la caolinita (argila blanca composta de silicat d'alumini hidratat format per la descomposició de feldespat i altres silicats d'alumini). Les diferències entre la salinitat de l'aigua subterrània que entra a la marjal i l'aigua que desemboca al mar procedent d'aquesta, evidencien una forta salinització de l'aigua de la marjal. Les concentracions de tots els isòtops de radi a l'aigua de la marjal són elevades, especialment les de ^{226}Ra , $[2-3097]\cdot 10^{-3} \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$, així com també ho són les concentracions de radó, $[0.7-616] \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$.

Aquests resultats motiven la realització d'un estudi per analitzar els nivells de radó que poden estar presents a l'aire exterior, a l'interior de recintes tancats i als sòls de la marjal de Penyíscola per identificar els llocs que poden presentar un risc radiològic significatiu derivat de la inhalació del gas radó i els seus descendents per part de la població, tant pels treballadors com pel públic en general (Cherta, 2008; Moreno et al., 2009b). Les mesures es realitzen entre els anys 2007 i 2008. En total s'analitza un conjunt de 34 punts (15 exteriors, 16 interiors i 3 sòls) distribuïts per tota la marjal (**Figura 5.22**). Aquests punts s'escullen a partir dels valors de radi obtinguts a l'estudi previ (Rodellas, 2008). Els recintes tancats seleccionats són locals públics i privats on es desenvolupa algun tipus d'activitat laboral o que acullen a membres del públic. En tots aquests punts es realitzen mesures integrades de la C_{Rn} en l'aire amb els detectors de Makrofol durant dos períodes de mesura d'entre 1 i 5 mesos. El segon període de mesura s'inicia al mateix temps que el primer i té uns dos mesos més de durada. Aquesta metodologia permet assegurar la mesura, en cas de que els detectors de primera exposició tinguin una densitat de traces inferior del límit inferior de detecció (L_D). En alguns punts (2 exteriors i 12 interiors) es realitzen mesures puntuals i en continu de la C_{Rn} en l'aire amb els monitors RAD7. També es seleccionen dos punts del sòl situats a una zona amb una alta concentració de ^{226}Ra i un tercer a una zona amb poca concentració d'aquest radionúclid per realitzar mesures integrades de la C_{Rn} en el sòl mitjançant detectors de LR115.

Els resultats de les mesures integrades de la C_{Rn} a l'aire exterior (**Taula 5.13**) presenten un interval de valors entre $9 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i $162 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, amb una mitjana geomètrica de $(42 \pm 2) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, pel primer període (Gener – Març del 2008), i de $(26 \pm 2) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, pel segon període (Gener – Maig del 2008). Els valors més elevats es registren en els punts P14 i P28, uns punts molt pròxims a canals i salts d'aigua, on es produeix una important desgasificació del radó. Si no es tenen en compte aquests dos punts, aleshores les mitjanes geomètriques són de $(36 \pm 1) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i $(24 \pm 2) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivament. Els valors del segon període de mesura són una mica més baixos que els del primer, però en general, coincideixen dins l'interval d'incertesa. Els valors de la C_{Rn} a l'aire exterior són superiors al valor mig mundial de la C_{Rn} ($10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$). La principal causa de la presència de radó a l'aire són les característiques geològiques de la marjal de Penyíscola, amb elevades concentracions de radi al sòl. Com que els valors més elevats de radó es registren a llocs pròxims a canals o salts d'aigua, això suggereix que l'elevada C_{Rn} no prové únicament de l'exhalació del sòl sinó també de l'aigua de la marjal, amb elevats nivells de radi i radó, tal i com s'observa a la **Taula 5.13**. Cal tenir present que la C_{Rn} en aire és el valor mig durant un període d'alguns mesos, mentre que els nivells de radi i radó en l'aigua s'obtenen a partir de mesures puntuals.

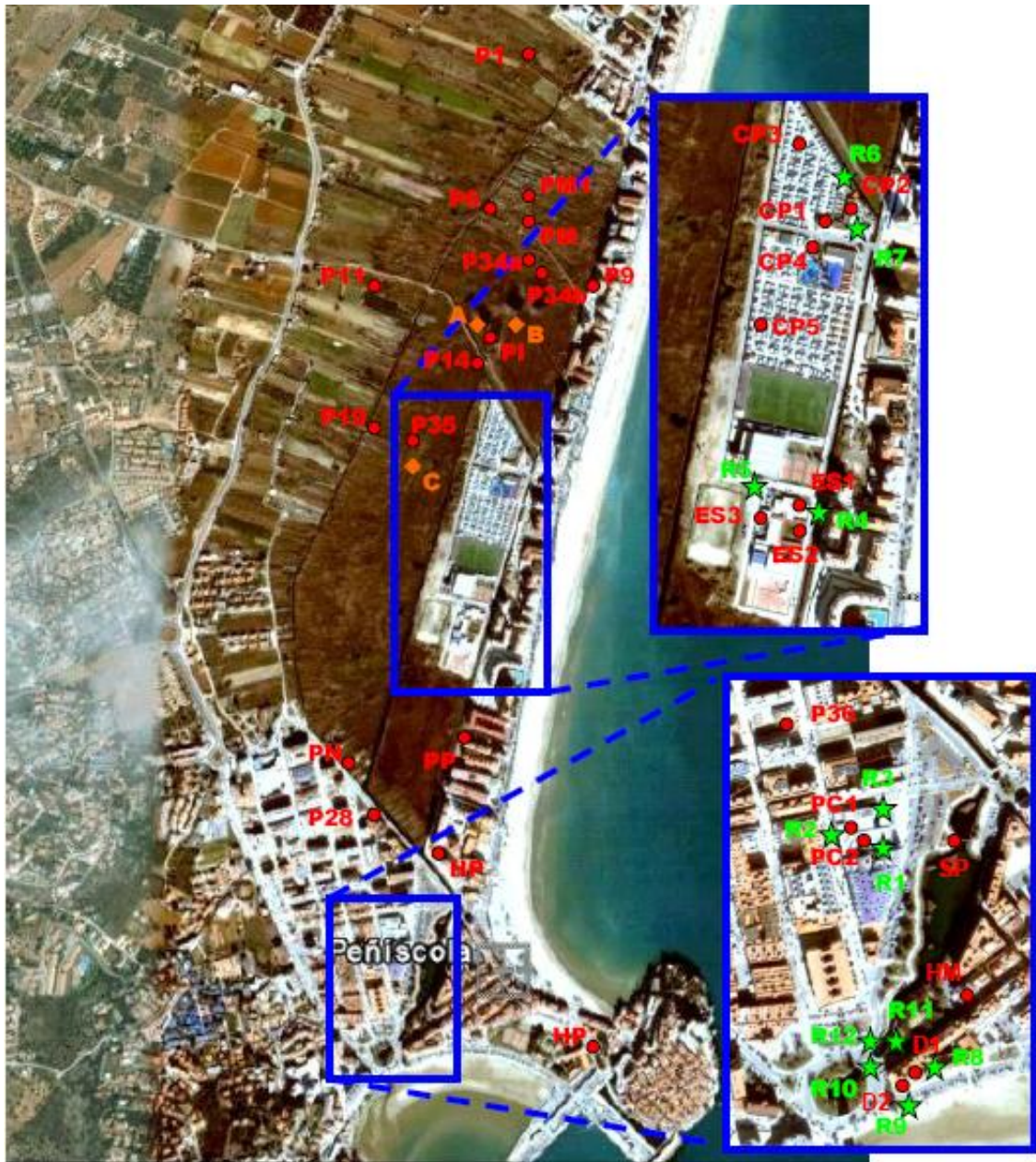


Figura 5.22. Distribució dels punts de mesura del gas radó a la marjal de Peníscola: Mesures integrades a l'aire (●), mesures en continu o puntuals a l'aire (★) i mesures integrades al sòl (◆) (Cherta, 2008).

Dues mesures en continu de la C_{Rn} a l'aire exterior, en els punts A i B (Figura 5.22), durant 9 h d'un dia de tardor de 2007 mostren la típica fluctuació dia/nit (Figura 5.23). Aquesta fluctuació és deguda als canvis de les condicions meteorològiques durant les hores posteriors a la posta de sol, és a dir, el canvi a la temperatura de l'aire provoca una diferència de pressions a la interfase sòl-aire que afavoreix l'exhalació del radó. Això provoca que la C_{Rn} experimenti una variació d'un factor 5, arribant als $50 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ en menys de 30 minuts al punt A. El valor mig de les dues mesures en continu és de $20 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, amb una desviació estàndard de $18 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, i és consistent amb el valor mig trobat amb el detector de Makrofol en el punt més proper (P1).

Taula 5.13. Valors de la C_{Rn} a l'aire exterior de la marjal de Penyíscola mesurats amb detectors de Makrofol durant alguns mesos del 2008, juntament amb els nivells de radó i radi a l'aigua obtinguts a l'estudi previ (Rodellas, 2008).

Codi	$C^{222}Rn$ aire ($Bq \cdot m^{-3}$)		$C^{222}Rn$ aigua ($Bq \cdot l^{-1}$)	$C^{226}Ra$ aigua $\cdot 10^{-3}$ ($Bq \cdot l^{-1}$)
	Gen. – Mar. 08	Gen. – Mai. 08		
P1	27 ± 7	25 ± 6	-	-
P6	63 ± 11	-	-	-
P9	30 ± 7	20 ± 6	106 ± 2	249 ± 2
P11	37 ± 8	38 ± 8	-	-
P14	79 ± 12	-	526 ± 5	1179 ± 4
P19	57 ± 10	27 ± 7	163 ± 4	68 ± 2
P28	162 ± 19	69 ± 11	299 ± 9	432 ± 2
P34a	27 ± 7	9 ± 4	-	-
P35	39 ± 9	43 ± 8	-	-
CP5	33 ± 8	11 ± 5	-	-
HP	39 ± 9	17 ± 6	-	-
PI	34 ± 8	-	7.1 ± 0.3	828 ± 9
PM	-	39 ± 8	-	-
PN	15 ± 5	30 ± 7	-	-
PP	48 ± 9	38 ± 8	-	-

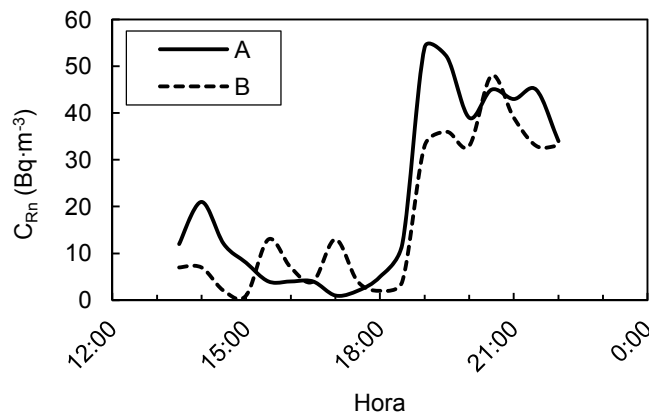


Figura 5.23. Variació temporal de la C_{Rn} als punts A i B el dia 4 de novembre de 2007.

Els nivells de radó a l'interior dels 16 recintes analitzats mitjançant detectors passius i actius apareixen a la **Taula 5.14**. En general les mesures puntuals i en continu de la C_{Rn} coincideixen amb els valors obtinguts amb les mesures integrades. La mitjana geomètrica obtinguda amb les mesures integrades, $(62 \pm 4) Bq \cdot m^{-3}$, és superior a la mitjana nacional, $(41 \pm 3) Bq \cdot m^{-3}$ (Quindós et al., 1991).

El recinte que presenta el valor mig de la C_{Rn} més elevat, $(2.9 \pm 0.3) kBq \cdot m^{-3}$, correspon a la depuradora municipal (D1), on es realitza el tractament primari de les aigües residuals de tota la població de Penyíscola. L'acumulació de gas radó en aquest recinte es pot veure afavorida per la poca ventilació de què disposa i pel fet que les aigües residuals estan en constant agitació durant tot el tractament, fins que són bombejades al mar a través d'un emissari. Com que es supera el nivell d'acció recomanat pel CSN (2012) pels llocs de treball, $600 Bq \cdot m^{-3}$, i seguint la metodologia descrita anteriorment, es realitza un estudi més detallat. Aquest estudi consisteix en realitzar noves mesures integrades i mesures en continu durant diferents estacions de l'any. Els resultats de les mesures integrades indiquen que el valor mig anual de la C_{Rn} és $(2.5 \pm 0.3) \cdot 10^3 Bq \cdot m^{-3}$ però els resultats de les

mesures en continu durant diversos dies d'hivern i d'estiu mostren dos comportaments diferents i unes fluctuacions diàries i estacionals importants (**Figura 5.24**). Durant els 3 dies d'hivern el nivell de radó es manté al voltant dels $2.8 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$, valor que coincideix amb el resultat de la mesura integrada durant 3 mesos, $(2.7 \pm 0.4) \cdot 10^3 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, però durant els 4 dies d'estiu els nivells fluctuen diàriament dins l'interval $[0.2 - 1.4] \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$. Amb les dades disponibles fins el moment aquest comportament pot explicar-se per la influència de la ventilació amb l'exterior i l'intercanvi d'aire amb les altres dependències de l'edifici, com s'ha observat en altres recintes (**UNSCEAR, 2000**). Durant els mesos més freds del any és habitual que l'intercanvi d'aire sigui baix o pràcticament nul i, per tant, la C_{Rn} té valors alts i presenta poques fluctuacions, en canvi, durant els mesos càlids s'acostuma a ventilar més i aleshores la C_{Rn} disminueix i pot experimentar majors fluctuacions diàries. El problema de l'acumulació durant els mesos freds pot resoldre's augmentant la ventilació del recinte amb un sistema d'extracció situat als punts de major desgasificació i, de fet, es té constància de que recentment ja s'ha aplicat aquest mètode de mitigació.

Són especialment rellevants les mesures puntuals realitzades durant el 23 de maig del 2008 a l'interior d'aquesta depuradora, on es van mesurar nivells de radó unes 150 vegades superiors al nivell d'acció recomanat. Aquesta important variació de les concentracions de radó s'ha associat a l'acció de les constructores d'edificis de la zona. A la major part de Penyíscola l'aigua residual té un únic sistema d'evacuació (excepte a les zones de recent urbanització), sense separació entre aigües fecals i aigües fluvials. Durant els processos de fonamentació és habitual que les màquines perforin el nivell freàtic inundant l'obra amb aigua de la marjal i aleshores l'extreuen mitjançant bombes que la retornen a l'aqüífer. Tot i això, es té constància de què durant el mes de maig del 2008 algunes d'aquestes obres van bombejar aigua freàtica directament al clavegueram municipal. Aquest fet va provocar que en tractar-se aquesta aigua a la depuradora es desgasifiqués el radó que portava dissolt i provoqués un augment significatiu de la concentració, amb el conseqüent increment del risc radiològic pels treballadors d'aquesta instal·lació. Una bona gestió del sistema de les aigües residuals és la solució a aquest altre problema.

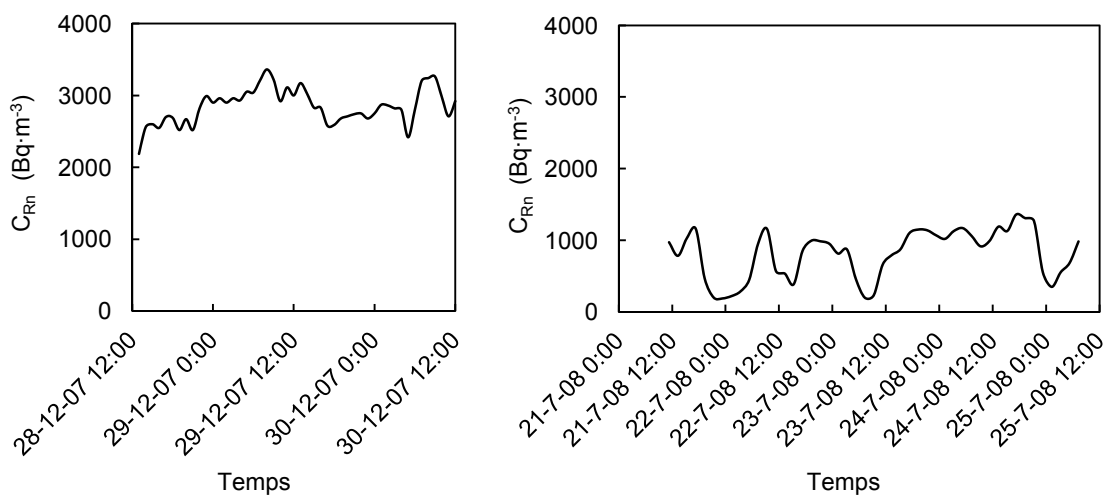


Figura 5.24. Evolució temporal de la C_{Rn} a la depuradora municipal de Penyíscola mesurada amb el monitor RAD7 durant dos períodes de mesura diferents (hivern del 2007 i estiu del 2008).

Taula 5.14. Valors de la C_{Rn} a l'aire dels recintes analitzats de la marjal de Penyíscola mesurats amb detectors passius i actius entre els anys 2007 i 2008.

Codi	Detectors de Makrofol		Monitors RAD7			
	Període mesura	C_{Rn} ($Bq \cdot m^{-3}$)	Període mesura	T (h)	C_{Rn} ($Bq \cdot m^{-3}$)	
					Valor mig	Interval
PA1	2 Mai/7 Jun 2007	165 ± 26	3 Mai 2007	3	71 ± 46	13 - 177
PA2	2 Mai/7 Jun 2007	≤ L_D				
	2 Mai/8 Ag 2007	≤ L_D				
P36	2 Mai/7 Jun 2007	≤ L_D				
	8 G/28 Mar 2008	30 ± 8				
	8 G/23 Mai 2008	45 ± 9				
D1	2 Mai/7 Jun 2007	$(2.9 \pm 0.3) \cdot 10^3$	28/30 D 2007	48	$(2.8 \pm 0.2) \cdot 10^3$	$(2.2 - 3.4) \cdot 10^3$
	2 Mai/8 Ag 2007	$(2.6 \pm 0.4) \cdot 10^3$	23 Mai 2008	2	$(6.4 \pm 1.2) \cdot 10^4$	$(4.6 - 7.1) \cdot 10^4$
	8 G/28 Mar 2008	$(2.7 \pm 0.4) \cdot 10^3$	6 Jun 2008	3	761 ± 97	567 - 872
	8 G/23 Mai 2008	$(1.7 \pm 0.2) \cdot 10^3$	21/25 Jul 2008	94	812 ± 11	$(0.2 - 1.4) \cdot 10^3$
D2	8 G/28 Mar 2008	341 ± 33	6 Jun 2008	3	48 ± 81	5 - 230
	8 G/23 Mai 2008	553 ± 46				
PC1	8 G/28 Mar 2008	37 ± 8	21 F/1 Mar 2008	216	42 ± 19	21 - 108
	8 G/24 Mai 2008	36 ± 8				
PC2	8 G/28 Mar 2008	61 ± 11	21 F/1 Mar 2008	216	47 ± 25	18 - 127
	8 G/24 Mai 2008	66 ± 10				
ES1	21 G/27 Mar 2008	56 ± 11	18/27 Mar 2008	214	24 ± 8	7 - 48
	21 G/19 Mai 2008	23 ± 7				
ES2	21 G/27 Mar 2008	52 ± 11	18/27 Mar 2008	214	14 ± 9	3 - 44
	21 G/19 Mai 2008	≤ L_D				
CP1	8 G/28 Mar 2008	23 ± 7				
	8 G/19 Mai 2008	24 ± 7				
CP2	8 G/28 Mar 2008	45 ± 9				
	8 G/19 Mai 2008	30 ± 7	19/23 Mai 2008	96	11 ± 8	1 - 34
CP3	8 G/28 Mar 2008	34 ± 8				
	8 G/19 Mai 2008	17 ± 6				
CP4	8 G/28 Mar 2008	49 ± 10				
	8 G/19 Mai 2008	36 ± 8				
FD	8 G/28 Mar 2008	103 ± 14				
	8 G/23 Mai 2008	321 ± 29				
HM	7 G/28 Mar 2008	37 ± 8				
	8 G/19 Mai 2008	35 ± 8				
PM1	7 G/28 Mar 2008	65 ± 11				
	8 G/24 Mai 2008	46 ± 9				
R1			21 F/1 Mar 2008	120	22 ± 8	4 - 41
R11			27 Jun 2008	2	6 ± 2	0 - 10
R12			24/25 Jul 2008	20	$(3.6 \pm 1.4) \cdot 10^2$	156 - 528
R10			27 Jun 2008	3	34 ± 7	23 - 41
			21/24 Jul 2008	70	35 ± 7	22 - 52

Els nivells de radó en els tres punts del sòl de la marjal (A, B i C) (**Taula 5.15**) presenten un interval de valors entre $0.4 Bq \cdot m^{-3}$ i $11.1 Bq \cdot m^{-3}$. Els punts A i B es van situar a una zona amb una concentració de ^{226}Ra de $(529 \pm 4) Bq \cdot kg^{-1}$ i el tercer a una zona amb una concentració inferior d'aquest radionúclid, $(75 \pm 4) Bq \cdot kg^{-1}$ (Rodellas, 2008). Els nivells de radó més elevats s'obtenen durant els mesos càlids, tal i com és habitual trobar en el sòl (Font et al., 2008b; Washington i Rose, 1990) i a cavitats o recintes subterranis (Font et al., 2008a; Li et al., 2006). Una possible explicació és l'efecte de la humitat del sòl ja que l'augment del contingut d'aigua durant els mesos més humits, tot i fer augmentar l'emanació, fa més difícil el transport del radó, mentre que la reducció del contingut d'aigua durant els mesos més càlids afavoreix el transport del radó. A més, aquests detectors han estat instal·lats a uns punts on el nivell freàtic està molt a prop de la superfície i en algun

moment fins i tot han quedat coberts d'aigua. Si el filtre està saturat, el coeficient de difusió és fa molt més petit i, aleshores, la C_{Rn} que s'assoleix dins la cambra de difusió és bastant més petita que la que s'obtingria amb el filtre sec. Aquests arguments explicarien perquè els valors obtinguts no són especialment elevats, en general, i perquè els nivells de radó obtinguts als punts A i C durant la tardor de 2008 són tan baixos en comparació amb la mesura d'estiu. Si es calcula el valor mig de les dues mesures a cada punt, donant major pes a la mesura més representativa (de major durada), s'observa que els punts A i B presenten uns nivells de radó més elevats que el C i, per tant, s'observa una certa relació amb els nivells de radi obtinguts a aquestes zones.

Taula 5.15. Valors de la C_{Rn} a tres punts del sòl de la marjal de Penyíscola mesurats amb detectors de LR115 durant dues exposicions del 2008.

Codi	Període de mesura	C_{Rn} sòl (kBq·m ⁻³)	Valor mig C_{Rn} sòl (kBq·m ⁻³)
A	20 / 27 Juliol 2008	11.1 ± 2.5	2.4 ± 0.4
	10 Set. / 19 Des. 2008	1.7 ± 0.4	
B	20 / 27 Juliol 2008	7.2 ± 1.7	3.4 ± 0.7
	10 Set. 2008 / 5 Mar. 2009	3.3 ± 0.7	
C	20 / 27 Juliol 2008	7.9 ± 2.0	0.8 ± 0.1
	10 Set. / 19 Des. 2008	0.4 ± 0.1	

5.4. Discussió

La identificació d'activitats laborals subterrànies amb nivells elevats de radó a Catalunya s'aconsegueix gràcies a l'estratègia seguida a la campanya de mesura entre els anys 2004 – 2007, consistent en realitzar mesures sistemàtiques al màxim nombre de llocs de treball subterrànies, independentment de la composició geològica del terreny on es troben.

Les mesures sistemàtiques no es poden basar exclusivament en mesures puntuals de la C_{Rn} , sinó en la correcta combinació de mesures puntuals, integrades i en continu. Amb les primeres només es fa una estimació dels nivells de radó i dels temps que es deixen exposats els detectors passius, que fins i tot en algun cas pot no ser del tot encertada, tal i com s'ha observat amb la mina 7. Precisament, en aquesta mina s'han trobat valors molt baixos en fer la mesura de radó puntual i, en canvi, en exposar els detectors passius de Makrofol, aquests han presentat saturació de traces degut a l'alta exposició de radó a la que han estat sotmesos. Les mesures en continu durant diversos dies o setmanes, de períodes laborals durant diferents estacions de l'any són les que acaben de determinar si realment existeix un risc radiològic significatiu pels treballadors d'aquestes activitats. Els estudis detallats en les dues activitats laborals identificades amb valors mitjos elevats de la C_{Rn} posen de manifest que actualment no existeix aquest risc pels seus treballadors.

Tal i com és d'esperar, les activitats laborals que tenen galeries subterrànies sense ventilació natural o forçada presenten les concentracions de radó més elevades als punts de mesura situats a major profunditat o major distància respecte les portes d'accés. Les dimensions d'aquestes galeries també juguen un paper fonamental, ja que aquelles que presenten un major quocient entre la seva superfície de paret i el volum d'aire interior són

les que concentren uns valors més elevats de radó, especialment si la seva ventilació és escassa o nul·la.

A les dues mines estudiades en detall s'observen importants variacions diàries i estacionals dels nivells de radó, el comportament de les quals recorda a les variacions observades a l'aire dels bufadors. Les causes d'aquestes variacions també podrien ser degudes als gradients de pressió provocats per les diferències de temperatura entre l'exterior i l'interior d'aquestes galeries subterrànies. Disposar de l'anàlisi conjunt amb les dades meteorològiques corresponents a les dates de mesura ha de permetre confirmar aquesta hipòtesis.

En els dos balnearis analitzats s'observa que l'ús de les aigües termals fa incrementar de forma significativa els nivells de radó a diferents sales de tractament. Aquest tipus de lloc de treball es caracteritza per unes condicions ambientals especialment extremes per la mesura del gas radó, degut a les temperatures i humitats elevades. Un dels establiments també serveix de laboratori de proves per posar a punt la metodologia que permet realitzar mesures en aquestes condicions extremes. A l'altre balneari es realitzen les mesures integrades directament amb els detectors de radó protegits per les membranes més adequades per la mesura.

En els dos escenaris de mesura d'aquest capítol, la marjal de Penyíscola i els balnearis, a part dels nivells de radó a l'aire també s'analitzen les concentracions de radó dissolt a les aigües. Els resultats obtinguts posen de manifest la importància de l'elecció del lloc de mostreig i del tipus de flux d'aigua en aquest punt.

En les sales de tractament dels balnearis, la inhalació d'uns nivells de radó més o menys elevats depèn del tipus d'ús que es fa de l'aigua i dels temps que transcorre des de que surt del sòl fins que arriba a la sala. Les sales que presenten els nivells de radó més elevats a l'aire són les que tenen una major desgasificació del gas radó dissolt a l'aigua utilitzada. En general, aquestes sales presenten una o més d'una de les següents característiques:

- Utilitzen l'aigua que procedeix directament de la surgència, sense haver passat prèviament per cap dipòsit, que l'hagi tingut emmagatzemada durant algunes hores, ni per cap sistema de tractament que l'hagi pogut agitar excessivament.
- Renoven l'aigua contínuament o a cada nova sessió de tractament.
- Converteixen els fluxos laminars de les canonades en fluxos turbulents (dutxes i dolls) o acumulen l'aigua per sotmetre-la a una intensa agitació mitjançant aire a pressió (jacuzzis i banyeres d'hidromassatges).
- Augmenten la temperatura de l'aigua per incrementar el nivell d'humitat (saunes i vaporaris).
- Són sales de reduïdes dimensions i poc ventilades, almenys durant l'estona que dura el tractament.

En aquest tipus de sales els nivells de radó poden experimentar fluctuacions molt importants depenent dels ritmes d'ús de les aigües i de les taxes de ventilació. Aquelles sales que serveixen per fer tractaments individualitzats durant breus períodes de temps, per exemple, de mitja hora, acostumen a presentar els nivells més elevats de radó a l'aire durant els instants posteriors a la finalització del tractament.

Cal tenir un coneixement molt exacte de les funcions de tot el personal que treballa a l'interior d'un establiment termal per poder determinar amb exactitud els nivells de radó a que estan exposats durant la seva jornada laboral. Per exemple, es pot donar la situació favorable de que en finalitzar un tractament determinat, el personal que l'ha portat a terme i el client ja surten immediatament de la sala i no s'exposen als nivells de radó més elevats. També es pot donar la situació desfavorable de que aquella mateixa sala s'utilitza contínuament i que el mateix treballador o un altre hi realitza una nova sessió de tractament o fins i tot, que hi accedeixi el personal de neteja, sense haver ventilat gens la sala i, aleshores, l'exposició d'aquestes persones sigui molt més significativa.

Els valors mitjos de la C_{Rn} a que estan exposats els treballadors dels dos establiments termals analitzats no representen un risc radiològic significatiu.

Els nivells de radó obtinguts a l'aire exterior de la marjal de Penyíscola són elevats degut a les altes concentracions de radi i radó existents en el sòl i en l'aigua de la marjal. Els punts amb els nivells més elevats estan situats al costat dels canals i es caracteritzen perquè l'aigua presenta un flux turbulent, provocant que la desgasificació del radó dissolt sigui més important.

Els 16 llocs de treball de la ciutat de Penyíscola que s'analitzen presenten, en general, unes concentracions de radó inferiors al nivell de protecció pels treballadors recomanat pel CSN ($600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$). Només un edifici, la depuradora municipal, presenta nivells de radó molt més elevats que aquest valor. Això es degut al fet de tractar les aigües residuals de la ciutat barrejades amb aigües de la marjal. Les mesures en continu a l'aire de l'interior d'aquest lloc de treball mostren importants variacions diàries i estacionals dels nivells de radó, provocats per les variacions de les taxes de ventilació del recinte al llarg dels dies i les estacions de l'any i per les incorporacions incontrolades de grans volums d'aigua de la marjal en el sistema de clavegueram. El Laboratori de Radiactivitat Ambiental de la Universitat de València l'any 2010 inicia un estudi en aquesta depuradora per tal de confirmar els resultats obtinguts per la UFR de la UAB. Segons un informe emès per la Subsecretaria de la "Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge" s'adopten mesures correctores per tal disminuir el risc radiològic dels treballadors d'aquest recinte, entre les quals hi ha l'augment de la ventilació, incorporant un sistema d'extracció d'aire que es posa en funcionament abans de l'entrada dels treballadors, i es comprova que els nivells de radó disminueixen de forma significativa (Maura, 2010).

6. Conclusions i perspectives de futur

En els capítols 3, 4 i 5 es presenten els diferents estudis realitzats al llarg dels últims vuit anys i a continuació es fa un recull de les principals conclusions i les perspectives de futur que ofereixen els resultats i la discussió de tota aquesta recerca.

6.1. Conclusions

Les principals conclusions del treball es presenten agrupades segons els capítol del qual es desprenen.

6.1.1. Instrumentació

- La UFR de la UAB ha adquirit una sèrie d'equips de detecció del gas radó, la resposta dels quals ha estat caracteritzada i optimitzada per poder utilitzar-los en diferents situacions
- Els calibratges i la participació en intercomparacions esdevenen essencials per disposar d'un bon control de qualitat extern de les mesures realitzades pels equips de la UFR.

- Els resultats de les intercomparacions dels detectors passius de radó en què ha participat la UFR de la UAB realitzades en dos centres de referència (HPA i INTE) han posat de manifest una diferència del 24 % entre els factors de calibratge obtinguts en ambdós centres pels detectors de Makrofol. Aquesta diferència pot ser deguda a fluctuacions del mètode de mesura de la UFR (degudes a possibles canvis en les condicions de revelatge, a lots de materials diferents, etc.) així com també a una discrepància entre els equips dels dos centres de referència.
- La comparació dels valors de la C_{Rn} obtinguda amb detectors passius de la UC i la UAB realitzada:
 - En la cambra de radó de l'INTE, ha mostrat una diferència del 12 % entre els resultats dels detectors dels dos centres (i del 30 % dels resultats de la UAB respecte el valor de referència de l'INTE).
 - En el mòdul experimental de Saelices el Chico, ha mostrat una diferència del 35 %.
 - En la campanya de mesura en habitatges, ha mostrat una diferència del 46 %.

Aquestes discrepàncies posen de manifest la gran importància de tenir un bon control de qualitat intern i uns procediments ben establerts pels diferents tipus de detectors.

- Les instruccions que es donen als col·laboradors d'una campanya de mesura i els procediments 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 una campanya.
- Les exposicions de detectors actius i passius a l'interior de la cambra de radó de la UFG de la UAB permeten realitzar un control de qualitat intern realitzant comparacions de detectors actius i passius, exposant detectors passius de control i analitzant membranes de polietilè.
- Els detectors de Makrofol exposats a les condicions ambientals extremes de la Península Antàrtica han mostrat deteriorament en els filtres de fibra de vidre i en les làmines de Mylar del Makrofol. Els exposats amb filtres de polietilè també han presentat el mateix deteriorament, per tant, s'ha vist la necessitat d'utilitzar un altre tipus de configuració de membrana de polietilè en forma de bossa impermeable a la humitat.
- Amb exposicions de curta durada (22 h) s'ha observat la influència de diferents membranes de polietilè sobre la resposta dels detectors de Makrofol degut al fet de 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 de difusió són diferents.

- Les exposicions dels detectors passius de radó a la cambra de referència de l'INTE en condicions normals (20 °C de temperatura i 45 % d'humitat relativa) i amb diferents configuracions de membrana de polietilè han mostrat que:
 - La influència de la membrana de polietilè depèn del volum de la cambra de difusió. Concretament les respostes dels Electrets amb cambres H i dels detectors de LR115 són les que s'han vist més influenciades per les membranes de polietilè i, per tant, requereixen de factors correctors. Per altra banda, en el cas dels detectors amb cambres petites, com els detectors de Makrofol, CR-39 i Electrets amb cambres S, la influència de la membrana ha quedat emmascarada per la dispersió dels resultats.
 - Entre els detectors amb la mateixa estadística en una mateixa exposició, els que han presentat major dispersió de resultats són els detectors de LR115.
 - Els detectors de CR-39, no s'han analitzat en els laboratoris de la UFR de la UAB, però s'ha vist que cal ventilar-los bé o evitar enviar-los tancats dins una bossa perquè el radó absorbit per la cambra de difusió no segueixi exposant els detectors durant el transport.
- Les exposicions dels detectors passius de radó a la cambra de referència de l'INTE en condicions ambientals extremes (fins a 30 °C de temperatura i 90 % d'humitat relativa) han mostrat que:
 - Degut a la curta durada de les exposicions realitzades (≤ 50 h, de les quals només 4 h eren a una humitat ≥ 85 %), els detectors passius exposats sense membranes de polietilè no presenten l'efecte de la humitat, és a dir, no s'han observat ni filtres de fibra de vidre inflats ni làmines de Mylar deteriorades, pel cas dels detectors de Makrofol.
 - Els detectors passius exposats amb membranes de polietilè tampoc mostren l'efecte de la humitat i la influència de la membrana és equivalent a la de les exposicions en condicions normals. Per tant, els detectors amb cambres petites no requereixen factors correctors per unes exposicions humides tan curtes.
- La utilització de membranes de polietilè per evitar l'efecte de la humitat requereix de nous procediments, especialment per exposicions curtes.
- 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 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 dues de les membranes de polietilè utilitzades, de $(33 \pm 2) \mu\text{m}$ i $(51 \pm 2) \mu\text{m}$ de gruix, a l'hora d'evitar el deteriorament provocat per la humitat.
- La membrana de polietilè Tyveck, tot i ser la més gruixuda que les altres dues membranes analitzades, $(115 \pm 6) \mu\text{m}$, no és eficaç per exposicions de detectors passius de radó de durada superior als 4 dies. Això és degut a que el vapor d'aigua travessa més ràpidament la seva textura fibrosa que una làmina de polietilè tres vegades més prima.
- De les diferents membranes de polietilè analitzades per evitar l'efecte de la humitat sobre la resposta dels detectors de Makrofol s'ha escollit la bossa Zipdar, de $(51 \pm 2) \mu\text{m}$ de gruix, per ser la més impermeable al vapor d'aigua per exposicions fins els 4 mesos. Aquesta membrana:
 - presenta un temps de retard $\tau_M = (5.0 \pm 0.6) \text{ h}$ i un temps $\tau = (4.8 \pm 0.5) \text{ h}$,
 - per minimitzar la diferència de concentracions entre l'exterior i l'interior de la cambra de difusió d'un detector s'ha d'aplicar un factor de correcció $\tau_M / \tau = 1.04 \pm 0.12$, i
 - perquè la influència de no tenir en compte el temps transcorregut entre la finalització de l'exposició i l'obertura de la bossa sigui inferior al 10 % l'exposició ha de tenir una durada superior a les 53 h.
- L'adaptació del model RAGENA al mòdul experimental de Saelices el Chico sota condicions estacionàries permet explicar els mecanismes d'entrada del radó dins el mòdul i als nivells de radó obtinguts abans de dur a terme mesures de mitigació. El principal mecanisme d'entrada 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.
- Sota condicions dinàmiques, 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.
- Els resultats dinàmics es poden explicar amb: (i) una entrada per difusió dominant i sostinguda en el temps, (ii) una altra entrada advectiona 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 advectiona de radó important deguda a les variacions de pressió atmosfèrica.

- S'ha dut a terme una modelització del temps de retard que triga una variació de la pressió atmosfèrica en propagar-se pel sòl fins a sota del mòdul i el millor ajust dels paràmetres s'obté amb un temps de retard de 0.77 h.

6.1.2. La zona volcànica de la Garrotxa i la falla d'Amer

- Les mesures realitzades en diferents medis de la zona volcànica de la Garrotxa i rodalies (aire dels recintes tancats, aire dels bufadors, aigües subterrànies i materials del sòl), han permès ampliar el coneixement radiològic d'aquesta zona volcànica.
- La zona volcànica de la Garrotxa, per les seves característiques geològiques i la presència d'una falla que encara pot ser activa, es pot identificar pel potencial que tenen els seus recintes tancats (especialment plantes baixes i soterranis) a presentar uns nivells de radó, mitja geomètrica de $(63 \pm 2) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, que són superiors al valor mig nacional $(41 \pm 3) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i per tenir una variació estacional diferent de la que és habitual en altres zones del territori: valors més elevats a l'estiu que a l'hivern. Aquests nivells però no representen un risc significatiu per la població.
- La mitjana geomètrica de les concentracions de radó obtingudes en els edificis construïts sobre materials volcànics és més elevada, $(72 \pm 3) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, que l'obtinguda en els recintes sobre materials no volcànics, $(49 \pm 2) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.
- Les característiques dels subsòls volcànics (materials porosos, presència de fissures i fractures, diferents capes de materials de permeabilitats variables, etc.) faciliten el transport del gas radó fins als recintes que presenten els nivells de radó més elevats.
- La variació estacional anòmla dels valors de la C_{Rn} obtinguda en general pels recintes construïts sobre materials volcànics es pot explicar amb l'existència de fluxos d'aire convectius entre el sòl i l'interior de recintes.
- L'origen del radó es pot trobar en una combinació del propis sòls volcànics, dels substrats inferiors més rics en radi (materials granítics) i dels nivells inferiors de l'escorça (hipòtesis de la desgasificació del mantell).
- L'estudi detallat d'un recinte amb un bufador en el seu interior ha permès constatar la dependència dels nivells de radó i els fluxos d'aire amb la diferència de temperatures entre l'aire exterior i l'aire del sòl.
- A partir dels resultats de les mesures de radó a l'interior de recintes no s'ha observat un efecte clar de la presència de la falla d'Amer. En canvi, amb les

mesures realitzades directament en el sòl del damunt d'aquesta falla s'ha pogut observar la influència en els nivells de radó, toró i CO₂.

- Els valors de les mesures en continu de la C_{Rn} en el sòl d'Amer mostren un clar efecte estacional, amb els valors més elevats durant l'estiu, fins a 140 kBq·m⁻³. Aquests resultats estan en acord amb el comportament estacional dels nivells de radó en els materials del sòl més porosos i fracturats, com s'observa amb els materials volcànics.
- Les aigües subterrànies de la zona volcànica de la Garrotxa presenten uns valors baixos de la C_{Rn} , (11.4 ± 0.8) Bq·l⁻¹. de valor mig, que no representen cap risc per les persones que les utilitzen.
- No s'observen variacions estacionals molt significatives de la C_{Rn} dissolt a les aigües subterrànies de la zona volcànica de la Garrotxa ni una clara influència del tipus de material de l'aqüífer.
- S'observa una possible influència de les característiques del flux d'aigua en els nivells de radó dissolts a les aigües subterrànies de la zona volcànica de la Garrotxa. Les aigües amb fluxos locals, en general, presenten valors baixos, mentre que les aigües amb fluxos regionals presenten els nivells de radó més elevats
- Els nivells més elevats de les aigües subterrànies de la zona volcànica de la Garrotxa també es poden explicar per la seva major proximitat amb les fractures del substrat, a través de les quals hi pot haver una aportació addicional de radó.
- Les concentracions de radi obtingudes en els materials de sòl de la zona volcànica de la Garrotxa, [12-74] Bq·kg⁻¹, són comparables als valors d'altres zones volcàniques i l'interval mundial [17-60] Bq·kg⁻¹.
- Els materials del sòl de la zona volcànica de la Garrotxa que presenten els valors més elevats de radi són les colades basàltiques del volcà Montolivet, (77 ± 1) Bq·kg⁻¹, i els sediments lacustres, (44 ± 2) Bq·kg⁻¹.
- Les mesures de la taxa de dosi absorbida deguda a la radiació gamma terrestre a l'exterior, (55 ± 1) nGy·h⁻¹, i a l'interior de recintes, (76 ± 2) nGy·h⁻¹, de la zona volcànica de la Garrotxa mostren uns nivells normals de dosis ambiental a que està sotmesa la població. Els valors obtinguts estan d'acord amb els resultats previstos a partir de l'anàlisi dels radionúclids de les mostres de materials del sòl.

6.1.3. Radó en altres activitats laborals

- L'estratègia de realitzar mesures sistemàtiques de la C_{Rn} a diferents activitats laborals subterrànies, independentment de la composició geològica del terreny on es troben, resulta adequada per identificar activitats amb nivell de radó superiors al nivell de protecció pels treballadors recomanat pel CSN ($600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$).
- Els estudis més detallats de les variacions temporals de la C_{Rn} a les dues activitats laborals identificades amb nivells de radó més elevats posen de manifest que:
 - Actualment no existeix risc radiològic significatiu pels seus treballadors.
 - Les fluctuacions diàries i estacionals dels nivells de radó tenen un comportament que recorda a l'observat a l'aire dels bufadors. Les causes d'aquestes variacions també podrien ser els gradients de pressió provocats per les diferències de temperatura entre l'exterior i l'interior d'aquestes galeries subterrànies.
- El valor mig de la concentració de radó a l'aire exterior de la marjal de Penyíscola (30 ± 2) $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, és més elevat que el valor mig mundial, $10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, degut a les altes concentracions de radi i radó existents en l'aigua de la marjal, $[2\text{-}3097]\cdot 10^{-3} \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ de radi i $[0.7\text{-}616] \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ de radó en les aigües.
- La majoria dels llocs de treball analitzats de Penyíscola presenten concentracions de radó inferiors al nivell de protecció pels treballadors recomanat pel CSN.
- La depuradora municipal presenta els nivells de radó més elevats, amb un valor mig anual al voltant dels $2000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, degut al fet de tractar les aigües residuals de la ciutat barrejades amb aigües de la marjal riques en radi i radó.
- Les mesures en continu a l'aire de la depuradora mostren importants variacions diàries i estacionals dels nivells de radó, provocats per les variacions de les taxes de ventilació del recinte al llarg dels dies i les estacions de l'any i per les incorporacions incontrolades de grans volums d'aigua de la marjal en el sistema de clavegueram.
- Els estudis detallats de la C_{Rn} a un parell de balnearis permeten observar els increments significatius dels nivells de radó a l'aire de diferents sales de tractament on s'utilitzen les aigües termals.
- Els establiments termals es caracteritzen per unes condicions ambientals extremes per la mesura del gas radó, degut a les altes temperatures, fins a $42 \text{ }^\circ\text{C}$, i humitats elevades, fins el 99 %, el què permet posar a punt i verificar la metodologia més adequada per realitzar mesures en tipus d'activitats laborals.

- Els resultats de les mesures de les concentracions de radó dissolt a les aigües posen de manifest la importància de l'elecció del lloc de mostreig i del tipus de flux d'aigua en aquest punt.
- En els balnearis, la inhalació d'uns nivells de radó més o menys elevats depèn del tipus d'ús es fa de l'aigua i dels temps transcorregut des de que surt del sòl fins que arriba a la sala de tractament.
- Les sales de tractament que presenten els nivells de radó més elevats a l'aire, fins a $7000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, són les que tenen una major desgasificació del gas radó dissolt a l'aigua utilitzada.
- Els nivells de radó a l'interior de les sales de tractament dels balnearis poden experimentar fluctuacions molt importants depenent dels ritmes d'ús de les aigües i de les taxes de ventilació. Algunes sales presenten els nivells de radó més elevats a l'aire, fins a $1700 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, durant els instants posteriors a la finalització del tractament, que segons l'ús posterior que se'n faci pot resultar un avantatge o un inconvenient important.
- Poder determinar amb exactitud els nivells de radó a que estan exposats durant la seva jornada laboral el personal que treballa a l'interior d'un establiment termal cal tenir un coneixement molt exacte de les funcions dels diferents perfils de treballador.

6.2. Perspectives de futur

La recerca desenvolupada en aquest treball deixa algunes qüestions pendents d'acabar de resoldre així com també obre noves perspectives de treball, algunes de les quals ja s'han iniciat en el transcurs dels últims mesos i altres ho faran en un futur no gaire llunyà. Novament les perspectives queden agrupades segons el capítol del qual es desprenen.

6.2.1. Instrumentació

La discrepància observada entre els factors de calibratge obtinguts pels detectors de Makrofol a les cambres de radó de referència de l'INTE (UPC) i de la HPA queda pendent de ser analitzada amb més profunditat. El fet d'utilitzar la nova font d'alimentació de forma regular en els revelatges d'aquests detectors i la participació a nous exercicis d'intercomparació organitzats per la HPA i un altre centre de referència d'Alemanya, el Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), han de permetre seguir comprovant el factor de calibratge dels detectors de Makrofol.

Està previst iniciar un procés de documentació dins el laboratori de radó de la UFR de la UAB encaminat a la implementació de la norma internacional sobre els requisits generals relatius a la competència dels laboratoris d'assaig i calibratge (ISO/IEC 17025). Dins aquesta documentació, s'editaran els procediments d'ús de cadascun dels instruments descrits en aquesta tesi, els documents de les seves especificacions tècniques, del seu anàlisi de riscos, manteniment, reparació, etc.

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.

6.2.2. La zona volcànica de la Garrotxa i la falla d'Amer

Queda pendent analitzar la possible correlació entre el nivell de radi que presenten els diferents tipus de materials del sòl i els nivells de radó en els recintes tancats situats sobre els diferents tipus de materials de la zona volcànica de la Garrotxa.

També són necessaris estudis més detallats d'aquesta zona per determinar si el sistema de fractures dels materials volcànics està connectat o no amb les fractures més profundes i amb falles actives, com la d'Amer. Per tant, com a continuació de la recerca realitzada a la zona volcànica de la Garrotxa pròximament s'iniciarà una nova campanya de mesures puntuals de la C_{Rn} directament en el sòl conjuntament amb altres tècniques geològiques, com la tomografia de resistivitat elèctrica, per tal de localitzar les falles més importants del sistema de falles secundàries que es troba sota els materials volcànics.

Esdevé especialment interessant analitzar la distribució de la mida dels grans del sòl i els continguts de radionúclids, especialment del radi, dels materials del sòl que cobreixen la falla d'Amer per tal d'entendre millor la dinàmica de la C_{Rn} en el sòl d'aquesta zona fracturada.

Com a conseqüència dels estudis de radó realitzats a la falla d'Amer s'han iniciat nous estudis a altres zones de falles de Catalunya: (i) falla nord de la Maladeta i la falla de Tredòs, a la vall d'Aran, (ii) a la falla del Camp, segment de Montroig, i (iii) a la falla del Vallès, segment de Caldes de Montbui. S'han realitzat mesures preliminars de la C_{Rn} en el sòl i a les aigües subterrànies amb l'objectiu de determinar els nivells de radó en aquests dos medis, estudiar els factors que influeixen sobre aquests nivells i intentar relacionar-los amb la presència de falles actives. Recentment s'iniciaran estudis fora de Catalunya.

6.2.3. Radó en altres activitats laborals

Confirmar la hipòtesis de que les fluctuacions de la C_{Rn} a les mines i altres llocs de treball subterrani tenen una clara dependència amb les diferències de temperatura entre l'aire

exterior i l'interior ha de permetre millorar les tècniques de mitigació existents. Analitzar les dades meteorològiques corresponents a les dates de mesura en continu de la C_{Rn} a l'interior de les activitats laborals subterrànies on s'observen aquestes fluctuacions ha de permetre confirmar aquesta hipòtesis.

A la marjal de Penyíscola cal seguir estudiant els nivells de radó a l'aire exterior i dels continguts de radionúclids en el sòls, animals i plantes per avaluar els riscos radiològics que se'n poden derivar pels membres de públic en general.

S'hauria d'iniciar una campanya de mesures sistemàtiques de la C_{Rn} a totes les activitats laborals que treballen amb aigües d'origen subterrani de Catalunya, per tal de realitzar els estudis previstos en el RPSRI.