

4 Resultats:

4.1 Introducció

En aquest capítol es mostren els resultats obtinguts a partir de les simulacions Montecarlo i les comparacions amb els corresponents resultats experimentals. Per a la simulació d'aquests espectres s'utilitzen tres versions del programa de simulació, el PENELOPE/penEasy, l'original, el PENELOPE/penEasy-Cascade que té implementats els pics suma i el PENELOPE/penEasy-eXtended, que representa tant els pics suma com els raig X.

Seguint el procediment descrit a la metodologia, primer de tot es mostren els resultats que permeten determinar la corba FWHM, necessària per a la convolució dels espectres simulats. A continuació, i fent ús de la geometria descrita en el capítol anterior, es presenten els resultats per a les mesures de fonts puntuals de Am-241, Cs-137 i Co-60. En aquest punt es mostra una comparativa dels espectres proporcionats per PENELOPE/penEasy i PENELOPE/penEasy-eXtended.

Tot seguit es mostren els resultats per a fonts extenses, en matrius patró d'aigua i sòl. En el segon cas, a partir dels resultats, es posa de manifest la importància de la correcta caracterització dels materials per poder traçar la corba d'eficiències en energia. Com que en el cas dels sòls, la composició no és homogènia entre les mostres, es descriu la metodologia d'un procediment que fa ús de la simulació i l'experimentació per poder conèixer el comportament del material en la zona amb l'eficiència més sensible a la composició dels materials, les baixes energies.

4.2 Determinació de la corba FWHM:

En el capítol de la metodologia del treball s'ha explicat que per tal de poder comparar els espectres simulats amb els experimentals cal convolucionar-los, per donar-los l'amplada corresponent al soroll gaussià. L'equació 3.11, posava de manifest la importància del terme FWHM en l'eixamplament que prendran els pics. Segons el *Gilmore* [3] la corba que millor ajusta aquest paràmetre en un detector de germani és la que es mostra a l'expressió 4.1.

$$FWHM = \sqrt{a + bE + cE^2} \quad [keV] \quad 4.1.$$

A partir del programa d'anàlisi espectral *Genie* es pot treure el valor FWHM per diferents fotopics. Per tal de tenir energies ben definides s'utilitzaran fonts puntuals d'Am-241, Cs-137 i Co-60. Els resultats apareixen a la taula 4.1.

Radionúclid	E (keV)	FWHM (keV)
Am-241	59,54	1,272
Cs-137	661,66	1,648
Co-60	1173,23	1,851
Co-60	1332,5	1,959

Taula 4.1: Valors de FWHM per als fotopics de diferents fonts puntuals

D'aquesta manera aplicant la corba d'ajust enunciada s'obtenen els valors **a**, **b**, **c**, que s'observen a la figura 4.1.

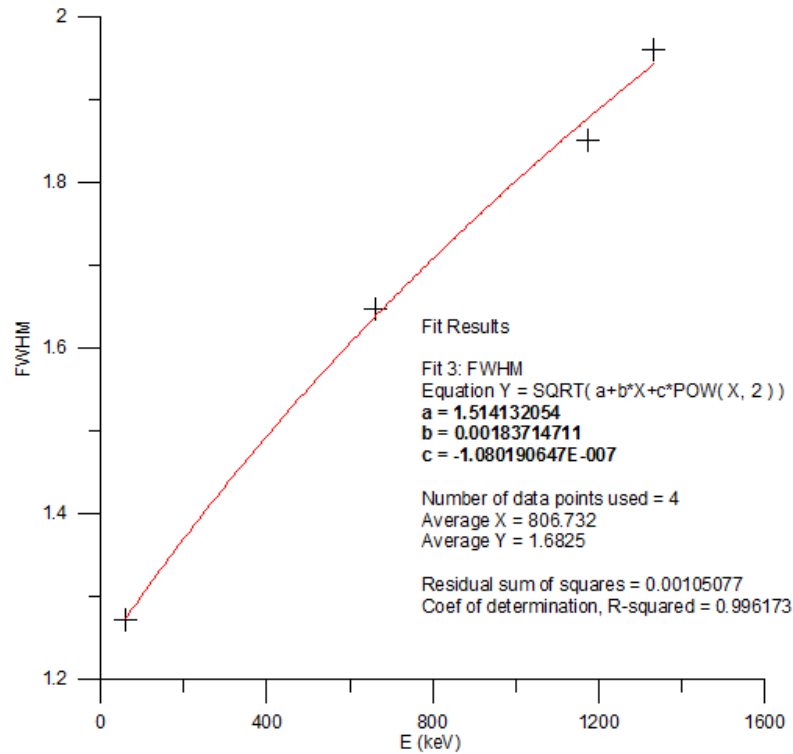


Figura 4.1: Ajust per trobar els coeficients a,b,c que determinaran la convolució que aplicarem als espectre proporcionats per PENELOPE/PenEasy

4.3 Resultats amb fonts puntuals

A continuació, a la taula 4.2, es mostren els resultats de les eficiències per fonts puntuals que serveixen per a constatar el bon comportament de la geometria dissenyada. Juntament amb l'eficiència experimental (ϵ_{exp}) i la simulada (ϵ_{MC}), es mostra la diferència percentual entre ambdues ($\Delta(\%)$):

$$\Delta(\%) = \frac{\epsilon_{MC} - \epsilon_{exp}}{\epsilon_{exp}} \times 100 \quad 4.2.$$

La geometria utilitzada en aquesta simulació es presenta a la figura 4.2.

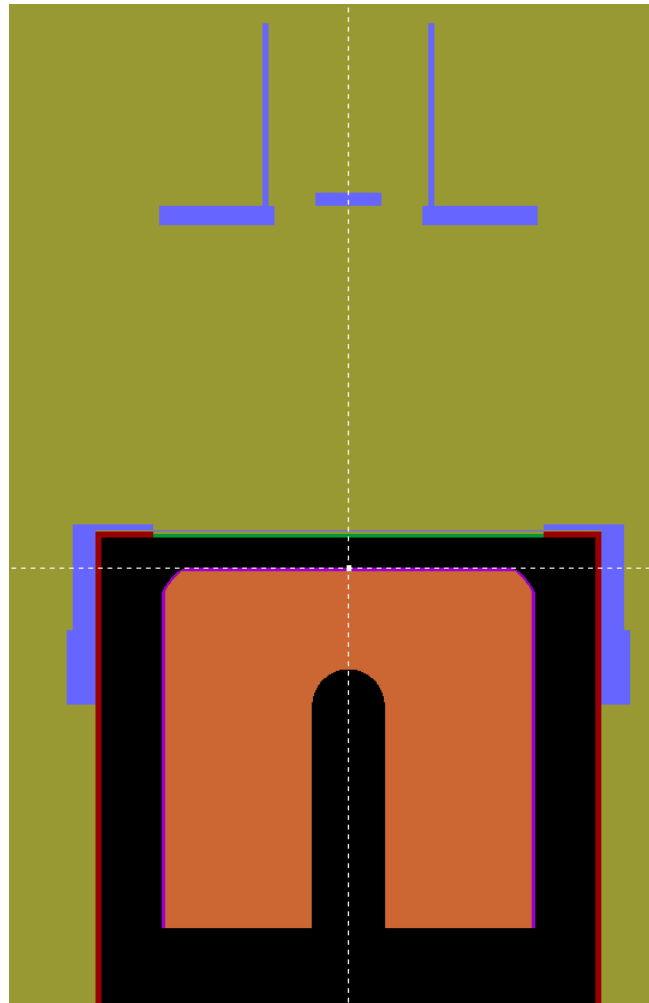


Figura 4.2: Disseny de la geometria utilitzada per a fonts puntuals. Imatge obtinguda amb el programa gview2D.

Radionúclid	E (keV)	$\epsilon_{\text{exp}} (k=2)$	$\epsilon_{\text{MC}} (k=2)$	$\Delta (\%) (k=2)$
Am-241	59,54	$0,04529 \pm 0,00363$	$0,04266 \pm 0,00007$	$-5,80 \pm 7,54$
Cs-137	661,66	$0,01015 \pm 0,00081$	$0,01030 \pm 0,00003$	$1,56 \pm 8,14$
Co-60	1173,23	$0,00635 \pm 0,00050$	$0,00655 \pm 0,00003$	$3,15 \pm 8,37$
Co-60	1332,5	$0,00571 \pm 0,00045$	$0,00589 \pm 0,00003$	$3,15 \pm 8,40$

Taula 4.2: Valors d'eficiència per a fonts puntuals

Els resultats de la taula 4.2 mostren les eficiències per radionúclid. Per conèixer l'eficiència en energia cal aplicar, tal com s'ha explicat en el capítol de metodologia, un factor de correcció. En aquest cas l'únic radioisòtop que presenta desintegració en cascada i, per tant, factor de correcció és el Co-60, que es pot observar a la taula 4.3.

Radionúclid	E (keV)	$\epsilon_{MC} (k=2)$	$\epsilon_{MC, amb PS} (k=2)$	FC (k=2)
Co-60	1173,23	$0,00655 \pm 0,00003$	$0,00635 \pm 0,00003$	$1,031 \pm 0,007$
Co-60	1332,5	$0,00589 \pm 0,00003$	$0,00573 \pm 0,00003$	$1,028 \pm 0,008$

Taula 4.3: Factors de correcció per a la font puntual de Co-60

Com es pot observar a baixes energies la tendència és que l'eficiència simulada sigui inferior que en el cas d'altres energies, on el comportament és més fidel a la realitat. La causa és que les gammes poc energètiques són molt més susceptibles als marges d'error, com poden ser els gruixos, les distàncies o les variacions en els materials que en molts casos en tractar-se de compostos se n'ha de fer una aproximació.

A continuació, en les següents figures, es presenten les gràfiques dels espectres experimentals i simulats per als tres radioisòtops.

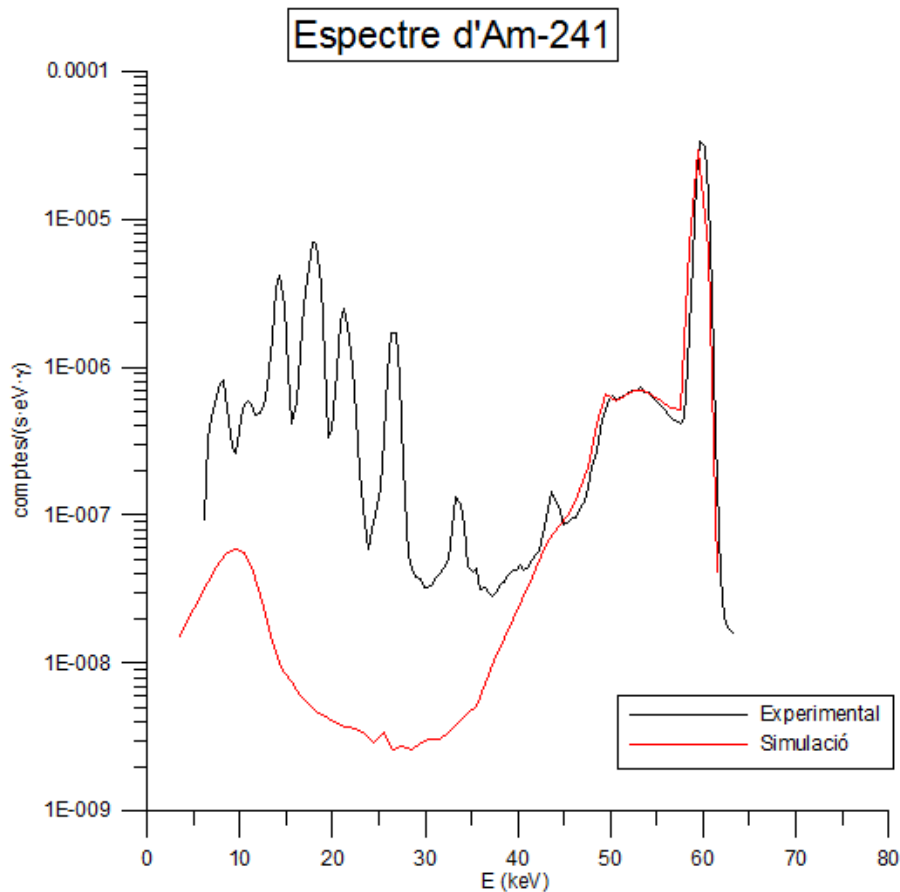


Figura 4.3: Simulació de la font puntual d'Am-241 amb PENELOPE/PenEasy

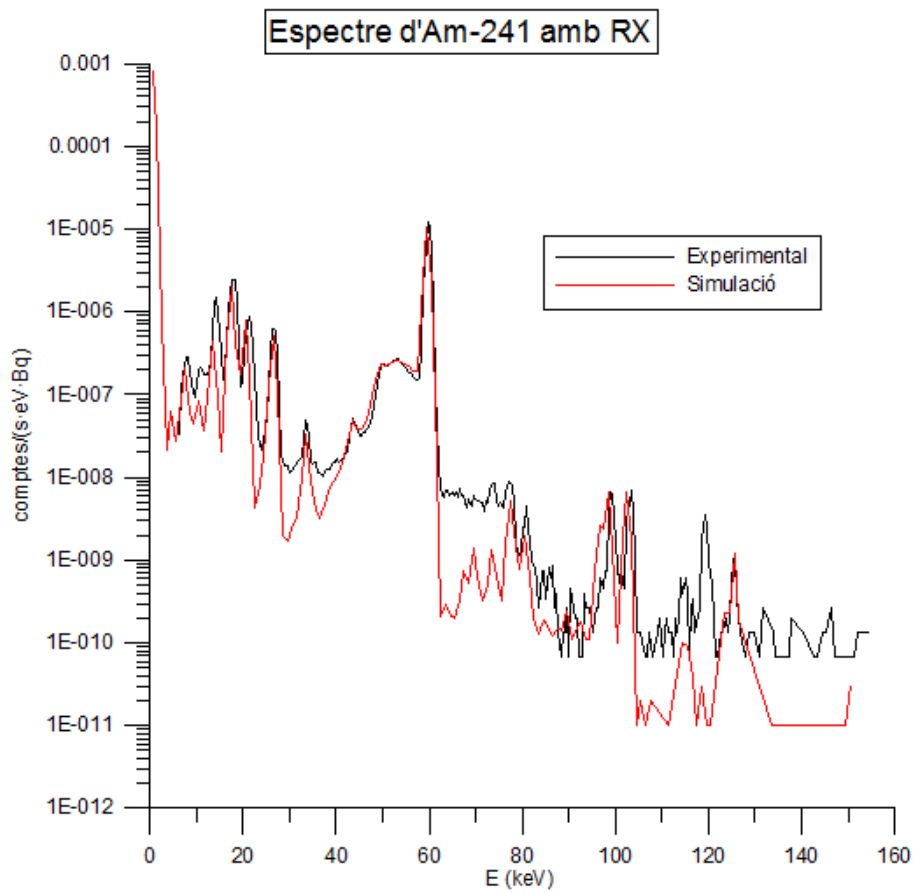


Figura 4.4: Simulació de la font puntual d'Am-241 amb PENELOPE/PenEasy-eXtended

En aquest cas es pot veure clarament la diferència entre l'espectre proporcionat per PENELOPE/PenEasy i PENELOPE/PenEasy-eXtended. El fet d'implementar aquesta ampliació del programa fa que apareguin no només els raigs X, sinó els diferents pics suma: gamma-gamma, gamma-RX i RX-RX. A continuació, a la figura 4.5, es mostra un anàlisi dels pics representats que s'han pogut contrastar amb la bibliografia [15].

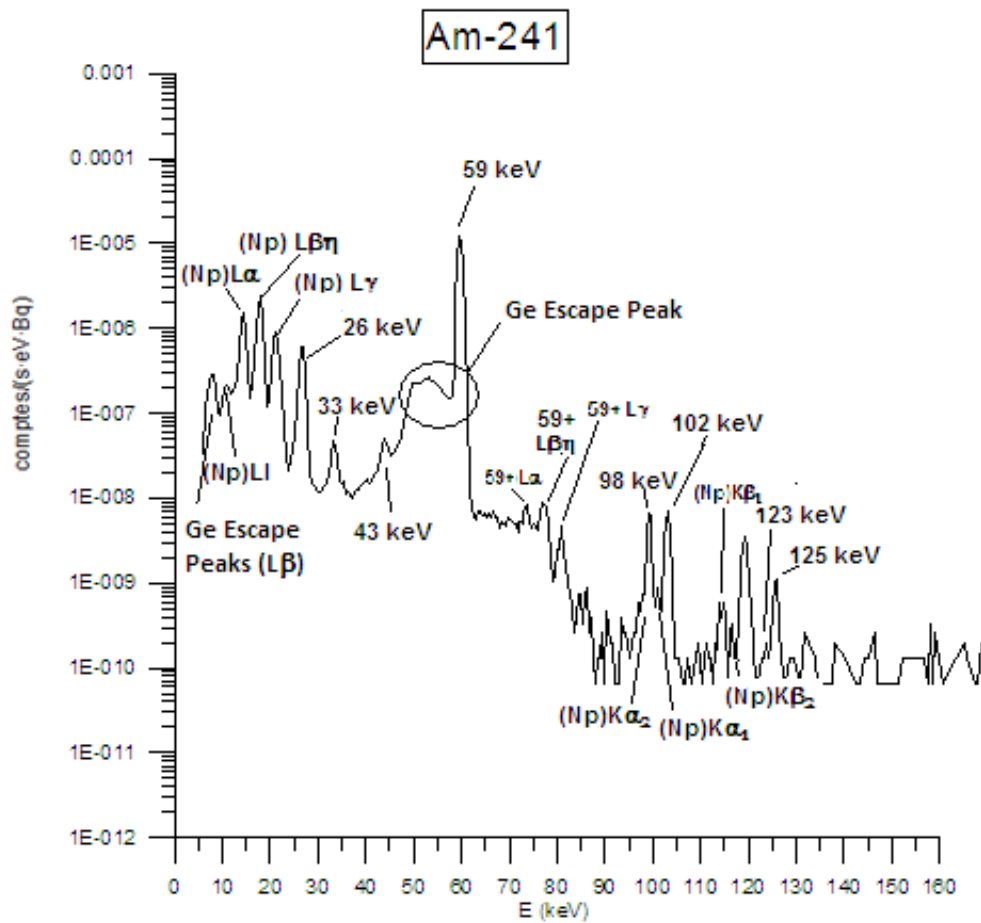


Figura 4.5: Espectre simulat per l'Am-241 amb detall dels pics que apareixen

Un anàlisi de la figura 4.4 on apareixen l'espectre experimental i el simulat amb PENELOPE/PenEasy-eXtended, mostra més que hi ha dues zones de clara discordança que apareixen marcats a la figura 4.6. En aquests punts la simulació registra números de comptes inferiors a l'espectre experimental.

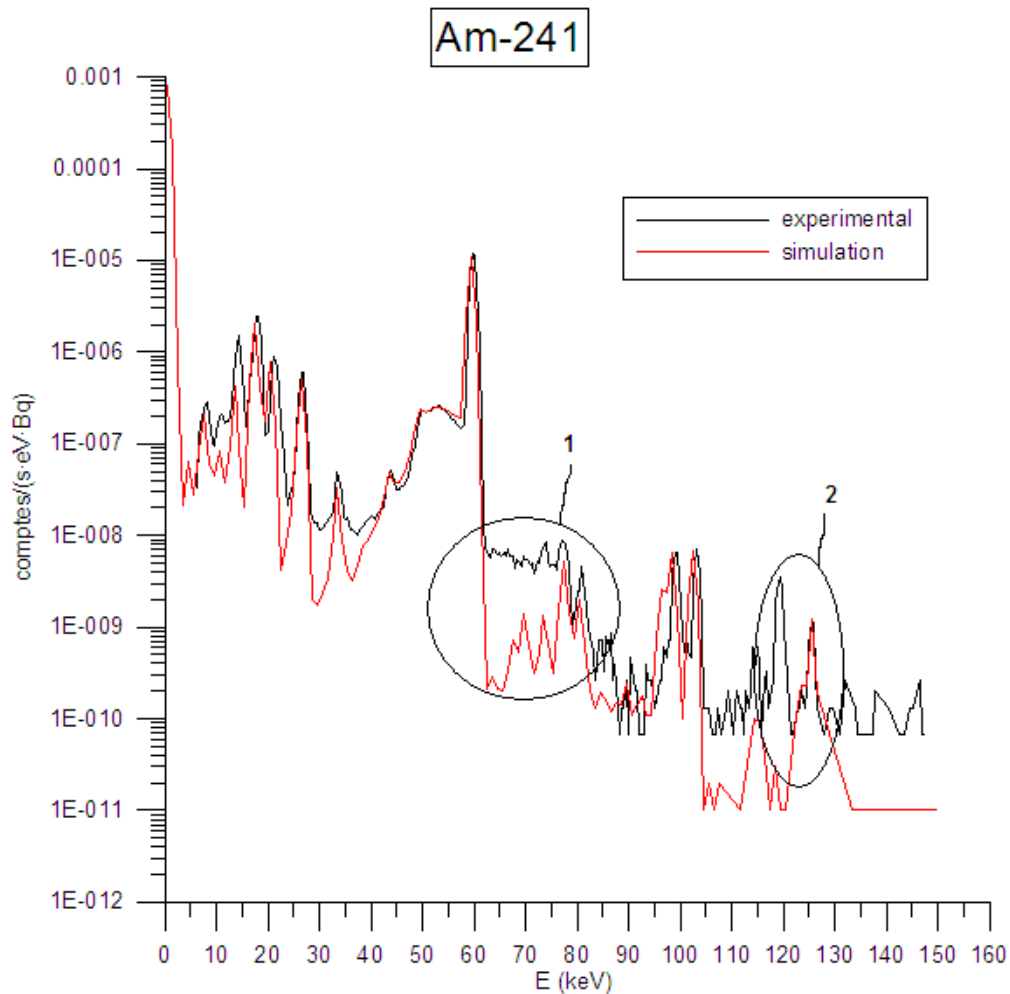


Figura 4.6: Espectre experimental i simulat de l'Am-241 on es mostren les principals zones de discordança

Una hipòtesi per explicar aquest fet és el pile-up, efecte explicat en el capítol de conceptes bàsics, el qual de moment no ha estat implementat a PENELOPE/PenEasy. La presència del pic de 120 keV que no apareix en la simulació (2) és possiblement una coincidència del fòton de 59,54 keV amb si mateix [15], ja que $59,54 + 59,54 = 119,08$ keV.

En el cas de la zona (1), s'observa que la zona de discordança va des dels 60 keV fins aproximadament els 80 keV, si es té en compte que els raigs-X més probables tenen energies d'entre 10 i 20 keV la suma de la gamma del fòton amb aquests RX se situaria en aquest rang.

Per tal de comprovar aquesta hipòtesi es repeteixen les mesures experimentals amb la font a diferents distàncies, una just sobre la finestra del detector i l'altra molt allunyada, ja que l'efecte del pile-up decreix amb la distància.

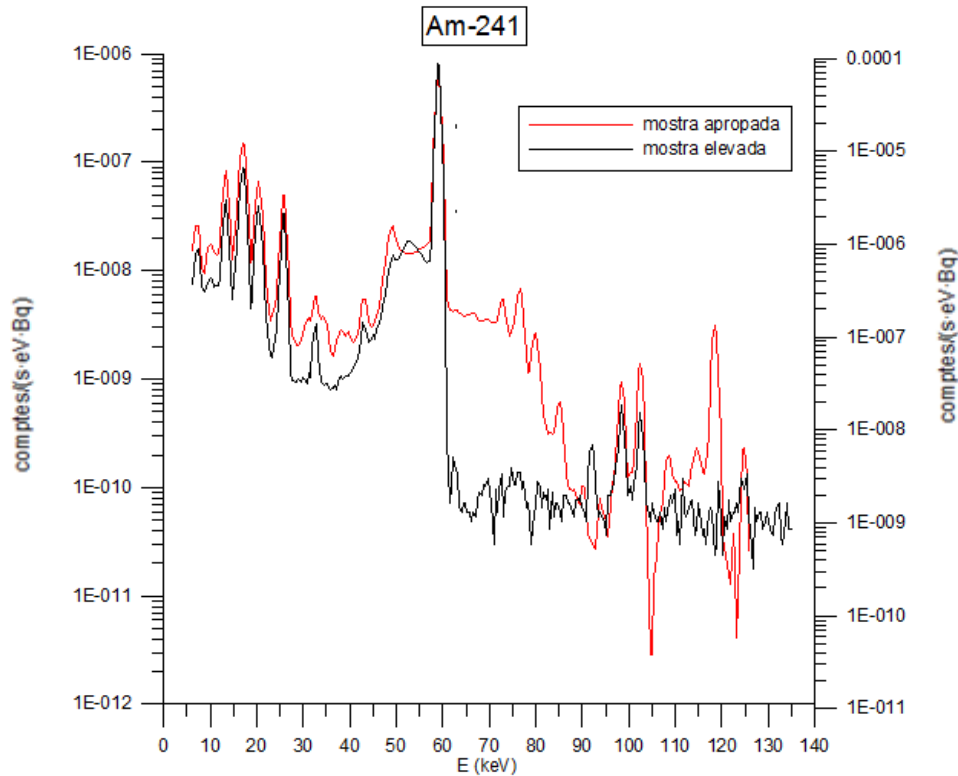


Figura 4.7: Comparació del comportament d'una font puntual d'Am-241 molt propera o molt allunyada del detector. L'eix esquerra correspon a les comptes per la mostra allunyada, mentre que l'eix de la dreta per la font apropiada

La figura 4.7 mostra que en una primera part de l'espectre el comportament és molt similar, tant per la mostra més allunyada com per la mostra apropiada. A partir del fòtòpic però el comportament canvia, es pot observar que:

- 1) La zona entre els aproximadament 60-80 keV, pateix un descens molt més brusc després del fòtòpic en el cas de la mostra allunyada, el que en la figura 4.6 s'ha anomenat zona 1.
- 2) El pic de 120 keV que apareix molt marcat en el cas de la font enganxada en el detector, gairebé ni destaca en el cas contrari.
- 3) L'alçada dels pics sobre el fons prenen valors similars per als pics corresponents a gammes o raigs X concrets, mentre que els pics corresponents a pics suma baixen notablement o desapareixen.

Aquest anàlisi confirma la hipòtesis del pile-up, el qual seria interessant incorporar a PENELOPE/PenEasy-eXtended per aconseguir espectres més similars encara a la realitat. Així com també posa de manifest l'efecte ja conegut que els pics suma disminueixen amb la distància.

A continuació, a la figura 4.8, es mostra l'espectre del Cs-137 realitzat amb PENELOPE/PenEasy i la figura 4.9, el mateix espectre però simulat amb PENELOPE/penEasy-eXtended. En aquest cas els raigs X no són tan abundants com en l'Am-241 però també se n'aprecien al principi de l'espectre.

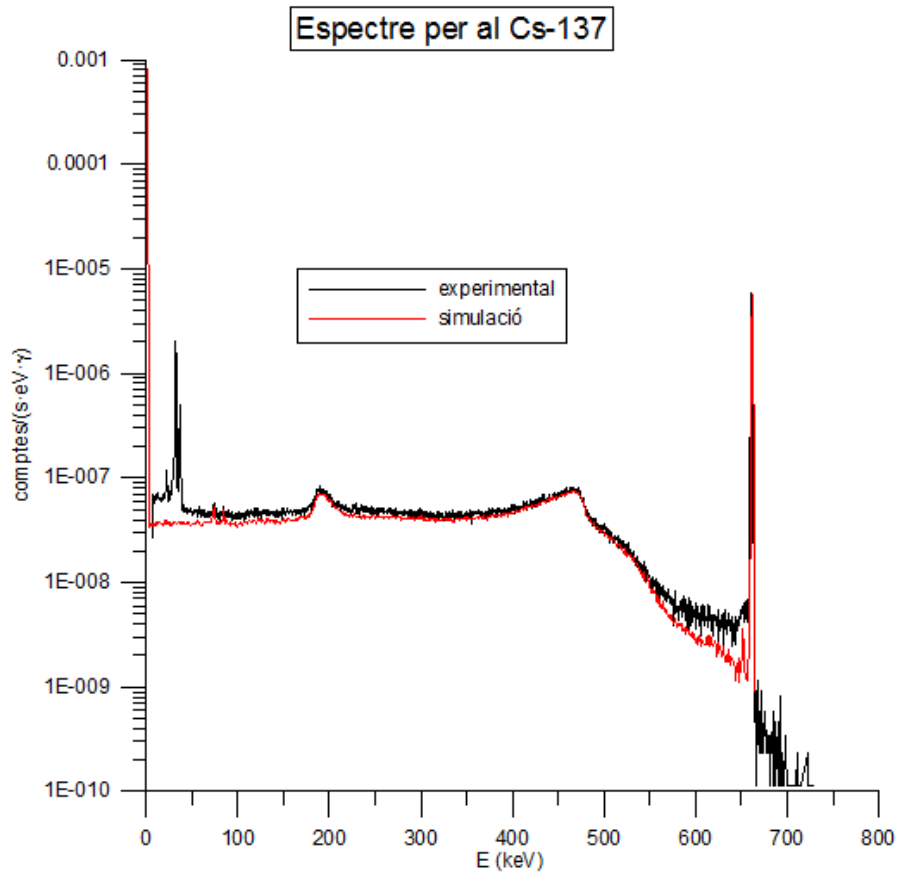


Figura 4.8: Espectre experimental i simulat del Cs-137 amb PENELOPE/PenEasy

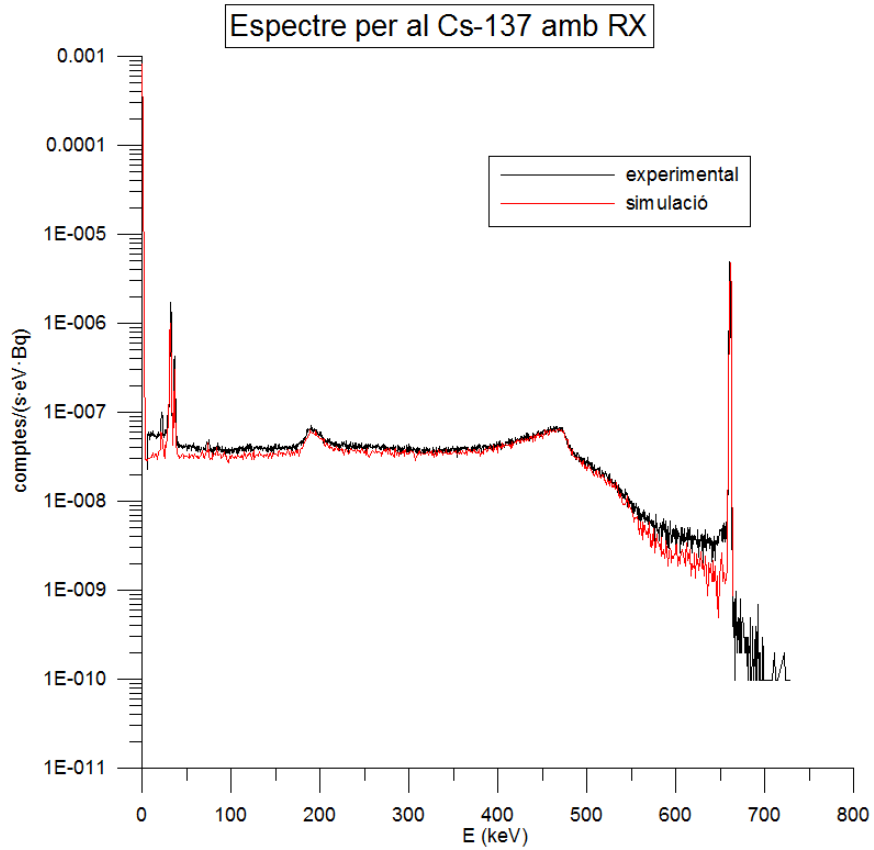


Figura 4.9: Espectre experimentat i simulat per al Cs-137 amb PENELOPE/PenEasy-eXtended

Finalment es mostren els espectres per al Co-60, en aquest cas els raigs X que pot presentar no arriben ni als 10 keV, de manera que la simulació s'ha realitzat amb PENELOPE/PenEasy-Cascade, que només simula l'efecte dels pics suma.

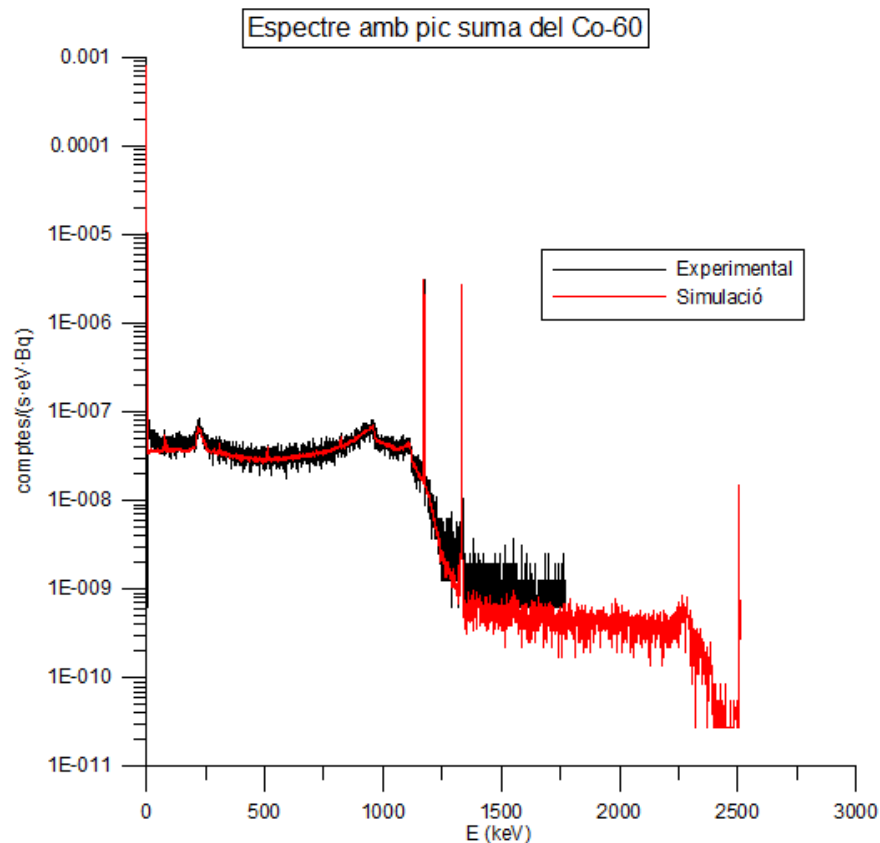


Figura 4.10: Espectre experimental i simulat per al Co-60 amb PENELOPE/PenEasy-Cascade

En aquest cas es poden observar els dos fotòpics del Co-60 (1173,23 i 1332,5 keV) i un pic suma posterior, concretament a 2505,23 keV, corresponent a l'energia dels dos anteriors. En l'espectre experimental no s'aprecia aquest efecte degut a què el programa d'adquisició espectral està configurat a 4092 canals~1871 keV, mentre que la simulació està programada perquè arribi fins als 3000 keV, per tal de poder apreciar justament el pic suma.

4.4 Resultats amb matriu d'aigua:

Malgrat que s'anomena matriu d'aigua la composició de la matriu és una solució de HCl 2M en aigua de densitat 0.997 g/cm^3 . A altes energies utilitzar com a material aigua o una solució de HCl no té massa influència però a baixes sí; per tant a partir del programa `material.exe` es crea un material que es correspongui amb la solució real (Annex 4).

En aquest cas la geometria utilitzada és un pot que conté la solució i que se situa sobre la finestra del detector tal com es mostra a la figura 4.11.

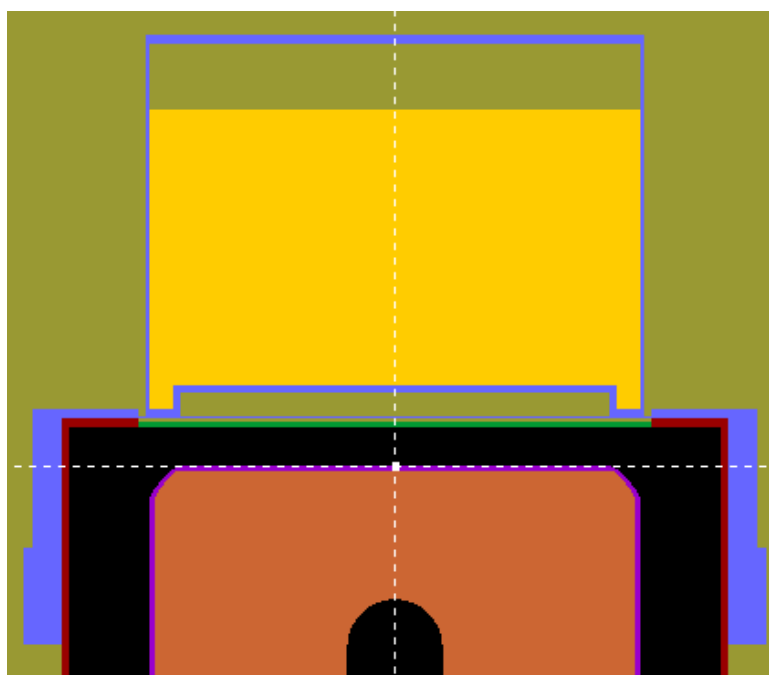


Figura 4.11: Detall de la geometria utilitzada per a la matriu d'aigua. Imatge obtinguda amb el programa gview2D.

El contingut d'aquesta matriu és un còctel de radioisòtops que en el moment de la mesura presenten unes activitats de: Pb-210 ($358,62 \pm 10,76$ Bq), Am-241 ($38,98 \pm 0,42$ Bq), Cd-109 ($498,71 \pm 6,33$ Bq), Co-57 ($18,03 \pm 0,19$ Bq), Ce-139 ($19,72 \pm 0,21$ Bq), Hg-203 ($39,44 \pm 0,41$ Bq), Sn-113 ($72,75 \pm 0,76$ Bq), Sr-85 ($77,96 \pm 0,85$ Bq), Cs-137 ($83,98 \pm 0,89$ Bq), Y-88 ($144,89 \pm 1,51$ Bq) i Co-60 ($101,30 \pm 1,06$ Bq). Les eficiències per radionúclid es mostren a la taula 4.4.

Radionúclid	E (keV)	$\epsilon_{\text{exp}} (k=2)$	$\epsilon_{\text{MC}} (k=2)$	$\Delta (\%) (k=2)$
Pb-210	46,54	$0,07581 \pm 0,00193$	$0,07220 \pm 0,00011$	$-4,76 \pm 2,43$
Am-241	59,54	$0,08044 \pm 0,00097$	$0,08087 \pm 0,00009$	$0,53 \pm 1,22$
Cd-109	88,03	$0,08685 \pm 0,00113$	$0,08058 \pm 0,00006$	$-7,22 \pm 1,21$
Co-57	122,06	$0,08211 \pm 0,00094$	$0,07679 \pm 0,00005$	$-6,48 \pm 1,07$
Ce-139	165,86	$0,06458 \pm 0,00076$	$0,06771 \pm 0,00005$	$4,85 \pm 1,24$
Hg-203	279,18	$0,04438 \pm 0,00049$	$0,04622 \pm 0,00004$	$4,15 \pm 1,15$
Sn-113	391,70	$0,03412 \pm 0,00038$	$0,03474 \pm 0,00004$	$1,81 \pm 1,14$
Sr-85	514,00	$0,02694 \pm 0,00030$	$0,02777 \pm 0,00004$	$3,08 \pm 1,16$
Cs-137	661,66	$0,02265 \pm 0,00025$	$0,02275 \pm 0,00004$	$0,44 \pm 1,12$
Y-88	898,04	$0,01630 \pm 0,00017$	$0,01667 \pm 0,00005$	$2,26 \pm 1,11$
Co-60	1173,23	$0,01294 \pm 0,00014$	$0,01358 \pm 0,00006$	$4,95 \pm 1,23$
Co-60	1332,5	$0,01160 \pm 0,00013$	$0,01236 \pm 0,00005$	$6,55 \pm 1,27$

Taula 4.4: Valors d'eficiència per a la matriu d'aigua

En aquest cas els radionúclids que presenten desintegració en cascada són el Co-60 i el Y-88 i els corresponents factors de correcció es poden observar a la taula 4.5.

Radionúclid	E (keV)	$\epsilon_{MC} (k=2)$	$\epsilon_{MC, amb PS} (k=2)$	FC (k=2)
Co-60	1173,23	$0,01499 \pm 0,00016$	$0,01358 \pm 0,00006$	$1,104 \pm 0,013$
Co-60	1332,5	$0,01363 \pm 0,00016$	$0,01236 \pm 0,00005$	$1,103 \pm 0,014$
Y-88	898,04	$0,01824 \pm 0,00018$	$0,01667 \pm 0,00005$	$1,094 \pm 0,011$

Taula 4.5: Factors de correcció en la matriu d'aigua

La comparació entre l'espectre simulat i l'experimental dóna com a resultat la figura 4.12. Com ha passat en la representació de l'espectre de Co-60, l'espectre experimental queda més curt que el simulat, de manera que el segon pic del Y-88 (1826,05 keV) i els pics suma només es poden apreciar en la simulació.

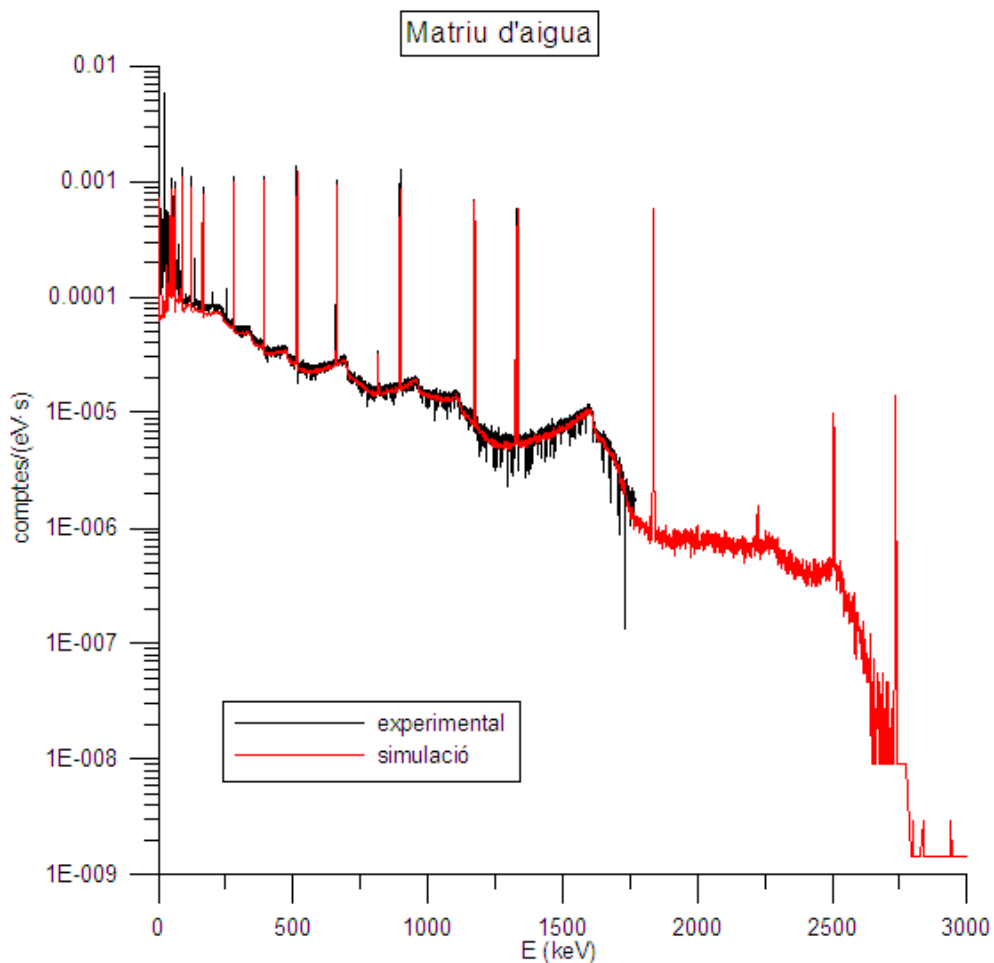


Figura 4.12: Comparació de l'espectre simulat i l'experimental per a la matriu d'aigua

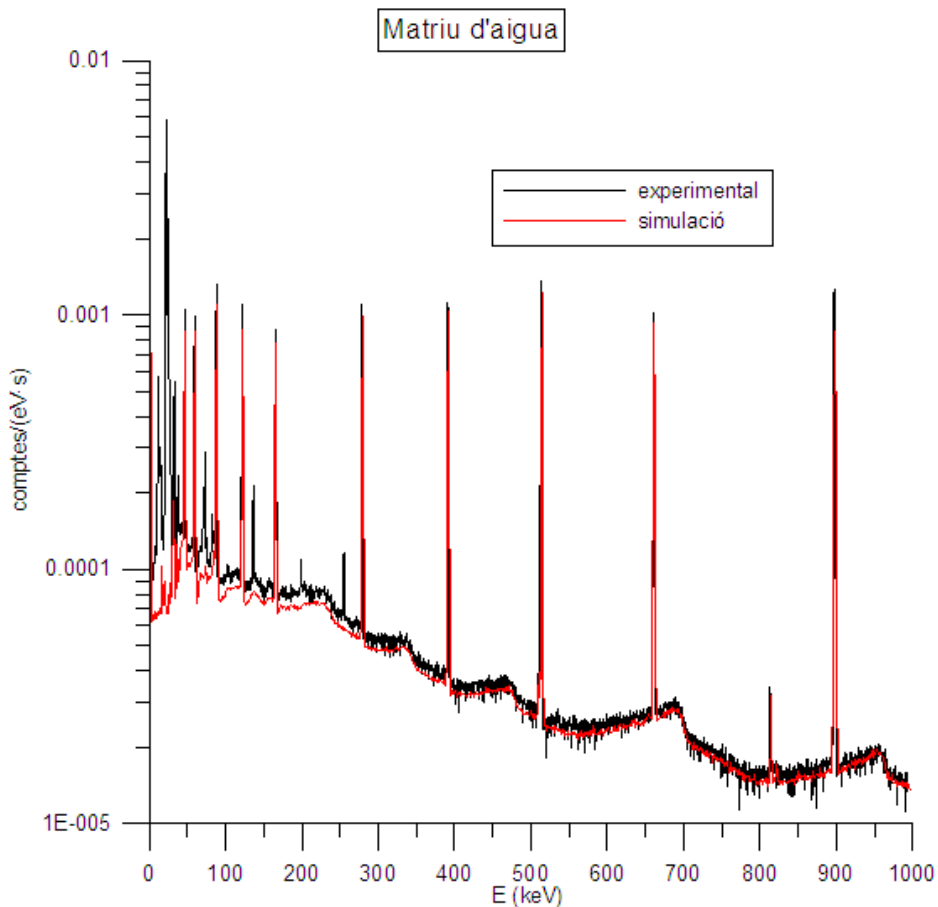


Figura 4.13: zoom de la matriu d'aigua a baixes energies

A la figura 4.13 es mostra amb més detall la zona de baixes energies, es pot veure que l'espectre simulat queda per sota de l'experimental i alguns pics de la zona més baixa no estan simulats. Els nuclis d'Am-241, Pb-210 i Cs-137 han estat simulats amb PENELOPE/penEasy-eXtended però la resta de no, de manera que aquests pics es deuen a raigs X d'altres radioisòtops. Pel que fa a la resta de comptes que no corresponen a pics i que també s'observa que, a mida que l'energia baixa, la simulació va quedant per sota de l'espectre experimental es deuen a la radiació bremsstrahlung, efecte que tampoc està implementat (ja que només es considera l'emissió gamma de la font, i de raigs X en el cas de PENELOPE/penEasy-eXtended) i que es deu a la radiació de frenada de les partícules β . Perquè aquest efecte sigui notable cal que al menys les beta tinguin una energia d'1 MeV i en el cas d'aquesta mostra els radionúclids que presenten desintegració beta són el Hg-203, el Cs-137, el Y-88 i el Co-60, amb unes energies de la partícula beta que poden arribar a 0,5, 1,16, 3,66 i 2,83 MeV respectivament.

A continuació, a la figura 4.14, es mostra una imatge de la zona on s'acostumen a posar de manifest els efectes d'aquesta radiació i s'observa que coincideix amb la zona on la simulació comença a desmarcar-se de l'espectre experimental.

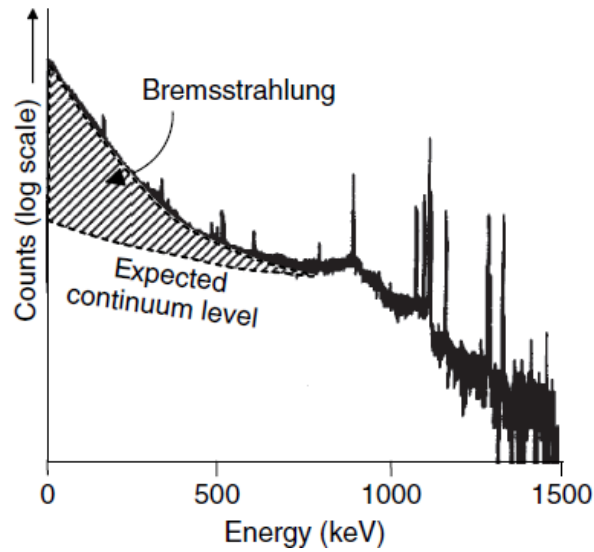
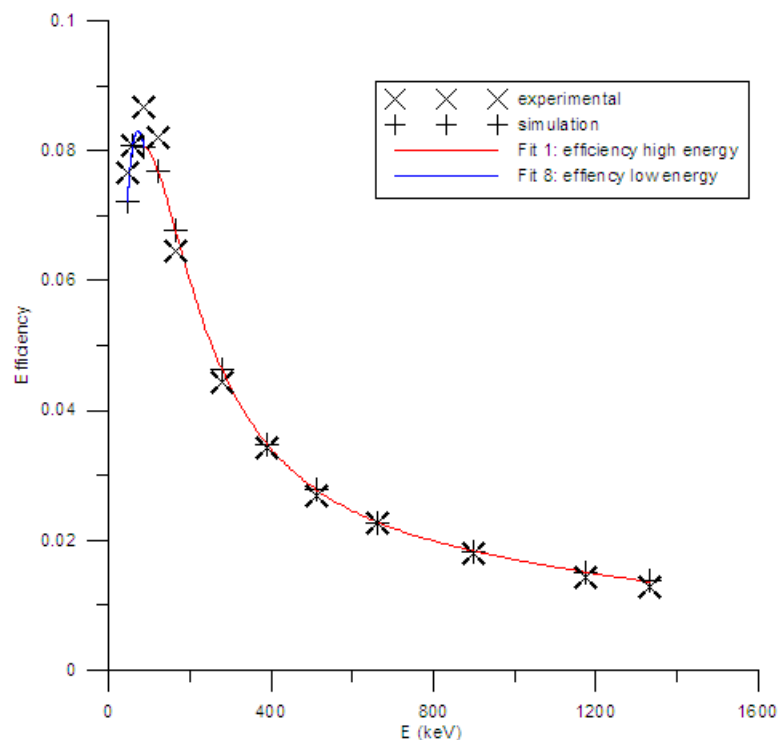


Figura 4.14: Efectes de bremsstrahlung degut a la partícula beta del P-32 [3]

A partir de les eficiències es pot traçar la corba de calibratge d'eficiències en energies. A la figura 4.15 apareixen els punts amb els valors experimentals i simulats i l'expressió utilitzada per ajustar la corba, aplicada per a la simulació. Donada la característica forma d'aquesta corba, el més habitual és utilitzar un ajust per baixes energies i un per altes.



$$\ln(\text{Eff}) = -15,96 + 6,300 \cdot \ln(\text{Eff}) - 0,737 \cdot (\ln(\text{Eff}))^2 \quad \text{si } E < 122,06 \text{ keV}$$

$$\ln(\text{Eff}) = 136,69 - 136,69 \cdot \ln(\text{Eff}) + 52,35 \cdot (\ln(\text{Eff}))^2 - 9,795 \cdot (\ln(\text{Eff}))^3 + 0,895 \cdot (\ln(\text{Eff}))^4 - 0,032 \cdot (\ln(\text{Eff}))^5 \quad \text{si } E > 122,06 \text{ keV}$$

Figura 4.15: Eficiència en energia simulat i experimental per a la matriu d'aigua

4.5 Resultats amb matriu de sòls

Les matrius patró de sòls tenen una densitat de $\rho=1,47 \text{ g/cm}^3$. Igual que en el cas de l'aigua la creació del material es realitza amb el programa `material.exe`, però a diferència del cas anterior aquí la composició química no es coneix amb exactitud. Recorrent a la bibliografia [10] s'obtenen les següents composicions a mode d'exemple:

Element	Z	Soil 1	Soil 2	Soil 3	Soil 4
H	1	2,2	1,1	10,0	-
C	6	-	1,2	11,4	-
N	7	-	-	0,4	-
O	8	58,2	55,8	78,0	45,2
Mg	12	-	-	-	2,5
Al	13	10,6	7,2	-	8,3
Si	14	26,2	31,6	-	25,0
S	16	-	-	0,2	-
K	19	-	-	-	1,8
Ca	20	-	-	-	4,1
Ti	22	-	-	-	0,7
Mn	25	-	-	-	0,2
Fe	26	2,8	3,1	-	12,2

Taula 4.6: Composició química elemental per diferents sòls (en % en massa)

Com s'observa les composicions varien molt d'un tipus de sòl a un altre i, la matriu amb què es treballa no té per què coincidir amb cap d'aquestes.

La composició de radioisòtops dels sòls patró és la mateixa que la de l'aigua però la simulació d'uns quants d'aquests amb diferents sòls posa de manifest que la composició influeix molt en els recomptes que es detectaran, sobretot pel que fa a baixes energies. En energies mig-altes (a partir del Cd-109) s'observa que entre una composició i una altra la diferència no és massa exagerada, si bé els valors en tots els casos tendeixen a ser superiors als experimentals. A baixes energies però, que és el cas del Pb-210 i l'Am-241 els canvis són molt més elevats quan es passa d'un tipus de sòl a un altre. El fet que hi hagi aquest comportament tan desigual indica que el motiu d'aquestes diferències ha de ser un factor que en variar-lo afecti molt a energies baixes però poc a energies altes, el coeficient d'atenuació lineal, tal com s'ha vist en el capítol de conceptes bàsics. A la taula 4.7 es mostren resultats per al sòl amb $\rho = 1.47 \text{ g/cm}^3$ i es pot observar el que s'ha comentat.

Radionúclid	E (keV)	ϵ_{exp} (k=2)	Δ soil1(%) (k=2)	Δ soil3(%) (k=2)	Δ soil4(%) (k=2)
Pb-210	46,54	0,04742 ± 0,00311	19,47 ± 7,84	50,16 ± 9,86	-16,15 ± 5,50
Am-241	59,54	0,06079 ± 0,00248	17,16 ± 4,78	29,19 ± 5,27	-3,79 ± 3,93
Cd-109	88,03	0,07363 ± 0,00260	-	4,88 ± 3,79	-
Co-57	122,06	0,07460 ± 0,00260	-	-1,44 ± 3,45	-
Ce-139	165,86	0,06168 ± 0,00246	-	5,22 ± 4,21	-
Hg-203	279,18	0,04121 ± 0,00176	-	-	-
Sn-113	391,70	0,03230 ± 0,00098	5,34 ± 3,21	-	-
Sr-85	514,00	0,02598 ± 0,00074	4,57 ± 2,99	3,05 ± 2,95	4,79 ± 3,50
Cs-137	661,66	0,02162 ± 0,00059	3,26 ± 2,83	1,81 ± 2,79	3,99 ± 2,88
Y-88	898,04	0,01562 ± 0,00042	4,41 ± 2,81	-	-
Co-60	1173,23	0,01252 ± 0,00035	6,49 ± 2,96	4,92 ± 2,93	6,67 ± 3,12
Co-60	1332,5	0,01126 ± 0,00032	7,13 ± 3,06	6,00 ± 3,04	7,85 ± 3,27

Taula 4.7: Taula on es mostren les diferències relatives percentuals per diferents composicions de sòls amb una densitat de 1.47 g/cc

La determinació d'aquest material és vital per poder fer la simulació correctament, a la següent secció es discuteix el procediment que cal dur a terme.

4.5.1 Caracterització d'un sòl

El procediment descrit a continuació té com a objectiu la caracterització de materials que componen una mostra de sòl i el seu recipient per poder estimar, amb la menor incertesa possible, la corba d'eficiències en el rang de baixes energies. De la composició química d'un material en depenen les seves característiques, entre elles paràmetres com és el coeficient d'atenuació, el qual determina l'atenuació d'un feix gamma en travessar-lo.

L'eficiència per una determinada energia depèn de la mostra que s'està analitzant i és el que permet estimar l'activitat que hi ha present, segons l'expressió:

$$\epsilon_{exp} = \frac{n^{\circ} \text{ de comptes}}{A \cdot t \cdot Y} \quad 4.3.$$

Per tal de conèixer l'eficiència s'utilitzen mostres patró amb activitats conegudes d'una sèrie de radioisòtops que permeten definir el que es coneix com a corba d'eficiències com la que es mostra a la figura 4.16, o com la que s'ha representat per a la matriu d'aigua.

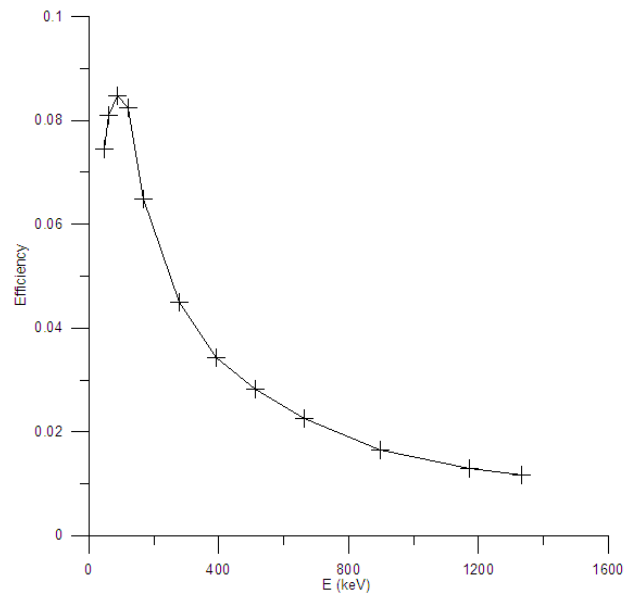


Figura 4.16: Corba de calibratge d'eficiències en energia

Aquestes corbes, que es basen en una aproximació exponencial, permeten conèixer l'eficiència en tot el rang energètic a partir d'uns casos concrets. A baixes energies però, els coeficients d'atenuació canvien de forma molt brusca i són molt sensibles a les diferents característiques dels sòls. Per tant, la determinació de la corba d'eficiències en el rang d'energies baixes per una mostra de sòl incògnita, pot ser molt diferent a la corba obtinguda amb el sòl patró. És necessari conèixer detalladament la composició del material per a cada cas en concret.

Les mostres que arriben al laboratori del LARA per determinar la seva radioactivitat són molt diverses. En el cas de la mostra d'aigua, sempre es té una composició força homogènia, de manera que es pot utilitzar la corba d'eficiències obtinguda amb una mostra patró sense que l'error que es cometi sigui significatiu. És necessari doncs disposar d'un patró d'aigua però, un cop obtinguts els resultats, es poden aplicar en mostres futures. Tot i així, tal com s'ha indicat, les mostres de sòl que arriben al LARA tenen composició molt variada. La composició de la mostra diferirà de la composició del possible patró que es disposi, de manera que la corba d'eficiència no es podrà aplicar de forma generalitzada. Per tant, és necessari caracteritzar el material per a cada cas i per això es farà ús de la simulació Montecarlo, ja que els anàlisis químics que permetrien conèixer la composició detallada de la mostra són molt costosos i no són viables.

Per veure la importància experimental que pren el fet de tenir el patró de la matriu corresponent, a la taula 4.8 es mostren els resultats per al Pb-210 en l'eficiència ajustada per a una matriu de sòl amb $\rho=1,3 \text{ g/cm}^3$. Abans de tenir la mostra en el patró, l'eficiència es determinava a partir de la corba de calibratge d'eficiències, com la que es veu a la figura 4.16, però un cop es té la mostra en el patró s'observa que aquest resultat canvia substancialment.

	Eff. Ajustada sense patró	Eff. Ajustada amb patró	Δ (%)
Pb-210	0,05029	0,05455	8,47

Taula 4.8: Comparativa de la diferència d'eficiències entre tenir o no tenir en el patró de la matriu corresponent el radionúclid d'interés

L'americi és un element que té el seu fotopic a una energia relativament baixa (59,54 keV) i que a més presenta una sèrie de gammes i raigs X a energies més baixes encara. A partir d'estudiar el seu comportament davant el material de composició desconeguda, es podran extreure les eficiències d'altres radionúclids de pics fotoelèctrics menys energètics -com el Pb-210 amb tan sols 46,5 keV-. A continuació es mostra la metodologia de treball que es seguirà.

Metodologia de treball:

- i. Comprovar la bona caracterització de la geometria del recipient i el bon comportament del programa de simulació, a partir d'una simulació amb el recipient buit i una font puntual d'Am-241.
- ii. Adquirir l'espectre experimental d'una font puntual d'Am-241 situada sobre el recipient quan ha de travessar el material.
- iii. Adquirir l'espectre experimental de la mostra matriu i restar-li a l'espectre del punt ii).
- iv. Superposar l'espectre experimental a la plantilla de sòls simulats.
- v. Escollir, vist el seu comportament d'atenuació, un material per reproduir la simulació del segon punt. Si és necessari a la composició del material s'hi afegirà H o Fe, segons si es vol reduir o augmentar l'atenuació respectivament.
- vi. Per conèixer quin % d'H (o Fe) cal afegir, realitzar una plantilla amb diferents valors d'aquest percentatge a la qual se superposarà de nou l'espectre experimental.
- vii. Escollir la simulació que presenti més acord amb l'espectre experimental.
- viii. Comprovar que l'eficiència per al pic d'Am-241 és l'adient, si no és així repetir el punt v), amb d'altres elements menys extrems, és a dir, que tinguin coeficients d'atenuació més intermedis entre el H i el Fe.
- ix. Fer la simulació amb el recipient ple de sòl (ja sense font puntual) per calcular l'eficiència dels radioisòtops en aquest material.

És important indicar que el fet d'haver trobat aquest material que té un bon comportament no implica que s'hagi trobat la composició real, això és gairebé impossible donada les infinites possibilitats. El que s'ha trobat és un material que es comporta de forma similar al real, en aspectes d'atenuació, en aquest rang de treball.

Aplicació de la metodologia

Quan una mostra de sòl arriba al LARA es col·loca dins un pot de plàstic de 100ml de capacitat que se situa sobre la finestra del detector. El primer pas es comprovar que la geometria que s'utilitzarà de forma general per a les mesures de sòls està ben caracteritzat, tant pel que fa a materials com a distàncies. Col·locant una font puntual d'americi sobre un pot de plàstic buit d'aquest tipus, es podrà comprovar si la definició de la geometria i el material del pot és la correcta. A la figura 4.17 es mostra el disseny de la geometria i a la figura 4.18 els resultats obtinguts amb PENELOPE/PenEasy-eXtended. Entre els espectres simulat i experimental s'observa un acord força gran a la zona entre 40-60 keV i la representació, en la simulació, de tots els pics de raigs X que hi ha en la part més baixa de l'espectre. Les zones de discordança, es poden atribuir a efectes de bremsstrahlung no simulats, tal com s'ha vist en l'apartat anterior.

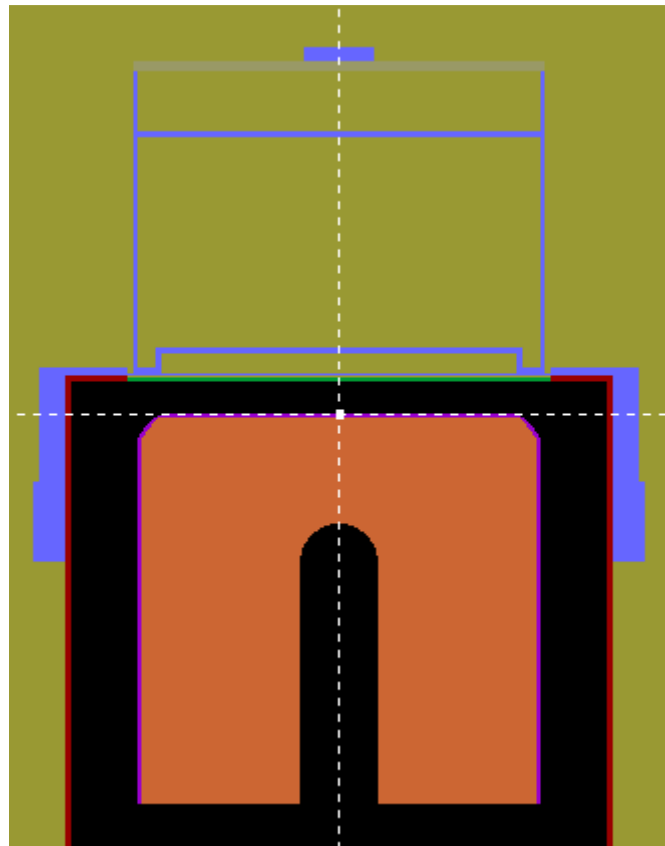


Figura 4.17: Detall de la geometria utilitzada per a la font puntual d'Am-241 sobre el recipient buit. Imatge obtinguda amb el programa gview2D.

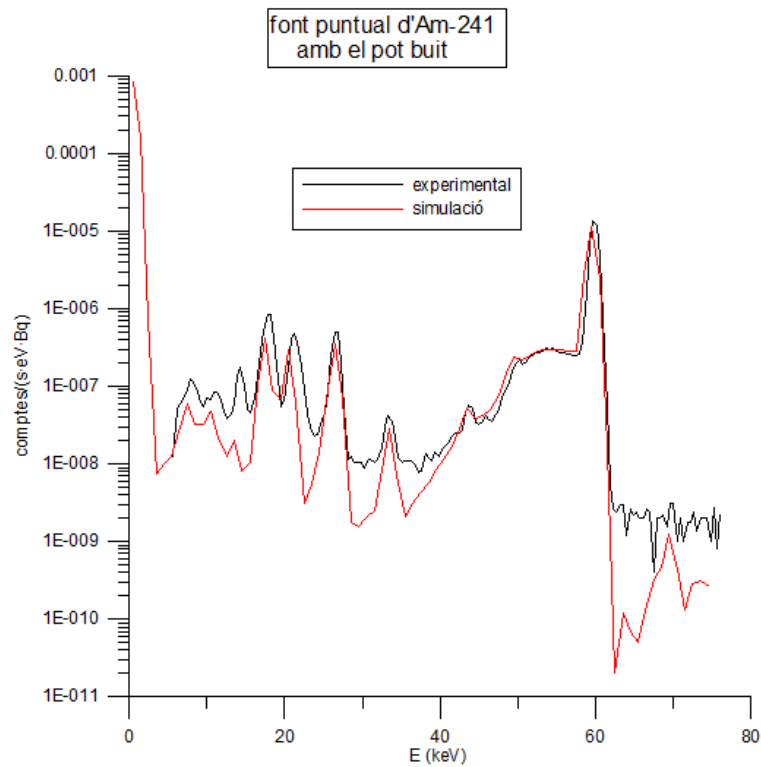


Figura 4.18: Espectre experimental i simulat de la font puntual d'Am-241 sobre el recipient buit.

Seguidament es repeteix procés però amb el pot ple la mostra incògnita tal com es mostra en la figura 4.19, amb l'objectiu de caracteritzar la composició del material d'aquesta mostra. L'espectre d'Am-241 es veurà afectat per la presència del sòl, per tant, si en la simulació s'aconsegueix reproduir l'espectre experimental de la mateixa manera que en el cas del pot buit, s'haurà aconseguit un material que es comporta igual que el real i que permet simular amb ell. La geometria amb el recipient ple amb la que es duen a terme les simulacions de mostra es presenten a la figura 4.20.

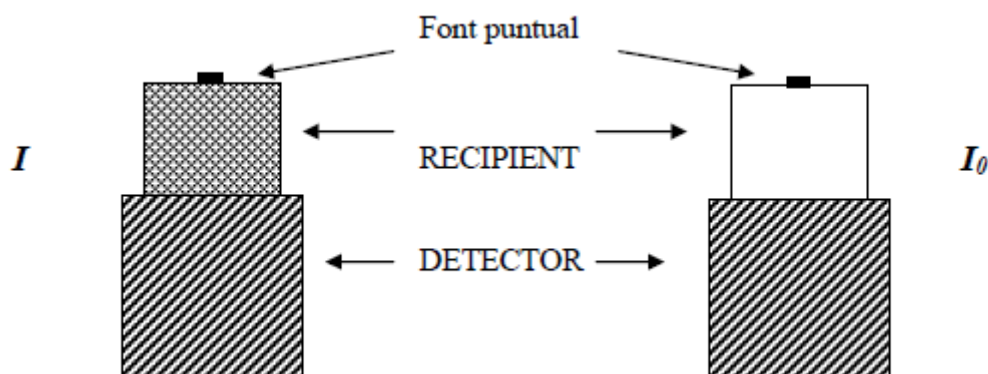


Figura 4.19: Representació esquemàtica del procediment seguit amb el recipient ple i el recipient buit. [9]

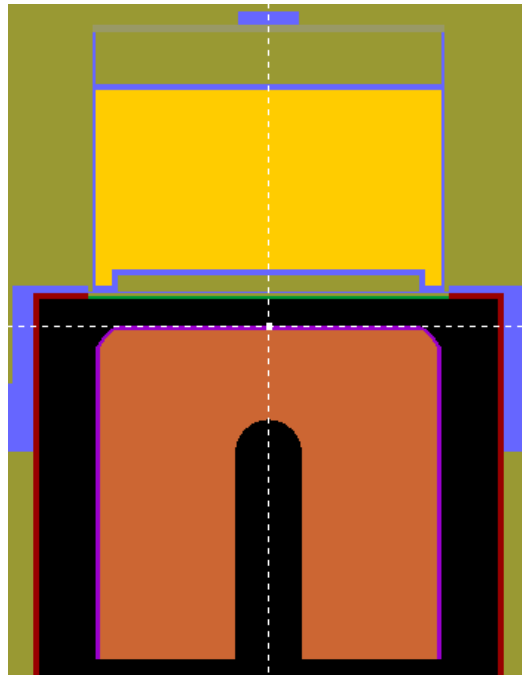


Figura 4.20: Detall de la geometria utilitzada per a la font puntual d'Am-241 sobre el recipient ple. Imatge obtinguda amb el programa gview2D.

L'espectre que s'obtingui de la simulació amb la font d'Am-241 es comparà amb l'espectre experimental al que prèviament se li ha restat un espectre obtingut sense la font puntual d'Am-241. A la figura 4.21 es mostra l'espectre experimental i l'espectre experimental al qual se li ha restat l'espectre obtingut sense la font puntual d'Am-241. Com es pot veure hi ha uns pics que si no es resta el fons que suposa el sòl radioactiu en si mateix apareixerien a l'espectre, deguts a altres radionúclids de la mostra i que emmascaren l'espectre de la font puntual d'Am-241, que és el que s'està estudiant de moment.

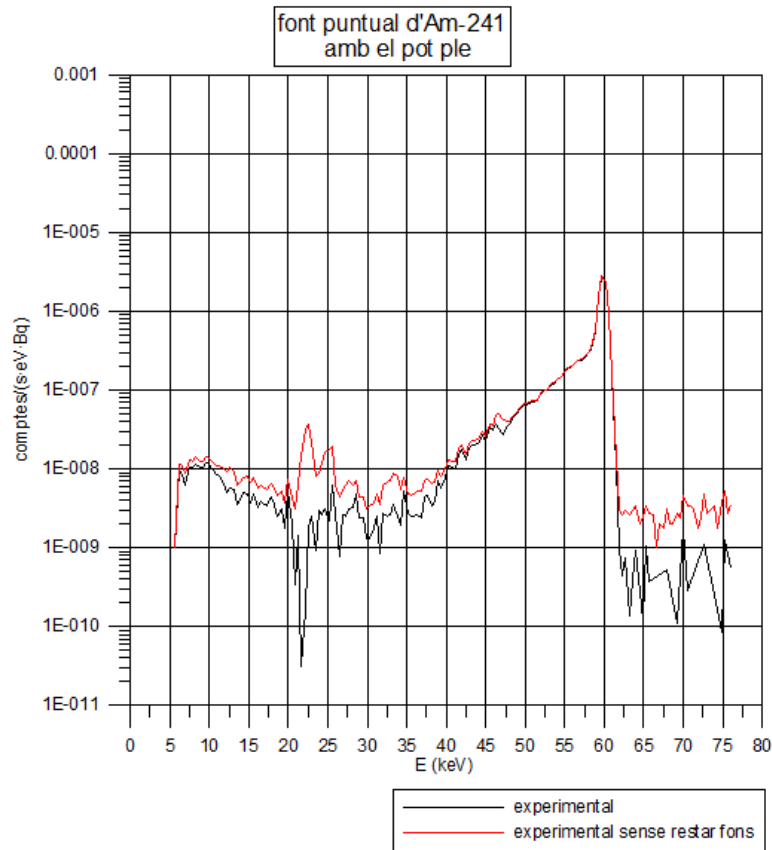


Figura 4.21: Comparativa de l'espectre de la font puntual sobre el pot ple, restant-li el fons que suposa el sòl radioactiu i sense restar-li.

Per aconseguir que la simulació reproduïxi l'espectre experimental caldrà que el sòl simulat atenuï de la mateixa manera que el real. Reproduir això en tot el rang energètic implicaria conèixer exactament la composició del material, que és justament el que no se sap. Per tant l'objectiu serà disposar d'una corba d'eficiència validada fins a una energia d'uns 35-40 keV, per sota d'aquesta energia, no s'espera que el LARA dugui a terme determinacions de l'activitat de radionúclids.

A la taula 4.6 es mostraven diferents composicions trobades a la bibliografia[10] i que serviran per fer la nostra plantilla. Els sòls tenen composició diversa i per tant els seus coeficients d'atenuació seran molt diferents. A partir del programa `tables.exe` (Annex 3) es pot extreure una taula amb els coeficients d'atenuació màssics totals. Tot i així si es té en compte que en materials compostos com és el cas dels sòls, l'atenuació total es deu als coeficients d'atenuació de cada element individual segons l'expressió 4.4, aquests coeficients es poden calcular directament.

$$coeff.total = \alpha_i \sum_i coeff.element i \quad 4.4.$$

On α és la proporció d'aquell element en el total i es fa el sumatori sobre i elements que formen el sòl. A continuació a la figura 4.22 es mostra un exemple del càlcul que expressa l'equació 4.4 per al sòl tipus 1.

4. RESULTATS

Energy (eV)	Proporció H	Coeff. H	Proporció C	Coeff. C	Proporció N	Coeff. N	Proporció O	Coeff. O	Proporció Mg	Coeff. Mg	Proporció Al	Coeff. Al	Proporció Si	Coeff. Si
10000	0,022	0,38213	0	2,38074	0	3,87806	0,582	5,95122	0	21,0522	0,106	26,2388	0,262	33,8854
12500	0,022	0,378357	0	1,28411	0	2,0346	0,582	3,08396	0	10,8839	0,106	13,6073	0,262	17,6541
15000	0,022	0,375018	0	0,812143	0	1,2385	0,582	1,83867	0	6,35987	0,106	7,95772	0,262	10,3373
17500	0,022	0,371812	0	0,576866	0	0,840794	0,582	1,215	0	4,05642	0,106	5,06708	0,262	6,58107
20000	0,022	0,368702	0	0,446015	0	0,620392	0,582	0,868327	0	2,76434	0,106	3,4417	0,262	4,46706
25000	0,022	0,362571	0	0,316894	0	0,404496	0,582	0,529473	0	1,49164	0,106	1,83667	0,262	2,36613
30000	0,022	0,356692	0	0,25881	0	0,308698	0,582	0,380439	0	0,932707	0,106	1,13021	0,262	1,43754
35000	0,022	0,351029	0	0,227942	0	0,25914	0,582	0,304035	0	0,649253	0,106	0,771285	0,262	0,966701
40000	0,022	0,34561	0	0,209372	0	0,230261	0,582	0,260401	0	0,49014	0,106	0,570277	0,262	0,702797
45000	0,022	0,340368	0	0,197062	0	0,211771	0,582	0,232977	0	0,393292	0,106	0,448169	0,262	0,542615
50000	0,022	0,335361	0	0,18828	0	0,199068	0,582	0,214619	0	0,330929	0,106	0,36982	0,262	0,439973
60000	0,022	0,325917	0	0,176217	0	0,182587	0,582	0,19177	0	0,258406	0,106	0,27921	0,262	0,321979
70000	0,022	0,317138	0	0,167895	0	0,172034	0,582	0,177973	0	0,219529	0,106	0,231231	0,262	0,259994

Energy (eV)	Proporció S	Coeff. S	Proporció K	Coeff. K	Proporció Ca	Coeff. Ca	Proporció Ti	Coeff. Ti	Proporció Mn	Coeff. Mn	Proporció Fe	Coeff. Fe	Coeff.total
10000	0	50,1498	0	79,0774	0	93,3879	0	110,696	0	151,411	0,028	170,2	19,8969045
12500	0	26,339	0	42,126	0	49,9881	0	59,8071	0	82,9641	0,028	93,7637	10,4963202
15000	0	15,5079	0	25,0345	0	29,801	0	35,8974	0	50,2805	0,028	57,0743	6,22832766
17500	0	9,90057	0	16,0766	0	19,1698	0	23,1952	0	32,7637	0,028	37,3191	4,02159548
20000	0	6,70834	0	10,9352	0	13,0635	0	15,8536	0	22,5548	0,028	25,6911	2,76801848
25000	0	3,52751	0	5,74815	0	6,87159	0	8,37239	0	11,9964	0,028	13,7114	1,51466213
30000	0	2,11326	0	3,4144	0	4,08008	0	4,97216	0	7,14777	0,028	8,18061	0,95475754
35000	0	1,39373	0	2,2164	0	2,64442	0	3,2138	0	4,61517	0,028	5,28686	0,66773496
40000	0	0,988285	0	1,54184	0	1,8304	0	2,21468	0	3,17021	0,028	3,63275	0,50545598
45000	0	0,743468	0	1,1314	0	1,33775	0	1,6055	0	2,28643	0,028	2,61567	0,40599051
50000	0	0,586053	0	0,868968	0	1,01985	0	1,21399	0	1,71464	0,028	1,95954	0,34162717
60000	0	0,406619	0	0,568561	0	0,65864	0	0,766561	0	1,06068	0,028	1,20617	0,26650783
70000	0	0,313334	0	0,414148	0	0,472255	0	0,536623	0	0,723093	0,028	0,816938	0,2260605

Figura 4.22: Mostra per al sòl 1 del càlcul del coeficient d'atenuació màssic total

Un cop caracteritzats els sòls pel que fa la seva atenuació. Es realitza la simulació de la font puntual d'Am-241 sobre el pot ple de sòl amb tots ells i es compara amb el resultat experimental. Els resultats es mostren a la figura 4.23 i permeten extreure diverses conclusions. En el cas del sòl tipus 3 es pot descartar, ja que el seu comportament difereix molt de l'espectre experimental. Per al cas dels sòls 1 i 2 presenten un comportament molt similar i en els dos casos, la simulació presenta menys atenuació que la realitat. Finalment en el cas del sòl tipus 4, la simulació atenua menys que l'experiment i, més concretament, es pot observar que per baixes energies aquest distanciament entre experiment i simulació es fa més notable.

Aquestes quatre simulacions són les que servien de plantilla per altres mostres que puguin arribar amb la mateixa densitat.

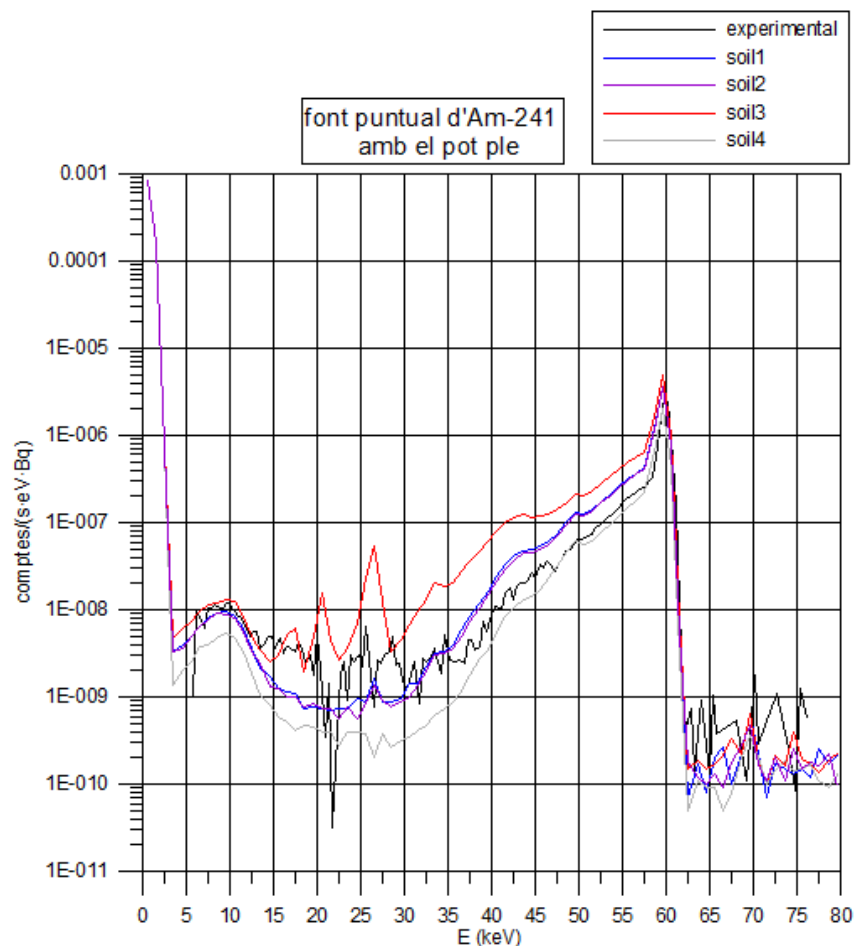


Figura 4.23: Superposició de l'espectre experimental sobre les quatre simulacions de sòl

El comportament d'aquests sòls en l'eficiència del fotopic d'Am-241 són els que es mostren a la taula 4.9 i a la figura 4.24 i també posen de manifest les seves diferències.

	Font puntual Am-241 experimental	Soil 1	Δ (%)
Eficiència	0.01003 ± 0.00081	0.01437 ± 0.00004	43.27 ± 11.58

	Font puntual Am-241 experimental	Soil 2	Δ (%)
Eficiència	0.01003 ± 0.00081	0.01435 ± 0.00001	43.07 ± 11.55

	Font puntual Am-241 experimental	Soil 3	Δ (%)
Eficiència	0.01003 ± 0.00081	0.01883 ± 0.00005	87.74 ± 15.76

	Font puntual Am-241 experimental	Soil 4	Δ (%)
Eficiència	0.01003 ± 0.00081	0.00813 ± 0.00003	-18.94 ± 6.55

Taula 4.9: Eficiències en el fotopic de l'americ per als diferents tipus de sòls

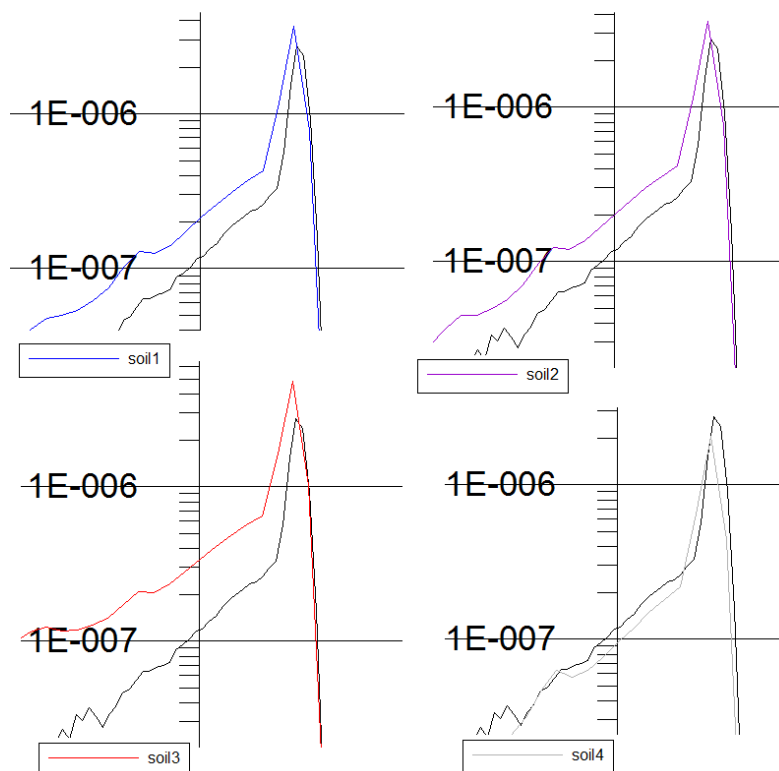


Figura 4.24: Representació del fotopic de l'americ en l'espectre simulat i experimental per a cada sòl.

Com s'ha dit la diferència entre coeficients d'atenuació degut a la composició es més marcat a baixes energies, de tal manera que les modificacions que es facin tindran més afectació en aquest rang. Per aquest motiu es treballarà amb el sòl tipus 4, perquè les modificacions que se li apliquin afectaran la zona energèticament més baixa, és a dir, la que presenta més desviació.

Com que en el cas del sòl 4 el que cal es reduir l'atenuació es procedirà a incrementar el % d'hidrogen (amb un coeficient d'atenuació baix) que se li restarà al % de Fe (amb un coeficient d'atenuació alt). Aquesta forma de procedir es realitzaria en sentit contrari si l'objectiu fos augmentar l'atenuació. A la figura 4.22 on apareixen els coeficients d'atenuació de tots els elements, es pot observar aquesta diferència.

El percentatge d'hidrogen que proporcionarà el resultat adequat es desconeix, de manera que es fan simulacions amb un 5, un 10 i un 15% més d'hidrogen (en l'últim cas com que de ferro només n'hi ha un 12.2% també s'ha restat silici). Així doncs la composició d'aquests sòls serà la que es mostra a la taula 4.10.

Element	Z	Soil 4	Soil 4 + 5% d'H	Soil 4 + 10% d'H	Soil 4 + 15% d'H
H	1	-	5	10	15
C	6	-	-	-	-
N	7	-	-	-	-
O	8	45.2	45.2	45.2	45.2
Mg	12	2.5	2.5	2.5	2.5
Al	13	8.3	8.3	8.3	8.3
Si	14	25.0	25.0	25.0	20.0
S	16	-	-	-	-
K	19	1.8	1.8	1.8	1.8
Ca	20	4.1	4.1	4.1	4.1
Ti	22	0.7	0.7	0.7	0.7
Mn	25	0.2	0.2	0.2	0.2
Fe	26	12.2	7.2	2.2	2.2

Taula 4.10: Composicions dels sòl 4 amb diferents increments d'hidrogen

Els resultats de les simulacions amb aquestes variants del sòl 4 es mostren en la figura 4.25, on es pot veure que el millor resultat s'obté afegint un 5% d'H. També s'observa que entre afegir un 10 o un 15% de més d'hidrogen gairebé no hi ha diferència. Això es deu a que tal com s'ha dit, en el cas del 15%, s'ha restat un 10% de ferro (igual que per al cas d'afegir un 10% d'H) i l'altre 5% se li ha restat al Si (ja que només es disposa d'un 12,2% de Fe en la

4. RESULTATS

composició original), però com que el seu coeficient d'atenuació es força més petit que per al ferro, la diferència gairebé no és apreciable.

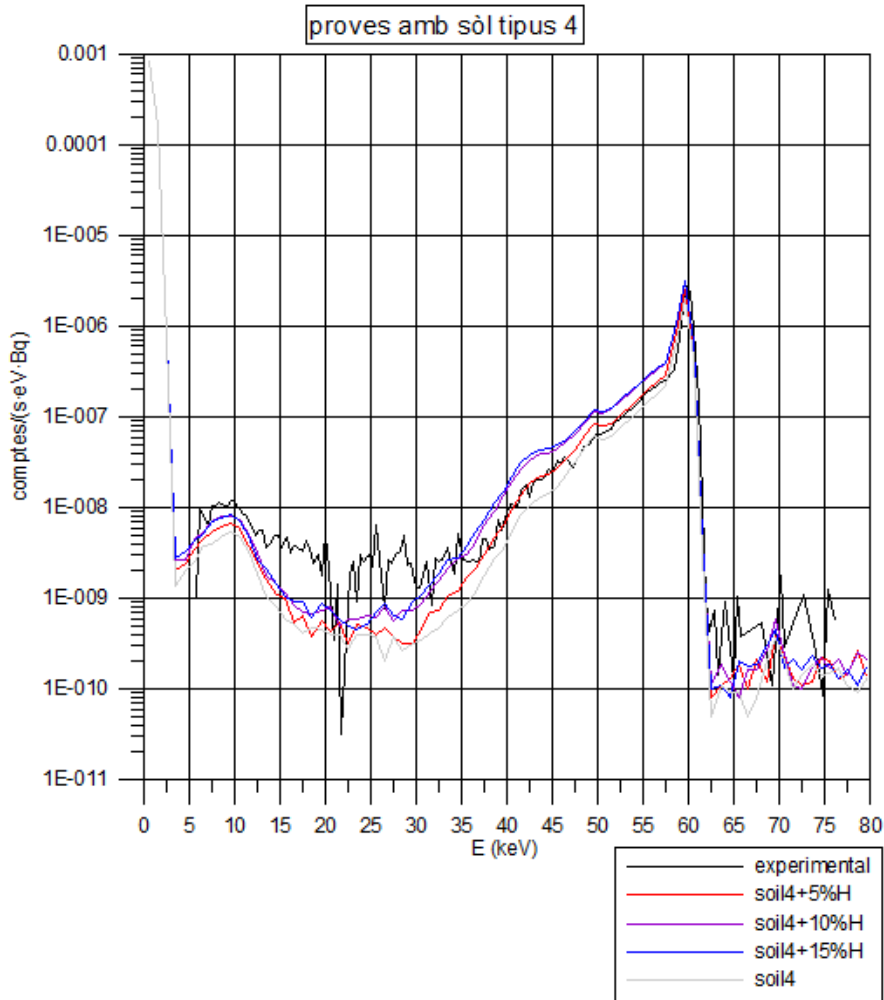


Figura 4.25: Representació dels espectres simulats de les variants del sòl 4

En aquest cas del sòl 4 més un 5% d'hidrogen, l'eficiència del fòtòpic d'Am-241 passa a ser molt més propera al resultat experimental, tal com mostra la taula 4.11.

	Font puntual Am-241 experimental	Soil 4 +5% d'H	Δ (%)
Eficiència	$0,01003 \pm 0.00081$	$0,00999 \pm 0.00003$	$-0,39 \pm 8,05$

Taula 4.11: Eficiència per al fòtòpic d'Am-241 amb el sòl 4 + 5% d'hidrogen

El bon comportament que s'observa en la figura 4.25 en el rang d'energies d'interès, juntament amb el bon resultat pel que fa l'eficiència del fòtòpic de l'Am-241, indica que la composició triada tindrà un comportament molt similar al sòl real de composició desconeguda. Aquesta comprovació del fòtòpic de l'Am-241 cal fer-la sempre, ja que per tal de triar el material de simulació s'està agafant com a referència la coincidència amb l'espectre

4. RESULTATS

experimental de l'Am-241. Un desviament relatiu molt gran en el pic no garanteix que, encara que hi hagi coincidència a la zona d'interès, el resultat sigui fiable.

A continuació es fa la simulació d'una mesura amb el recipient de plàstic ple d'aquest material (sense cap font puntual) per tal de mesurar l'eficiència del Pb-210 i l'Am-241, ja que com ja s'ha explicat cal fer simulacions individualitzades de cada isòtop emissor. És a dir, tal com reproduïx la figura 4.26, la mesura de la matriu que es realitza al LARA per determinar el contingut radioactiu del sòl.

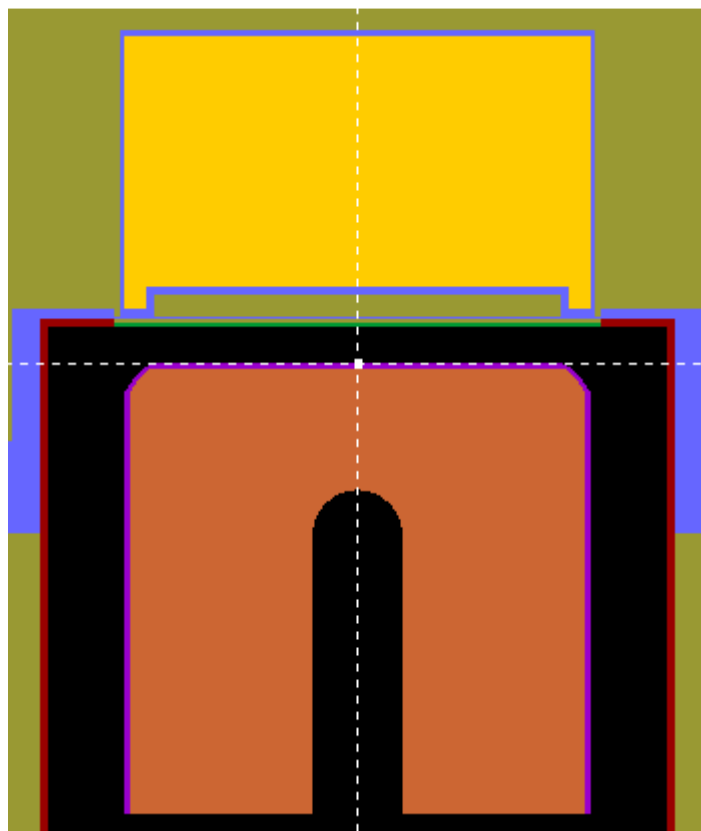


Figura 4.26: Detall de la geometria utilitzada per al recipient ple del material mostra. Imatge obtinguda amb el programa gview2D.

Com que aquests sòls són patrons es coneix amb certesa l'eficiència tant del Pb-210 com del Am-241 i els resultats es mostren a la taula 4.12.

	Pb-210 experimental	Soil 4 + 5% H	Δ (%)
Eficiència	0.04742 ± 0.00311	0.04507 ± 0.00004	-4.95 ± 6.24

	Am-241 experimental	Soil 4 + 5% H	Δ (%)
Eficiència	0.06079 ± 0.00248	0.06263 ± 0.00008	3.03 ± 4.21

Taula 4.12: Eficiència del Pb-210 i el Am-241 en la matriu de sòl (sòl simulat tipus 4 +5% d'H)

Aquests resultats si es no es tractés d'un patró es considerarien correctes, ja que la desviació en eficiència per a l'Am-241 es de tan sols un 3% i per a la font puntual, la precisió es gairebé exacta tal com es mostra a la taula 4.10. Tot i així, com que es tracta d'un patró s'intenta millorar més el resultat per al Pb-210, en una mostra del que caldria fer per una matriu desconeguda si el resultat de l'Am-241 no fos del tot satisfactori. En aquest cas caldria fer modificacions més fines incrementant progressivament el contingut d'hidrogen, però sense excedir-nos perquè ja s'ha vist a la figura 4.25 que un 10% s'allunyava massa de l'espectre experimental. A continuació es mostren els resultats per al cas d'un 6%, tant la simulació (a la figura 4.27) com l'eficiència en el fòtòpic de l'americí per a la font puntual d'Am-241 (a la taula 4.13) sobre el pot ple de material.

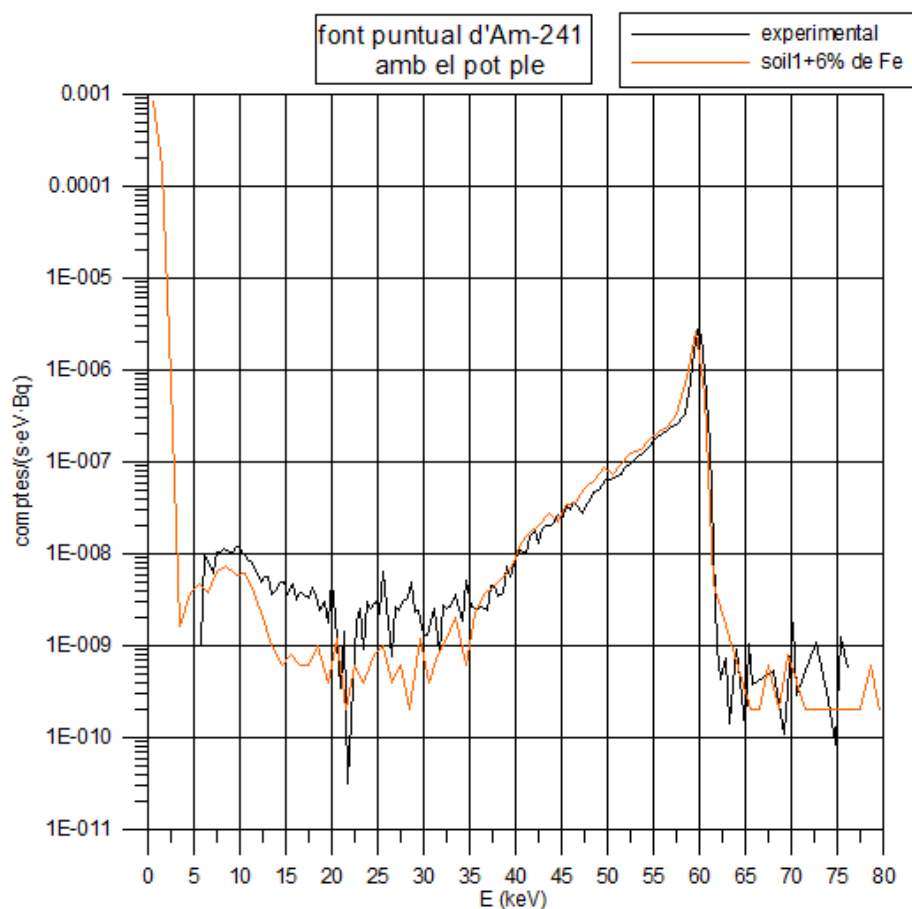


Figura 4.27: Representació de l'espectre experimental i simulat per un increment del 6% d'H en el sòl tipus 4

	Font puntual Am-241 experimental	Soil 4 +6% d'H	Δ (%)
Eficiència	0.01003 ± 0.00081	0.01048 ± 0.00003	4.49 ± 8.44

Taula 4.13: Resultats en eficiència en el fòtòpic de l'Am-241 per al sòl tipus 4 + 6% d'hidrogen

Tant la gràfica com l'eficiència en el fotopic està d'acord amb els resultats experimentals. De manera que com en el cas anterior, es realitza la simulació amb el recipient ple de material (sense font puntual) per trobar l'eficiència tant de l'Am-241 com del Pb-210, els resultat es mostren a la taula 4.14.

	Pb-210 experimental	Soil 4 + 6% H	Δ (%)
Eficiència	0.04742 ± 0.00311	0.04659 ± 0.00004	-1.75 ± 6.45

	Am-241 experimental	Soil 4 + 6% H	Δ (%)
Eficiència	0.06079 ± 0.00248	0.06371 ± 0.00008	$4,80 \pm 4,27$

Taula 4.14: Eficiència del Pb-210 i el Am-241 en la matriu de sòl (sòl simulat tipus 4 +6% d'H)

Com que l'objectiu principal es caracteritzar el material de la simulació per tal que es comporti a baixes energies com el real, finalment s'opta per triar la composició 4 amb un 6% extra d'hidrogen.

És important comentar que aquesta caracterització és adient per aquest sòl amb aquesta densitat, ja que com s'ha vist en el capítol de conceptes bàsics, la densitat també té influència sobre l'atenuació. Això implica que, per aquest mateix sòl però amb una altra densitat, serà necessari fer una nova caracterització del material.

Finalment doncs, el material que s'acaba escollint per al sòl de densitat $\rho = 1,47 \text{ g/cm}^3$ té la composició que es mostra a la taula 4.15 i les simulacions es realitzaran amb la geometria que mostra la figura 4.26.

Pel que fa la composició radiològica de la mostra en el moment de la medició és la següent: Pb-210 ($360,48 \pm 9,12 \text{ Bq}$), Am-241 ($39,16 \pm 0,42 \text{ Bq}$), Cd-109 ($506,30 \pm 6,43 \text{ Bq}$), Co-57 ($18,49 \pm 0,19 \text{ Bq}$), Ce-139 ($20,51 \pm 0,22 \text{ Bq}$), Hg-203 ($43,97 \pm 0,46 \text{ Bq}$), Sn-113 ($76,23 \pm 0,80 \text{ Bq}$), Sr-85 ($84,39 \pm 0,92 \text{ Bq}$), Cs-137 ($84,41 \pm 0,90 \text{ Bq}$), Y-88 ($152,33 \pm 1,58 \text{ Bq}$) i Co-60 ($102,03 \pm 1,07 \text{ Bq}$).

Element	Z	Soil 4 +6% d 'H
H	1	6
C	6	-
N	7	-
O	8	45,2
Mg	12	2,5
Al	13	8,3
Si	14	25,0
S	16	-

4. RESULTATS

K	19	1,8
Ca	20	4,1
Ti	22	0,7
Mn	25	0,2
Fe	26	6,2

Taula 4.15: Composició del material escollit per fer les simulacions per al sòl de $\rho=1.47 \text{ g/cm}^3$

Els resultats de les eficiències per radionúclid determinades amb aquest sòl que s'ha escollit (soil4+6% de H) es mostren a la taula 4.16. A la figura 4.28 es poden veure els espectres simulats i experimental i a la figura 4.29, tal com s'ha fet per la matriu d'aigua un detall per baixes energies.

Radionúclid	E (keV)	$\epsilon_{\text{exp}} (k=2)$	$\epsilon_{\text{MC}} (k=2)$	$\Delta \text{ soil4 + 6\% d'H}(\%) (k=2)$
Pb-210	46,54	$0,04742 \pm 0,00311$	$0,04659 \pm 0,00004$	$-1,75 \pm 6,44$
Am-241	59,54	$0,06079 \pm 0,00248$	$0,06371 \pm 0,00008$	$4,80 \pm 4,27$
Cd-109	88,03	$0,07363 \pm 0,00260$	$0,07320 \pm 0,00011$	$-0,58 \pm 3,51$
Co-57	122,06	$0,07460 \pm 0,00260$	$0,07271 \pm 0,00014$	$2,53 \pm 3,40$
Ce-139	165,86	$0,06168 \pm 0,00246$	$0,06512 \pm 0,00005$	$5,56 \pm 4,21$
Hg-203	279,18	$0,04121 \pm 0,00176$	$0,04487 \pm 0,00009$	$8,88 \pm 4,66$
Sn-113	391,70	$0,03230 \pm 0,00098$	$0,03371 \pm 0,00009$	$4,37 \pm 3,18$
Sr-85	514,00	$0,02598 \pm 0,00074$	$0,02682 \pm 0,00017$	$3,23 \pm 3,01$
Cs-137	661,66	$0,02162 \pm 0,00059$	$0,02219 \pm 0,00003$	$2,64 \pm 2,80$
Y-88	898,04	$0,01586 \pm 0,00042$	$0,01621 \pm 0,00002$	$2,21 \pm 2,71$
Co-60	1173,23	$0,01252 \pm 0,00035$	$0,01327 \pm 0,00003$	$5,99 \pm 2,97$
Co-60	1332,5	$0,01126 \pm 0,00032$	$0,01199 \pm 0,00002$	$6,48 \pm 3,03$

Taula 4.16: Valors d'eficiència per la matriu de sòl de densitat $\rho=1.47 \text{ g/cm}^3$

En aquest cas els factors de correcció s'apliquen al Co-60 i al Y-88 i es mostren la taula 4.17, d'aquesta manera es pot traçar la gràfica de calibratge en energia que correspon a la figura 15 .

Radionúclid	E (keV)	ϵ_{MC} (k=2)	$\epsilon_{MC, amb PS}$ (k=2)	FC (k=2)
Co-60	1173,23	$0,01414 \pm 0,00015$	$0,01327 \pm 0,00003$	$1,066 \pm 0,013$
Co-60	1332,5	$0,01304 \pm 0,00015$	$0,01199 \pm 0,00002$	$1,088 \pm 0,014$
Y-88	898,04	$0,01732 \pm 0,00018$	$0,01621 \pm 0,00002$	$1,068 \pm 0,018$

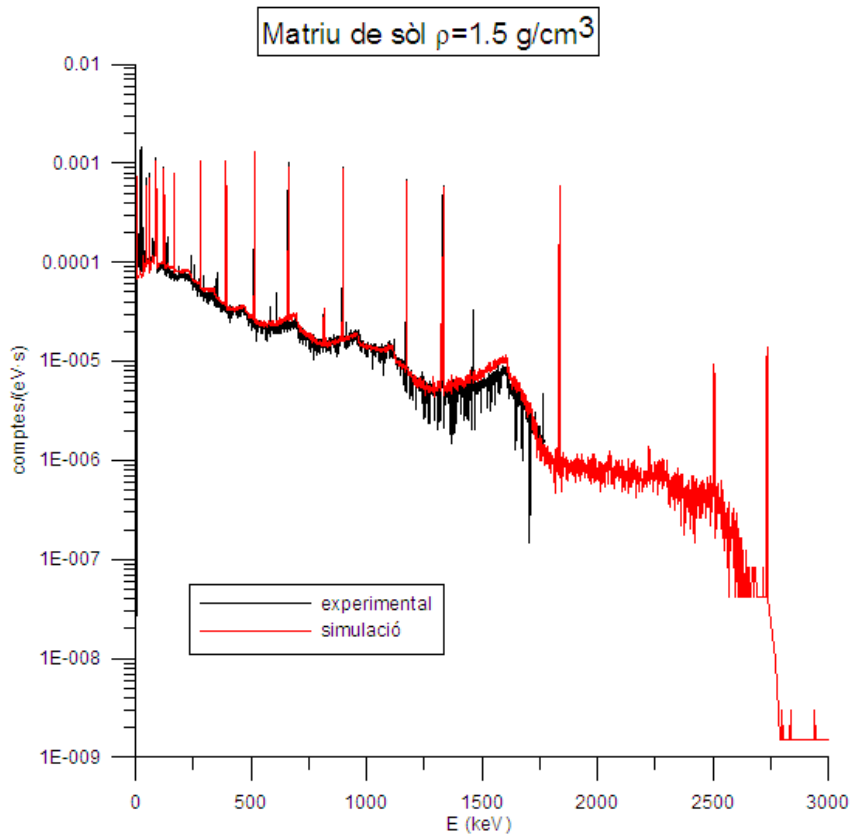
Taula 4.17: Factors de correcció en la matriu de sòl de densitat $\rho=1.47 \text{ g/cm}^3$ 

Figura 4.28: Comparació de l'espectre simulat i l'experimental per a la matriu de sòl

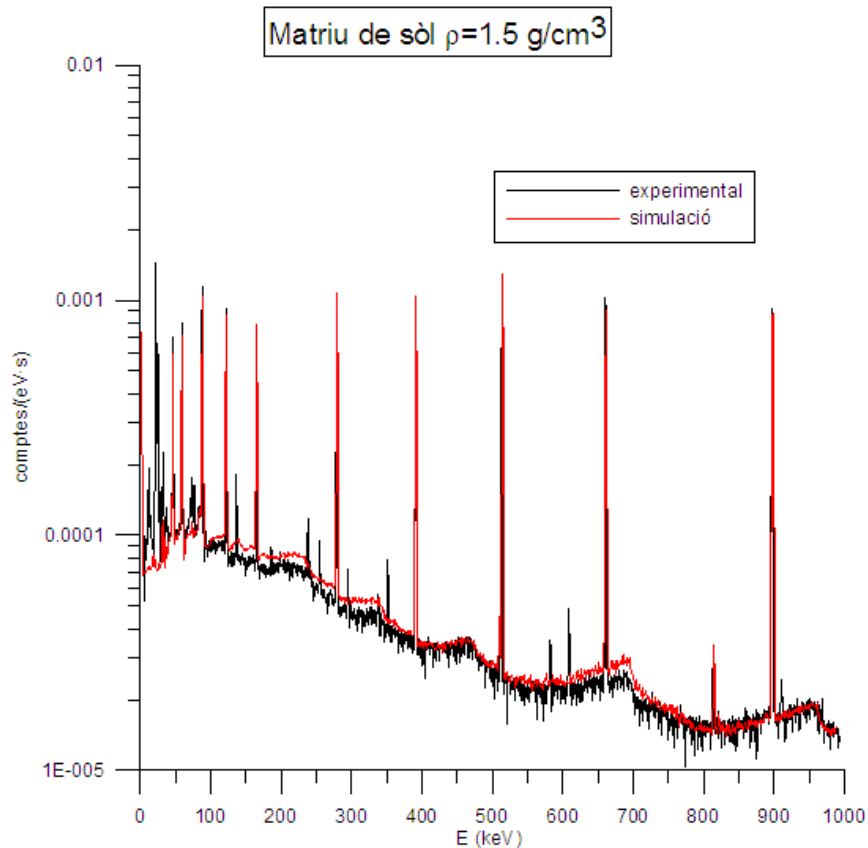
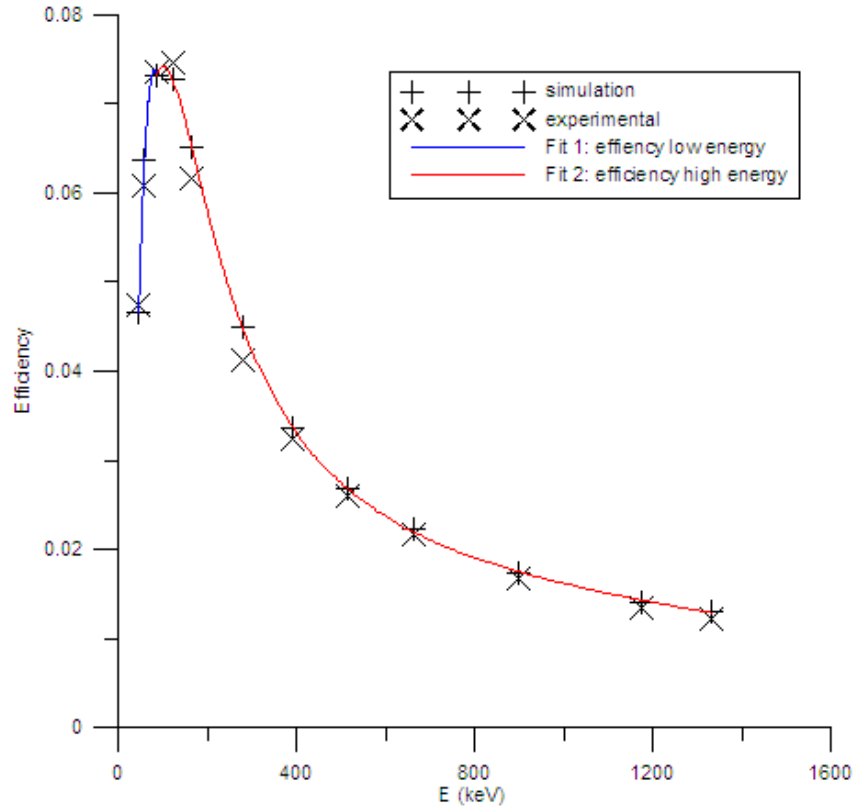


Figura 4.29: zoom de la matriu de sòl a baixes energies

En el detall a baixes energies es pot observar un efecte contrari al que passava en la simulació de matriu d'aigua i és que la simulació se'n va per sobre de l'espectre experimental. Aquest efecte però, possiblement es degui a la composició del material que, tal com s'ha indicat, no es coneix al 100%. Si bé s'ha aconseguit que a baixes energies el resultat en eficiències siguin satisfactoris i, per a la resta de radioisòtops, com es pot veure a la taula 4.15, els desviaments percentuals tinguin un comportament correcte, reproduir exactament l'espectre experimental serà molt més complexa si no es disposa d'una reproducció fidel de la composició real del material que es simula. En valors molt baixos sí que passa com en el cas de l'aigua i l'espectre simulat queda per sota de l'experimental degut a l'efecte bremsstrahlung.

A la figura 4.30 es pot observar el calibratge d'eficiències en energia obtingut a partir dels resultats de la taula 4.15, amb la corresponent corba d'ajust per als valors simulats.



$$\ln(\text{Eff}) = -30,48 + 12,65 \cdot \ln(\text{Eff}) - 1,436 \cdot (\ln(\text{Eff}))^2 \quad \text{si } E < 122,06 \text{ keV}$$

$$\ln(\text{Eff}) = 66,61 - 76,92 \cdot \ln(\text{Eff}) + 32,06 \cdot (\ln(\text{Eff}))^2 - 6,347 \cdot (\ln(\text{Eff}))^3 + 0,603 \cdot (\ln(\text{Eff}))^4 - 0,022 \cdot (\ln(\text{Eff}))^5 \quad \text{si } E > 122,06 \text{ keV}$$

Figura 4.30: Eficiència en energia simulat i experimental per a la matriu de sòl $\rho = 1.47 \text{ g/cm}^3$