

---

# **5. RESULTATS i DISCUSSIÓ**

## **PART I**

### **L'EMBASSAMENT DE FLIX I TRAM BAIX DEL RIU EBRE**

---

5.1.1 Introducció .....	96
5.1.2 Granulometria dels testimonis de Flix.....	96
5.1.3 Perfils de radionúclids naturals .....	96
5.1.4 Factors d'enriquiment.....	115
5.1.5 Estimació de l'inventari radioactiu.....	115
5.1.6 Datació dels testimonis de Flix.....	118
5.1.7 Associació d'altres contaminants als residus fosfatats NORM .....	118
5.1.8 Discussió de resultats de l'embassament de Flix.....	126
5.1.9.Sediments superficials del tram català del riu Ebre.....	132

El capítol 5 de Resultats i Discussió s'estructura en 4 parts:

- Part I. Es presenten els resultats de les mesures de radioactivitat natural dels fangs dels 5 lòbuls de contaminació de l'embassament de Flix. Amb l'objectiu d'avaluar la possible mobilització dels residus de Flix, també s'ha mesurat la radioactivitat natural i artificial dels sediments superficials de l'Ebre en el seu tram comprès des de la vila de Miravet fins a l'Illa de Buda, a la desembocadura de l'Ebre.
- Part II: Es presenten els perfils de  $^{210}\text{Pb}$  en excés i  $^{137}\text{Cs}$  dels testimonis sedimentaris de l'embassament de Camarasa, els inventaris dels radionúclids, les datacions, els càlculs dels ritmes de sedimentació, els fluxos de massa i de  $^{210}\text{Pb}$  en excés (testimonis sedimentaris i trampa de sediment) i una estimació del temps de vida útil de l'embassament.
- Part III. Es presenta un estudi de la distribució del flux de  $^{210}\text{Pb}$  en excés a partir d'un grup de sòls obtinguts a la conca de la Noguera Pallaresa. Es correlaciona el flux de  $^{210}\text{Pb}$  amb la precipitació i es calculen els factors de *focusing* o d'acumulació en les diferents parts de l'embassament de Camarasa.
- Part IV. Es presenten els resultats de la distribució de les anàlisis de  $^{210}\text{Pb}$  i  $^{137}\text{Cs}$  dels sediments superficials (0.5 cm) de 73 llacs dels Pirineus. En aquest apartat estudiem l'aplicació del  $^{210}\text{Pb}$  en excés com a potencial normalitzador de les concentracions dels contaminants presents en els llacs (Zn, Cd, HCB, HCH, DDE).

### 5.1.1 Introducció

Hem determinat els perfils de concentració d'alguns isòtops de les cadenes naturals radioactives de l' $^{238}\text{U}$  ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ) i del  $^{232}\text{Th}$ , així com també els perfils de  $^{40}\text{K}$  i de  $^{137}\text{Cs}$ . Val a dir que les dades granulomètriques i de metalls pesants i elements majoritaris que es citen en aquest apartat han estat realitzats a l'Institut de Ciències del Mar (ICM-CSIC) de Barcelona sota la direcció del Dr. Albert Palanques en el marc de la tesi doctoral en preparació d'en Marc Belzunces. Les dades de contaminants organoclorats que apareixen en el treball han estat elaborades pel Departament de Química Ambiental del Centre d'Investigació i Desenvolupament (CID-CSIC) dirigit pel Dr. Joan Grimalt.

La part I del capítol 5 es divideix en dos blocs:

- En un primer apartat es presenten els testimonis sedimentaris dels deltes de contaminació de l'embassament de Flix. Es descriuen els perfils granulomètrics, els perfils d'activitat dels radioelements de la cadena de l' $^{238}\text{U}$  i del  $^{232}\text{Th}$  en profunditat i s'estudien les correlacions entre els residus NORM i alguns dels metalls pesants i compostos organoclorats més rellevants.
- En un segon bloc (apartat 5.1.9.) es tracta la remobilització de radionúclids en el tram català del riu Ebre mitjançant la determinació de les activitats dels radioelements naturals presents en els sediments superficials del llit del riu.

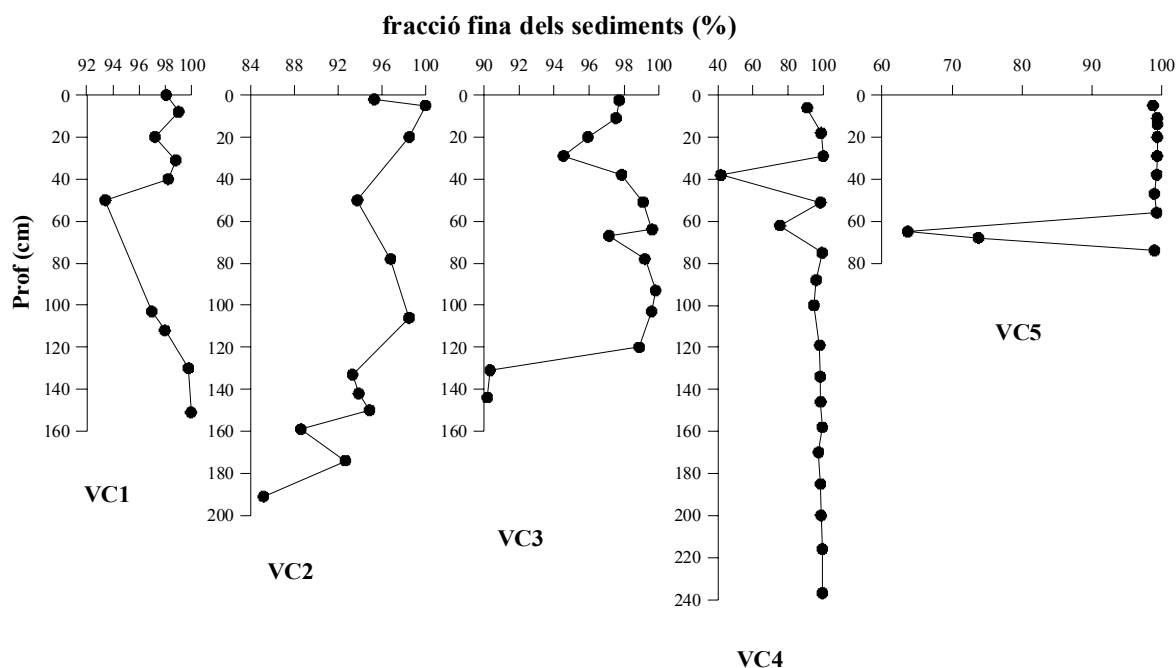
### 5.1.2 Granulometria dels testimonis sedimentaris de Flix

#### Granulometria

Els residus presents en els lòbuls de contaminació de l'embassament de Flix es caracteritzen per ser molt homogenis, amb poques oscil·lacions granulomètriques al llarg de tota la seva longitud i amb una distribució mitjana del 98% en fins (llims i argiles,  $<63\mu\text{m}$ ) (Fig 5.1.1) i del 2 % en grollers (sorres,  $>63\mu\text{m}$ ). En la Fig. 5.1.1 es mostren els perfils granulomètrics (fracció de fins) en profunditat dels 5 testimonis mostrejats a Flix.

### 5.1.3 Perfils de radionúclids naturals

En aquest apartat 5.1.3 es descriuen de manera detallada els perfils dels radionúclids naturals de la cadena de l' $^{238}\text{U}$  i del  $^{232}\text{Th}$  estudiats en els testimonis mostrejats a Flix, així com el perfil de  $^{137}\text{Cs}$  en el testimoni VC1. Els resultats es presenten des de la figura 5.1.6 fins a la figura 5.1.13. i des de la taula 9.1 fins a la taula 9.5. A la taula 5.1.1 es resumeixen els rangs de concentracions obtingudes per  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{238}\text{U}$  en els fangs de l'embassament de Flix separant entre tram contaminat i tram sense contaminar.



**Fig 5.1.1** Distribució granulomètrica de la fracció fina dels sediments de l'embassament de Flix (elaborada per Palanques i col·laboradors)

### Testimoni VC1

#### Perfil de $^{210}\text{Pb}$

El testimoni VC1 es troba aigües amunt del complex electroquímic, a les proximitats de la cua de l'embassament (vegeu Fig 4.9). La potència del testimoni és de 154 cm i està formada per lutites o fangs amb una tonalitat dominant de marró groguenc moderat, amb laminacions puntuals intercalades de color gris, gris-oliva i negre. La concentració de  $^{210}\text{Pb}$  en la secció analitzada més propera a la superfície del testimoni (3-6 cm) és de  $370 \pm 21 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . El perfil  $^{210}\text{Pb}$  mostra unes oscil·lacions importants al llarg dels primers 102 cm. L'activitat màxima de  $^{210}\text{Pb}$  és de  $410 \pm 11 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  i es registra a la secció 99-102 cm. El perfil mostra una clara reducció de les concentracions a partir de la secció 105-108 ( $57 \pm 3 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Aquest descens coincideix amb un canvi sobtat en el color del sediment que passa de marró oliva moderat a negre intens (108 – 116 cm), indicant un canvi en la naturalesa del material. Posteriorment, l'activitat de  $^{210}\text{Pb}$  es manté baixa i constant, al voltant dels  $30\text{-}40 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  fins al final del testimoni (150-153 cm). Els valors d'activitat de la part baixa del testimoni són similars a les concentracions naturals mesurades en els sediments superficials del tram baix del riu Ebre (vegeu l'apartat 5.1.9). Tanmateix la coloració que mostra el tram final no és la característica de sediments fluvials no contaminats, amb un color marró clar o fosc, sinó que s'observa la clara laminació de negre intens (108 al 116 cm), esmentada anteriorment, juntament amb diverses laminacions intercalades de color gris i gris-oliva (135 al 138 cm, 138 al 139 cm) (vegeu Fig 5.1.5 i Fig. 5.1.2).

*Perfil de  $^{226}\text{Ra}$* 

El perfil de  $^{226}\text{Ra}$  en profunditat presenta concentracions més elevades que el perfil de  $^{210}\text{Pb}$ . Tanmateix, el dos perfils presenten un comportament similar. La concentració de  $^{226}\text{Ra}$  a la superfície és de  $770 \pm 16 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  amb un màxim de  $900 \pm 42 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  a la secció 12-15 cm. A partir d'aquest màxim, l'activitat decreix progressivament en profunditat fins a la secció 84-87 cm amb una activitat de  $280 \pm 5 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Les darreres tres seccions analitzades, per sota dels 87 cm, presenten nivells naturals típics de la superfície del llit del riu Ebre, amb unes concentracions de  $24 \pm 5$  a  $42 \pm 9 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

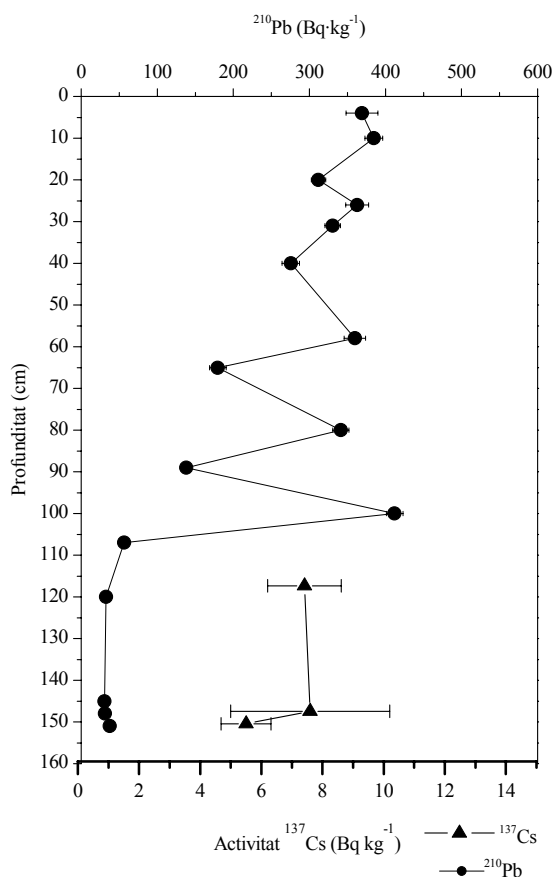
*Perfil de  $^{238}\text{U}$* 

L' $^{238}\text{U}$  presenta les activitats més elevades en aquest testimoni. L'activitat de  $^{238}\text{U}$  en superfície és de  $1334 \pm 32 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 1.7 vegades superior a l'activitat superficial del radi i 3.6 vegades superior a l'activitat de  $^{210}\text{Pb}$  (3-6 cm). L' $^{238}\text{U}$  mostra la seva activitat màxima, de  $1700 \pm 52 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , a la secció 12-15 cm, coincidint també amb el màxim de radi. A partir d'aquesta secció el perfil mostra un decreixement suau fins a la secció 84-87 cm, amb  $860 \pm 30 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  d'activitat. Seguidament, les activitats disminueixen fortament cap a uns valors baixos i constants, de manera similar a la tendència que presenta el perfil de radi, prenent uns valors d'activitat de  $37 \pm 9$ ,  $<73$  i  $<70 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  per a les seccions 116-119 cm, 147-150 cm i 150-153 cm respectivament. Els nivells de  $^{238}\text{U}$  característics dels sediments superficials del llit del riu Ebre presenten un valor mitjà de  $20.7 \pm 0.9 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , relativament proper al valor observat a la secció 116-119 cm.

Si comparem els 3 perfils estudiats fins al moment, observem com el  $^{226}\text{Ra}$  i l' $^{238}\text{U}$  mostren uns perfils en profunditat similars. Ambdós presenten el seu màxim en la secció 12-15 cm i un decreixement sobtat a partir de la secció 84-87 cm. Per contra, el perfil de  $^{210}\text{Pb}$  presenta el seu màxim en profunditat, a la secció 99-102 cm. Posteriorment, a la secció 119-122 cm s'observa la davallada d'activitat del  $^{210}\text{Pb}$  com en els altres perfils. En el perfil de  $^{210}\text{Pb}$  s'observa la capa de transició o barreja que s'estén des de la secció 87-90 cm ( $140 \pm 6 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) fins a la secció 105-108 cm ( $57 \pm 3 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). En aquesta capa entren en contacte el material autòcton (lliure de contaminació) amb el material NORM, amb uns nivells d'activitat clarament superiors.

*Perfil de  $^{137}\text{Cs}$* 

El  $^{137}\text{Cs}$  només es detecta en les tres seccions més profundes del testimoni, 116-119 cm, 147-150 cm i a 150-153 cm, amb unes activitats respectives de  $7.4 \pm 1.2$  i  $8 \pm 3$  i  $5.5 \pm 0.8 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . El  $^{137}\text{Cs}$  és un radioelement d'origen artificial que es diposita sobre la litosfera per deposició atmosfèrica. Per aquest motiu, el  $^{137}\text{Cs}$  s'utilitza com a datador (anys 1954, 1963 i 1986) i alhora ens permet diferenciar entre el material lacustre (d'origen natural) del d'origen antropogènic altament contaminat. Per tant, la presència de  $^{137}\text{Cs}$  en les darreres seccions ens indica que el material procedeix principalment de la pròpia dinàmica sedimentària de l'embassament, ja que els residus abocats no mostren en cap cas la seva presència. També ens permet afirmar que la columna sedimentària contaminada ha estat depositada a partir de l'any 1954, primera data en la que aquest radionúclid fou emès al medi.



**Fig. 5.1.2** Perfils de  $^{210}\text{Pb}$  i  $^{137}\text{Cs}$  del testimoni VC1.

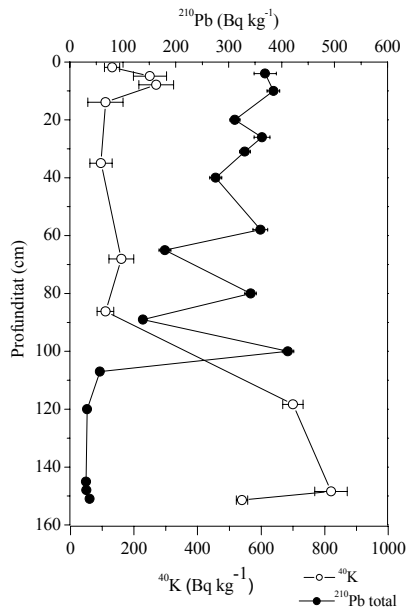
El testimoni VC1 ha estat l'únic dels cinc testimonis analitzats en el que s'ha pogut detectar  $^{137}\text{Cs}$ . (Figura 5.1.2). En els altres testimonis els nivells de  $^{137}\text{Cs}$  es troben per sota del valor mínim detectable a causa de la forta dilució amb els residus abocats.

#### Perfil de $^{232}\text{Th}$

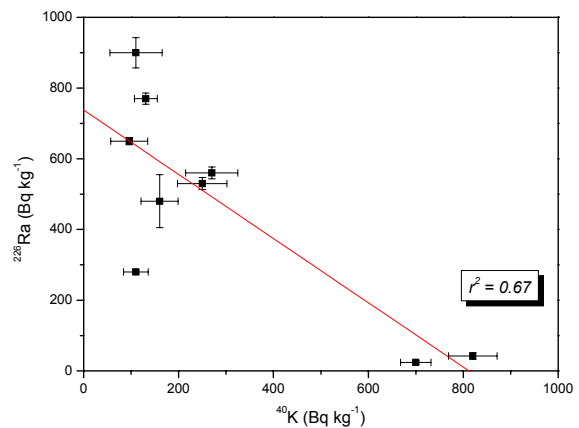
El  $^{232}\text{Th}$  (vegeu Fig 3.2) només és detectable en les seccions 33-36 cm, 116-119 cm i 150-153 cm amb uns valors respectius de  $48 \pm 8$ ,  $27 \pm 3$  i  $23 \pm 2$   $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Els nivells observats en les dues seccions profundes analitzades són similars a la concentració mitjana dels sediments superficials del riu Ebre mesurada en aquest mateix treball ( $18 \pm 5$   $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).

#### Perfil de $^{40}\text{K}$

El  $^{40}\text{K}$  és un element que es troba àmpliament distribuït a la biosfera de forma natural. Segons l'informe de l'UNSCEAR (2000) els nivells típics de  $^{40}\text{K}$  en els sòls es troben en un rang d'activitats comprès entre els  $290$ - $700$   $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ . De la mateixa manera, és sabut que la roca fosfòrica del Marroc presenta uns nivells molt baixos de  $^{40}\text{K}$  (de l'ordre de  $20$   $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) (UNSCEAR, 2000, Hussein, 1994).



**Fig 5.1.3** Perfils del  $^{210}\text{Pb}$  i  $^{40}\text{K}$  en el testimoni VC1



**Fig 5.1.4.** Correlació lineal del  $^{40}\text{K}$  amb el  $^{226}\text{Ra}$  del testimoni VC1,  $r^2 = 0.67$

Per tant, els nivells baixos de  $^{40}\text{K}$  en el material sedimentari són indicadors de la presència de material NORM (Martínez-Aguirre i García-León, 1995; Azouazi *et al.* 2001; Bridgen *et al.*, 2002). Aquesta correlació s'observa clarament en la Figura 5.1.3 i Figura 5.1.4 del testimoni VC1, on es representen conjuntament amb els perfils de  $^{210}\text{Pb}$  i de  $^{40}\text{K}$  i la correlació lineal del  $^{226}\text{Ra}$  amb el  $^{40}\text{K}$ , respectivament.

El perfil de  $^{40}\text{K}$  del testimoni VC1 mostra una activitat superficial de  $131 \pm 24 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  i assoleix un màxim local de  $270 \pm 55 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  prop de la superfície, als 6-9 cm. Aquests nivells de concentració es mantenen relativament constants dintre de l'interval dels  $110 \pm 26$  a  $270 \pm 55 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  fins a la secció 116-119 cm, on l'activitat s'incrementa ràpidament ( $700 \pm 32 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). La següent secció analitzada, 147-150 cm, mostra una activitat lleugerament més elevada, de  $820 \pm 51 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , i finalment, la darrera secció del testimoni, 150-153 cm, presenta una activitat de  $540 \pm 18 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Les seccions 116-119 i 147-150 cm mostren uns nivells de  $^{40}\text{K}$  més elevats que les concentracions habituals observades en els sediments superficials de l'Ebre (de 480 a 500  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). En canvi, la darrera secció del testimoni si que presenta un valor característic dels sediments naturals del llit del riu Ebre. A l'igual com en els demés perfils, les tres darreres seccions analitzades mostren un canvi sobtat en les concentracions, fet que indica un canvi en les propietats del material.

## Testimoni VC2

### Perfil de $^{210}\text{Pb}$

La columna sedimentària del testimoni VC2 mesura 195 cm i està formada per fangs amb unes tonalitats marrons-ataronjades i puntualment verdoses fins a la secció 129 cm. Des dels 129 cm fins al final del testimoni els tons grisos (gris-oliva i negre) passen a dominar amb forma de laminacions intercalades (Fig 5.1.6).



El perfil de  $^{210}\text{Pb}$  presenta una concentració superficial de  $260 \pm 16 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  que s'incrementa progressivament fins al seu màxim absolut de  $800 \pm 37 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , als 66-69 cm (Fig. 5.1.6). A partir d'aquesta secció la concentració disminueix fins a la secció 125-128 cm, amb una concentració de  $510 \pm 25 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Per sota d'aquesta secció, als 129 cm, el perfil mostra un decreixement sobtat de l'activitat. Aquest canvi s'aprecia de forma evident en la coloració del testimoni, que adquireix unes tonalitats més grisenques. Així per exemple, les seccions de transició 128-131 i 135-138 cm, amb unes activitats respectives de  $83 \pm 5$  i  $57 \pm 3 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , presenten una sèrie de laminacions primes, inferiors al centímetre, de tonalitats grises, amb la intercalació d'algun nivell marró groguenc i taronja grisenc. El tram del perfil comprès entre la secció 138-141 cm i 148-151 cm presenta uns valors baixos i constants d'activitat, de l'ordre de  $10\text{-}20 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , molt similars als valors de  $^{210}\text{Pb}$  observats en el llit del riu. En aquest tram s'observen unes laminacions de color gris més amples, de l'ordre de centímetre. Finalment, la part més profunda del testimoni, seccions 154-157 a 192-194 cm, les activitats prenen uns valors baixos i constants, inferiors als nivells habituals en els sediments fluvials de l'Ebre, amb una concentració mitjana de  $6 \pm 3 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . En aquest tram les laminacions també són molt evidents, amb unes coloracions grises blau i verd oliva, fet que evidencia la naturalesa antròpica del material.

#### *Perfil de $^{226}\text{Ra}$*

El perfil de  $^{226}\text{Ra}$  presenta una gran similitud amb el perfil de  $^{210}\text{Pb}$  (Fig. 5.1.6). Tanmateix, mostra una major irregularitat en el seu tram central i presenta unes activitats sensiblement més elevades al llarg de tot el perfil. L'activitat superficial de radi és de  $478 \pm 13 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Aquesta activitat es manté relativament constant des de la superfície fins a la secció 6-9 cm, amb unes activitats de  $490 \pm 13 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  per a la secció 3-6 cm i de  $450 \pm 16 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  per a la secció 6-9 cm. En la següent capa, 9-12 cm, amb una activitat de  $790 \pm 24 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , el perfil experimenta un increment progressiu fins al seu màxim de  $990 \pm 21 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  de la secció 12-15 cm, similar al màxim de radi observat en valor i en profunditat en el testimoni VC1. En les següents seccions, de la 24-27 cm fins a la 125-128 cm, les activitats es mantenen amb uns valors elevats, d'entre  $700 \pm 15$  a  $960 \pm 20 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , exceptuant el valor mínim d'activitat de la secció 66-69 cm ( $460 \pm 14 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) similar a les activitats del tram superficial del testimoni. La següent secció analitzada, 131-135 cm, mostra un decreixement de l'activitat ( $133 \pm 7 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Finalment, les darreres tres seccions analitzades presenten uns valors que varien entre els  $56 \pm 5 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  i els  $21 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , similars a les activitats habituals dels sediments de l'Ebre observades en aquest estudi ( $15\text{-}40 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

#### *Perfil de $^{238}\text{U}$*

El perfil de  $^{238}\text{U}$  mostra el mateix comportament que el perfil de  $^{226}\text{Ra}$ , amb els màxims i mínims localitzats pràcticament en els mateixos trams sedimentaris, si bé les concentracions de  $^{238}\text{U}$  són dues vegades superiors a les de radi al llarg de tot el perfil (Fig. 5.1.7). L'activitat superficial és de  $814 \pm 35 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  i es manté constant fins a la secció 6-9 cm. La capa 9-12 cm experimenta un creixement de l'activitat, amb un valor de  $1530 \pm 50 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , fins a assolir un màxim local, als 12-15 cm, de  $1760 \pm 35 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , en la mateixa profunditat que el màxim absolut de radi. Des d'aquesta secció fins a la 125-128 cm les activitats es mantenen altes amb valors entre  $1230 \pm 36$  i  $1440 \pm 36 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , exceptuant un mínim local de  $590 \pm 24 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  a la secció 66-69 cm, just abans del màxim del perfil, a la secció 82-85 cm amb  $1900 \pm 32 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Després d'aquesta secció les activitats decreixen fortament amb valors en el rang  $42\text{-}130 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  fins al final del

testimoni. Val a dir que, tot i presentar uns valors baixos d'activitat, encara no són els nivells habituals observats en el llit del riu ( $15\text{-}27 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

#### *Perfil de $^{232}\text{Th}$*

El perfil de  $^{232}\text{Th}$  pren unes concentracions baixes, que oscil·len entre els  $20\text{-}60 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Tanmateix, presenta una tendència similar a la del perfil de radi i d'urani, mostrant dos pic, un en superfície ( $12\text{-}15 \text{ cm}$ ) i un altre en profunditat ( $82\text{-}85 \text{ cm}$ ) (Fig. 5.1.7). La seva activitat superficial ( $3\text{-}6 \text{ cm}$ ) és de  $26\pm 5 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  i es manté constant fins a la secció  $6\text{-}9 \text{ cm}$ . En les dues següent seccions,  $9\text{-}12 \text{ cm}$  i  $12\text{-}15 \text{ cm}$ , l'activitat creix, amb uns valors de  $51 \pm 10 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , i de  $61 \pm 9 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  (màxim del perfil) en la mateixa profunditat on s'observa el màxim de radi i el pic en profunditat de  $^{238}\text{U}$ . A les seccions  $82\text{-}85 \text{ cm}$  i  $104\text{-}107 \text{ cm}$  s'observa un nou increment de la concentració de  $^{232}\text{Th}$ . Aquest comportament també s'aprecia en els perfil de  $^{238}\text{U}$ , que mostren el seu màxim en aquesta secció ( $82\text{-}85 \text{ cm}$ ) i en el perfil de  $^{226}\text{Ra}$ , amb el seu pic en profunditat en aquesta mateixa secció. L'activitat decreix en el tram final del perfil  $^{232}\text{Th}$  amb un valor de  $10 \pm 4 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  en la secció  $148\text{-}151 \text{ cm}$ , similar a les concentracions que es troben als sediments fluvials. En les dues darreres seccions del testimoni l'activitat es troba per sota del valor mínim detectable amb uns valors de  $<20.3$  i  $<30.8 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

#### *Perfil de $^{40}\text{K}$*

Les activitats del perfil de  $^{40}\text{K}$  es troben per sota dels nivells mínims detectables que es troben en un interval d'activitat comprès entre els  $<62$  i els  $<302 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Malgrat tot, la baixa concentració de  $^{40}\text{K}$  d'aquests fangs és un bon indicador de que tot el material del testimoni està contaminat (NORM), fins i tot en les seves darreres seccions sedimentàries, i revela que no hi ha presència rellevant de material autòcton del riu.

### **Testimoni VC3**

#### *Perfil de $^{210}\text{Pb}$*

La columna sedimentària del testimoni mesura  $148 \text{ cm}$  i està formada per fangs extremadament laminats i amb una coloració molt variada. Des de la superfície fins als  $40 \text{ centímetres}$  s'aprecia un tram homogeni de color negre-verdós oliva molt destacat. Posteriorment, fins al primer metre les coloracions presenten una tendència verdosa. El testimoni canvia de color en la secció dels  $127$  als  $144 \text{ cm}$  amb una tonalitat marró groguenca i en els darrers  $4 \text{ cm}$  ( $144\text{-}148$ ) s'aprecia un canvi cap a gris groguenc (Fig 5.1.8).

Les activitats més elevades de  $^{210}\text{Pb}$  s'observen a la superfície del testimoni, en els primers  $13.5 \text{ cm}$ , i prenen uns valors elevats i constants de l'ordre de  $1300 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . En la secció  $10\text{-}13.5 \text{ cm}$  es registra el màxim del perfil de  $^{210}\text{Pb}$  amb una activitat de  $1350 \pm 49 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $1.7$  vegades superior al màxim de  $^{210}\text{Pb}$  del testimoni VC2 i  $3.3$  vegades superior al màxim del VC1. Posteriorment el perfil decreix progressivament en profunditat. El tram comprès entre la secció  $16.5\text{-}19 \text{ cm}$  i la  $24.5\text{-}27.5 \text{ cm}$  mostra unes activitats constants i lleugerament més baixes que les de la part superficial, amb uns valors de  $890 \pm 28$  i  $850 \pm 28 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  respectivament. En la següent secció analitzada,  $36\text{-}39 \text{ cm}$ , l'activitat es redueix a la meitat amb un valor de  $440 \pm 17 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

A partir d'aquesta secció el perfil és més irregular i experimenta una forta davallada de l'activitat fins a la secció 55-62 cm, amb un valor de  $25 \pm 2 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Val a dir que aquesta davallada en l'activitat del  $^{210}\text{Pb}$  coincideix amb la presència d'una capa de discordança diagonal que creua el testimoni des del centímetre 56 fins al 68. Aquesta discordança separa dues zones de coloració diferent (gris/verd). Un cop superada aquesta discordança l'activitat de la següent secció analitzada, 17 cm més avall (79-82.5 cm), pren un valor novament elevat, de  $450 \pm 24 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , que torna a disminuir a la secció 97-98.5 cm amb una activitat de  $170 \pm 6 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

El tram baix del testimoni, des dels 112 fins als 146 cm no sembla estar tant afectat pels residus NORM, ja que presenta unes activitats molt més baixes que les concentracions dels nivells superficials. Tanmateix, podem afirmar que aquest tram no n'està exempt. Les activitats que es registren són molt fluctuants i es troben en un interval comprès entre els  $6.3 \pm 0.7$  i  $66 \pm 3 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Per tant, a partir del perfil de  $^{210}\text{Pb}$  podem afirmar que totes les seccions del testimoni VC3 estan afectades d'una forma generalitzada pels residus NORM.

#### *Perfil de $^{226}\text{Ra}$*

El testimoni VC3 presenta les activitats de  $^{226}\text{Ra}$  més elevades de les obtingudes en els testimonis de l'embassament de Flix. El màxim d'activitat de  $^{226}\text{Ra}$  és de  $9631 \pm 181 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  i es troba a la superfície del testimoni (0-5 cm) (Fig. 5.1.8.). La secció analitzada immediatament després del màxim de radi, la 10-13.5 cm, experimenta una forta reducció de l'activitat, amb un valor de  $2465 \pm 44 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . A partir d'aquesta secció fins als 36-39 cm es mantenen uns nivells elevats que fluctuen entre els  $1000$ - $2400 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Un cop superat aquest tram l'activitat de  $^{226}\text{Ra}$  decreix ràpidament assolint uns valors baixos i constants fins al final del testimoni (143-146 cm), amb un rang comprès entre els  $110$ - $160 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . A diferència de la tendència que s'observa en les activitats mesurades en el tram final del perfil de  $^{210}\text{Pb}$ , els valors de  $^{226}\text{Ra}$  són més constants en profunditat.

#### *Perfil de $^{238}\text{U}$*

La secció superficial (0-5 cm), amb un valor de  $11723 \pm 198 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , té l'activitat d' $^{238}\text{U}$  més elevada d'entre les mesures en els testimonis de l'embassament de Flix i, en general, la més elevada d'entre tots els radionúclids estudiats. Fins als 39 primers centímetres els nivells d'activitat es mantenen elevats, però disminuint en profunditat, tot passant dels  $4284 \pm 69 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  de la secció 10-13.5 cm als  $1883 \pm 29 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  de la secció 36-39 cm. En el tram següent, des dels 65 cm fins al final del testimoni (146 cm), l'activitat d'urani es mostra constant i baixa, amb uns valors entre els 100 i  $260 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  (Fig. 5.1.8.).

#### *Perfil de $^{232}\text{Th}$*

El perfil de  $^{232}\text{Th}$  presenta el seu màxim en superfície ( $219 \pm 13 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) i esdevé el valor més elevat de  $^{232}\text{Th}$  d'entre tots els testimonis estudiat. Presenta un marcat perfil decreixent en profunditat. Es poden diferenciar clarament dues parts en el testimoni. En la part superficial, que comprèn des de la superfície fins als 19-24.5 cm, s'observen uns valors elevats d'activitat de l'ordre de  $100$ - $200 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . En la part més profunda (65 a 146 cm), les activitats són relativament baixes i van des dels  $20 \pm 15 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  (112-115.5 cm) fins als  $<44.1 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  (143-146 cm).

*Perfil de  $^{40}\text{K}$* 

Les activitats de  $^{40}\text{K}$  mostren uns valors baixos en tot el perfil. En la part superior del testimoni les activitats de  $^{40}\text{K}$  són sensiblement més elevades, amb valors de  $283 \pm 55 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  en el cas de la secció superficial, i de  $217 \pm 33 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  per la següent secció analitzada (10-13.5 cm). A partir dels 16.5 cm les concentracions són encara més baixes, amb valors que es troben entre els  $48 \pm 14$  i  $130 \pm 90 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ , amb alguna secció intercalada on l'activitat de  $^{40}\text{K}$  pren valors per sota del valor mínim detectable.

En termes generals observem que el perfil de  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ , i  $^{232}\text{Th}$  presenten un comportament molt similar en profunditat, amb un màxim en superfície, seguit d'un decreixement en profunditat fins al final del testimoni.

**Testimoni VC4***Perfil de  $^{210}\text{Pb}$* 

El testimoni VC4 és el de major longitud, amb 240 cm. La seva litologia és fangosa, de color marró, i finament laminat al llarg de tota la seva longitud (Fig 5.1.9).

El perfil de  $^{210}\text{Pb}$  presenta la seva activitat màxima en superfície, amb un valor de  $540 \pm 24 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ , i decreix progressivament en profunditat fins al final del testimoni. Gràcies a l'elevat grau de resolució d'aquest perfil, amb la totalitat de les seccions analitzades, es pot apreciar en detall les irregularitats en la concentració de  $^{210}\text{Pb}$  en els primers 70 centímetres.

En el perfil es poden classificar dues zones amb un comportament en l'activitat diferenciat: un tram superficial, fins als primers 73 cm, i dels 73 cm fins al final del testimoni. En els primers 73 cm l'activitat experimenta un decreixement gradual amb alguns mínims intercalats en les seccions 20-23.5, 35.5-40, 42-45.5, 55-58, i 67-70 cm amb unes activitats d'entre els 40 als 90  $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ . La coloració d'aquests primers 70 cm també presenta variacions passant de verds oliva a gris groguencs. En la secció 30-46 cm apareixen uns nivells marrons amb dues intercalacions sorrenques a 35-38 i 42-45.5 cm, coincidint amb les baixades puntuals d'activitat de  $^{210}\text{Pb}$  descrites anteriorment. Seguidament, des de la secció 70-73 cm fins al final del testimoni (238 cm) s'observa un llarg tram d'1.5 metres amb uns valors d'activitat baixos i constants compresos entre els 5.4 i 25  $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Aquests sediments no presenten els nivells de radioactivitat fins ara observats per a residus NORM. Tanmateix, els nivells puntuals extremadament baixos de  $^{210}\text{Pb}$  que s'observen, així com la presència dels contrastos de color en forma de laminacions ens indiquen l'existència de contaminants, com ara compostos organoclorats i metalls pesants, probablement abocats anteriors als residus de la producció de fòsfats.

*Perfil de  $^{226}\text{Ra}$* 

A l'hora d'estudiar el comportament dels radionúclids emissors gamma del testimoni VC4 s'ha hagut de limitar el nombre de mostres analitzades a causa de la gran longitud del testimoni. Com a conseqüència, les fluctuacions que s'aprecien en els primers 70 centímetres del perfil de  $^{210}\text{Pb}$  no es poden observar amb la mateixa claredat en el cas dels perfils gamma. Tanmateix, si que es poden apreciar dues zones d'activitat molt diferenciada. La part superficial, fins als 61-63.5 cm, i un tram d'activitat més baixa i constant des dels 82.5-86 cm fins al final del testimoni.

L'activitat de  $^{226}\text{Ra}$  en la superfície del testimoni és de  $1280 \pm 22 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Aquest valor és el màxim que s'observa en el perfil i experimenta una reducció important en la següent secció analitzada, 23.5-26 cm, amb una activitat de  $300 \pm 22 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . A partir d'aquesta secció l'activitat és redueix a la meitat a la secció 45.5-49 cm, amb un valor de  $140 \pm 7 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  i es redueix 1.6 vegades en la secció 61-63.5 cm, amb una activitat de  $87 \pm 4 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Ja en el tram final del testimoni les activitats són més constants, però es registra un valor mínim de  $24 \pm 10 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  en la secció 82.5-86 cm i un màxim de  $76 \pm 16 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  en la capa 198.5-202 cm. (Fig 5.1.9.)

#### *Perfil de $^{238}\text{U}$*

L'activitat de  $^{238}\text{U}$  és màxima a la secció 23.5-26 cm, amb  $680 \pm 28 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Disminueix en la capa 45.5-49 cm ( $430 \pm 3 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) i en la següent secció analitzada, 61-63.5 cm, amb un valor de  $140 \pm 14 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Finalment, des de la secció 82.5-86 cm fins al final del testimoni, les activitats prenen uns valors baixos i fluctuants, compresos entre els 49-110  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  (Fig 5.1.10.), similars als valors observats en els sediments del llit del riu Ebre.

#### *Perfil de $^{232}\text{Th}$*

De manera similar als perfils de  $^{210}\text{Pb}$  i  $^{226}\text{Ra}$ , el perfil de  $^{232}\text{Th}$  mostra una activitat màxima de  $70 \pm 7 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  a la capa superficial, que disminueix fins als  $20 \pm 8 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  de la secció 45.5-49 cm. Les següents seccions analitzada mostren uns valors constants de  $^{232}\text{Th}$  de l'ordre dels 10  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  fins al final del testimoni. (Fig 5.1.10.).

#### *Perfil de $^{40}\text{K}$*

El perfil de  $^{40}\text{K}$  mostra uns valors baixos i constants de concentració al llarg de tota la columna de material analitzada sense arribar mai a uns nivells naturals. Les concentracions es troben en un interval que van des dels 44 als 140  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

### **Testimoni VC5**

#### *Perfil de $^{210}\text{Pb}$*

El testimoni VC5 té una longitud de 87.5 cm i es troba a les proximitats de la presa de l'embassament. Val a dir, que aquest testimoni integra tot el material sedimentari acumulat en aquest punt des de la construcció de la presa, a l'any 1948, ja que en el moment del mostreig s'assoliren els nivells bassals de graves lacustres corresponents al sediment fluvial primari. En termes granulomètrics, la darrera secció mostra una davallada de la fracció fina, passant del 98 % de fins present de manera general en tot el testimoni, fins a un 60 % en el darrer centímetre. La litologia del sediment és lutítica amb una gran presència de làmines mil·limètriques intercalades al llarg de la seva longitud. Des de la superfície de la columna de material fins als 78 cm dominen, bàsicament, els nivells foscos amb capes marrons intercalades. En el tram final els nivells de fangs són més grisos i amb alguna presència puntual de còdols centimètrics (Fig 5.1.11).

El perfil de  $^{210}\text{Pb}$  presenta unes concentracions elevades i constants des de la superfície fins a la secció 61-64 cm. Les activitats es troben en un interval entre els 950-1180  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . En canvi, a partir de la secció 61-64 cm ( $1600 \pm 124 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) s'observa un increment considerable de l'activitat amb un màxim en profunditat de  $3500 \pm 157 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  a la secció 64-67 cm, 3.6 vegades superior a l'activitat de la secció anterior 61-64 cm, i que es manté fins a la capa 71-73 cm, amb un valor de  $3000 \pm 90 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Aquests 10 cm de fang on s'aprecia el màxim coincideixen amb un canvi colorimètric del testimoni que vira de tons marrons a grisos. L'activitat d'aquesta secció (64-67 cm) representa la més elevada de  $^{210}\text{Pb}$  registrada en els testimonis de Flix, amb una concentració dues vegades superior al màxim superficial observat en el testimoni VC3. A partir dels 71-73 cm les activitats de  $^{210}\text{Pb}$  recuperen els nivells similars als observats en les seccions anteriors al màxim, amb uns valors de l'ordre de 820-1070  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , que es mantenen fins al final del testimoni.

#### *Perfil de $^{226}\text{Ra}$*

Les concentracions de  $^{226}\text{Ra}$  són generalment superiors a les de  $^{210}\text{Pb}$ , amb uns valors elevats des de la superfície fins als 61-64 cm. El perfil mostra una activitat superficial de  $1212 \pm 30 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  amb un màxim local a la secció 19-22 cm de  $1760 \pm 34 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , i un màxim absolut en profunditat de  $2050 \pm 26 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  a la secció 61-64 cm. Podem observar com el màxim del perfil de radi es localitza molt a prop del màxim del perfil de  $^{210}\text{Pb}$ . Tanmateix, el màxim del radi no és tan gran com el de  $^{210}\text{Pb}$ . Des dels 19 cm fins als 64 cm les activitats del perfil són elevades, però cal destacar una capa de 3 cm, a la profunditat 46-49 cm, que pren un valor d'activitat molt baix, de  $150 \pm 30 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . A partir dels 73-76 cm ( $300 \pm 10 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) l'activitat decau fins al final del testimoni, a diferència del perfil de  $^{210}\text{Pb}$ , que manté una activitat elevada fins a la darrera secció del testimoni (Fig 5.1.11.).

#### *Perfil de $^{238}\text{U}$*

El perfil de  $^{238}\text{U}$  pren una activitat superficial de  $1868 \pm 81 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . L'activitat de  $^{238}\text{U}$  assoleix el seu màxim de  $3530 \pm 322 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  prop de la superfície (19-22 cm), a la mateixa profunditat on s'aprecia el màxim local de  $^{226}\text{Ra}$ . A la secció 55-58 cm el perfil de  $^{238}\text{U}$  experimenta un màxim local profund de  $2820 \pm 52 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Val a dir però, que la següent secció analitzada, 61-64 cm, presenta una activitat pràcticament igual a la del màxim, amb un valor de  $2730 \pm 58 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , coincidint amb el pic del perfil de  $^{210}\text{Pb}$  i  $^{226}\text{Ra}$ . Posteriorment, l'activitat decau fins als  $170 \pm 14 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  en la darrera secció analitzada del testimoni, de forma similar a com ho fa el radi (Fig 5.1.12.).

#### *Perfil de $^{232}\text{Th}$*

Els valors de  $^{232}\text{Th}$  fluctuen entre 20 i 69  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  sense mostrar una tendència clara. Els màxims del perfil es localitzen als 7-10 cm i 46-49 cm, amb unes activitats respectives de  $69 \pm 9$  i  $69 \pm 6 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  (Fig. 5.1.12.).

#### *Perfil de $^{40}\text{K}$*

El perfil de  $^{40}\text{K}$  presenta uns valors constants al llarg del testimoni d'entre 75-170  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , exceptuant la darrera secció analitzada (73-76 cm) que pren un valor 4 vegades superior a la de la resta de seccions, amb una activitat de  $460 \pm 36 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , similar als valors que s'observen en els sediments superficials de l'Ebre.

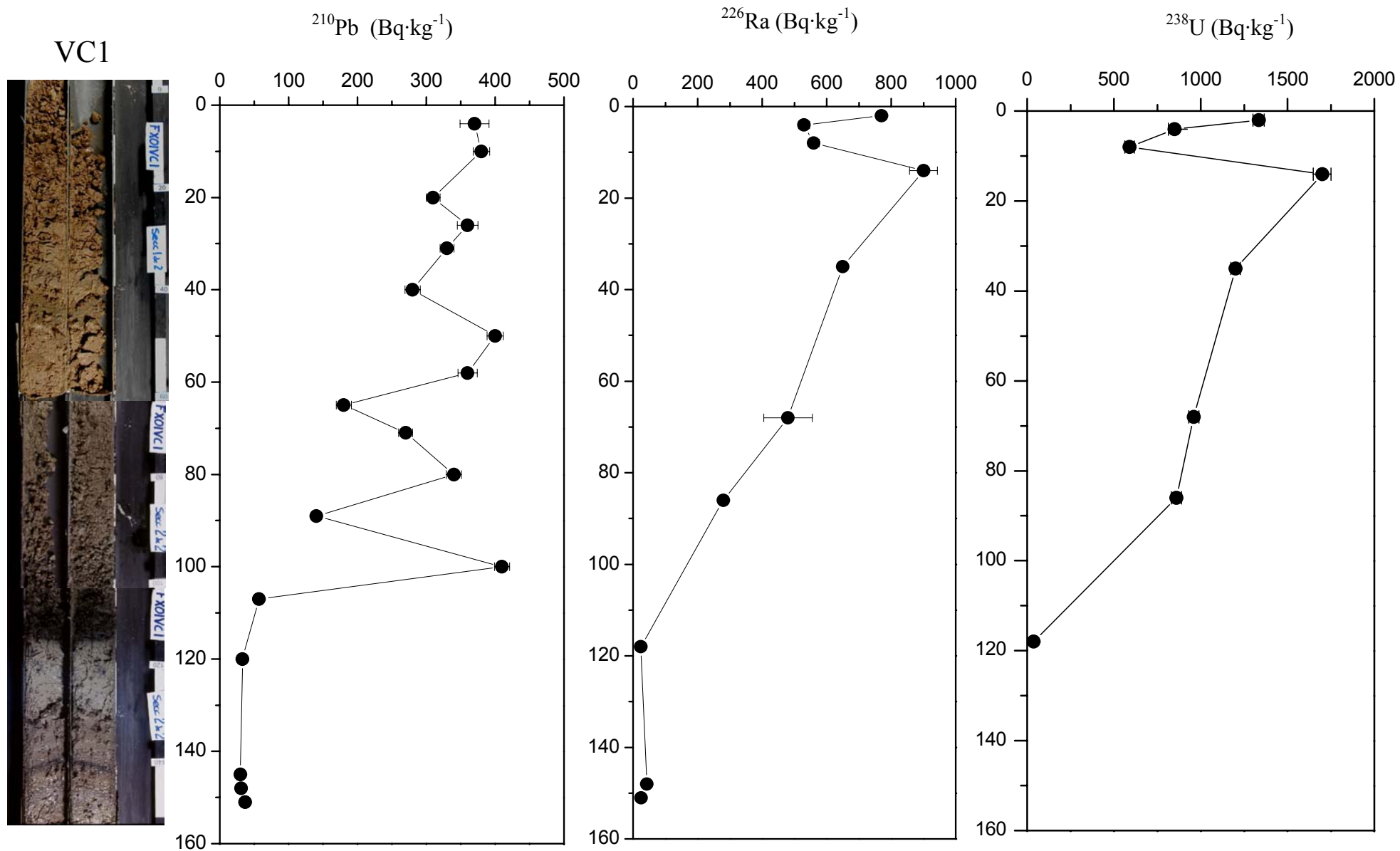


Fig. 5.1.5. Perfils de <sup>210</sup>Pb, <sup>226</sup>Ra i <sup>238</sup>U del testimoni VC1.

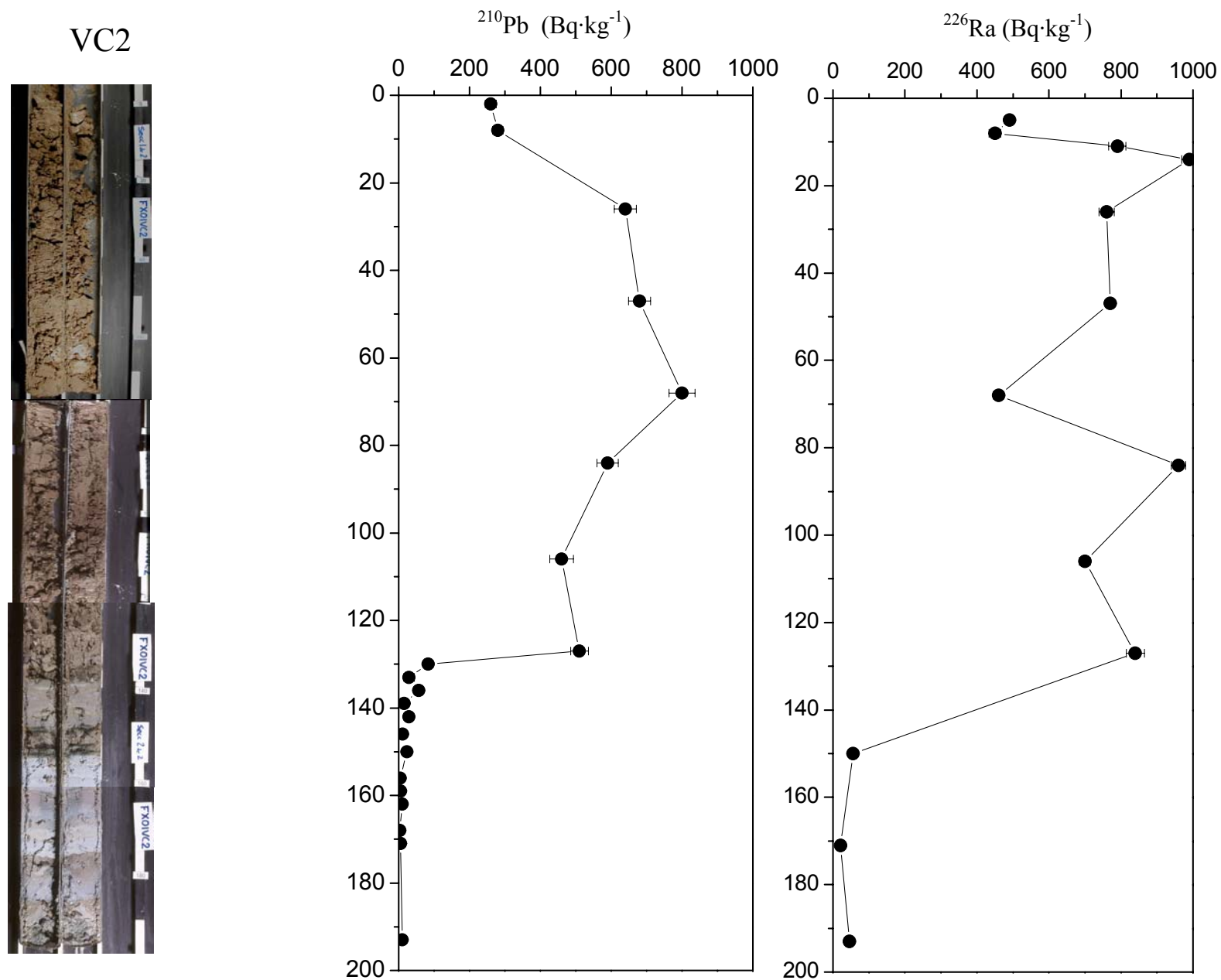


Fig. 5.1.6. Perfils de  $^{210}\text{Pb}$  i  $^{226}\text{Ra}$  del testimoni VC2.



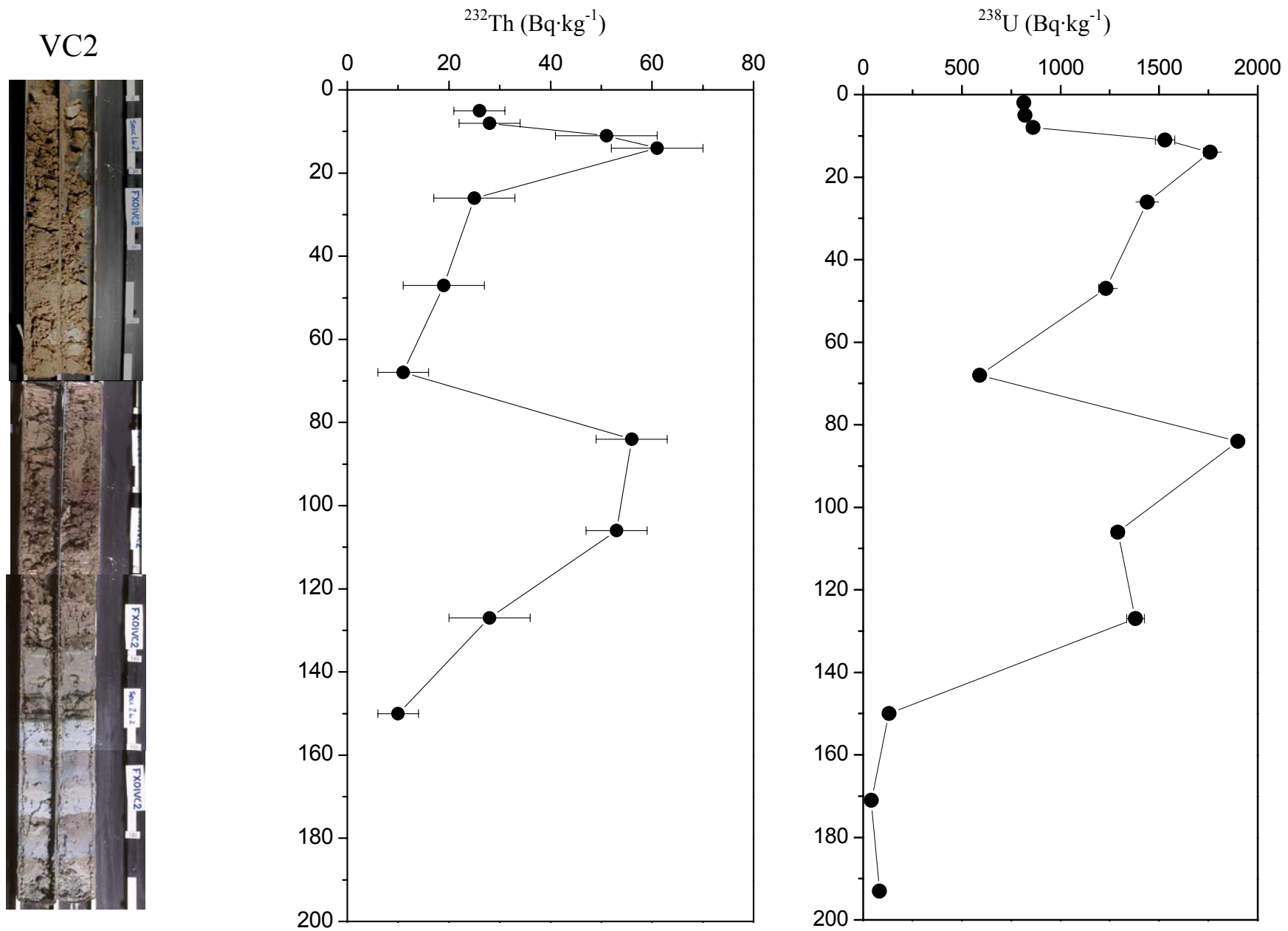


Fig. 5.1.7. Perfils de  $^{232}\text{Th}$  i  $^{238}\text{U}$  del testimoni VC2.

VC3

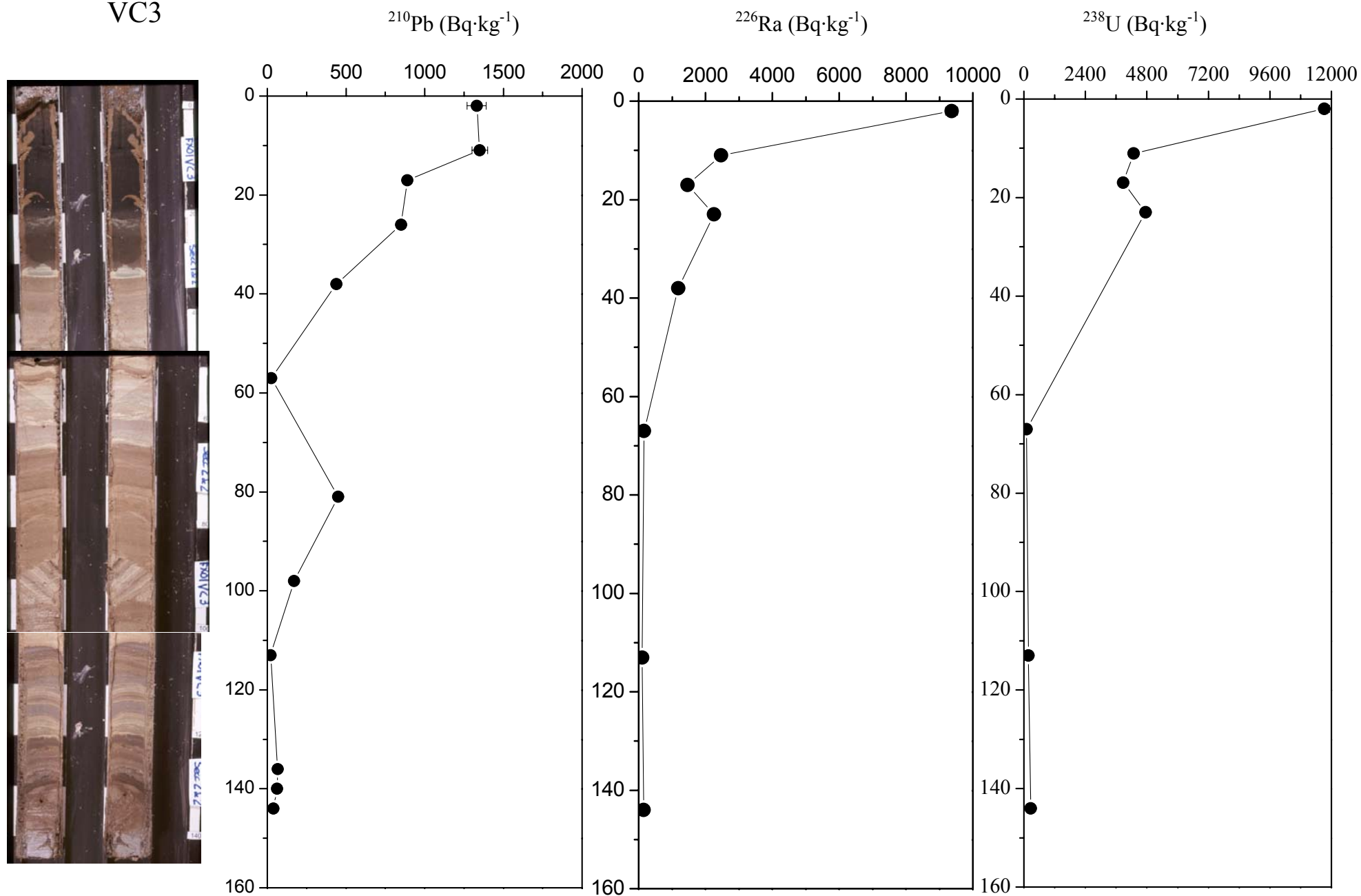


Fig. 5.1.8. Perfils de <sup>232</sup>Th i <sup>238</sup>U del testimoni VC3.

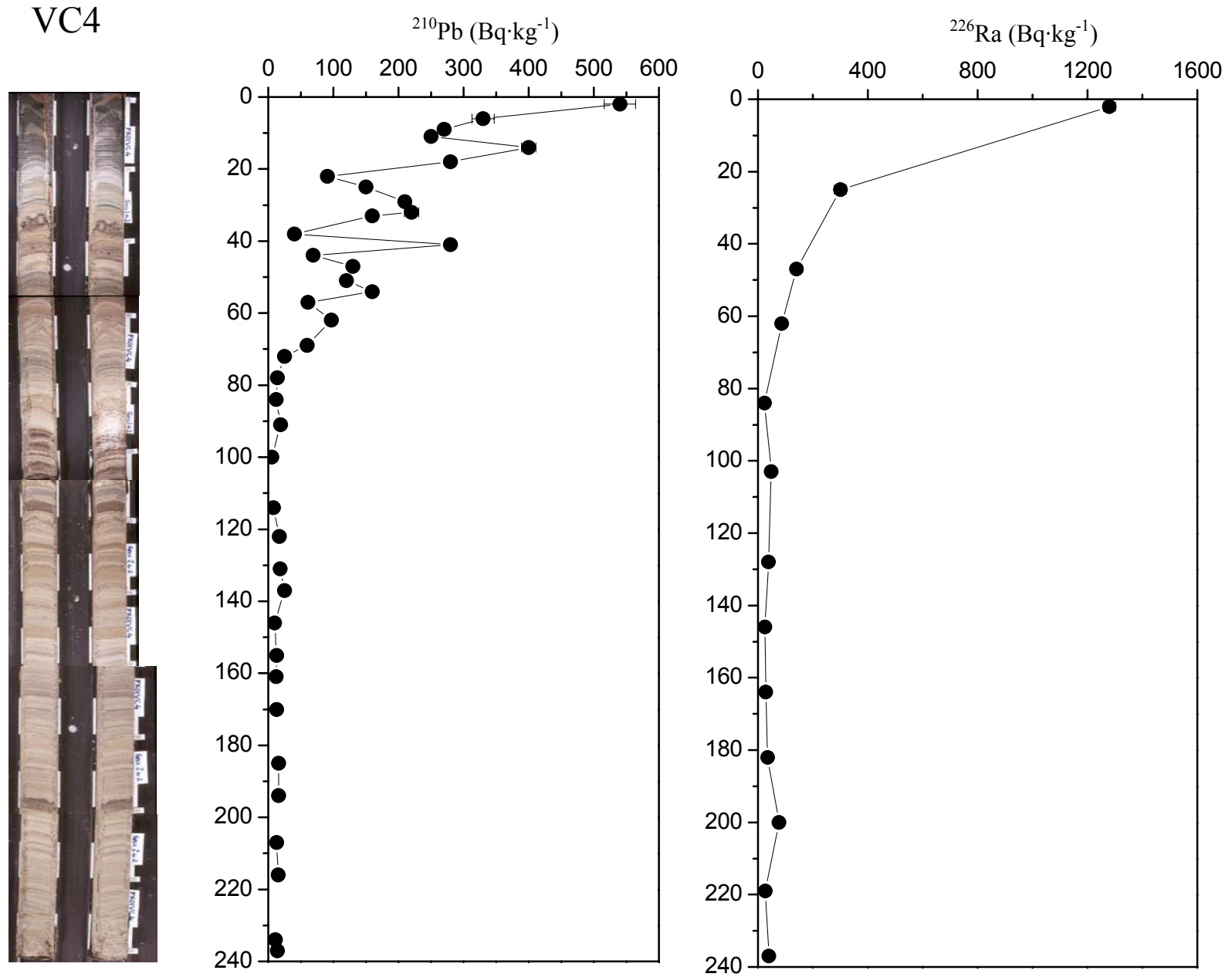


Fig. 5.1.9. Perfils de  $^{210}\text{Pb}$  i  $^{226}\text{Ra}$  del testimoni VC4.

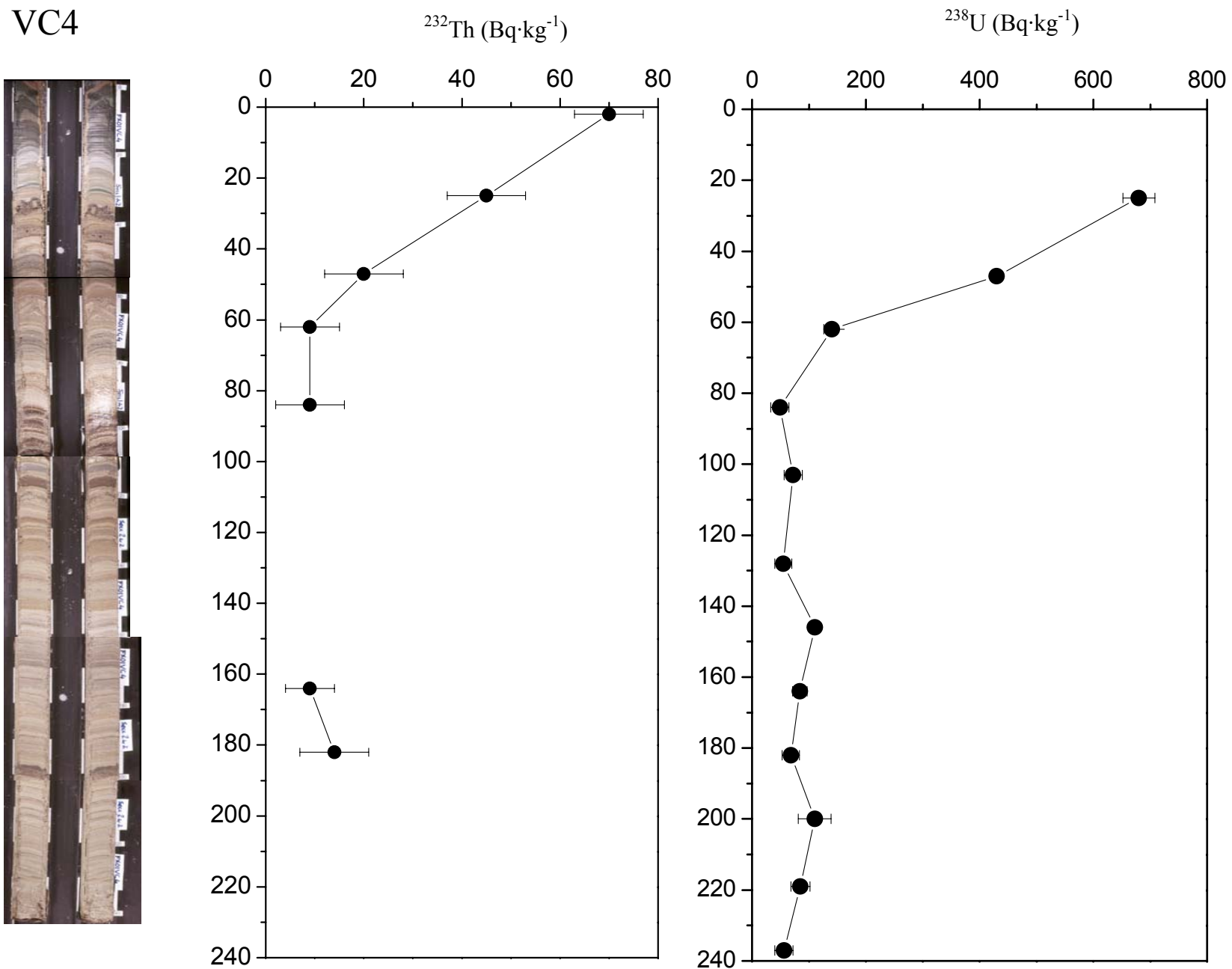


Fig. 5.1.10. Perfils de  $^{232}\text{Th}$  i  $^{238}\text{U}$  del testimoni VC4.

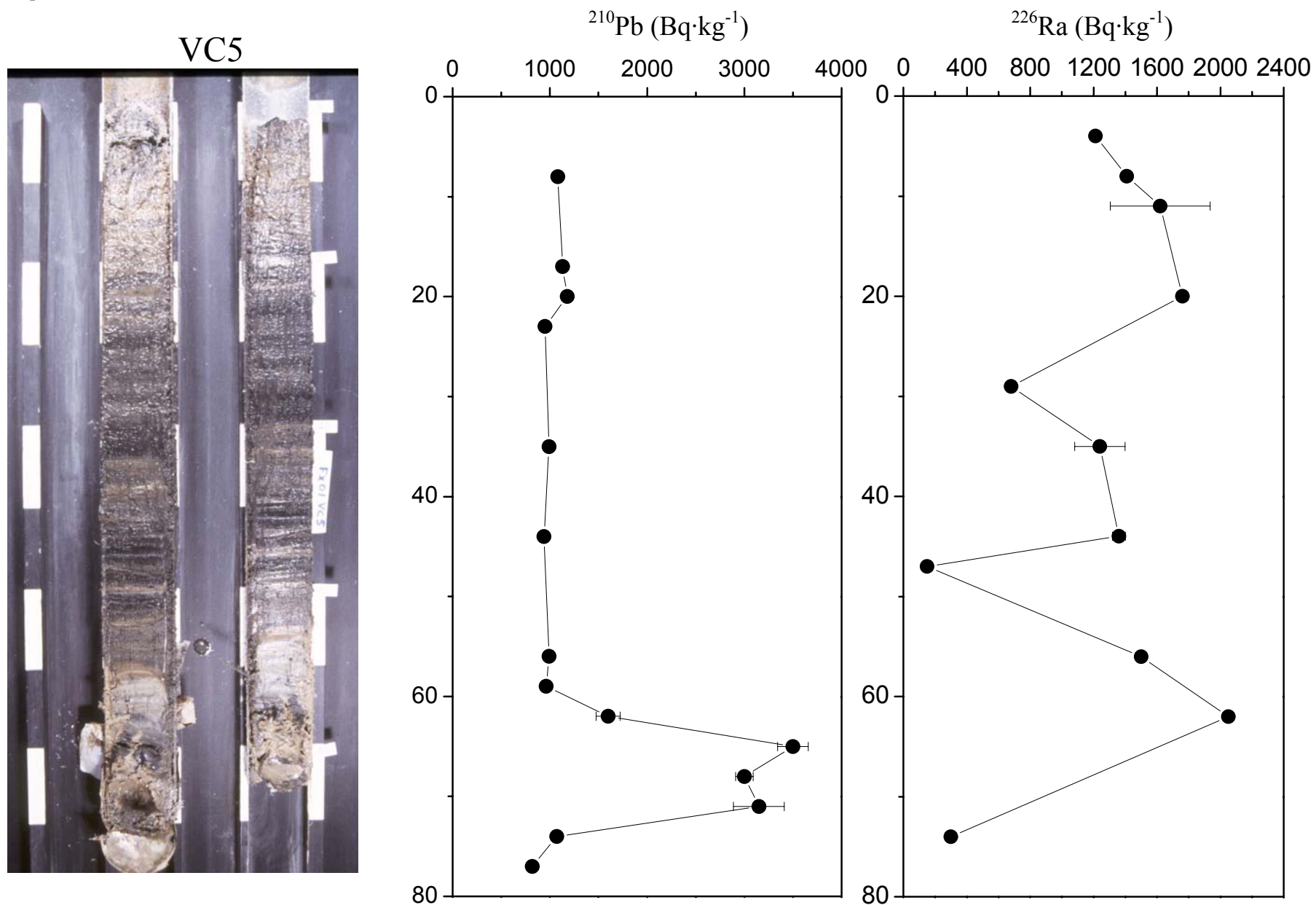


Fig. 5.1.11. Perfils de  $^{210}\text{Pb}$  i  $^{226}\text{Ra}$  del testimoni VC5.

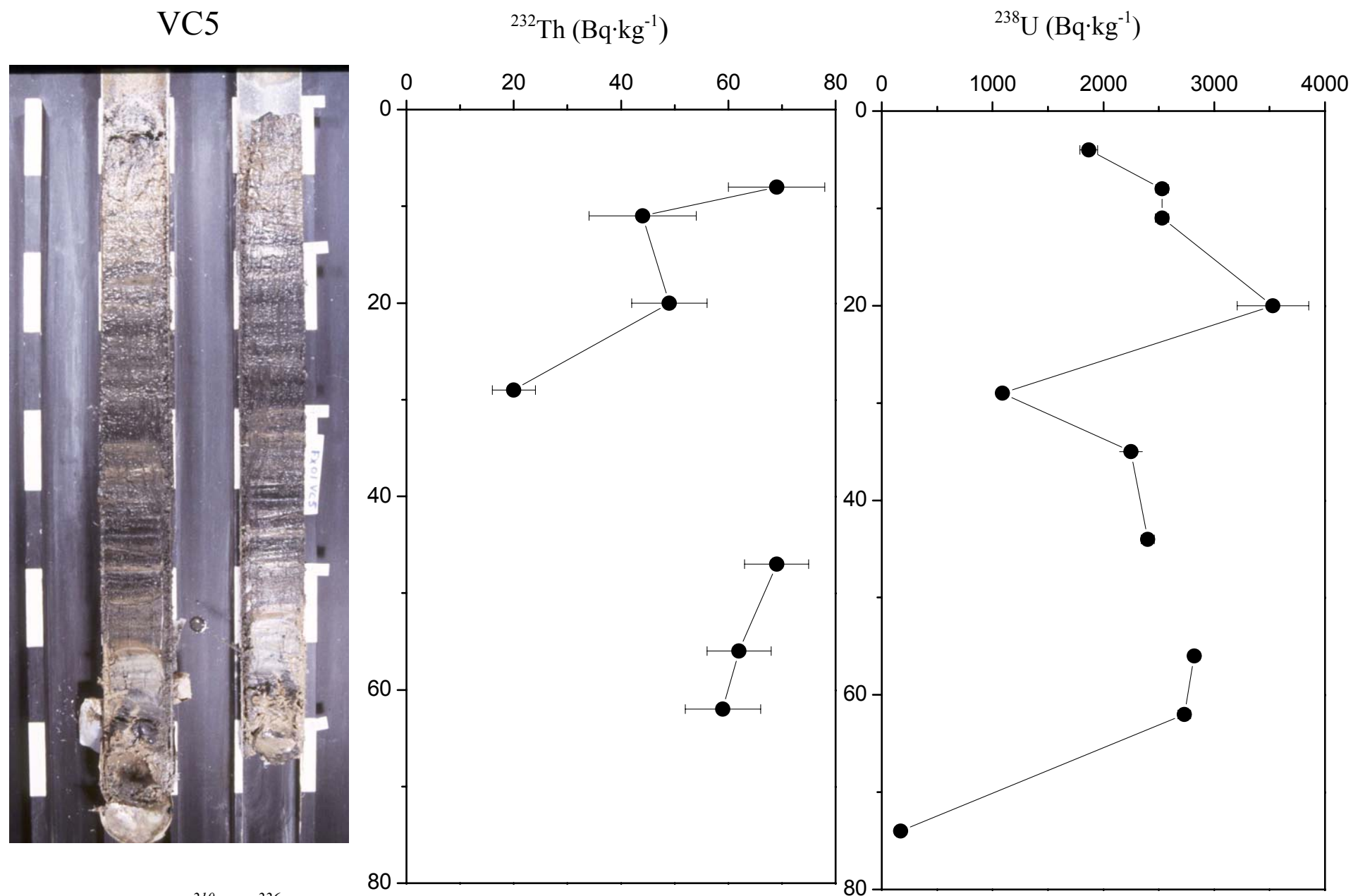


Fig. 5.1.12. Perfils de  $^{210}\text{Pb}$  i  $^{226}\text{Ra}$  del testimoni VC5.

**Taula 5.1.1.** Rang d'activitats dels radionúclids presents en els 5 testimonis mostrejats en els deltes de descarrega de l'embassament de Flix.

Testimoni	Tram contaminat (Bq·kg <sup>-1</sup> )			Activitat en tram no contaminat (Bq·kg <sup>-1</sup> )		
	<sup>210</sup> Pb	<sup>226</sup> Ra	<sup>238</sup> U	<sup>210</sup> Pb	<sup>226</sup> Ra	<sup>238</sup> U
VC1*	140 – 410	280 – 900	590 – 1700	30 – 57	24 – 42	37± 9
VC2	83 – 800	133 – 990	590 – 1900	3 – 57	21 – 56	42 – 130
VC3	170 – 1350	110 – 9361	1883 – 11723	6 – 39		105±14
VC4	97 – 540	140 – 1280	140 – 680	5 – 25	24 – 76	49 – 110
VC5	820 – 3500	300 – 1620	170 – 3530			

\*El rang d'activitat del <sup>137</sup>Cs en el testimoni VC1 és de 5 a 8 Bq·kg<sup>-1</sup>

#### 5.1.4 Els factors d'enriquiment

El factor d'enriquiment és un paràmetre que relaciona la radioactivitat present en la matèria primera inicial i la radioactivitat continguda en el residu final. La matèria prima emprada en el procés de producció del fosfat bicàlcic a la fàbrica de Flix és la fosforita procedent del Marroc. Una mostra de fosforita del Marroc ha estat analitzada en el nostre laboratori i presenta unes activitats de  $1284 \pm 40$  Bq·kg<sup>-1</sup> de <sup>210</sup>Pb,  $1343 \pm 13$  Bq·kg<sup>-1</sup> de <sup>226</sup>Ra i de  $836 \pm 11$  Bq·kg<sup>-1</sup> de <sup>238</sup>U. En la taula 5.1.1 es presenten els valors d'activitat de cadascun dels perfils dels testimonis classificats entre tram fortament contaminat, amb uns nivells elevats de radioactivitat natural, i el “no” contaminat, que inclou solament algunes de les darreres seccions dels testimonis VC1, VC2, VC4. La resta de testimonis, VC3 i VC5, presenten una contaminació generalitzada en tota la seva longitud.

Els factors d'enriquiment per al <sup>210</sup>Pb, <sup>226</sup>Ra i <sup>238</sup>U es presenten en la taula 5.1.2, on es pot apreciar un procés evident de concentració de la radioactivitat natural en els residus NORM. Així per exemple, els màxims de radioactivitat mesurats en els sediments de Flix, de  $3500 \pm 157$  Bq·kg<sup>-1</sup> de <sup>210</sup>Pb,  $9361 \pm 181$  Bq·kg<sup>-1</sup> de <sup>226</sup>Ra (VC3) i  $11723 \pm 198$  Bq·kg<sup>-1</sup> de <sup>238</sup>U (VC3) equivalen a uns factors d'enriquiment de  $\approx 6$  pel <sup>210</sup>Pb, de 7 en el cas del màxim de <sup>226</sup>Ra, i de 14 per a <sup>238</sup>U. Per tant, la concentració de radionúclids que s'observa en els residus és una conseqüència evident del procés de producció del fosfat bicàlcic.

#### 5.1.5 Estimació de l'inventari radioactiu

Les concentracions de radionúclids trobades en les diferents seccions dels testimonis de Flix es poden utilitzar per a calcular l'inventari total de la radioactivitat present en els lòbuls de contaminació submergits de l'embassament. En un estudi previ realitzat a l'embassament, sobre la quantitat de sediments submergits acumulats als deltes de contaminació, s'obtingué una estimació d'entre 200.000 i 360.000 tones mètriques. Per tant, és possible fer una estimació de l'inventari radioactiu total mitjançant una associació entre l'activitat mitjana de cada radioelement estudiat amb la massa total dipositada. Per tal de realitzar el càlcul assumim que tot el residu de Flix presenta una concentracions mitjana de  $650$  Bq·kg<sup>-1</sup> de <sup>210</sup>Pb,  $1100$  Bq·kg<sup>-1</sup> de <sup>226</sup>Ra i de  $1900$  Bq·kg<sup>-1</sup> de <sup>238</sup>U. Llavors multiplicant aquesta activitat mitjana pel rang de quantitat total de residus (200.000-360.000 Tm), obtenim un interval de quantitats total de radioactivitat de l'ordre de  $130-240 \cdot 10^9$  Bq per al <sup>210</sup>Pb,  $220-420 \cdot 10^9$  Bq per al <sup>226</sup>Ra i de  $380-$

**Taula 5.1.2** Factors d'enriquiment pel  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{238}\text{U}$  en el tram contaminat dels testimonis de Flix

Testimoni	$^{210}\text{Pb}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{238}\text{U}$
VC1	0.11 – 0.32	0.21 – 0.67	0.71 – 2.03
VC2	0.06 – 0.62	0.10 – 0.73	0.71 – 2.27
VC3	0.13 – 1.05	0.08 – 6.97	2.25 – 14.02
VC4	0.08 – 0.42	0.10 – 0.95	0.17 – 0.81
VC5	0.64 – 2.73	0.22 – 1.21	0.20 – 4.22

\*Radioactivitat natural de la fosforita del Marroc:  $1284 \pm 40 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  de  $^{210}\text{Pb}$ ,  $1343 \pm 13 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  de  $^{226}\text{Ra}$  i  $836 \pm 11 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  de  $^{238}\text{U}$ .

**Taula 5.1.3.** Inventaris dels radionúclids naturals acumulats en els residus submergits de l'embassament de Flix.

Radionúclid	Concentració mitjana (Bq·k <sup>-1</sup> )	Quantitat estimada ( $10^9\text{Bq}$ )
$^{210}\text{Pb}$	650	130-240
$^{226}\text{Ra}$	1100	220-420
$^{238}\text{U}$	1900	380-730
<i>Total</i>		<i>730-1390</i>

$730 \cdot 10^9 \text{ Bq}$  per a l' $^{238}\text{U}$ . Els resultats de l'inventari total present en els fangs submergits de l'embassament de Flix per als radionúclids  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{238}\text{U}$  es troben a la taula 5.1.3.

Les activitats mesurades a Flix són comparables a les concentracions que es reporten a la bibliografia per a la indústria dels fosfats i fertilitzants. En la taula 5.1.4 es resumeixen diversos nivells d'activitat i es detalla en quina forma es troba el residu o producte fosfòric. A Espanya una de les zones més estudiades pel que fa als abocaments de residus NORM és l'estuari del Riu Tinto i Odiel (Martínez-Aguirre *et al.*, 1994; Martínez-Aguirre, 1996; San Miguel *et al.*, 2003), a la província de Huelva. Els rius Tinto i Odiel pateixen una forta pressió industrial que es remunta ja a l'època dels romans (Davis *et al.* 2000). Els sediments i aigües dels rius, així com les de l'estuari, presenten uns registres elevats de metalls pesants (Davis *et al.*, 2000, Martin *et al.*, 1998) procedents de la mineria i de radioactivitat natural procedents de la indústria de l'àcid fosfòric i del fertilitzants de la zona. El problema ambiental dels abocaments de fosfats de guix del marge dret de la desembocadura del riu Tinto es remunta a la dècada dels 60, ocupant unes grans basses descobertes d'aproximadament 1000 -1200 ha de superfície per 12 km de longitud i una amplada mitjana de 1.5 km (Cancio *et al.*, 1989). Les filtracions de metalls i residus radioactius (per precipitació, contacte directe amb l'aigua del riu etc.) han provocat un fort impacte en els ecosistemes de les maresmes del Pinar i gran part de la del Rincón i Mendaña. A aquest fet cal afegir-li l'accident ambiental del dia 31 de desembre del 1998 quan les basses de fosfats de guix (de pH 1.5), propietat de FMC Foret i Fertiberia, es rebentaren tot alliberant més de  $50.000 \text{ m}^3$  de material NORM i metalls pesants a la Ria de Huelva (tributària del Tinto) (CSIC-LIM, 2003). Martínez-Aguirre & García-León (1997) en el seu estudi de sòls de la zona reporten un rang de



**Taula 5.1.4.** Revisió bibliogràfica de les concentracions de les activitats de la matèria prima (fosforita), productes fosfòrics (fertilitzants (simple superfosfat), fosfat bicàlcic per als animals), productes intermitjos de producció (precipitats de  $\text{CaCl}_2$ ) i residus de producció de la indústria del fòsfor (fosfat de guix derivat de la indústria de l'àcid fosfòric i residus de la producció del fosfat bicàlcic).

Localització	Medi	Material NORM	Autors	Activitat mitjana ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ )		
				$^{210}\text{Pb}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{238}\text{U}$
Florida (USA)	Acopis de residus		Hull & Burnett (1996)		1600	1500
Portugal	Estuari del Tajo	Fosfat de guix	Carvalho (1995)		1043	156
		Fosforita del Marroc	Carvalho (1995)	1083	1406	1003
Líban	Costa del Líban (Selaata)	Simple superfosfat (Fertilitzant)	Bridgent <i>et al.</i> (2002)		1043±25	
		Fosfat de guix	Bridgent <i>et al.</i> (2002)		957±47	
Suècia	Acopis de residus	Fosfat bicàlcic (Producte)	Gäfvert <i>et al.</i> (2001)	169±7	15±1	954±38
		Residus fosfòrics	Gäfvert <i>et al.</i> (2001)	100±5	142±4	8.0±0.5
	Acopis de residus	Precipitat de $\text{CaCl}_2$	Gäfvert, <i>et al.</i> (2001)	3480±252	78±8	
Itàlia	Estuari de Venècia (1)	Fosfat de guix	Guogang <i>et al.</i> (2002)	6725±6063		
Bèlgica (Tessenderlo)	Zona agrícola	Fosfat de guix	Vandehove <i>et al.</i> (1996)		3500	
Marroc	Mines de fòsfor	Fosfat de guix	Azouazi <i>et al.</i> (2001)		1420±330	<1700
Irlanda	Sediments de la part est del mar d'Irlanda	Residus fosfòrics	Poole <i>et al.</i> (1995)	837±55	1477±36	1377±34
Espanya	Estuari Tinto-Odiel	Sòls-maresmes	Martínez-Aguirre & García León (1997)	15.4 a 820	20.3 a 711	
Espanya	Riu Odiel	Sediments fluvials	Periañez <i>et al.</i> (1997)	341±12		
Espanya	Riu Ebre	Fosforita del Marroc	Aquest treball	623±24	1343±13	836±11

concentració de  $15.4 \pm 10.1$  a  $820 \pm 27 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  per al  $^{210}\text{Pb}$ , i de  $20.3 \pm 17.7$  a  $711 \pm 45 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  per al  $^{226}\text{Ra}$ , indicant una clara remobilització dels radionúclids naturals procedents de les zones d'abocament de fosfat de guix aigües amunt d'ambdós rius. Actualment la radioactivitat procedent de les piles continua mobilitzant-se aigües avall. Tanmateix, després de l'accident del 1998, la política de gestió dels residus NORM canvià completament amb l'implantació d'un sistema d'acumulació de residus aïllat dels efectes externs i amb un sistema de bombeig de lixiviats de producció de nou cap a l'interior de la fàbrica (Villa *et al.* 2004).

En el port de Whitehaven, a la costa de Cumbria (Anglaterra) McCarteney i col·laboradors (2000) han mesurat unes concentracions en els sediments del port de  $685 \pm 17 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  per al  $^{238}\text{U}$ , de  $140 \pm 2$  per al  $^{210}\text{Pb}$  i de  $7750 \pm 200 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  per al  $^{210}\text{Po}$ , com a resultat dels abocaments d'una planta de producció d'àcid fosfòric localitzada a les seves proximitats. A Thessalonika (Nord de Grècia), Papastefanou (2001) estima les emissions atmosfèriques anuals d'una factoria de processat de roca fosfòrica en  $10 \text{ MBq}$  per al  $^{238}\text{U}$ , i de  $10.7 \text{ MBq}$  per al  $^{226}\text{Ra}$ . A Portugal, Carvalho (1995) estudia el comportament dels radionúclids naturals en el Riu Tajo, així com els senyals de radiació de les descarregues del complex industrial de fertilitzants ubicat a les seves ribes. Segons Carvalho (1995) les emissions anuals de  $^{210}\text{Pb}$  dissolt a l'estuari per mitjà de les descarregues totals de residus de fòsfor es quantifiquen en  $21 \text{ GBq a}^{-1}$ .

### 5.1.6 Datació dels testimonis de Flix

La tècnica de datació mitjançant el  $^{210}\text{Pb}$  es basa en la desintegració en profunditat del  $^{210}\text{Pb}$  en excés dipositat en els sediments per via atmosfèrica. Lamentablement, en aquest cas la contaminació antròpica en els fangs de l'embassament de Flix invalida la tècnica. Malgrat això, la presència d'aquest radionúclid, juntament amb el  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{238}\text{U}$ , permet determinar almenys una data en els perfils sedimentaris estudiats, que correspon a l'inici de l'increment d'aquests radionúclids i que es pot relacionar amb les dades de producció de la fàbrica de Flix. Així, la producció de fosfats s'inicià a l'any 1973 i és raonable, per tant, assignar aquesta data als nivells corresponents a l'increment d'aquests radionúclids.

Degut a la major resolució dels perfils de  $^{210}\text{Pb}$  s'ha utilitzat per a assignar la data de 1973 als testimonis obtinguts a l'embassament de Flix. Aquesta data es pot situar a les profunditats de 102, 130, 115, 70 i 77 cm en els testimonis VC1, VC2, VC3, VC4 i VC5 respectivament

A través de la datació per  $^{137}\text{Cs}$  podem afirmar que tot el testimoni VC1 és posterior a l'any 1954, ja que detectem la presència de  $^{137}\text{Cs}$  fins a la darrera secció del testimoni (Fig. 5.1.5). En canvi, en els demés testimonis el  $^{137}\text{Cs}$  es troba sempre per sota del mínim valor detectable. La detecció del  $^{137}\text{Cs}$  en el testimoni VC1 ha estat possible gràcies a la poca presència de residus al tram final del testimoni. En canvi, en els demés testimonis la presència de residus es generalitzada de manera que dilueixen els senyal atmosfèric del  $^{137}\text{Cs}$ .

Val a dir, però, que juntament amb la data de referència del 1973 s'ha pogut establir una nova data complementària en els testimonis VC1 i VC5:

- En el testimoni VC1, el mercuri i la presència dels compostos organoclorats ens ofereixen una nova datació indirecta que permet datar la secció 111-116 cm a principis dels anys '60 any. Per aquestes dates es produí una ampliació de les plantes de síntesi de clor, fet que coincideix amb un espectacular pic de compostos organoclorats registrat en aquesta secció sedimentària (vegeu Figura 5.1.15 i apartat 5.1.7).
- En el cas del testimoni VC5 la data complementària a l'any 1973 s'obté a partir de la granulometria del testimoni. Durant el mostreig es van assolir els nivells de graves lacustres de naturalesa similars a les que s'acumulen en el tram fluvial aigües avall (secció 76-87.5 cm). Per aquest motiu, podem assumir que tota la columna sedimentària acumulada en aquest punt de l'embassament data de l'any 1948, any en què es finalitzà la construcció de l'actual embassament hidroelèctric de Flix (Fig 5.1.13).

### 5.1.7. Associació d'altres contaminants en els residus fosfatats NORM

Les dades de metalls pesants i compostos organoclorats que apareixen en aquest apartat han estat realitzades per l'Institut de Ciències del Mar (ICM-CSIC) de Barcelona, sota la direcció del Dr. Albert Palanques en el marc de la tesi doctoral en preparació d'en Marc Belzunces, i pel Departament de Química Ambiental del Centre d'Investigació i Desenvolupament (CID-CSIC) dirigit pel Dr. Joan Grimalt, respectivament. Per tant, aquestes dades s'utilitzen exclusivament en aquest apartat per a poder interpretar possibles correlacions entre els residus NORM i els demés contaminants trobats en els fangs residuals de Flix.

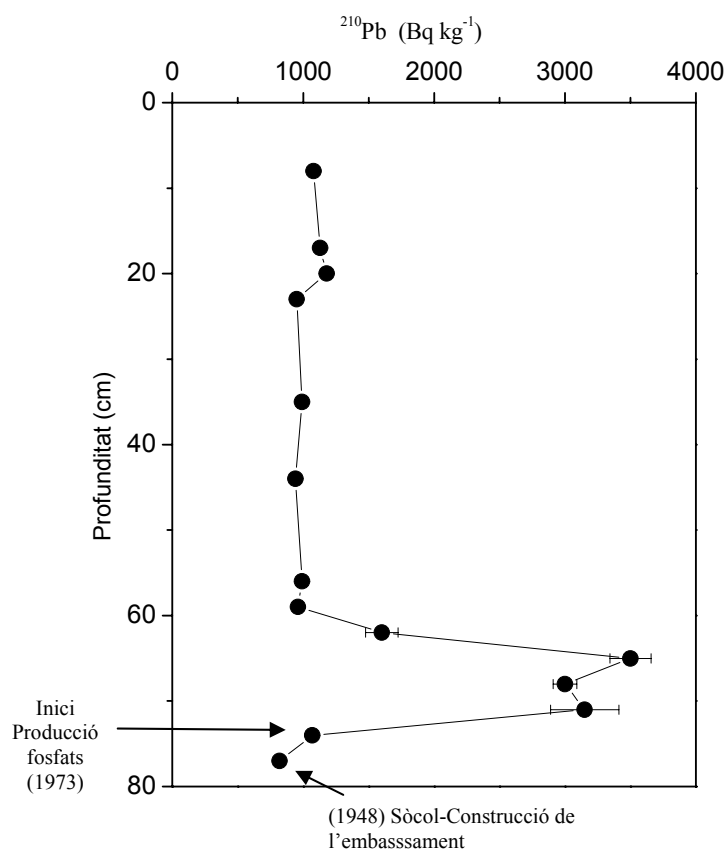


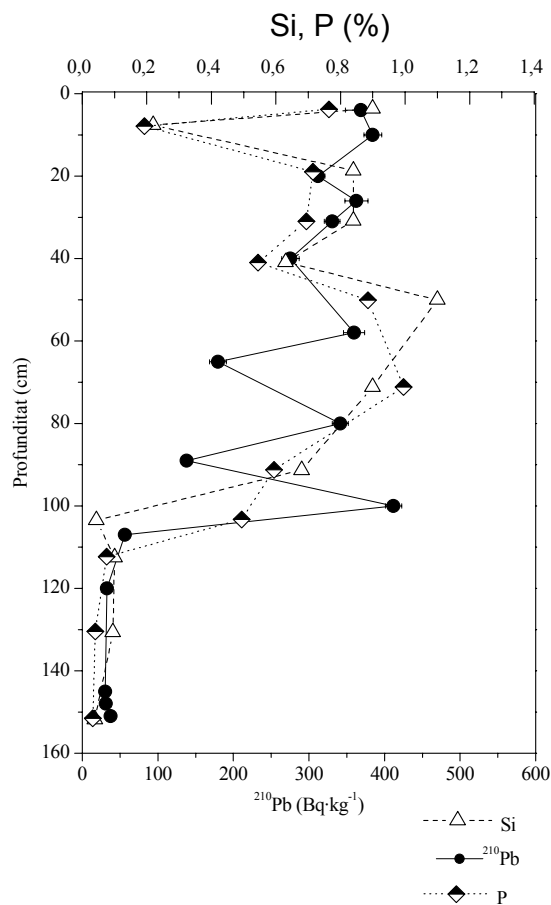
Fig. 5.1.13. Datas en el perfil de  $^{210}\text{Pb}$  del testimoni VC5

- *Components majoritaris i metalls pesants en els residus NORM*

#### *Fòsfor i calci*

Els residus de la producció del fosfat bicàlcic van associats a nivells elevats de fòsfor i de silici. Si comparem els perfils d'activitat de  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  o  $^{238}\text{U}$  amb les seves concentracions en fòsfor i silici observarem una bona correlació en tots els testimonis, ja que tant els radionúclids com el fòsfor i silici són traçadors del mateix tipus de residu. En la figura 5.1.14 es mostren els perfils en profunditat de P i de Si del testimoni VC1. En la fig 5.1.16. es pot observar la correlació lineal entre el  $^{210}\text{Pb}$  i el P del testimoni VC4, amb un coeficient de  $r^2 = 0.88$ .

L'interval de concentració de fòsfor en els residus de producció són de 0.01-2.6 % (Grimalt *et al.*, 2003). Per contra, la concentració habitual en sediments fluvials no contaminats és de l'ordre del 0.03-0.15%. Per tant, els valors elevats de fòsfor reflecteixen la pèrdua de grans quantitats de roca fosfòrica en el decurs del tractament industrial que s'acaba concentrant en el residus de producció del fosfat bicàlcic abocat en els deltes.



**Fig 5.1.14.** Perfils de P, Si i  $^{210}\text{Pb}$  en testimoni VC1

El calci és un dels altres components majoritaris que es troba associat a la producció del fosfat bicàlcic. Tal com comenten en el capítol 2 (apartat 2.8.3.3), el calci s'aporta en el procés productiu en forma de roca calcària i s'acaba repartit entre el producte final (el fosfat bicàlcic) i en els residus de producció (clorur càlcic i altres). El calci és el component majoritari que presenta les concentracions més elevades, amb un interval de 12-46 %. En canvi, les concentracions de calci dels sediments fluvials no contaminats no superen el 2-4%. Tanmateix, les concentracions de calci només segueixen el comportament dels residus NORM en el cas del testimoni VC1. En els altres testimonis no es produeix aquesta correlació, mostrant nivells elevats de calci en parts dels testimonis on la presència de NORM és baixa (Fig 5.1.17). Per exemple, en el testimoni VC3 la presència dels residus fosfòrics s'observa fins als 98 cm de profunditat i posteriorment, les concentracions dels radionúclids són molt baixes. En canvi, la concentració de calci es manté constant, al voltant del 30 %, fins als 98 cm i experimenta un creixement de la concentració en les darreres seccions del testimoni, assolint valors de fins al 39 %. Aquest mateix comportament també s'observa en el testimoni VC2 on es detecten residus NORM fins a la secció 125-128 cm, amb uns percentatges de calci d'entre 29-37 %. Un cop desapareixen els residus fosfòrics (125 cm), el calci experimenta un augment en la distribució arribant fins al 46 % en la secció 172.5-177 cm. Per tant, aquests exemples ens confirmen que el calci s'aboca com a residu durant el procés productiu del bicàlcic, així com també en altres processos que no estan lligats directament als nivells elevats de NORM.

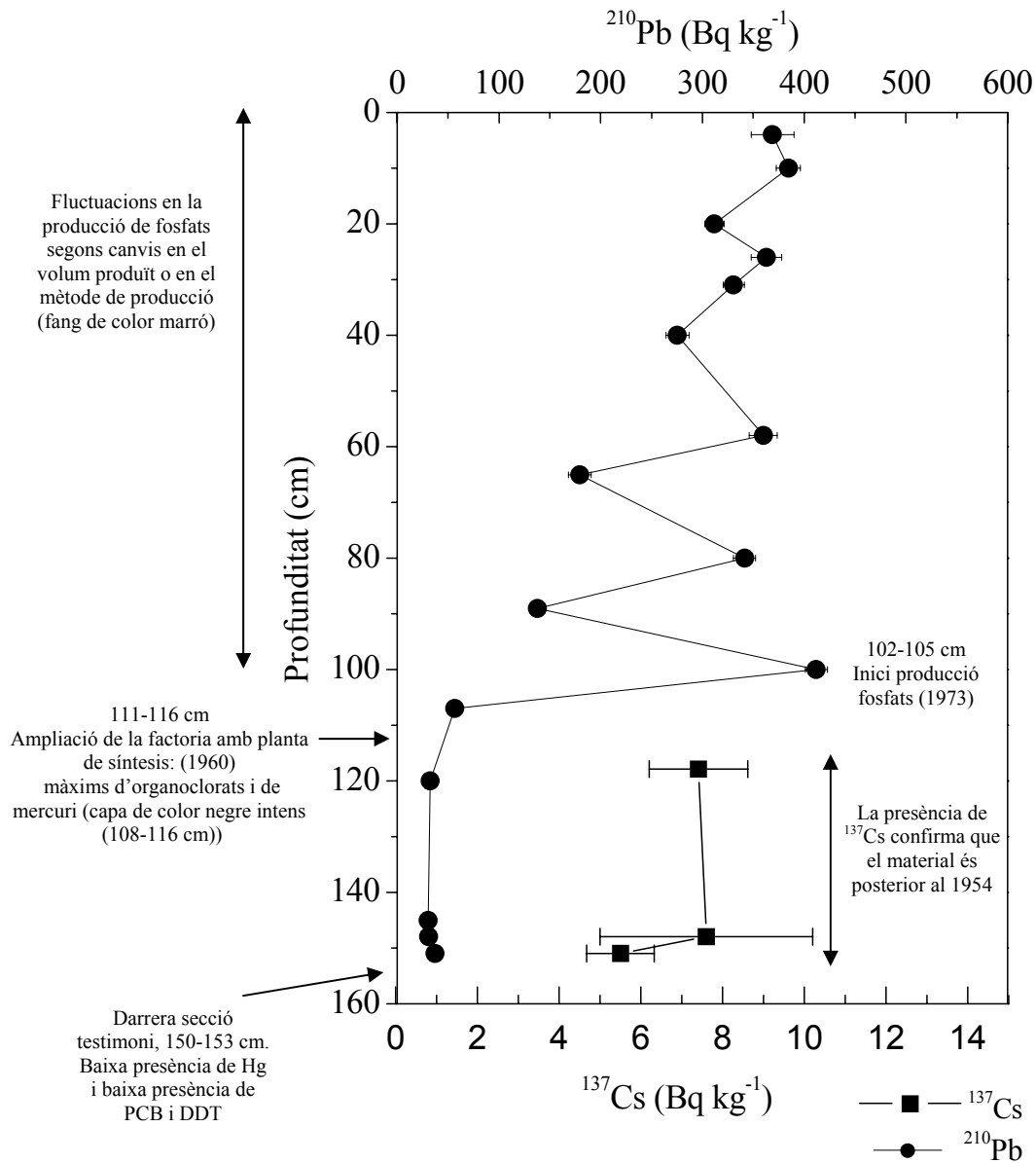
### Metalls pesants

Els metalls pesants de Cr, Ni, Cd i Zn també presenten unes concentracions elevades en els fangs residuals de Flix molt superiors als nivells naturals. En la Fig 5.1.18. es pot apreciar la correlació dels metalls amb el  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ . Les correlacions no són especialment ajustades, exceptuant el bon ajust del perfil de  $^{210}\text{Pb}$  del testimoni VC2 *versus* el Cr ( $r^2=0.92$ ). Tanmateix, si que s'observa clarament com en els trams on hi ha presència de residus NORM també es registren les concentracions més elevades de metalls (Williams & David, 1973).

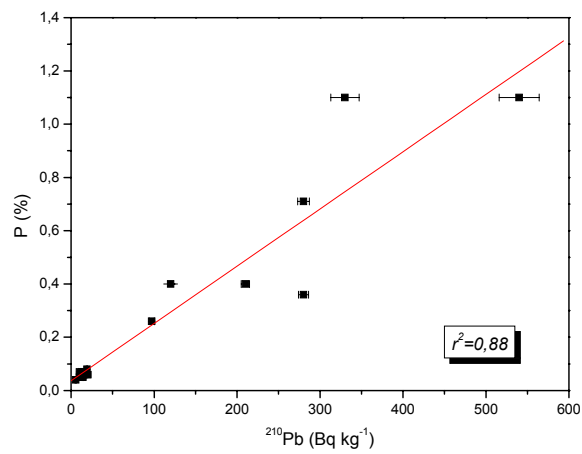
Segons Kongshaug i col·laboradors (2002) la fosforita del Marroc és rica en Cr, Cd i Zn, amb uns valors de 225, 30, 261 mg kg<sup>-1</sup>, respectivament. En canvi, la roca és pobre en Pb i Hg, amb uns valors de 7 mg kg<sup>-1</sup> Pb i de 0.04 mg kg<sup>-1</sup> de Hg. En el cas dels fangs de Flix també s'observa una tendència similar, amb uns nivells elevats de Cr, Cd i Zn i, per contra, nivells baixos de plom. Krarikov i Smetana (2000) també reporten que la fosforita del Marroc és rica en cadmi (30 mg kg<sup>-1</sup>), seguida de la fosforita de Tunísia, amb 21 mg kg<sup>-1</sup>, i de la roca fosfòrica d'Algèria, amb 16 mg kg<sup>-1</sup>.

### Mercuri

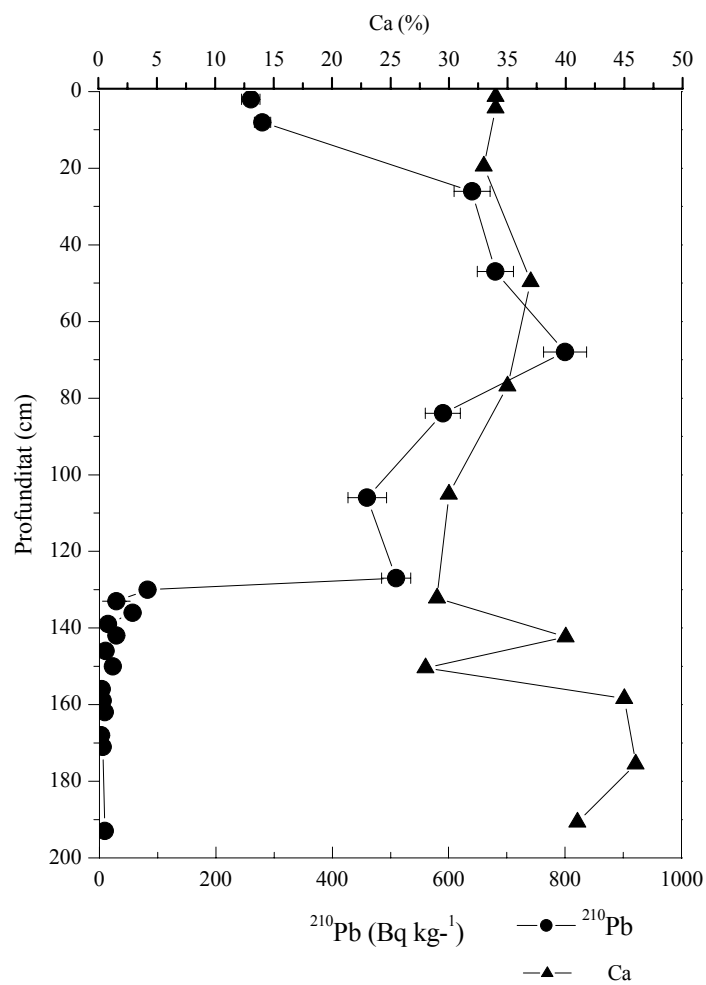
Els testimonis extrets dels deltes de contaminació de l'embassament de Flix presenten uns nivells molt elevats de mercuri. Les concentracions mitjanes dels testimonis, VC1, VC2, VC3, VC4, i VC5, són de 142, 31, 23, 54 i 16 µg g<sup>-1</sup>, respectivament, amb uns màxims que prenen uns valors de fins a 700 vegades superiors als nivells considerats naturals en fangs sedimentaris (0.04-0.3 µg g<sup>-1</sup>). Dels cinc testimonis analitzats per l'Institut de Ciències del Mar (ICM-CSIC) de Barcelona, el VC1 és el més contaminat per mercuri. Si comparem la seva concentració mitjana (142 µg g<sup>-1</sup>) amb la dels demés testimonis observem que aquest darrer presenta unes concentracions que són 4.5, 6, 2.6, i 8.9 vegades superior a la dels testimonis VC2, VC3, VC4 i VC5, respectivament. Val a dir que el mercuri és un metall que presenta una concentració molt baixa en la fosforita sedimentària del Marroc (Kongshaug *et al.*, 2002, veure taula 2.8 del Capítol 2). Per tant, la seva presència està estretament vinculada a la planta de producció de clor i organoclorats adjunta a la fàbrica de fosfats. Com ja hem comentat en el capítol 2 dedicat als processos industrials de la factoria electroquímica, el mercuri és un subproducte derivat de la utilització de les cel·les de mercuri en el procés d'electròlisi.



**Fig 5.1.15.** Perfil de  $^{210}\text{Pb}$  i  $^{137}\text{Cs}$  del VCI, indicant també les datacions indirectes a través dels residus NORM,  $^{137}\text{Cs}$ , mercuri i compostos clorats.



**Fig 5.1.16.** Correlació entre el P i el  $^{210}\text{Pb}$  del testimoni VC4 ( $r^2 = 0.88$ )



**Fig 5.1.17.** Representació gràfica de la concentració de Ca i de l'activitat de  $^{210}\text{Pb}$  en profunditat en el testimoni VC2.

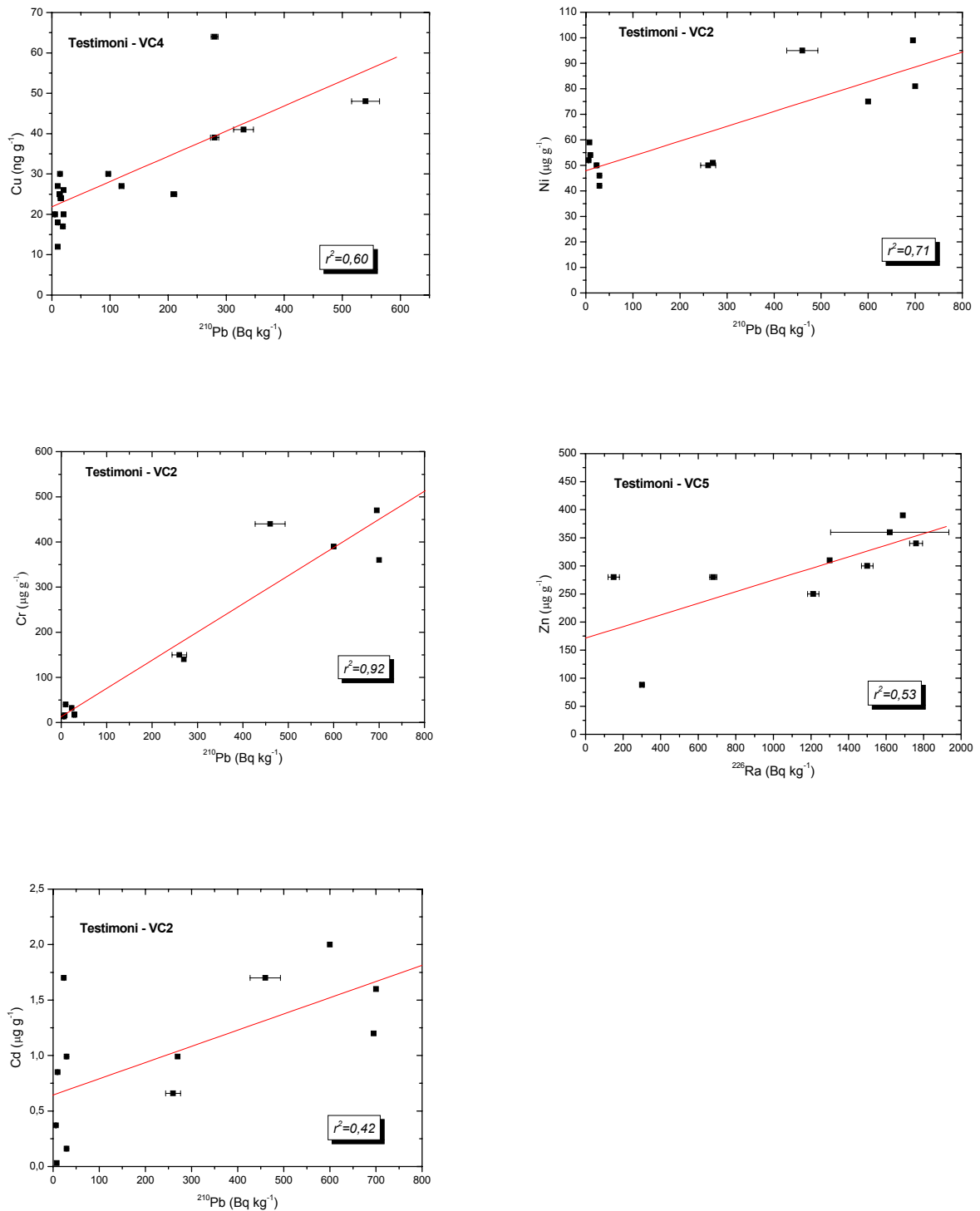


Fig. 5.1.18. Correlació dels residus NORM amb el Cr, Cd, Ni, Zn i Cu en els testimonis VC2, VC4 i VC5.



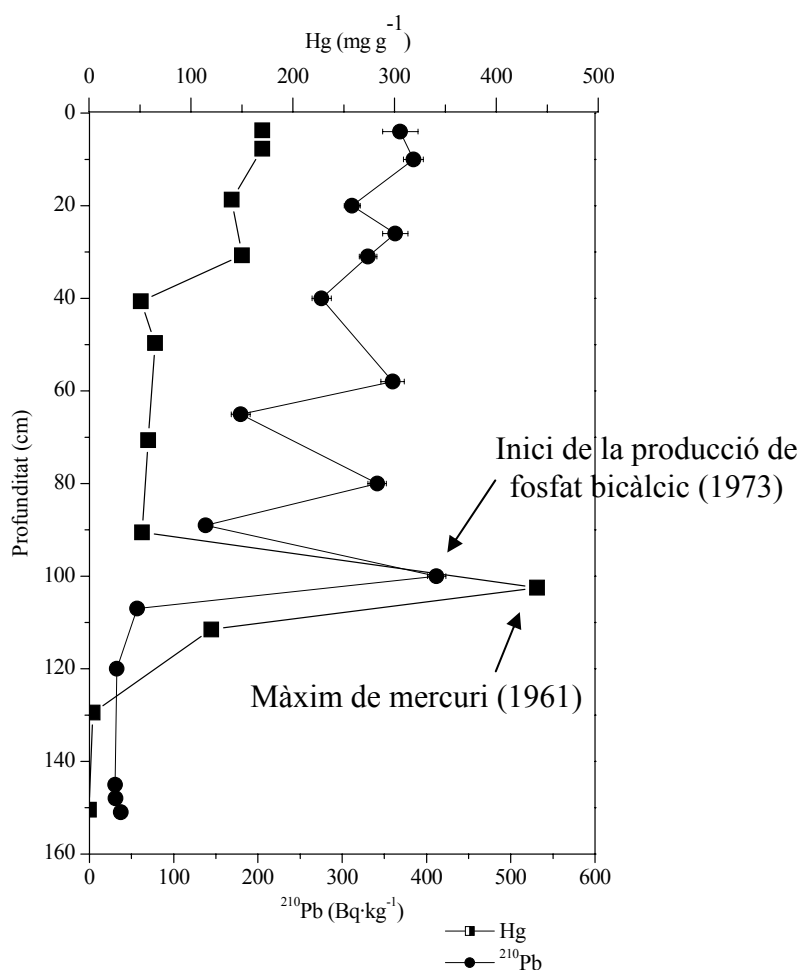


Fig 5.1.19. Distribució del mercuri i del  $^{210}\text{Pb}$  en profunditat en el testimoni VC1.

Mitjançant la datació indirecta amb el  $^{210}\text{Pb}$  observem com ja era habitual en alguns dels deltes d'abocament eliminar subproductes clorats abans del l'any 1973 (inici de la presència de residus rics en radioactivitat natural). A més a més, en el cas concret del testimoni VC1 s'ha utilitzat la concentració de mercuri per obtenir una data complementària a la del 1973 establerta a partir del  $^{210}\text{Pb}$ . S'observa un gran abocament de mercuri a la secció 102-105 cm, amb una concentració de  $440 \mu\text{g g}^{-1}$ , que podria possiblement ser el resultat de l'ampliació de les plantes de síntesi de clor de l'any 1961 i que coincidiria amb les datacions proposades mitjançant el  $^{137}\text{Cs}$  i el  $^{210}\text{Pb}$  (Fig 5.1.19).

- *Els organoclorats*

La presència d'organoclorats és generalitzada en tots els sediments de Flix i no mostren una tendència definida en profunditat (Fig 5.1.20). Els principals compostos organoclorats que ha detectat el Departament de Química Ambiental del Centre d'Investigació i Desenvolupament del (CID-CSIC) dirigit pel Dr. Joan Grimalt, són l'hexaclorobenzè, pentaclorobenzè, DDTs, policlorobifenils, policloronaftalens i policloroestirens, amb unes concentracions molt elevades en comparació amb els nivells habituals citats a la bibliografia.

L'únic perfil que presenta un comportament decreixent en profunditat és el del testimoni VC1 (Fig. 5.1.20 i taula 5.1.5). En la darrera secció del VC1 (150-153 cm) la concentració d'organoclorats és molt baixa, similar als nivells habituals en sediments lacustres (Grimalt, 2003) i només es detecten petites concentracions de DDT (DDE) i altres, procedents molt probablement de les filtracions de les capes superiors afectades. En la següent secció les concentracions de compostos organoclorats augmenten fins al seu màxim absolut a la secció 111-116 cm, just per sota la secció 100 cm datada a l'any 1973 a través del  $^{210}\text{Pb}$ . El màxim correspon a un abocament massiu de residus (hexaclorobenzè, pentaclorobenzè, hexaclorociclohexans, policloronaftalens i policloroestirens) que destaca fortament pel seu color negre intens des dels 108 al 116 cm. Si revisem la taula 2.5 del capítol 2, on es descriu l'evolució històrica de les línies de producció de la fàbrica, podem observar com a l'any 1945 s'inicià la línia de producció de DDT, cloral i clorobenzè (1947-1948) i entre l'any 1949, i principalment el 1961, s'incorporaren a la factoria dues noves plantes de síntesis d'organoclorats que incrementaren notablement la producció d'orgànics. Aquest màxim coincideix, per tant, amb el desplegament de les noves línies de producció i amb la posada en marxa d'aquestes noves plantes. Aquesta data del 1961 que s'observa en el testimoni VC1 està plenament d'acord amb la datació per  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{210}\text{Pb}$  (residus NORM).

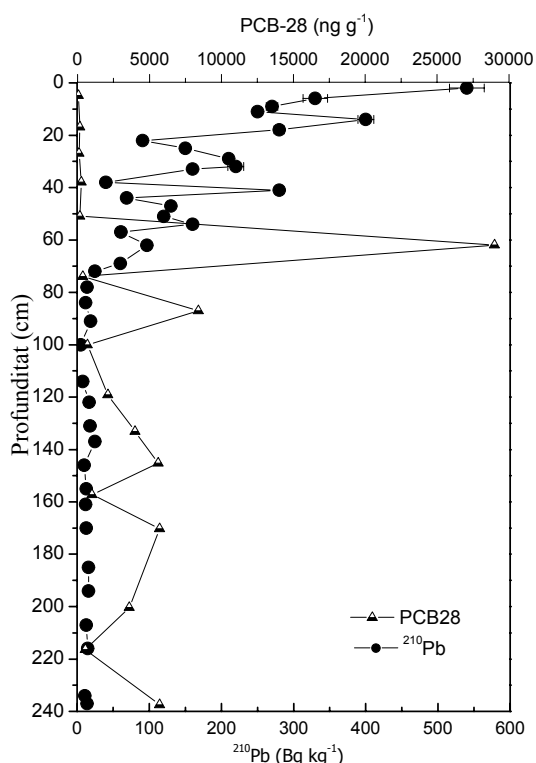
Després de l'any 1973 les concentracions continuen essent molt elevades en tots els compostos organoclorats, però amb uns valors inferiors als de l'abocament registrat a la secció 111-116 cm (Taula 5.1.6).

Malgrat que la tendència general és trobar els compostos organoclorats arreu dels testimonis, en alguns casos concrets s'observen diferències. Així per exemple el  $\gamma$ -Hexaclorociclohexà es troba present en tots els testimonis de Flix exceptuant el testimoni VC5. El g-HCB es un subproducte de la fabricació de molts de compostos clorats i és altament soluble en aigua. La presència de concentracions elevades d'aquest subproducte en els residus de Flix reflecteix un increment general de la producció dels compostos fabricats. En el testimoni VC5 no hi ha presència de nivells de  $\gamma$ -Hexaclorociclohexà., molt probablement per la seva situació al costat de la presa, sota la influència dels corrents d'aigua (captació de la hidroelèctrica i obertura de portes) que han rentat el g-HCB i no s'hi ha acumulat. De la mateixa manera, el testimoni VC4 mostra unes concentracions molt elevades de 4.4'-DDT (ex: 44000 ng g<sup>-1</sup> a la capa superficial), en canvi les concentracions són molt més baixes en els testimonis VC2 i VC3 i VC5, amb un interval de valors de 0 a 700 ng g<sup>-1</sup>. Per tant, s'observa una contaminació global per organoclorats en tots els lòbuls i en alguns casos es pot observar una contaminació selectiva per alguns compostos.

### 5.1.8. Discussió dels resultats obtinguts en l'embassament de Flix

Els lòbuls residuals presents en l'embassament de Flix mostren un impacte radiològic ambiental evident a causa del procés de concentració de radionúclids naturals durant l'elaboració del fosfat bicàlcic. Cal tenir en compte que aquests residus NORM es troben dipositats dintre del llit del riu, a 95 km de la desembocadura al delta de l'Ebre. El sistema fluvial de la zona és molt dinàmic i per tant aquests fangs són susceptibles a ser remobilitzats i transferit a ecosistemes sensibles o a la cadena alimentària i afectar finalment a la població.

**Taula 5.1.5.** Concentracions de DDT i PCB-180, PCB-28 en el testimoni VCI



Codi	Secció (cm)	4,4'-DDT	PCB-180	PCB-28
VC1004	3-6	120	54	49
VC1008	6-9	90	51	0
VC1010	9-12	87	91	180
VC1017	15-18	31	36	99
VC1020	18-21	26	150	58
VC1023	21-24	37	89	45
VC1026	24-27	39	54	52
VC1031	30-33	22	67	19
VC1040	39-42	42	15	48
VC1044	42-45	67	77	110
VC1050	48-51	29	21	59
VC1071	69-72	36	33	200
VC1091	90-93	460	140	730
VC1103	102-105	400	33	460
<i>VC1112</i>	<i>111-116</i>	<i>3600</i>	<i>6300</i>	<i>52000*</i>
VC1130	128-131	23	0	13
VC1151	150-153	7.5	0	0

**Fig 5.1.20.** Perfil de  $^{210}\text{Pb}$  i PCB-28 en el testimoni VC4, on es comprova com els compostos clorats s'aboquen segons la producció de clor de la factoria i que no estan directament vinculats a la producció del fosfat bicàlcic.

*\*En cursiva es senyala la secció 111-116 corresponent a la posada en marxa de la producció d'organoclorats (1949 i 1961) amb tecnologia alemanya ÜHDE.*

En la normativa espanyola (Real Decreto 1836/1999), europea (96/29/Euratom) ni internacional, no hem trobat uns límits de contaminació per a residus, ni límits de residus radioactius referents a elements radioactius naturals. En general es considera que es un tema pendent de resoldre. Legalment només es contempla l'impacte dels residus NORM en termes de dosi rebuda per la població i pels treballadors de l'empresa assumint els criteris de protecció radiològica. Així doncs, el sistema de protecció radiològica estableix que la dosi màxima rebuda per a la població no pot ser superior a 1 mSv per persona i any, i en el cas de personal professionalment exposat a la radiació la legislació estableix 100 mSv per persona durant un període de 5 anys oficials consecutius subjecte a una dosi efectiva màxima de 50 mSv en qualsevol any oficial. Per tant, segons la normativa l'impacte de Flix només és quantificable si s'elabora un estudi dosimètric detallat a l'interior de la planta de DCP, en el cas de personal treballador, i si s'avaluen totes les possibles vies que poden afectar a la població (vegeu Capítol 8. Estudis prospectius, estimació de dosi).

La directiva europea 96/29/Euratom només estableix uns límits de concentració i de quantitat total en el cas de les pràctiques en instal·lacions radioactives. Segons la normativa europea, les activitats exemptes de declaració són aquelles en què les quantitats o concentracions no superen els límits de: 10000 Bq d'activitat total o bé 10000 Bq·kg<sup>-1</sup> per al  $^{210}\text{Pb}$  i  $^{226}\text{Ra}$ , i de 10000 Bq d'activitat total o bé 1000 Bq·kg<sup>-1</sup> per  $^{238}\text{U}$  (Taula 5.1.6). En tot cas, però, aquests nivells

**Taula 5.1.6.** Límits de concentració i quantitat establerts per la directiva 96/29/Euratom.

Radionúclid	(96/29/Euratom)	
	Quantitat (Bq)	Concentració (Bq·kg <sup>-1</sup> )
<sup>226</sup> Ra+	10 <sup>4</sup>	10.000
<sup>210</sup> Pb+	10 <sup>4</sup>	10.000
<sup>210</sup> Po	10 <sup>4</sup>	1.000
<sup>232</sup> Th	10 <sup>3</sup>	1.000
<sup>238</sup> U	10 <sup>3</sup>	1.000

<sup>+</sup> el límit pel radionúclid és computant incloent els seus fills.

s'apliquen estrictament a les fonts radioactives i no als residus generats, que solen presentar uns nivells d'activitat d'un o més ordres de magnitud per sota de les activitats de les fonts. Per tant, no podem comparar directament les activitats dels NORM de Flix amb els límits de concentració de la normativa 96/29/Euratom. Tanmateix, la IAEA Draft Safety Guide DS161, (2004) si que recomana uns límits d'excepció per a residus sòlids rics en radioactivitat natural derivats de la indústria no nuclear (NORM) (Wymer, 2004). Les recomanacions s'estableixen en concentracions de 1000 Bq·kg<sup>-1</sup> per als elements de la cadena de l'<sup>238</sup>U i de 10000 Bq·kg<sup>-1</sup> per al <sup>40</sup>K. Segons això, algunes de les seccions analitzades per <sup>210</sup>Pb i <sup>226</sup>Ra són inferiors, però significativament properes als límits de la IAEA. Per contra, una gran part de les seccions analitzades superen els límits de la IAEA per <sup>238</sup>U.

Malauradament, l'aplicació d'aquests límits recomanats per la IAEA en els països de la Unió Europea és molt complex, ja que s'acaba d'aprovar recentment la normativa (96/29/Euratom) per a regular, entre d'altres aspectes, aquest tema. És evident que la 96/29/Euratom presenta un buit legal pel que fa a la regulació de les indústries NORM (mineria de l'urani, indústria dels fosfats, mineria del carbó i de centrals tèrmiques, indústria del petroli i del gas, indústria dels òxids de titani, indústria del zirconi i ceràmiques, producció de material de construcció, i les diverses aplicacions dels radionúclids de radi i tori) ja que no dona cap indicació, a part del criteri de dosi, per tal de controlar i gestionar els residus generats. L'únic pas que la comunitat ha fet en relació a la gestió dels NORM és elaborar diversos estudis preliminars per tal de localitzar les indústries productores de residus i quantificar d'una forma preliminar el volum de residus que es generen en els estat membres (Radiation Protection 122 (2001); Vandenhove (2002); Vandenhove *et al.*, 1996; Karsten *et al.*, 2002 en el marc del project EU-project TENORMHARM). Per tant, encara falta elaborar un estudi seriós del volum de residus històrics NORM que es troben repartits per tot Europa.

En resum, les recomanacions de la IAEA són un bon punt de partida per a una gran majoria de països que encara no han desenvolupat normativa per a la regulació dels residus NORM (Wymer, 2004) i s'espera que en un futur es converteixi en un referent a seguir per a millorar l'actual directiva europea en matèria de radioprotecció.

### *Propostes de remeiació*

Una vegada descrita la magnitud de la problemàtica associada als fangs NORM de Flix cal plantejar-nos quines tècniques de remeiació es poden aplicar en aquest tipus d'ambient

sedimentari. L'objectiu final és reduir el perill potencial que suposen les 300.000 tones mètriques de residus contaminats que es troben emplaçades al mig del curs fluvial del riu Ebre, a 95 km de la seva desembocadura, i que només és total o parcialment retinguts per la presa de l'embassament.

### a) Mesures de remeiació

Vandenhove i col·laboradors (1996), Lambers i col·laboradors (1999) i Bousher i Jackson (1999) proposen diverses línies d'actuació per tal de pal·liar el problema dels abocaments de residus radioactius NORM derivats de la indústria no nuclear. Vandenhove i col·laboradors (1996), en el seu informe de la comissió Europea DG XI, 96-ET-006, proposen un model anomenat *Assessment Model for a Common Approach to Restoration of Contaminated Sites* (AMCARE) pensat per escollir la mesura de remeiació més adient a cada tipus de residu NORM. Les variables que el model té en compte són la naturalesa del residu, el tipus d'abocament, el volum, el nombre d'habitants de les proximitats de la zona afectada, l'accessibilitat al residu, i les principals vies d'exposició que intervenen (veure capítol 3, apartat 3.3.2). Finalment, un cop escollida la tècnica més adient es modelitza la dosi per la població després de l'aplicació de la mesura correctora.

L'elecció de la millor tècnica, o combinació d'aquestes, estarà sempre subjecte a la relació cost-benefici (capital disponible, volum de residus a tractar, el temps necessari per implantar la tècnica, la quantitat de mà d'obra contractada, etc.).

#### 1. Trasllat del material NORM des de la zona afectada a una localització més segura i controlada (dragat de sediments, eliminació dels residus, eliminació dels sòls).

El dragat dels 5 lòbuls de l'embassament de Flix és una operació d'un elevat cost econòmic però, que elimina definitivament la presència dels residus en les aigües de l'Ebre i resol el problema per a les generacions futures.

Primerament s'hauria de dissenyar un canal que permeti travessar les aigües de l'Ebre des de la sortida de l'embassament de Riba roja fins a l'altura del meandre de Flix. Posteriorment, un cop l'embassament ja està sec, s'han de dragar i retirar les 200.000-360.000 tones de contaminació que s'estimen en els deltes submergits i tot el material emergit dels deltes, encara per quantificar. L'operació és molt delicada degut a la contaminació en radioactivitat natural i sobretot en metalls pesants i compostos organoclorats presents en els fangs. Per tant s'han de prendre fortes mesures de protecció a l'hora de minimitzar l'exposició del personal treballador en l'obra. A més a més, durant el temps que es deixin les piles de material al descobert, s'incrementa el risc radioactiu per exhalació de radó i d'alliberació d'altres contaminants volàtils (organoclorats, zinc, cadmi, mercuri). Per tant és una operació que també s'ha de realitzar en el mínim temps possible. Paral·lelament a aquesta operació s'ha de preveure la construcció de dipòsits especials per acollir aquests fangs dragats (Vandenhove *et al.*, 1996). Un cop finalitzat el dragat de la zona afectada, s'ha d'impermeabilitzar seguint el protocol utilitzat en el segellat dels abocadors urbans, amb l'objectiu d'assegurar la completa immobilització del material contaminat que hi pugui romandre.

Cal remarcar, que l'opció de dragat del riu sense un previ assecament és completament inviable ja que llavors s'agreuja sèriament el problema de la mobilització dels contaminants aigües avall del riu.

**2. Confinament o aplicació de barreres físiques** que impedeixin la migració dels contaminants, evitant la seva interacció amb el medi no contaminat (cobriment del residu amb material impermeable, sistema de capes, malles geotèxtils, cimentació)

Una altra opció molt menys costosa i que redueix el risc de mobilització dels contaminants d'una forma temporal és el confinament *in situ* del fang. En aquest cas també s'ha d'assecar totalment el pantà i posteriorment s'han d'aplicar les barreres físiques més adients. En el mercat hi ha diversos tipus de malles de geotèxtil usades habitualment en la clausura d'abocadors que s'apliquen de manera intercalada amb diverses capes de material impermeable (roca calcària i argiles). Posteriorment, la pròpia dinàmica sedimentària de la zona cobrirà l'àrea impermeabilitzada. Una altra barrera física aplicable, però més agressiva amb l'entorn, és la cimentació dels lòbuls. El procés consisteix en aplicar ciment directament sobre la zona afectada que, un cop solidificat, aïlla el residu de l'exterior. Tanmateix, la inestabilitat sedimentària dels lòbuls, juntament amb l'elevada toxicitat dels residus (pH àcids, productes dissolvents, organoclorats), podrien dissoldre la barrera de ciment (CSIC-LIM, 2003) tot alliberant el residu progressivament a l'entorn. Així doncs, la màxima impermeabilització s'aconseguiria combinant els dos tipus de barreres: primer una capa de geotèxtil amb làmines de roca calcària intercalades i finalment una coberta de ciment que segelli definitivament la zona.

**3. La immobilització dels contaminants.**

El procés consisteix en aplicar determinats productes químics a la zona afectada amb l'objectiu d'immobilitzar els contaminants i reduir el seu grau de dispersió. La tècnica es basa en la immobilització química a partir de la formació de complexos insolubles que acaben retenint el elements tòxics en els seus enllaços.

Es poden aplicar diversos agents químics directament sobre el residu de Flix. Tanmateix aquesta via no és del tot adequada al tipus de problema que ens ocupa. La totalitat del fang a tractar es molt elevat i alhora concentrat, per tant la immobilització amb agents químics en la pròpia zona esdevindria laboriosa, costosa, i no asseguraria el tractament de la totalitat del volum residual.

**4. Separació o extracció del contaminant.**

L'objectiu final de la separació o extracció és la de concentrar el producte tòxic en el mínim volum possible. Com a resultat tenim un material ric en contaminant i un material més empobrit. Aquesta mesura es basa en separar els elements més contaminants (metalls, organoclorats) del material afectat, mitjançant l'aplicació d'agents químics que formen un precipitat, per dissolució mitjançant un rentat amb àcids minerals o solucions alcalines que capturen els metalls ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  etc.) (Watanabe et al., 2001), a través de columnes d'intercanvi iònic (p.e. columnes de EDTA), electro-refinaments, volatilització, etc. (Choopin & Morgenstern, 1999). Així per exemple, Watanabe i col·laboradors (2001) conclouen que l'aplicació de la sal alcalina de carbonat d'hidrazina és un bon agent separador de l'U(IV) que forma part dels àcids organofosfòrics (àcids dèbils) derivats de la indústria dels fosfats. En la gestió de basses de fosfat de guix de la indústria del fòsfor, o en el tractament fisicoquímic de les plantes de depuració i de potabilització, s'utilitzen agents químics que interactuen de manera selectiva amb

els agents més contaminants, separant-los en forma de precipitat i floculació. Juntament amb la separació química també es combinen les tècniques de separació per filtració i flotació. Així per exemple, Gäfvert i col·laboradors (2002) descriuen l'eficiència d'eliminació de radionúclids naturals i antropogènics en les aigües potables de la província d'Scania (Suècia). El mètode utilitzat es basa en fer passar l'aigua per un procés que combina la coagulació (p.e.  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{FeCl}_3$ ) amb la floculació, seguit d'una filtració amb sorra (filtració ràpida i lenta). Els resultats demostren una bona eliminació de l'urani, el tori, i el poloni. Per contra el procés no és tan eficient en el cas de l'estronci i el radi, que s'escapen del procés de purificació.

La separació dels radionúclids presents en el fang de Flix és una mesura molt costosa que implica un dragat, desplaçament del residu, procés de tractament (assecat del fang, tamisat, atac amb àcids selectius depenent del contaminat, etc.) en una planta especialitzada, i finalment transportar el residu, que és molt divers, altament concentrat i tòxic, en uns dipòsits de contenció especials. A més a més, aquests residus ja presenten uns nivells de radioactivitat natural elevat en origen i es troba en unes grans quantitats que fan la seva separació molt difícil.

Resumint, l'opció que bàsicament s'ha d'intentar dur a terme a l'embassament de Flix és la retirada dels residus tòxics del llit del Riu Ebre, per resoldre el problema definitivament i no deixar-lo a les generacions futures. Posteriorment aquest residu es pot intentar tractar per reduir el seu grau de toxicitat, o simplement s'inertitzar i confina en uns dipòsits especials lluny de la població.

En qualsevol cas, sigui quina sigui l'opció escollida, cal remarcar que el maneig i tractament d'aquests residus ha d'estar estretament vinculat a un complet estudi dosimètric per tal d'estimar la dosi rebuda pels treballadors encarregats de posar en marxa el sistema de remeiació. També és imprescindible fer un monitoreig dels nivells de dosi a les proximitats dels residus confinats i de la contaminació aigües avall del riu per tal de comprovar que el confinament funciona correctament.

Juntament amb aquest estudi dosimètric dels treballadors i de monitoreig ambiental cal elaborar un estudi del risc on s'estimi la dosi rebuda per la població després de l'aplicació de la mesura correctora. Tampoc s'ha d'oblidar, tal com apunta l'informe del CSIC-LIM (2003) on s'avalua l'impacte radiològic de les basses de fosfat de guix derivades de la indústria dels fertilitzants a la província de Huelva, que per tal d'assegurar l'èxit de les operacions és imprescindible la redacció d'un pla d'actuació que compti amb el consens i cooperació de totes les parts implicades (l'empresa, organismes públics i la població afectada).

## **b) Mesures preventives**

Les mesures de remeiació proposades anteriorment estan pensades per a pal·liar el problema quan ja no existeix cap altra alternativa que el simple tractament del residu final. És a dir, les mesures de remeiació només tindran sentit si s'apliquen conjuntament amb un seguit de mesures preventives que assegurin la minimització de la producció de contaminants en origen. Un cop el contaminant ja es troba dispersat en el medi el problema esdevé més difícil de controlar ja que interactua amb les diferents variables ambientals de l'ecosistema. Per aquest motiu, les mesures preventives són sempre més eficients i econòmiques que les mesures de remeiació.

1. És necessari invertir en noves tecnologies de producció de fosfat bicàlcic més netes que garanteixin un residu final més lliure de metalls pesants i radionúclids naturals. El

sistema de producció de fosfat bicàlcic ha d'incorporar una tecnologia que permeti combinar processos de precipitació selectiva (extracció química de Cd, As, de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ ), amb sistemes de resines de retenció de radionúclids i metalls pesants (resines d'intercanvi iònic), que acabin concentrat finalment els contaminants en el mínim volum possible. Posteriorment, el residu final pot ser inertitzat, cristal·litzat (confinat en una matriu cristal·lina), o simplement contingut en dipòsits especials.

2. Una altra actuació preventiva és la reestructuració dels fluxos industrials que tenen lloc durant la producció del DCP. El procés productiu ha de contemplar el reaprofitament i recirculació dels fluxos dels diferents subproductes que es formen durant les fases intermitges (Gäfvvert et al., 2001). L'optimització de les matèries primes permetrà tenir un sistema de producció més eficient (kg de matèria prima consumit per kg de producte final elaborat) i menys costos. Per tant es reduirà la quantitat final de residus generats, i paral·lelament es podrà llançar al mercat un producte més competitiu.
3. La prevenció de la contaminació atmosfèrica és un altre punt a tractar. És aconsellable la utilització de filtres (ex: filtres de manegues) que evitin la propagació de núvols de pols de radiació natural generats durant les descarrega i molturació de la roca fosfòrica. La finalitat és evitar el contacte potencial que pugui tenir la població amb el núvol. Simultàniament, a la sala de molturació de la roca, s'ha d'instal·lar un bon sistema de ventilació que minimitzi la dosi rebuda per l'exhalació del  $^{222}\text{Rn}$  de la fosforita.
4. En relació a l'exposició del personal de planta s'ha d'assegurar la mínima exposició dels treballadors en les operacions de descarrega, molturació, recollida del producte final i empaquetat, neteja de cubetes de precipitació, així com també durant les operacions de retirada dels fangs residuals (Gäfvvert et al., 2001).

### 5.1.9. Sediments superficials del riu Ebre

Les activitats dels radionúclids analitzats en els sediments superficials del riu Ebre, des de l'embassament de Flix fins a la seva desembocadura, es mostren a la taula 5.1.7 i a les figures 5.1.21, 5.1.22 i 5.1.23. A les taules 9.6a i 9.6b es presenten també les concentracions en profunditat dels dos testimonis sedimentaris obtinguts en els punts de mostreig OEB1700 i OEB1800, respectivament.

#### *Radionúclids naturals*

#### **Concentracions de $^{210}\text{Pb}$ en excés**

Els nivells de concentració de  $^{210}\text{Pb}$  en excés són de 10-16  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  en les dragues OEB0200, OEB1100, OEB1300, localitzades en el tram des del Castell de Miravet fins a les proximitats de Tortosa. Posteriorment el  $^{210}\text{Pb}$  en excés decreix fins a nivells indetectables en les dragues OEB1400 i OEB1500, localitzades a l'entrada i sortida d'Amposta, i la draga OEB1600 mostrejada al costat de la petita illa de Sapinya. L'absència de  $^{210}\text{Pb}$  en excés indica que el material que transporta el riu no s'acumula en aquest tram. Cal afegir que aquests trams són navegables i que regularment són dragats per a facilitar la navegació. Així doncs, és comprensible que no hi hagi presència de material acumulat en aquest sector fluvial.



Seguint riu avall, i ja entrant plenament en el delta de l'Ebre, observem que les activitats de  $^{210}\text{Pb}$  en excés de les dragues OEB1700 fins a la OEB2100 (la darrera draga mostrejada) experimenten un augment de concentració, variant entre els 18-52  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . El màxim es localitza a la draga OEB1800, a la sortida de la població de Deltebre, amb  $52\pm 3 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , i el mínim a la draga OEB2000, prop del canal de lo Migjorn, amb un valor de  $18\pm 3 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , molt similar a la draga OEB1900 mostrejada pràcticament en el mateix punt. Finalment, la draga OEB2100, a l'altura de l'Illa de Buda (desembocadura del riu Ebre), mostra una activitat de  $37 \pm 3 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  indicant també una acumulació del material transportat pel riu.

En les estacions de mostreig OEB1700 i OEB1800 també es van obtenir 2 testimonis sedimentaris de 18 i 33 cm de longitud. El perfil de  $^{210}\text{Pb}$  en excés del OEB1700 presenta una concentració superficial de  $36 \pm 3 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  i de  $39 \pm 3 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  als 2.75 cm de profunditat. A partir dels 3 primers centímetres comença a mostrar un sensible decreixement en profunditat des dels  $27.8 \pm 2.4 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  de la secció 5.5 cm fins als  $14.9 \pm 3.0 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  de la secció final (17.5 cm). Tanmateix, l'activitat de  $^{210}\text{Pb}$  en excés no arriba en cap moment a ser nul·la (Taula 9.6).

El perfil de  $^{210}\text{Pb}$  en excés del testimoni OEB1800 mostra unes concentracions molt similars a les del perfil de OEB1700, però en canvi presenta una major irregularitat. L'activitat superficial és més baixa que la del testimoni l'OEB1700 i pren un valor de  $28.7 \pm 4.9 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Augmenta en profunditat fins assolir el màxim a la secció 9.5 cm amb un valor de  $42.3 \pm 5.4 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , superior al màxim del OEB1700. En la següent secció (11.5 cm) l'activitat baixa ràpidament fins als  $25.3 \pm 2.9 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , però recupera els nivells elevats a la secció 18.5 cm amb un valor de  $40.2 \pm 4.2 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Des d'aquesta secció fins al final del testimoni, les concentracions baixen fins als  $19.8 \pm 4.5 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  de la darrera secció a 32.25 cm de profunditat, amb un valor similar al de les darreres seccions del testimoni OEB1700.

### Concentracions de $^{226}\text{Ra}$

Les dragues del riu Ebre presenten una concentració de  $^{226}\text{Ra}$  mitjana de  $22.0 \pm 0.9 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , amb un màxim en la zona del Castell de Miravet (OEB1100) amb  $39.6 \pm 1.8 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . A l'estació OEB1700 (Deltebre) es produeix un màxim local de radi, amb  $27\pm 3 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , i un mínim a la sortida de la mateixa població (OEB1800) de  $9.0 \pm 1.2 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

En relació als dos testimonis mostrejats a les estacions OEB1700 i OEB1800, les seves activitats prenen uns valors d'entre 15-19  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  i de 14-24  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectivament. En el cas de la draga OEB1700 la seva activitat és sensiblement superior a la mesurada en el testimoni sedimentari. En canvi, en el testimoni OEB1800 observem una activitat de radi sensiblement més elevada que la de la draga OEB1800.

### Concentracions d' $^{238}\text{U}$

L'activitat mitjana d' $^{238}\text{U}$  en les dragues és de  $20.7 \pm 0.9 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Presenta el seu màxim a la població de Deltebre (OEB1700) amb un valor de  $49 \pm 3 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  en el mateix punt on es localitza el màxim local de  $^{226}\text{Ra}$  i molt a prop del màxim de  $^{210}\text{Pb}$ , localitzat a la sortida de la mateixa població (OEB800).

En el cas del testimoni OEB1700 mostrejat en el mateix punt, les activitats d' $^{238}\text{U}$  en profunditat són molt constants i oscil·len entre els 20-24  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , per sota de la concentració mesurada a la draga OEB1700. En la draga OEB1800 l' $^{238}\text{U}$  presenta la concentració més baixa, amb un valor

de  $9 \pm 2 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Tanmateix, si comparem aquesta mesura amb les concentracions obtingudes en el perfil d' $^{238}\text{U}$  del testimoni sedimentari OEB1800, observem com el perfil d' $^{238}\text{U}$  en profunditat pren uns valors compresos entre els 13-24  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , lleugerament més elevats que l'activitat de la draga.

### Concentracions de $^{232}\text{Th}$

L'activitat mitjana de  $^{232}\text{Th}$  dels sediments superficials del riu Ebre és de  $18.3 \pm 0.3 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , amb uns valors molt similars entre les dragues. El seu valor màxim es troba en la draga OEB1700, a l'igual com el màxim d' $^{238}\text{U}$ , amb un valor de  $27 \pm 2 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . S'observa també un màxim local a l'estació de Miravet (OEB1100), en el mateix punt del màxim absolut de radi, amb un valor de  $24.8 \pm 1.3 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . El mínim es localitza a la draga OEB1800 a l'igual com el mínim d' $^{238}\text{U}$  i de  $^{226}\text{Ra}$ , i on es localitza el màxim de  $^{210}\text{Pb}$  en excés.

Les activitats de tori del testimoni OEB1700 prenen uns valors de 20-26  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , similars al valor de la draga. En el testimoni OEB1800, les activitats són d'entre 21-22  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , exceptuant a la secció 18.5 cm on l'activitat està per sota del mínim detectable. En general, però, la seva activitat està sensiblement per sobre de la mesurada en la draga OEB1800.

A partir d'aquestes mesures dels radionúclids naturals dels sediments del Riu Ebre podem considerar que no hi ha un senyal evident de la presència de fangs NORM remobilitzats en el tram baix del riu Ebre des de Miravet fins a l'Illa de Buda (al delta). A la taula 5.1.10. es presenten les mesures d'activitat de radionúclids naturals en sediments superficials del tram català de l'Ebre (període 1989-1993) reportades per Pujol (1996) i Pujol & Sanchez-Cabeza (2000), on s'aprecien uns valors similars als que hem obtingut en aquest treball.

### Concentració de $^{40}\text{K}$

Les activitats de  $^{40}\text{K}$  es troben en un interval comprès entre els  $241 \pm 12$  i  $447 \pm 17 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , amb una activitat mitjana de  $347 \pm 98 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Aquests valors són típics del llit del riu (Pujol, 1996; Pujol & Sanchez-Cabeza, 2000). Pel que fa a les concentracions de  $^{40}\text{K}$  dels testimonis sedimentaris OEB17 i OEB18, aquests mostren uns valors sensiblement superiors als observats en les dragues, amb uns valors de l'ordre de 450-500  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

### *Radionúclids artificials*

#### Concentració de $^{137}\text{Cs}$

El  $^{137}\text{Cs}$  presenta uns nivells molt baixos en totes les dragues, amb una activitat mitjana de  $2.65 \pm 0.14 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . El valor més elevat s'observa a la draga OEB1700, on també s'experimenta el màxim de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ . Si observem les concentracions de  $^{137}\text{Cs}$  en la columna sedimentària de l'estació OEB1700 i OEB1800, els valors són els típics dels sediments lacustres, amb el seu màxim a la secció 11.5 cm de  $7.1 \pm 0.7 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  pel OEB1700 i de  $5.9 \pm 0.8 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  a la secció 3.75 cm pel OEB1800.

#### Concentració de $^{60}\text{Co}$

La presència de  $^{60}\text{Co}$  en els sediments de l'Ebre és habitual ja que les centrals instal·lades en el seu curs tenen permís per fer descarregues puntuals i controlades de residus líquids de baix

**Taula 5.1.7.** *Activitats mesurades en les dragues sedimentàries del tram català del riu Ebre.*

Codi	<sup>40</sup> K	<sup>137</sup> Cs	<sup>210</sup> Pb excés	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>238</sup> U	<sup>60</sup> Co
OEB1100	271 ± 80	3.1 ± 0.5	12 ± 3	39.6 ± 1.8	24.8 ± 1.3	16 ± 3	1.2 ± 0.3
OEB0200	250 ± 8	1.5 ± 0.4	16 ± 4	21.9 ± 3.0	16.6 ± 1.1	16 ± 3	1.5 ± 0.3
OEB1300	241 ± 12	0.7 ± 0.4	10 ± 2	20.3 ± 1.0	15.1 ± 1.5	14 ± 4	<1.91
OEB1400	302 ± 11	1.3 ± 0.4	3 ± 4	21.3 ± 4.0	18.2 ± 1.0	<16.5	<0.88
OEB1500	462 ± 17	<2.7	5 ± 2	25.0 ± 9.0	<10.0	27 ± 4	<2.3
OEB1600	269 ± 12	1.8 ± 0.5	0 ± 0	21.1 ± 3.0	15.2 ± 1.4	14 ± 5	<2.3
OEB1700	492 ± 3	6.6 ± 0.8	27 ± 4	27.4 ± 3.0	27 ± 2	49 ± 3	6.2 ± 1.7
OEB1800	- ± -	1.5 ± 0.3	52 ± 3	9.0 ± 1.2	11.1 ± 1.2	9 ± 2	<1.67
OEB1900	312 ± 14	3.6 ± 0.4	21 ± 3	20.6 ± 1.7	17.4 ± 1.2	20 ± 2	5.4 ± 0.3
OEB2000	423 ± 15	3.1 ± 0.4	18 ± 3	19.1 ± 1.7	19.9 ± 1.3	21 ± 3	<1.9
OEB2100	447 ± 17	3.3 ± 0.4	37 ± 3	16.4 ± 1.8	17.5 ± 1.4	21 ± 3	<2.4
<i>Mitjana</i>	<i>347 ± 98</i>	<i>2.6 ± 1.7</i>	<i>18 ± 15</i>	<i>21.9 ± 0.1</i>	<i>18 ± 4</i>	<i>20.7 ± 0.9</i>	

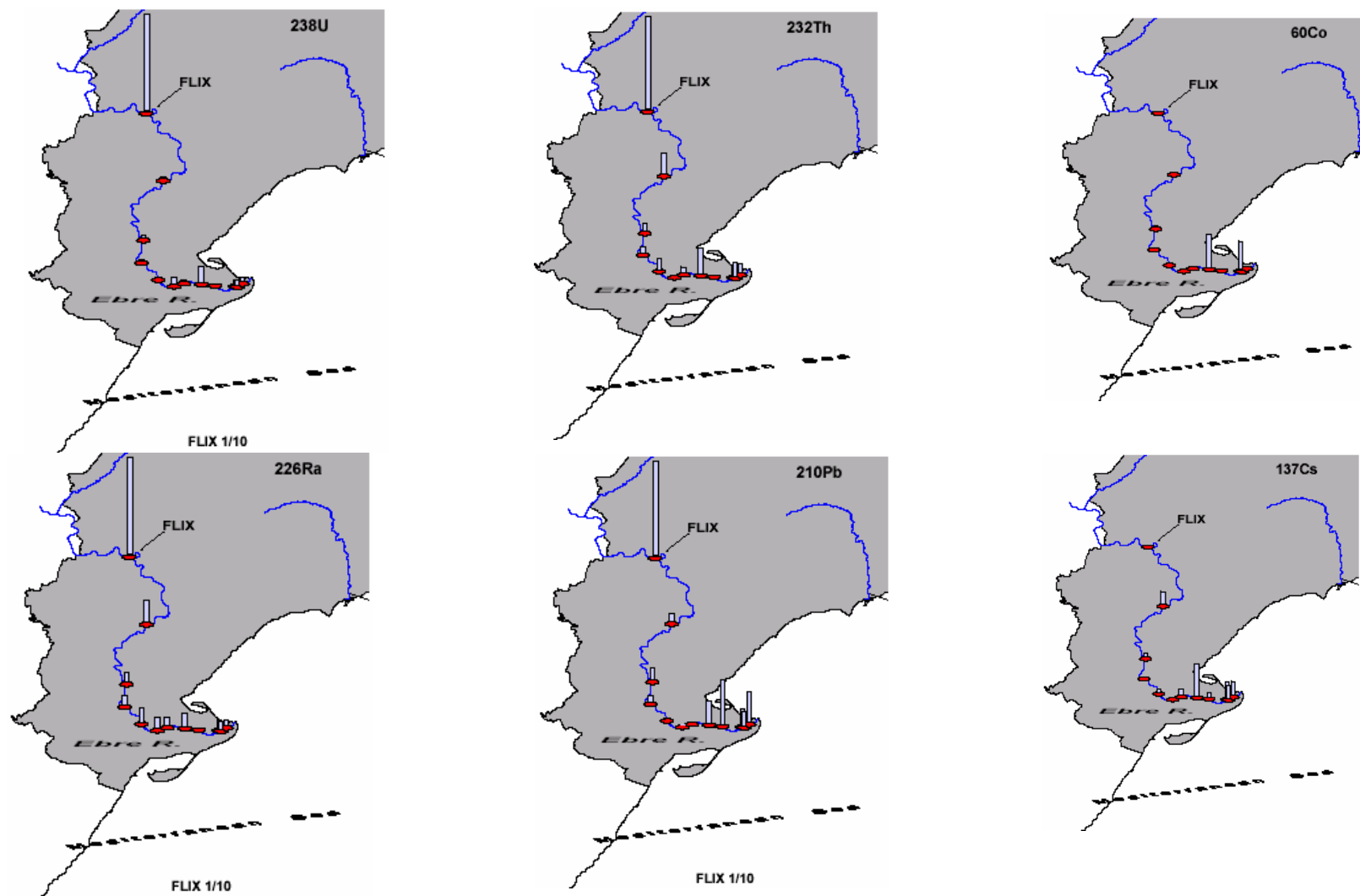
**Taula 5.1.8.** *Concentracions dels radionúclids naturals i artificials en sediments superficials en el tram català de l'Ebre (període 1989-1993) reportades per Pujol (1996) i Pujol i Sanchez-Cabeza (2000).*

Mostra	<sup>137</sup> Cs (Bq·kg <sup>-1</sup> )	<sup>60</sup> Co (Bq·kg <sup>-1</sup> )	<sup>40</sup> K (Bq·kg <sup>-1</sup> )	<sup>210</sup> Pb excés (Bq·kg <sup>-1</sup> )	<sup>226</sup> Ra (Bq·kg <sup>-1</sup> )	<sup>238</sup> U (Bq·kg <sup>-1</sup> )
Ribarroja	1.3±1.0	-	215±29	12.3±5.8	21.2±3.2	21.9±4.3
Flix (tram fluvial)	1.6±1.3	-	278±38	6.6±8.8	31±22	23±16
Ascó	2.9±1.9	1.6±2.8	286±58	17±18	28±12	29±19
Miravet	5±3	2.3±2.6	299±42	14.8±7.7	30.7±9.9	34±17
Xerta	2.5±1.2	0.89±0.37	171±59	6.6±5.7	19.2±4.6	13.3±6.5
Amposta	1.7±0.4	0.46±0.23	227±45	4.62±0.43	14.1±8.2	12.2±6.9

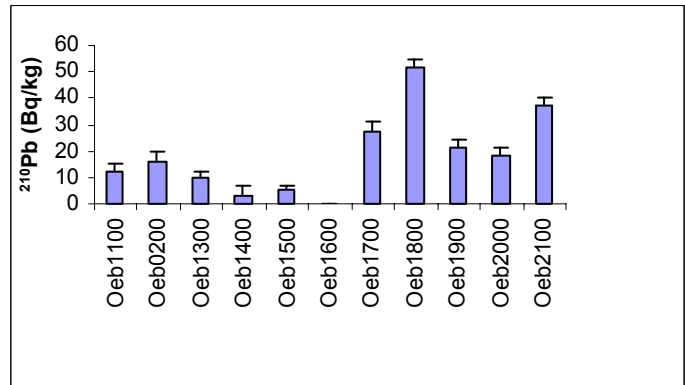
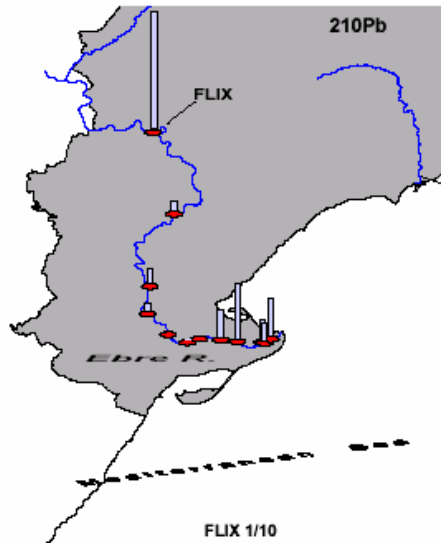
nivell. Les activitats de <sup>60</sup>Co que s'observen en els sediments són molt baixos i només són detectables en les dragues on es produeix acumulació de material, exceptuant la draga OEB1800, que tot i presentar el màxim de <sup>210</sup>Pb en excés, no mostra <sup>60</sup>Co.

El senyal de <sup>60</sup>Co s'observa en les dragues més properes a la central nuclear d'Ascó, OEB1100 i OEB0200, però amb un valor 5 vegades inferior al registrat al Delta de l'Ebre, punt on realment acaben sedimentant les partícules i acumulant el <sup>60</sup>Co. Els valors màxims s'observen per tant, en els sediments superficials de les estacions OEB1700 i OEB1900.

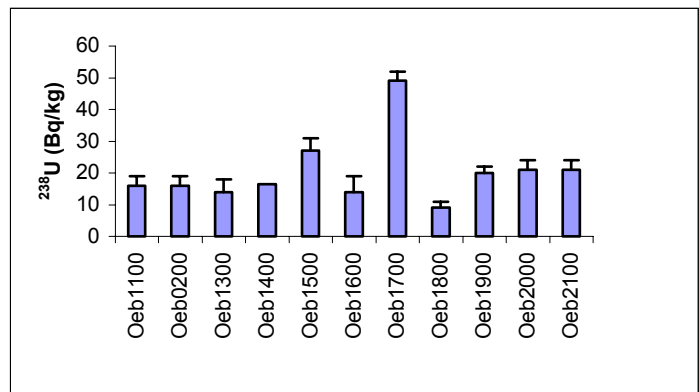
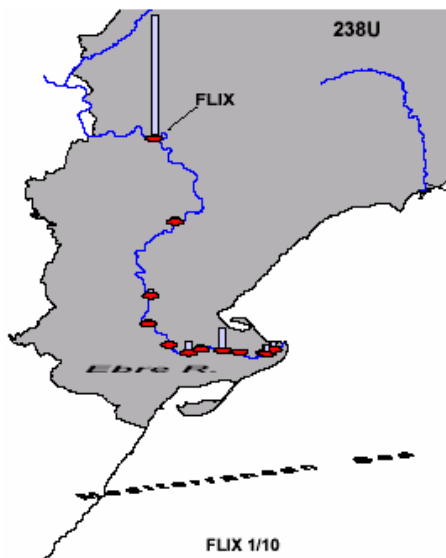
Els resultats dels radionúclids artificials obtinguts en aquest treball són similars als nivells d'activitat reportats per Pujol (1996) i Pujol & Sanchez-Cabeza (2000) en un treball elaborat durant els anys 1989-1993 (Taula 5.1.8).



**Figura 5.1.21.** Nivells d'  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  en excés,  $^{60}\text{Co}$  i  $^{137}\text{Cs}$  en les mostres seleccionades per l'estudi del tram del riu Ebre entre l'embassament de Flix i la desembocadura ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).  $^{238}\text{U}$ , l'alçada màxima de la barra correspon a  $250 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ .  $^{232}\text{Th}$ , l'alçada màxima de la barra correspon a  $69 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  és a dir el valor del sediment VC5008 del testimoni VC5, que s'inclou com a referència (Taula 9.5).  $^{226}\text{Ra}$ , l'alçada màxima de la barra correspon a  $140 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  és a dir el valor del sediment VC5008 del testimoni VC5 dividit per 10, que s'inclou com a referència (Taula 9.5).  $^{210}\text{Pb}$ , l'alçada màxima de la barra correspon a  $108 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  és a dir el valor del sediment VC5008 del testimoni VC5 dividit per 10, que s'inclou com a referència (Taula 9.5).  $^{60}\text{Co}$ , l'alçada màxima de la barra correspon a  $8.2 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ .  $^{137}\text{Cs}$ , l'alçada màxima de la barra correspon a  $6.6 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

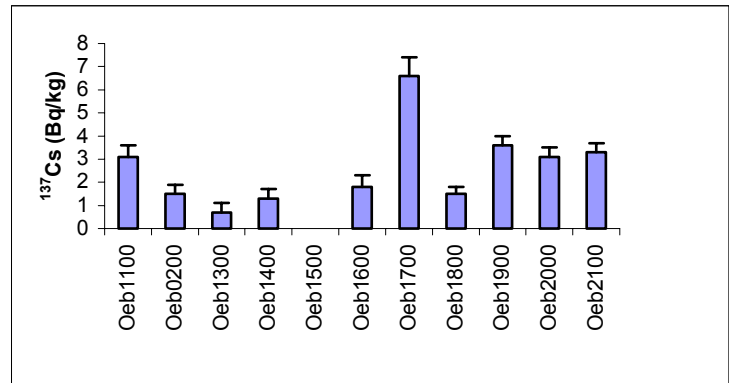
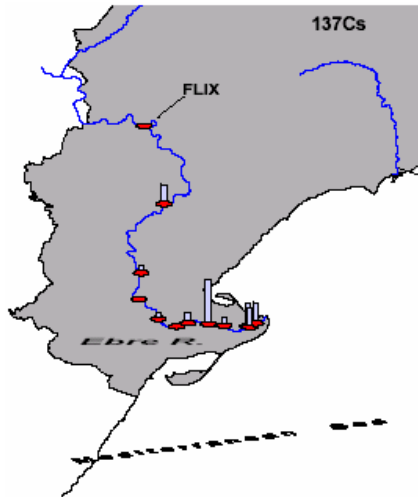


Interval d'activitats de <sup>210</sup>Pb en excés: 0 a 52 Bq·kg<sup>-1</sup>

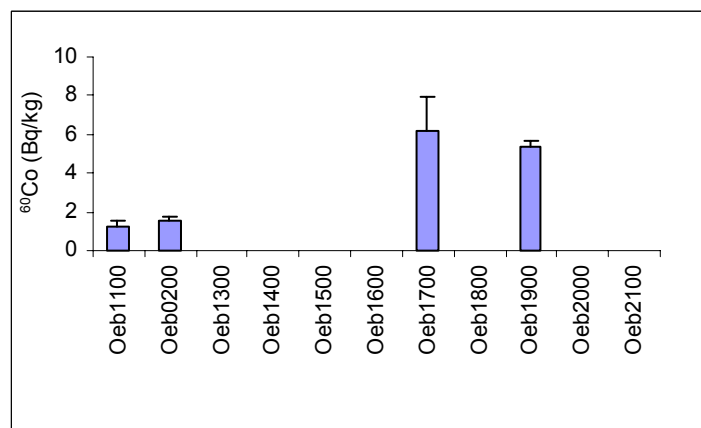
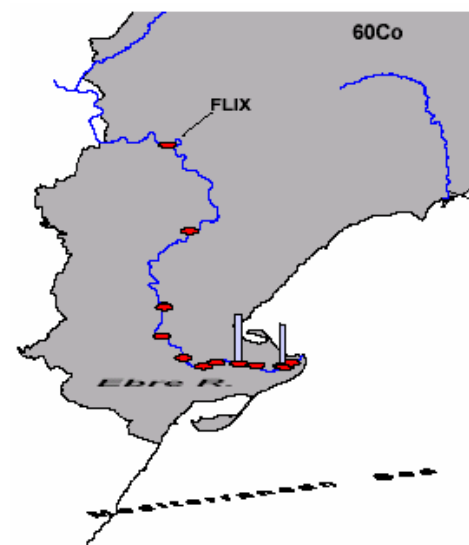


Interval d'activitats d'<sup>238</sup>U: 9 a 49 Bq·kg<sup>-1</sup>

**Fig 5.1.22.** Distribució de la radioactivitat natural i artificial en el sediments del tram baix del riu Ebre.

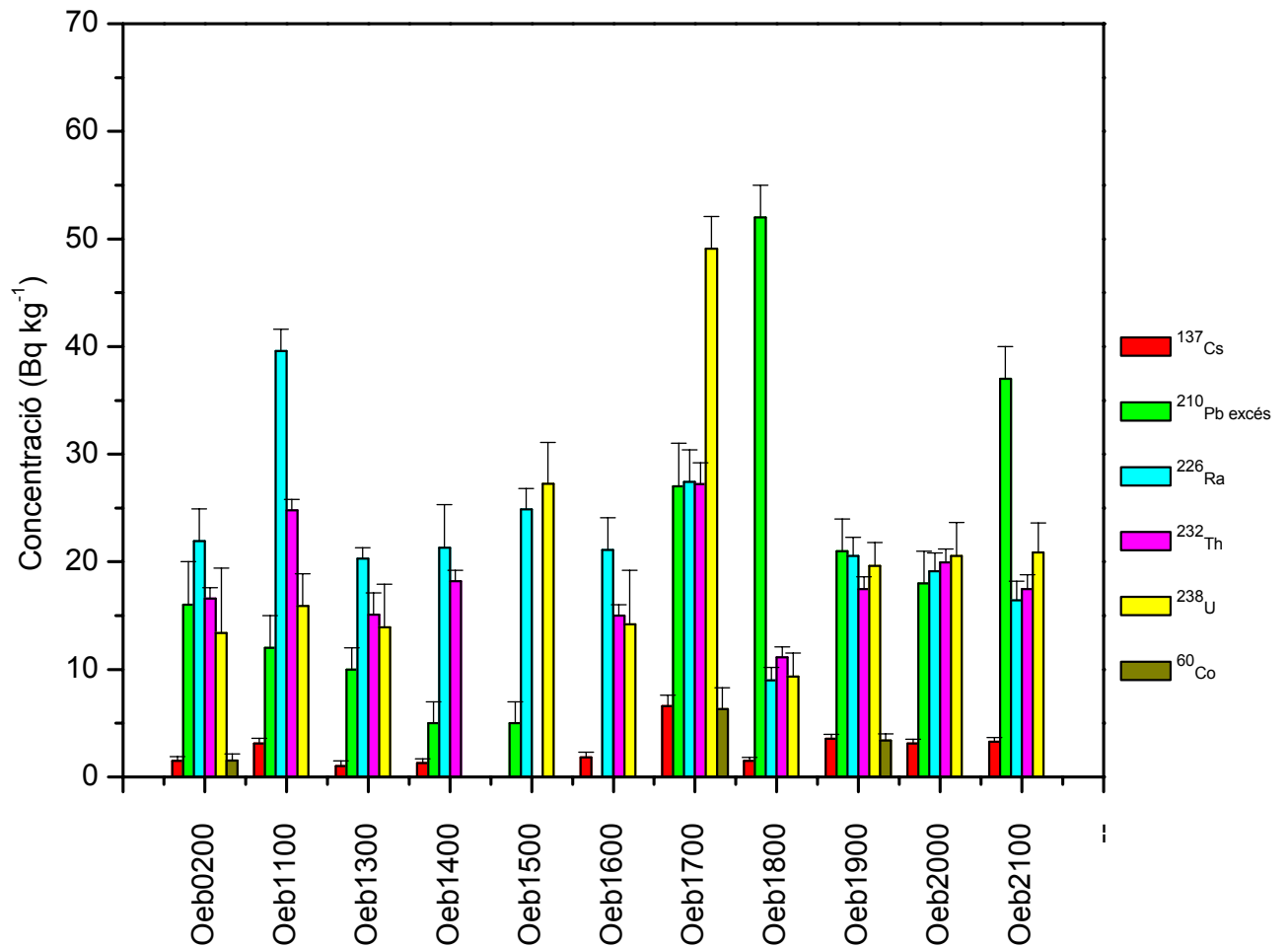


Interval d'activitats de  $^{137}\text{Cs}$ : 0.7 a 6.6 Bq·kg<sup>-1</sup>



Interval d'activitats de  $^{60}\text{Co}$ : <0.88 (mda) a 1.5 Bq·kg<sup>-1</sup>

**Fig. 5.1.22. (cont.)** Distribució de la radioactivitat natural i artificial en els sediments del tram baix del riu Ebre.



**Fig. 5.1.23.** Concentracions de <sup>137</sup>Cs, <sup>210</sup>Pb en excés, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>238</sup>U i <sup>60</sup>Co en els sediments superficials mostrejats al llarg del riu Ebre des de l'embassament de Flix fins al delta de l'Ebre.





---

**PART II**  
**L'EMBASSAMENT DE CAMARASA**

---

5.2.1. Granulometria i potencial redox (Eh) .....	143
5.2.2. Perfils de $^{210}\text{Pb}$ en excés i $^{137}\text{Cs}$ .....	143
5.2.3. Datacions i ritmes de sedimentació .....	146
5.2.3.1. Model CIC .....	146
5.2.3.2. Models CFCS i datació per $^{137}\text{Cs}$ .....	152
5.2.4. Discussió dels perfils de $^{210}\text{Pb}$ i $^{137}\text{Cs}$ .....	156
5.2.4.1. Previsió del reompliment .....	157
5.2.5. Inventaris de $^{137}\text{Cs}$ i $^{210}\text{Pb}$ en excés .....	160
5.2.6. Flux de $^{210}\text{Pb}$ en una trampa de sediment .....	160

Les eines d'anàlisi utilitzades per a la obtenció dels resultats de la Part II-Camarasa són els perfils de concentració del  $^{210}\text{Pb}$  en excés i  $^{137}\text{Cs}$  combinats amb els perfils de densitat, de granulometria i tamany del gra, i de potencial redox (Eh). Mitjançant aquestes eines s'estudien els aspectes que es detallen a continuació:

- La granulometria i potencial redox dels sediments.
- Els inventaris de  $^{210}\text{Pb}$  en excés i  $^{137}\text{Cs}$  dels testimonis.
- Les datacions dels perfils sedimentaris.
- Els ritmes de sedimentació a l'embassament.
- Els fluxos de massa i de  $^{210}\text{Pb}$  en excés en la trampa.

Els perfils granulomètrics i de potencial redox han estat realitzats pel Departament d'Estratigrafia, Paleontologia i Geociències Marines de la Universitat de Barcelona (UB).

### 5.2.1. Granulometria i potencial redox (Eh)

#### Granulometria

Els sediments de l'embassament de Camarasa es caracteritzen per ser molt homogenis, tal i com s'aprecia en els perfils granulomètrics que s'han realitzat en els testimonis SCA2, SCA5, SCA1, i SCA4 (veure figures 5.2.1, 5.2.2, 5.2.4 i 5.2.5). La seva textura és fina i uniforme, amb uns valors de l'ordre del 50 % de llims i 50 % d'argiles amb petites oscil·lacions. En el cas de la fracció grollera, aquesta no s'ha representat a les figures ja que es despreciable en front de la fracció fina. El tamany del gra dels sediments de Camarasa es troba en un interval d'entre 4 i 6  $\mu\text{m}$ .

#### Potencial redox (Eh)

Els perfils de potencial redox (Eh) proporcionen informació del grau d'oxidació dels sediments i ens permeten observar els efectes de barreja a causa de l'activitat biològica. Els perfils redox de tots els testimonis sedimentaris de Camarasa presenten uns valor similars en profunditat (figures 5.2.1, 5.2.2, 5.2.4, 5.2.5). En la taula 5.2.1 es recullen els valors d'Eh en les capes superficials de cada testimoni. Els testimonis SCA2 i SCA4 són els que presenten els sediments més reduïts en superfície, de l'ordre de -150 mV, seguits dels testimonis SCA1 i SCA5 amb uns valors de -102 mV i -73 mV respectivament, indicant una major difusió de l'oxigen de l'aigua en les capes superficials del sediment.

### 5.2.2. Perfils de $^{210}\text{Pb}$ en excés i de $^{137}\text{Cs}$

En aquest apartat descrivim de manera detallada la forma dels perfils de  $^{210}\text{Pb}$  en excés i de  $^{137}\text{Cs}$  dels testimonis mostrejats en els diferents ambients sedimentaris de l'embassament

#### SCA2

El testimoni SCA2 presenta un perfil de disminució de l'activitat de  $^{210}\text{Pb}$  en excés en funció de la profunditat, amb una concentració mitjana de  $^{210}\text{Pb}$  de base de  $21 \pm 2 \text{ Bq kg}^{-1}$  (Fig.5.2.1).

**Taula 5.2.1.** *Potencials de reducció a la capa superficial dels testimonis sedimentaris.*

Testimoni	Potencial Eh (mV)
SCA2	-151
SCA1	-102
SCA5	-73
SCA4	-156

La concentració de  $^{210}\text{Pb}$  en excés a la capa superficial és de  $49 \pm 3 \text{ Bq kg}^{-1}$ , amb un decreixement de la concentració al llarg dels primers 20 cm. Tot seguit s'inicia un tram de baixa activitat que es manté aproximadament constant fins al final del testimoni, amb una concentració mitjana de  $^{210}\text{Pb}$  en excés de  $16 \pm 2 \text{ Bq kg}^{-1}$ .

La densitat es manté constant fins als primers 22 cm amb un valor promig de  $0.35 \pm 0.07 \text{ g cm}^{-3}$ . A partir d'aquesta profunditat i fins als 48 cm la densitat mitjana s'incrementa i pren un valor de  $0.59 \pm 0.11 \text{ g cm}^{-3}$ . Finalment, en els darrers 10 cm del testimoni la densitat recupera de nou els valors superficials, de l'ordre de  $0.30 \text{ g cm}^{-3}$ .

La granulometria també registra aquest canvi en la naturalesa del material i esdevé més grollera. Els llims passen a dominar la distribució amb un 70% (veure Fig. 5.2.1), i el tamany del gra augmenta passant dels 3-4  $\mu\text{m}$  fins a un màxim de 10  $\mu\text{m}$ .

El perfil de  $^{137}\text{Cs}$  es troba sobreposat a un valor de fons constant de  $4.0 \pm 0.6 \text{ Bq kg}^{-1}$ , que considerem el valor d'activitat de pre-Txernòbil. El perfil presenta un doble pic entre els centímetres 20.5 i 30.5 amb un fort descens de l'activitat entre pics, amb una concentració similar al valor de fons.

#### SCA5

El perfil de  $^{210}\text{Pb}$  en excés d'aquest testimoni és molt semblant al del testimoni SCA2, amb una concentració en la seva capa superficial lleugerament més elevada, de  $56 \pm 4 \text{ Bq kg}^{-1}$  (Fig. 5.2.2) i amb una concentració mitjana de  $^{210}\text{Pb}$  de base de  $21 \pm 3 \text{ Bq kg}^{-1}$ . La part inferior del perfil, a partir dels 25 cm fins als 58.5 cm, presenta una forma plana i de baixa activitat amb una concentració mitjana de  $10 \pm 6 \text{ Bq kg}^{-1}$ .

El perfil de  $^{137}\text{Cs}$  presenta la mateixa estructura en profunditat que l'SCA2. A la secció 19.5 cm trobem el primer dels dos pics, que es troben separats per una disminució de la concentració de  $^{137}\text{Cs}$  a la profunditat dels 25.5 cm. En aquest tram, però, a diferència de l'SCA2, no detectem cap increment en el perfil granulomètric ni en el tamany del gra.

La densitat es manté constant en la part superior del perfil i s'incrementa lleugerament entre els 20 i 32 cm. A partir d'aquesta profunditat la densitat es manté constant, de l'ordre de  $0.6 \text{ g cm}^{-3}$ , coincidint amb el tram de baixa activitat del perfil de plom.

La distribució granulomètrica mostra un 60 % en argiles i un 40 % en llims, fins als 35 cm de profunditat. Després la presència d'argiles es redueix a un 50% de llims i 50% argila fins al final del testimoni. Tanmateix, el contrast granulomètric no és tan marcat com en el cas del

testimoni SCA2. El tamany del gra és lleugerament més baix en el tram on dominen les argiles i augmenta sensiblement en el tram des dels 30 cm fins als 40 cm. Posteriorment es manté constant fins al final del testimoni.

#### SCA8

El perfil presenta una estructura similar al SCA2 i SCA5. La concentració de  $^{210}\text{Pb}$  en excés en la seva capa superficial és de  $48 \pm 7 \text{ Bq kg}^{-1}$  i decreix en profunditat fins als 25 cm. Seguidament, el perfil presenta un tram amb una activitat baixa i constant fins al final del testimoni, al centímetre 59.5 cm, amb una concentració mitjana de  $10 \pm 5 \text{ Bq kg}^{-1}$ .

La densitat dels primers 20 cm és constant, amb un valor mitjà de  $0.35 \pm 0.07 \text{ g cm}^{-3}$ , molt similar a les densitats que es registren en els altres testimonis. Posteriorment, a partir dels 25 cm, la densitat experimenta un progressiu augment fins als 30 cm on assoleix un valor de  $0.60 \pm 0.05 \text{ g cm}^{-3}$  que es manté constant fins al final del testimoni.

El perfil de  $^{137}\text{Cs}$  presenta un doble pic de  $^{137}\text{Cs}$ , però amb una forma no tan definida com en els testimonis SCA2 i SCA5 (vegeu 5.2.3). La concentració de cesi en superfície és més elevada que en els altres testimonis, amb un valor de  $5.7 \pm 1.0 \text{ Bq kg}^{-1}$ .

#### SCA1

La forma del perfil de  $^{210}\text{Pb}$  en excés del testimoni SCA1 és diferent a la que presenten els perfils dels testimonis SCA2, SCA5 i SCA8. La densitat també és més elevada, amb un valor mitjà de  $0.42 \pm 0.11 \text{ g cm}^{-3}$  en els primers 25 cm i creixent fins a un màxim puntual localitzat entre els 30 i 35 cm, amb un valor de  $0.82 \pm 0.08 \text{ g cm}^{-3}$ . En el tram final (38.5-49.5 cm) la densitat decreix i recupera els nivells baixos, però fluctuants, de les capes més superficials.

La concentració de  $^{210}\text{Pb}$  en excés en la secció superficial és de  $56 \pm 3 \text{ Bq kg}^{-1}$ . El perfil de plom mostra un descens lent al llarg dels primers 30 cm fins a arribar a una davallada sobtada en el mateix interval on s'incrementa la densitat, entre els 30-35 cm. La granulometria dels primers 30 centímetres es troba dominada per les argiles amb un 60 – 70 % i un tamany del gra baix, entre 4 i 5  $\mu\text{m}$ , amb un petit pic als 10 cm on arriba a 6  $\mu\text{m}$ . A partir dels 30 cm la distribució passa a ser constant, amb uns valors de 55% de llims i 45% d'argiles, amb un augment del tamany del gra amb un valor constant de 6.5-7  $\mu\text{m}$ .

En aquest cas el perfil de concentració de  $^{137}\text{Cs}$  no presenta cap pic definit, però sí que s'observa una tendència a augmentar fins al final del testimoni.

#### SCA4

El perfil de  $^{210}\text{Pb}$  en excés presenta poca variació al llarg dels 35 cm mostrejats, amb una activitat mitjana de  $28 \pm 4 \text{ Bq kg}^{-1}$ . La seva activitat superficial és de  $30 \pm 3 \text{ Bq kg}^{-1}$ , més baixa que la dels altres testimonis estudiats, que prenen unes concentracions de l'ordre de 50  $\text{Bq kg}^{-1}$ . La densitat es correlaciona bé amb les variacions del tamany del gra, marcant les oscil·lacions entre els llims i les argiles. Al final del testimoni s'observa un augment important de la densitat, de 0.6 a 1.2  $\text{g cm}^{-3}$ , el tamany del gra passa de 5 a 11  $\mu\text{m}$ , i els llims dominen amb un 60% la distribució.

El  $^{137}\text{Cs}$  s'ha mesurat en les seccions 1.5, 4.5, i 9.5, 14.5, i 36.5 cm. S'ha detectat la presència de  $^{137}\text{Cs}$  tan sols en les seccions 1.5 i 9.5 amb unes activitats respectives de  $2.25 \pm 0.95$  i  $2.15 \pm 0.60$  Bq kg<sup>-1</sup>. En la resta de seccions el seu valor d'activitat es troba per sota del valor mínim detectable: < 3 Bq kg<sup>-1</sup> (4.5 cm); <2 Bq kg<sup>-1</sup> (14.5 cm); <4 Bq kg<sup>-1</sup> (36.5 cm).

### 5.2.3 Datacions i ritmes de sedimentació

Per tal de calcular els ritmes de sedimentació s'ha utilitzat el model CF:CS mitjançant els perfils de  $^{210}\text{Pb}$  en excés i la datació per  $^{137}\text{Cs}$ . També s'ha intentat aplicar el model CIC pel  $^{210}\text{Pb}$  en excés en els sediments de Camarasa. Tanmateix, la dinàmica sedimentària de l'embassament, que es reflecteix en uns perfils de  $^{210}\text{Pb}$  en excés fluctuants en profunditat, limiten la seva aplicació. Pel que fa als altres models de datació, CRS i PF que es descriuen en el capítol 3, no s'han pogut aplicar ja que no es disposava de testimonis que integressin tot l'inventari de plom des del sòcol de l'embassament fins a l'actualitat.

#### 5.2.3.1 Model CIC

El CIC és un model simple (vegeu Capítol 3, apartat 3.2.2), de manera que la seva aplicació en els perfils de  $^{210}\text{Pb}$  en excés s'ha de fer amb molta cautela. En general, cal que el perfil de  $^{210}\text{Pb}$  en excés sigui decreixent en profunditat, fet que no es dona estrictament en tots els nostres testimonis. Si observem els perfils de concentració de  $^{210}\text{Pb}$  en excés que presentem a les figures, aquest criteri es dona en el testimoni SCA5 (Fig. 5.2.2) i en pràcticament tot el SCA1 (Fig. 5.2.4). Per contra hi ha trams en el testimoni SCA2 i SCA8 amb fortes oscil·lacions en la concentració (Fig. 5.2.1 i 5.2.3), fent que en seccions més profundes es trobin activitats més elevades i donant com a resultat edats inconsistents. Finalment, el testimoni SCA4 no és datable perquè no presenta pràcticament cap variació de l'activitat de  $^{210}\text{Pb}$  en excés en profunditat (vegeu taula 5.2.2 i Fig. 5.2.5).

#### SCA2

El testimoni SCA2 mostra variacions de la concentració de  $^{210}\text{Pb}$  en excés en tot el seu tram datable, els primers 20 cm. Tanmateix, la tendència general és la de disminució de l'activitat en profunditat. El ritme de sedimentació calculat és de  $2.5 \pm 1.3$  cm a<sup>-1</sup> amb una concentració de  $40 \pm 3$  Bq kg<sup>-1</sup> als 17.5 cm (any 1994) i una  $C_0$  de  $49 \pm 3$  Bq kg<sup>-1</sup>.

#### SCA5

Aquest testimoni presenta un perfil de disminució del  $^{210}\text{Pb}$  en excés en profunditat que permet el seu tractament mitjançant el model CIC. La secció 18.5 cm està datada a l'any 1993, amb una  $C$  de  $43 \pm 4$  Bq kg<sup>-1</sup> i una  $C_0$  de  $56 \pm 4$  Bq kg<sup>-1</sup>. El ritme sedimentari que se'n deriva és de  $2.3 \pm 1.0$  cm a<sup>-1</sup>, lleugerament més baix que el testimoni SCA2. La secció 22.5 cm, datada a l'any 1981, mostra una petita disminució de l'activitat de  $^{210}\text{Pb}$  en excés, i un ritme de sedimentació de  $1.2 \pm 0.2$  cm a<sup>-1</sup>.

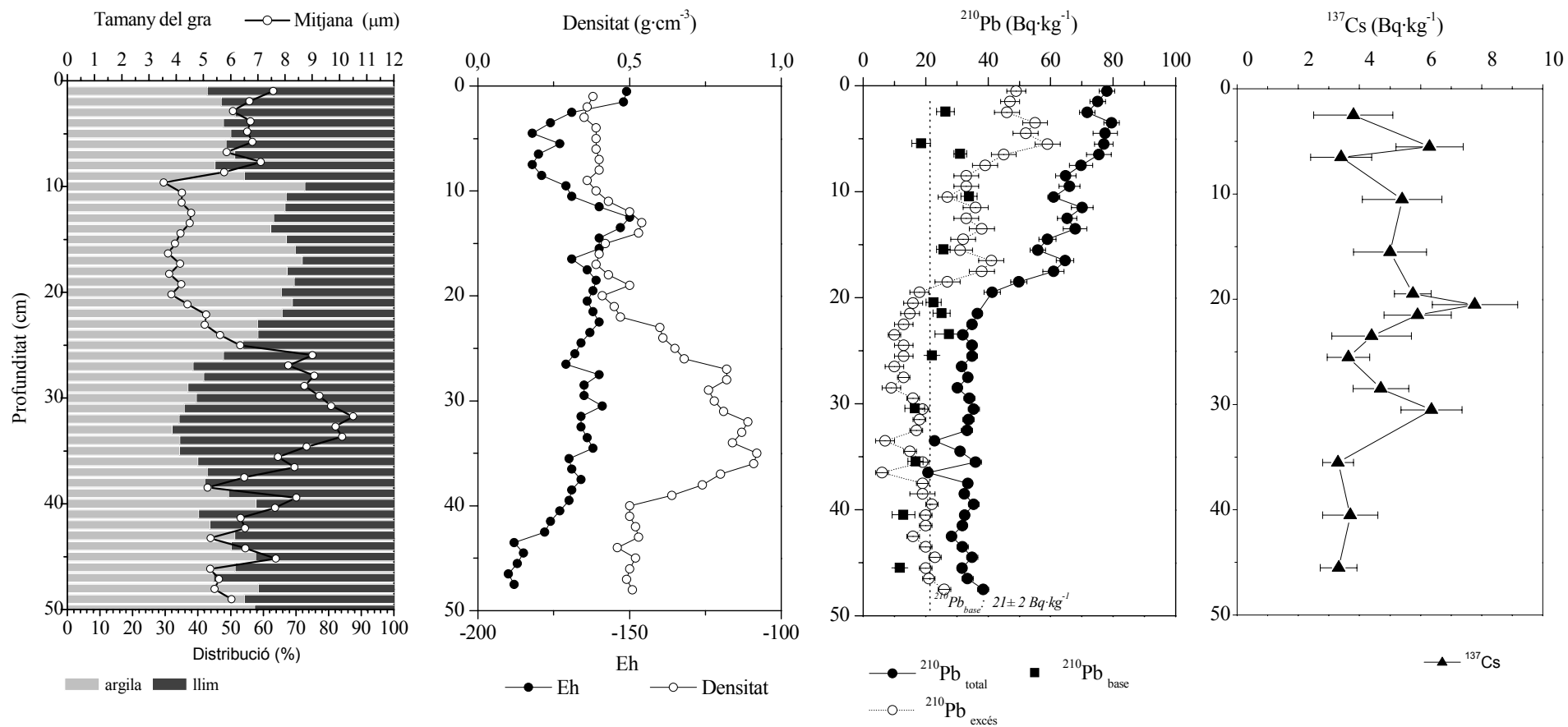
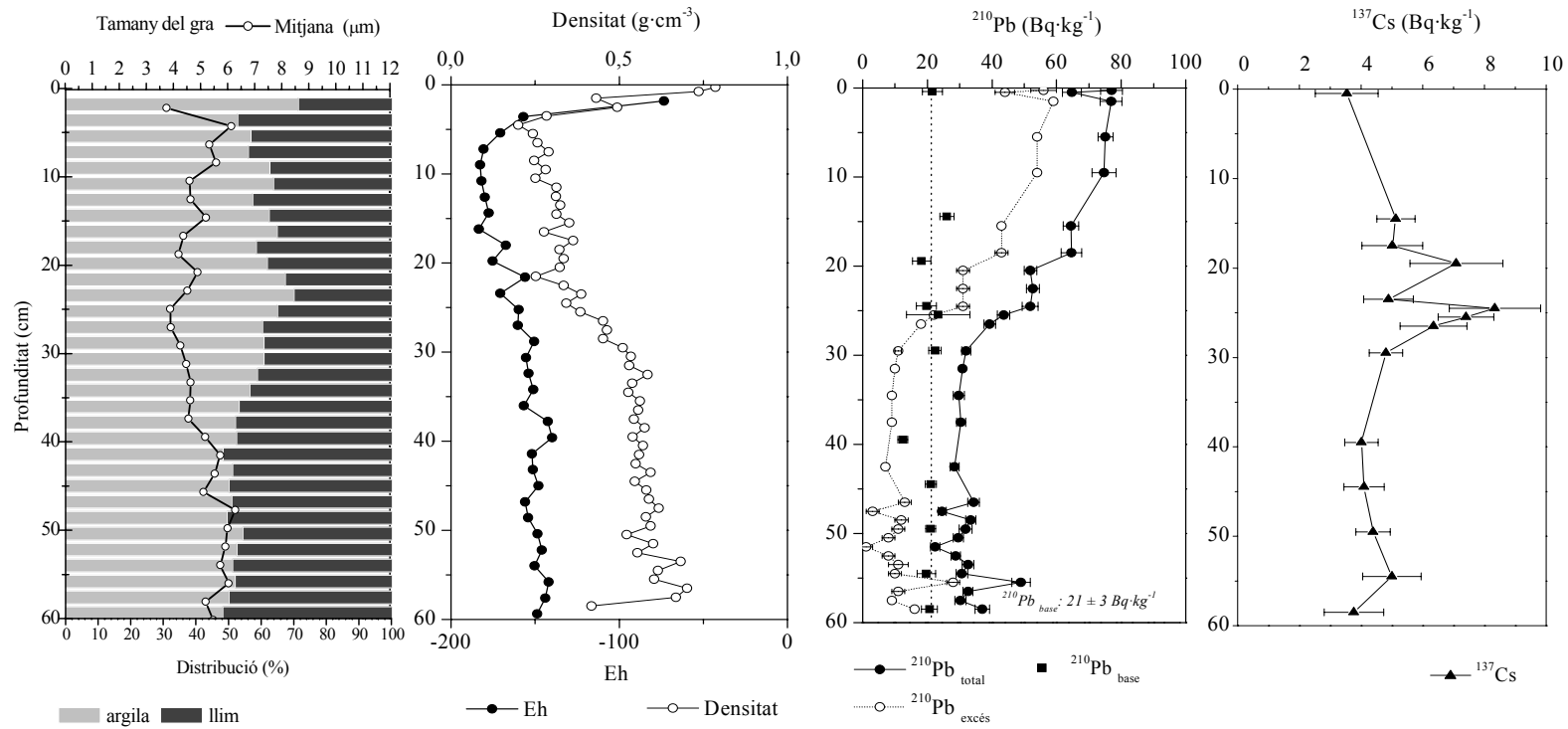


Figura 5.2.1. Granulometria i tamany del gra, perfils de densitat i Eh, <sup>210</sup>Pb en excés i <sup>137</sup>Cs del testimoni SCA2.



**Figura 5.2.2.** Granulometria i tamany del gra, perfils de densitat i Eh, <sup>210</sup>Pb en excés i <sup>137</sup>Cs del testimoni SCA5



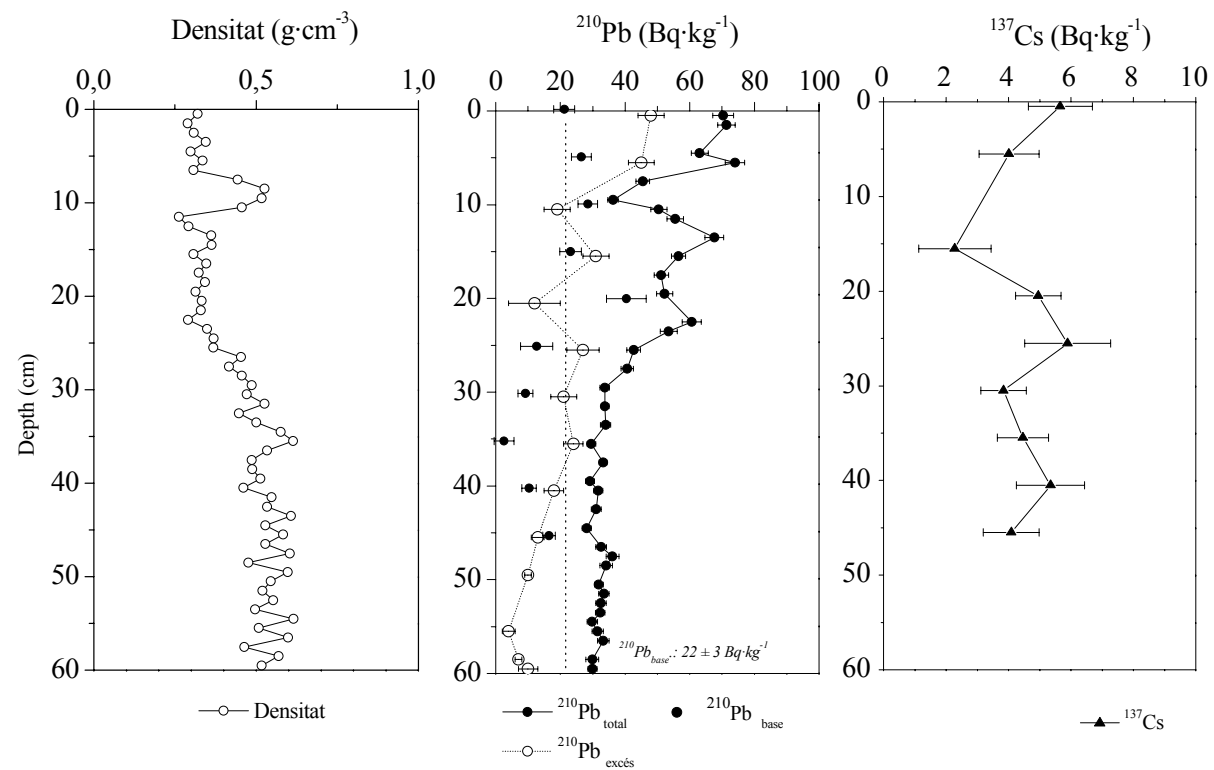
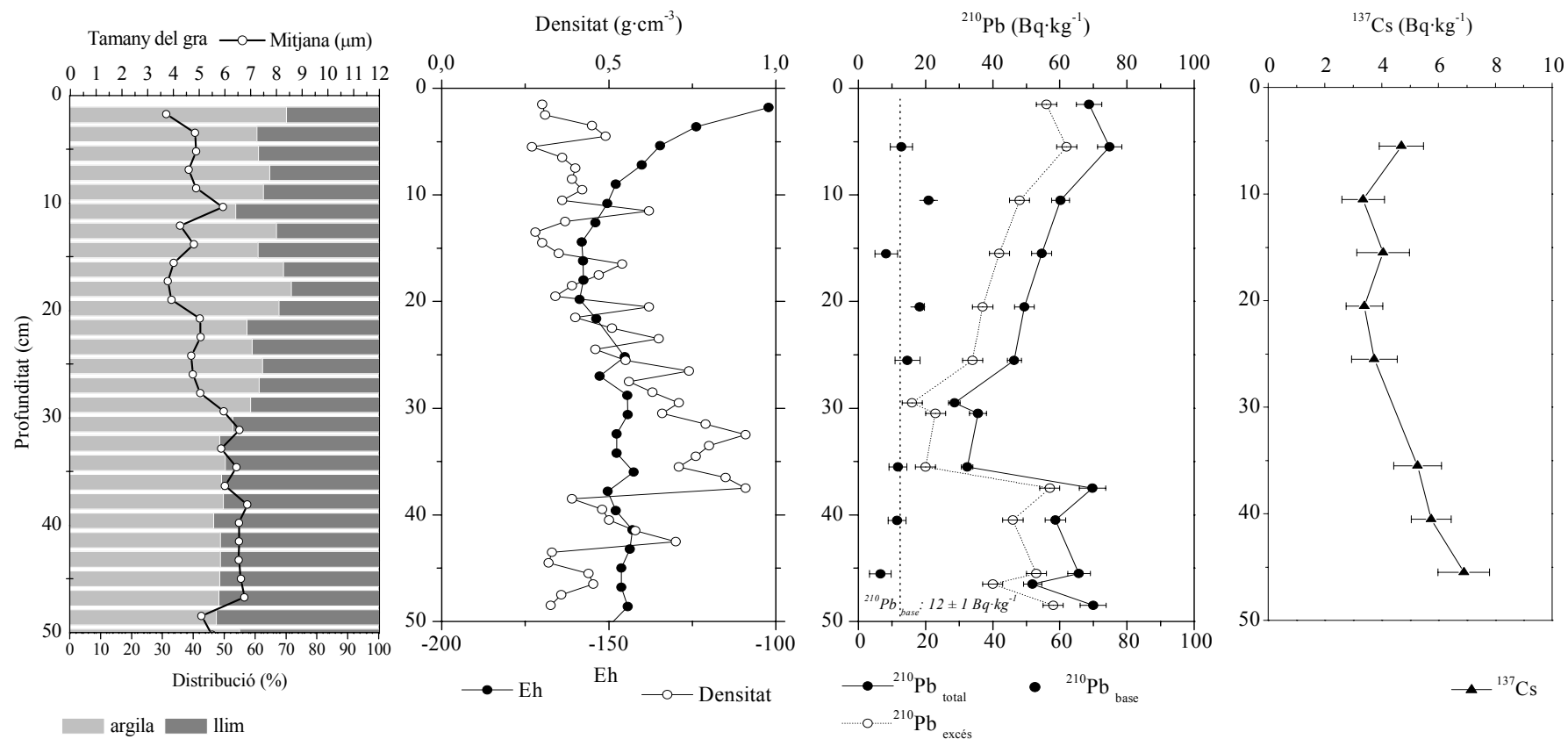
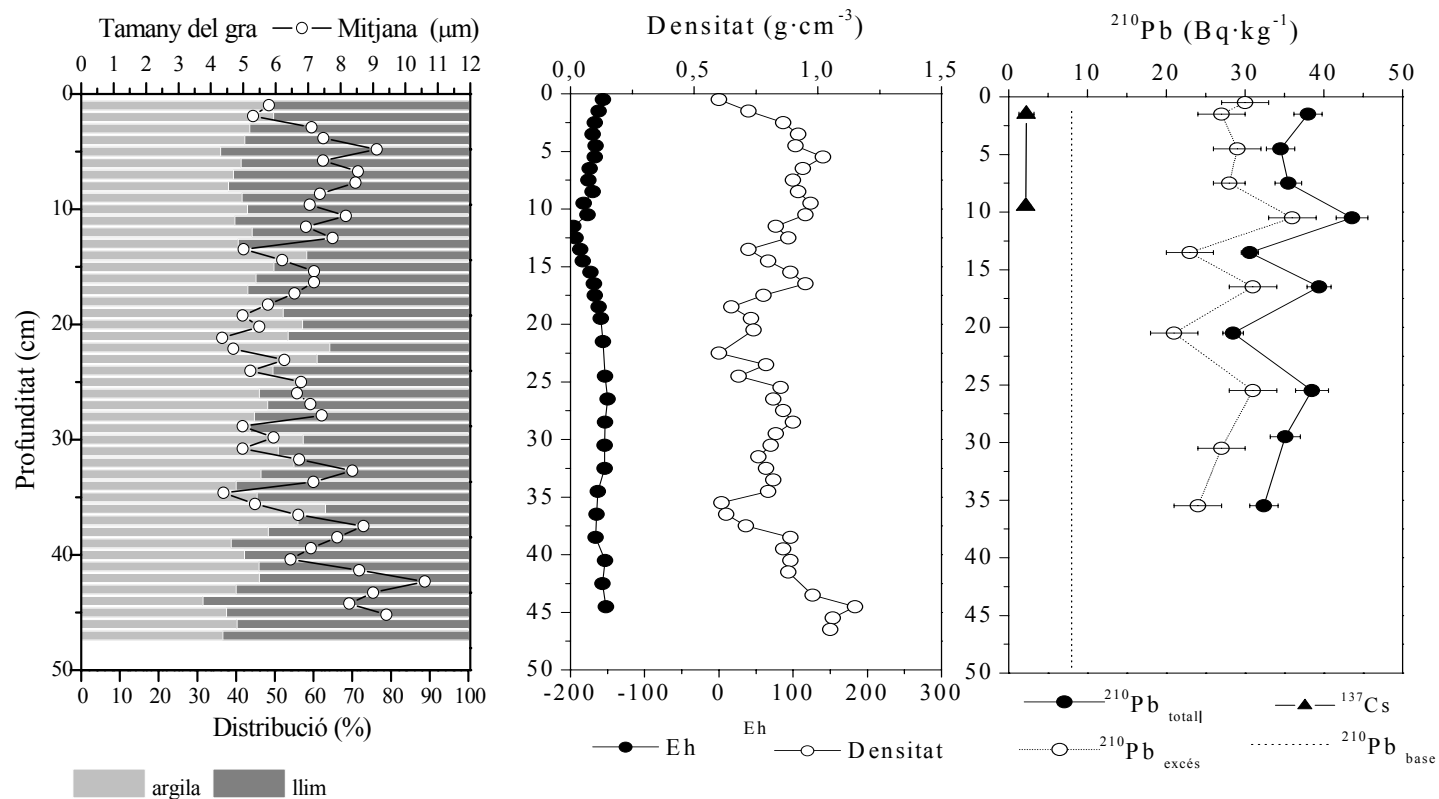


Figura 5.2.3. Perfils de densitat, <sup>210</sup>Pb en excés i <sup>137</sup>Cs del testimoni SCA8



**Figura 5.2.4.** Granulometria i tamany del gra, perfils de densitat i Eh,  $^{210}\text{Pb}$  en excés i  $^{137}\text{Cs}$  del testimoni SCA1.



**Figura 5.2.5.** Granulometria i tamany del gra, perfils de densitat i Eh, <sup>210</sup>Pb en excés i <sup>137</sup>Cs del testimoni SCA4. Els valors d'MDA pel perfil de <sup>137</sup>Cs són: <4.2 Bq kg<sup>-1</sup> (4.5 cm); <2.5 Bq kg<sup>-1</sup> (14.5 cm); <4.4 Bq kg<sup>-1</sup> (36.5 cm).

*SCA8*

El perfil fluctuant del testimoni SCA8 no permet un aplicació fiable del model CIC, ja que l'activitat presenta unes fortes davallades als 10 cm i als 20 cm. El seu tram datable correspon als primers 25 cm on hi ha  $^{210}\text{Pb}$  en excés. Si apliquem el model a la secció 22.5 cm obtenim una edat de  $8 \pm 3$  anys, és a dir, de l'any 1993, i un ritme de sedimentació de  $2.8 \pm 1.1 \text{ cm a}^{-1}$ .

*SCA1*

Finalment, en el testimoni SCA1 el model CIC és aplicable si es combina amb la datació per  $^{137}\text{Cs}$ , com es descriu en l'apartat 5.2.3.2.

*5.2.3.2 Model CFCS i la datació per  $^{137}\text{Cs}$* *SCA2*

Els resultats de l'aplicació del  $^{137}\text{Cs}$  per a estimar el ritme de sedimentació en troben recollits en la taula 5.2.3. Per a poder realitzar aquests càlculs s'ha considerat que el primer pic en profunditat present en els perfils de  $^{137}\text{Cs}$  correspon al pic de Txernòbil de l'any 1986. Per tant, en el testimoni SCA2, el pic de Txernòbil es troba a la profunditat de 20.5 cm, i ens permet calcular un ritme de sedimentació de  $1.37 \pm 0.14 \text{ cm a}^{-1}$ . L'error associat a aquest càlcul s'ha estimat considerant la meitat de la distància en profunditat per sobre i per sota de la secció corresponent al pic de Txernòbil.

Els càlculs del ritme de sedimentació a partir del model de  $^{210}\text{Pb}$  CFCS es troben resumits a la taula 5.2.4. Amb el mètode CF:CS aplicat al perfil de  $^{210}\text{Pb}$  del testimoni SCA2 obtenim un ritme de  $1.2 \pm 0.2 \text{ cm a}^{-1}$ , similar a la datació per  $^{137}\text{Cs}$ , i data la secció 20.5 cm a l'any 1982 (figura 5.2.6). Si comparem el ritme de sedimentació proposat pel model CFCS amb el model CIC, observem com el CIC estima un valor 2.1 vegades superior al resultat estimat pel model CFCS.

*SCA5*

A partir del perfil de  $^{137}\text{Cs}$ , el ritme de sedimentació del testimoni SCA5 pren un valor de  $1.30 \pm 0.14 \text{ cm a}^{-1}$ . Amb el model CF:CS s'obté un ritme de sedimentació de  $1.4 \pm 0.2 \text{ cm a}^{-1}$  i data la secció 21.5 cm a l'any 1984 (veure figura 5.2.7). El model CIC data la secció 22.5 cm a l'any 1981, en aquest cas coincidint amb el model CFCS i la datació per  $^{137}\text{Cs}$ .

*SCA8*

El ritme de sedimentació del testimoni SCA8 calculat amb el  $^{137}\text{Cs}$  a partir del pic en profunditat situat als 25.5 cm és de  $1.7 \pm 0.2 \text{ cm a}^{-1}$ . L'aplicació del CFCS en aquest testimoni s'ha desestimat ja que el perfil de  $^{210}\text{Pb}$  en excés és molt irregular i no permet un ajust per mínims quadrats en cap tram del perfil de plom.

**Taula 5.2.2.** Datacions i ritmes de sedimentació aplicant el model CIC.

Testimoni	Profunditat (cm)	Secció datada (cm)	Concentració inicial ( $C_0$ ) ( $Bq\ kg^{-1}$ )	Concentració en secció datada (C) ( $Bq\ kg^{-1}$ )	t (anys)	Any	Ritme sedimentació ( $cm\ a^{-1}$ )
SCA2	17-18	17.5	$49 \pm 3$	$39 \pm 3$	$7 \pm 3$	1993	$2.6 \pm 1.3$
SCA8	22-23	22.5	$48 \pm 3$	$37 \pm 3$	$8 \pm 3$	1993	$2.8 \pm 1.1$
SCA1	24-25	-	$56 \pm 4$	$32 \pm 3$	$18 \pm 3$	1982	$1.4 \pm 0.3$
SCA5	18-19	18.5	$56 \pm 4$	$43 \pm 4$	$8 \pm 4$	1992	$2.3 \pm 1.0$
SCA5	22-23	22.5	$56 \pm 4$	$31 \pm 3$	$19 \pm 4$	1981	$1.2 \pm 0.2$

### SCA1

El càlcul del ritme de sedimentació en el perfil SCA1 és difícil. El perfil de  $^{137}Cs$  no presenta cap pic definit però mostra una tendència clara a augmentar en les darreres seccions. Com que el pic de  $^{137}Cs$  es troba a una profunditat mínima de 50 cm, llavors obtenim un valor mínim de sedimentació de  $3.3 \pm 0.2\ cm\ a^{-1}$ .

Pel que fa al perfil de  $^{210}Pb$  en excés, la davallada de la concentració s'aprecia a partir dels 25.5 primers centímetres, assolint un valor mínim de  $16 \pm 2\ Bq\ kg^{-1}$  a la secció 30 cm.

Considerem que el tram del perfil de  $^{210}Pb$  del testimoni SCA1 comprès entre els 25.5-49.5 cm correspon al mateix fenomen sedimentari registrat entre els 5-10 cm dels perfils de plom dels testimonis SCA2 i SCA8. En aquests testimonis, l'interval de profunditat des dels 5 als 10 cm mostra un mínim d'activitat de  $^{210}Pb$  en excés, amb uns valors de  $27 \pm 3\ Bq\ kg^{-1}$  i  $19 \pm 4\ Bq\ kg^{-1}$  de  $^{210}Pb$  per l'SCA2 i SCA8, respectivament. A partir del ritme de sedimentació calculat amb el perfil de  $^{137}Cs$  del testimoni SCA2 ( $1.37 \pm 0.14\ cm\ a^{-1}$ ) datem la secció 10.5 cm a l'any 1993. En el testimoni SCA8 el ritme de sedimentació calculat amb el perfil de  $^{137}Cs$  ( $1.7 \pm 0.2\ cm\ a^{-1}$ ) ens permet datar la secció 10.5 cm a l'any 1995. D'aquesta manera, podem afirmar que l'edat de la secció 25.5 cm de l'SCA1 es troba entre els anys 1993 i 1995 estimats a partir dels perfils SCA2 i SCA8. Per tant, el ritme de sedimentació que es dedueix a partir de la combinació d'ambdós perfils és  $r = 3.6 \pm 0.3\ cm\ a^{-1}$ , acumulant-se 25.5 cm en 7 anys (1993-1994).

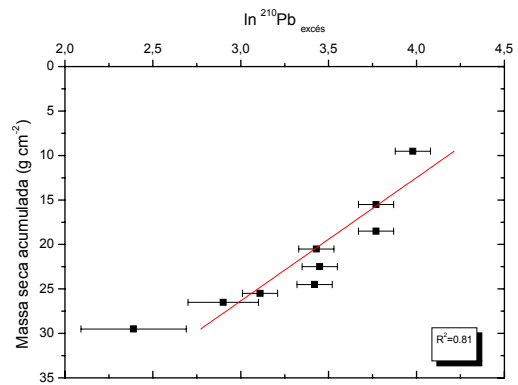
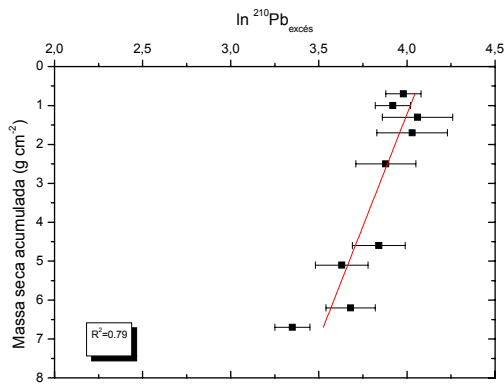
Aquesta datació també ens confirma la hipòtesi de l'existència d'un pic de  $^{137}Cs$  als 50 cm, ja que el ritme de sedimentació, assumint el pic als 50 cm, coincideix amb l'edat determinada a partir de la combinació dels perfils de cesi dels testimonis SCA2 i SCA8 al testimoni SCA1.

L'aplicació directa del mètode CIC i CFCS en aquest testimoni ens dona uns ritmes de sedimentació menors al estimats a través del  $^{137}Cs$ . El CFCS estima una sedimentació de  $1.2 \pm 0.2\ cm\ a^{-1}$  (taula 5.2.3, figura 5.2.8.) i data la secció 25.5 cm amb una edat de 22.2 anys (any 1978). Aquest ritme de sedimentació és 2.7 vegades inferior al ritme obtingut a partir del perfil de  $^{137}Cs$ . El model CIC data la secció 25.5 cm a l'any 1982, amb una concentració C és de  $32 \pm 3\ Bq\ kg^{-1}$  i una concentració inicial  $C_0$  és de  $56 \pm 4\ Bq\ kg^{-1}$ . El ritme de sedimentació que se'n deriva és de  $1.4 \pm 0.3\ cm\ a^{-1}$ , 2.3 vegades inferior a la sedimentació proposada pel  $^{137}Cs$  ( $r = 3.33 \pm 0.2\ cm\ a^{-1}$ , considerant que el pic de Txernòbil es troba com a mínim a la secció 50 cm). A la figura 5.2.9 es resumeixen gràficament els ritmes de sedimentació segons els models CIC, CFCS i la datació per  $^{137}Cs$  en les diferents parts de l'embassament de Camarasa. En les taules 5.2.5, i 5.2.6 es presenta un recull bibliogràfic dels ritmes de sedimentació calculats en diferents llacs i embassaments.

**Taula 5.2.3.** *Ritmes de sedimentació a partir dels perfils de concentració de  $^{137}\text{Cs}$ .*

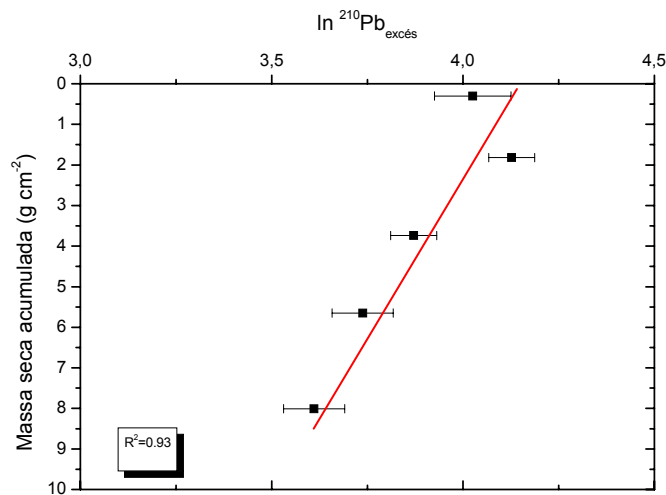
Estacions	Profunditat (cm)	Any	Taxa de sedimentació (cm a <sup>-1</sup> )
SCA 2	20.5	1986	1.37 ± 0.14
SCA 5	19.5	1986	1.30 ± 0.14
SCA1	50	1986	3.3 ± 0.2
SCA1*	25.5	1992-1994	3.60 ± 0.13
SCA8	25	1986	1.7 ± 0.2

\* *Datació combinant els perfils de  $^{137}\text{Cs}$  dels testimonis SCA2 i SCA8.*



**Figura 5.2.6.** *Model CF:CS al perfil de  $^{210}\text{Pb}$  en excés del testimoni SCA2 als primers 25 cm ( $r = 1.2 \pm 0.2 \text{ cm a}^{-1}$ )*

**Figura 5.2.7.** *Model CF:CS al perfil de  $^{210}\text{Pb}$  en excés del testimoni SCA5 en els primers 25 cm ( $r = 1.4 \pm 0.3 \text{ cm a}^{-1}$ )*



**Figura 5.2.8.** *Model CF:CS al perfil del testimoni SCA1 aplicat en els quatre punts entre el 10-25 cm,  $r = 1.2 \pm 0.2 \text{ cm a}^{-1}$*

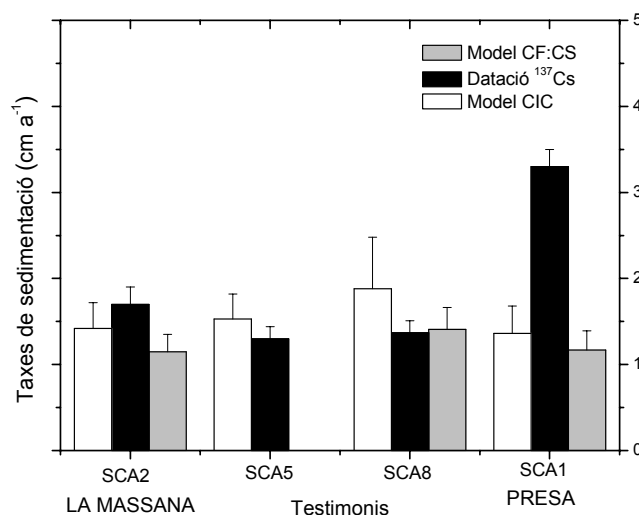
**Taula 5.2.4.** *Ritmes de sedimentació aplicant el model CF:CS*

Estacions*	Densitat mitjana al tram aplicat ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Flux de massa ( $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )	Flux de massa ( $\text{g cm}^{-2} \text{a}^{-1}$ )	Ritme Sedimentació ( $\text{cm a}^{-1}$ )
SCA 2	$0.30 \pm 0.07$	$10 \pm 2$	$0.36 \pm 0.07$	$1.2 \pm 0.2$
SCA 5	$0.31 \pm 0.07$	$12 \pm 2$	$0.43 \pm 0.08$	$1.4 \pm 0.2$
SCA1	$0.37 \pm 0.10$	$12 \pm 2$	$0.43 \pm 0.07$	$1.2 \pm 0.2$

\*Exceptuant els testimonis SCA4, SCA8.

**Taula 5.2.5.** *Ritmes de sedimentació calculats en diferents embassaments.*

Localització embassament	Autor	Taxa de sedimentació ( $\text{cm a}^{-1}$ )
Embassaments dels Estats Units	Callender <i>et al.</i> (1993)	1-20
Embassaments dels Estats Units	Van Metre <i>et al.</i> (1997)	0.26-0.31 - 20
Embassament Livingston (E.U.A)	Van Metre <i>et al.</i> (1996)	2, 4 i 6 a la cua
Moldàvia (Romania)	Ionita <i>et al.</i> (2000)	4.6 de mitjana i 10-15 al delta de cua
Wyresdal Park Reservoir (Regne Unit)	Rowan <i>et al.</i> (2001)	5.6
Barasona (Osca)	Navas <i>et al.</i> (1998)	4
<b>Embassament de Camarasa</b>	<b><i>Aquest treball</i></b>	<b><math>1.40 \pm 0.07</math></b>
		<b><math>3.60 \pm 0.13</math></b>


**Figura 5.2.9.** *Resum de les taxes de sedimentació a diferents parts de l'embassament de Camarasa.*

**Taula 5.2.6** *Punta de cabal (cresta) i cabal relatiu de diferents estacions de les conques afectades per l'avinguda del 6 al 8 de novembre del 1982.*

Riu	Estacions	Conca (km <sup>2</sup> )	Cresta (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	Cabal relatiu (L·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> )	Cabal mitjà anual (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
Ebre	Tortosa	84230	3200	38	540
	Puigcerda	297	600	2020	
	Seu d'Urgell	1233	1000	811	
	Oliana	2700	2000	740	
	Lleida	11369	3200	281	
Noguera	Pobla de Segur	1950	620	318	47
Pallaresa	Camarasa	2820	1300	460	
Noguera Ribagorçana	Pinyana	1757	180	409	

Font: *Batlle & Llasat (2000)*.

Observem com, en termes generals, la sedimentació en els llacs és menor que en els embassaments. Tanmateix s'aprecia certa variabilitat de les mesures segons el tipus de llac (profunditat de la columna d'aigua, superfície de la conca hidrogràfica, forma del vas sedimentari, situació geogràfica etc.). En els embassaments (taula 5.2.6) l'interval de variació en el ritme sedimentari és més ampli que en els llacs i oscil·la entre 1 i 20 cm a<sup>-1</sup>.

#### 5.2.4 Discussió dels perfils de <sup>210</sup>Pb i <sup>137</sup>Cs

La disminució sobtada de l'activitat de <sup>210</sup>Pb en excés a partir dels 20-30 cm que s'observa en els testimonis SCA2, SCA5 i SCA8, indica una forta dilució del senyal de plom atribuïble a un elevat ritme de sedimentació. El perfil de densitat d'aquests testimonis també mostra un increment en aquest mateix interval de profunditat, indicador d'un canvi en el tipus de material i per tant d'un canvi en la font de sediments. L'explicació d'aquest increment en la dinàmica sedimentària la trobem en el fenomen de les riuades, que provoquen una entrada de material de forma puntual i massiva en els embassaments. La inundació més important que ha sofert la conca de la Noguera Pallaresa en els darrers anys ha estat la del 1982. Aquesta data estaria d'acord amb les nostres datacions sedimentàries proposades en l'apartat 5.2.3. Com a conseqüència d'aquesta riuada es produí una gran entrada de material que dissolgué el senyal de <sup>210</sup>Pb en excés.

Segons Batlle i Llasat (2000), la inundació de la primera setmana de novembre del 1982 fou la més important des del 1940 i afectà a tot el Sud-est de França, el Pirineu andorrà, el Pirineu català i Aragonès. Les pluges van sobrepassar en alguns casos els 500 mm en 48 hores en diversos punts de la conca del Segre, del Tet i del Tech. El dia de més precipitacions, el 7 de novembre de 1982, es van registrar a la conca de la Noguera Pallaresa valors de 100 mm, amb un registre màxim a l'estació de Cabdella de 252 mm. El Segre, en els seu pas per Lleida, portava 3200 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, de manera que la laminació dels embassaments no suavitzà prou la cresta de l'avinguda i moltes poblacions riberenques, com ara la Pobla de Segur i Balaguer, s'inundaren. A la taula 5.2.7 detallem les puntes de cabal registrades durant l'avinguda del 1982.

El senyal de l'avinguda també es troba registrat en el perfil de <sup>137</sup>Cs en forma d'un doble pic en profunditat. El segon pic en profunditat del perfil de <sup>137</sup>Cs s'ha produït durant un procés d'avinguda a conseqüència d'un arrossegament de la coberta superficial dels sòls de la



conca hidrogràfica. El  $^{137}\text{Cs}$  es troba en un 90 % retingut en els primers centímetres dels sòls (He *et al.*, 1996). Per tant, durant els períodes d'intenses pluges la gran quantitat d'aigua que cau en poc temps no pot ser absorbida pels sòls, de manera que l'escorrentia superficial n'erosiona els primers centímetres i els arrossega fins al vas sedimentari de l'embassament. L'entrada de material procedent dels sòls representa una nova incorporació de cesi en el registre sedimentari que s'observa en forma d'un nou pic de cesi en profunditat. Per tant, el pic més superficial correspondria al pic causat per l'accident nuclear de Txernòbil (1986) i el pic més profund correspondria a l'erosió de la coberta superficial dels sòls a l'any 1982.

En la estació SCA1 s'observa una sedimentació més elevada que en les estacions SCA2, SCA5 i SCA8 (Fig. 5.2.9). En aquesta zona es recull bona part dels aportos sedimentaris que són transportats al llarg de l'embassament i que s'aturen a l'arribar a la presa per un efecte de barrera física. A més, cal tenir present l'entrada de material procedent del barranc de Sta. Linya, torrent situat en el braç esquerra de la part baixa de l'embassament. Els materials que transporta aquest torrent també poden sedimentar a la zona de la presa.

En el cas del testimoni SCA4 la forma constant en profunditat del perfil de  $^{210}\text{Pb}$  en excés és indicadora de l'elevada sedimentació que experimenta la zona. Aquest testimoni està situat a la part alta del pantà i es troba sotmès a la influència de la deposició de la càrrega sedimentària que transporta la Noguera Pallaresa, així com a la successiva mobilització sedimentària provocada pels corrents. El perfil de  $^{137}\text{Cs}$  també mostra l'efecte de dilució que provoca l'elevada sedimentació de la zona del delta de cua. Les concentracions de  $^{137}\text{Cs}$  prenen uns valors de l'ordre de la meitat de l'activitat del fons atribuït al nivell de pre-Txernòbil (de l'ordre de  $4 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) que es pot apreciar en la resta de testimonis, i per tant, mostra un senyal molt diluït.

#### 5.2.4.1 Previsió del reompliment

Els embassaments són infraestructures públiques molt costoses i, per tant, requereixen ser amortitzades en un període temporal llarg. La major part de les preses tenen una triple funció: producció hidroelèctrica, laminació d'avingudes i emmagatzemament d'aigua per a la població. Un cop determinats els ritmes de sedimentació podem fer una previsió del reompliment de l'embassament a 25, 50 i 100 anys vista (taula 5.2.8) i valorar la capacitat de vida útil de la infraestructura. Si utilitzem els ritmes de sedimentació calculats amb la datació per  $^{137}\text{Cs}$ , veiem com a la zona de la presa s'acumulen 1.65 m de material sedimentari en 50 anys. La resta de testimonis de la part baixa (SCA2, SCA5 i SCA8) mostren una acumulació d'entre 68 cm i 85 m de material durant aquest període. Hem agafat la datació per  $^{137}\text{Cs}$  ja que és la tècnica de datació que ens permet calcular la sedimentació en totes les estacions mostrejades, fins i tot en la estació SCA1. Tanmateix, val a dir que el model CFCS coincideix amb la datació per  $^{137}\text{Cs}$  a les estacions de mostreig SCA2, SCA5 i SCA8 (vegeu Fig. 5.2.9).

Per tal de quantificar, de manera qualitativa, la pèrdua de volum causada pel reompliment hem utilitzat l'estimació del volum de tot l'embassament proposada pel Departament d'Estratigrafia Paleontologia i Geociències Marines de la UB. Si considerem que la sedimentació mitjana de l'embassament és la mínima que hem calculat mitjançant el perfil de  $^{137}\text{Cs}$  a l'estació SCA2,  $1.37 \pm 0.14 \text{ cm a}^{-1}$ , i que la profunditat mitjana de les aigües és de 11.46 m, llavors, el volum acumulat és aproximadament de  $84 \text{ hm}^3$  (Taula 5.2.8). En 5 anys la sedimentació provocaria una pèrdua de volum de  $0.27 \text{ hm}^3$ , equivalent al 0.19 % del volum total de l'embassament ( $137.9 \text{ hm}^3$ ). Aquesta estimació és purament qualitativa ja que

**Taula 5.2.7.** *Previsió del reompliment de l'embassament sense considerar l'efecte de les riuades.*

Testimoni	Taxa de sedimentació (cm a <sup>-1</sup> )	Previsió a 25 anys (cm)	Previsió a 50 anys (cm)	Previsió a 100 anys (cm)
SCA2	1.37± 0.14	34	68	137
SCA5	1.30± 0.14	34	65	130
SCA1	3.3 ± 0.2	82	165	333
SCA 1*	3.60± 0.13	90	180	360
SCA8	1.7± 0.2	42	85	170

\*Combinant els perfils de <sup>137</sup>Cs dels testimonis SCA2 i SCA8.

hem comprovat que la sedimentació és molt més elevada en determinades regions del vas, com ara el delta de cua, que en les zones centrals de l'embassament. Per tant aquesta és una estimació basada en la mínima sedimentació de l'embassament. Tanmateix, a l'hora de quantificar el volum total perdut a causa de la sedimentació també hauríem de tenir en compte les inundacions. Així doncs, durant el període de la riuada del 1982 s'ha arribat a dipositar en la part central de l'embassament (estacions SCA2, SCA5, SCA8) tant material com en els darrers 20 anys de sedimentació regular, assumint com a ritme de sedimentació el valor mínim de sedimentació calculat a partir del cesi de  $1.37 \pm 0.14$  cm a<sup>-1</sup>. Malgrat tot, no disposem de dades volumètriques més precises de cada part de la cubeta sedimentària que ens permetrien valorar més acuradament el volum perdut per la sedimentació.

Les conseqüències d'aquest reompliment depenen de la morfologia del vas. La major part de l'embassament té una forma allargada i sinuosa, amb una profunditat mitjana de 11 m.

- *La presa* és una zona profunda, amb una major capacitat d'acumulació de material degut a l'efecte barrera que provoca el mur de contenció. Un reompliment excessiu pot condicionar el funcionament de la central ja que la cota de turbinatge es troba a 310 m sobre el nivell del mar. Si el fons de l'embassament es troba cada vegada més elevat a causa de la sedimentació, les partícules en suspensió poden entrar en contacte amb el sistema de turbinatge amb més facilitat, deteriorant la producció hidroelèctrica. Segons Rasós (2003) els nivells de partícules en suspensió durant el gener del 2001 a la part profunda de la zona de la presa, a 48 m, són elevats, amb un valor de 8.04 mg L<sup>-1</sup>. A 17 m la concentració de partícules es redueix, amb un valor de 5.58 mg L<sup>-1</sup> i esdevé mínim en superfície, amb una concentració de 2.19 mg L<sup>-1</sup>.
- *A la part central* el reompliment comporta una pèrdua de la capacitat útil, que es tradueix en una pèrdua de la capacitat de laminació i d'emmagatzematge d'aigua per a la població.
- *A la zona de l'estretament*, l'embassament s'encaixa entre singles i les profunditats són baixes, de l'ordre dels 15-20 m (Rasós 2003). L'efecte del reompliment sedimentari pot convertir aquest tram en un zona pràcticament fluvial, fet que provocaria que en un escenari de futur es desconnectés la part superior de l'embassament
- Finalment la part més fràgil de l'embassament és *la cua*, que presenta el ritme de sedimentació més elevat de tot l'embassament. Si tenim en compte que és la part amb les profunditats més baixes, de l'ordre dels 10 m (Rasós 2003) l'efecte del reompliment és més important i pot provocar fins i tot que certes zones que actualment es troben

**Taula 5.2.8.** Estimació del volum de l'embassament proposada pel Departament d'Estratigrafia, Paleontologia i Geociències Marines de la UB.

Profunditat (m)	Cota *	Àrea ocupada (m <sup>2</sup> )	Volum entre cotes (hm <sup>3</sup> )	Volum acumulat (hm <sup>3</sup> )
0	336	5.437.850	25.6	137.9
-5	331	4.804.965	22.5	112.3
-10	326	4.222.020	19.6	89.7
-15	321	3.619.123	16.5	70.1
-20	316	2.930.828	12.3	53.6
-25	311	2.148.083	9.8	41.3
-30	306	1.804.879	8.4	31.4
-35	301	1.549.226	7.1	23.1
-40	296	1.304.067	5.8	15.9
-45	291	1.014.456	4.4	10.1
-50	286	739.107	2.9	5.7
-55	281	440.855	1.7	2.8
-60	276	261.929	0.91	1.1
-65	271	106.671	0.19	0.19
-70	266	562	≅ 0	≅ 0

\* Cota sobre el nivell de mar.

cobertes d'aigua quedin de manera permanent descobertes en forma de barres fluvials o petites illes. de la part inferior, entrant en contacte només durant les èpoques d'avingudes amb el pas dels cabals màxims.

### 5.2.5 Inventaris de <sup>137</sup>Cs i <sup>210</sup>Pb en excés

Els inventaris de <sup>137</sup>Cs i <sup>210</sup>Pb (Taula 5.2.10) ens permeten comparar els diferents testimonis entre ells. En el cas de que els testimonis mostrejats arribessin al sòcol de l'embassament es podrien comparar els inventaris directament entre ells. En el nostre cas però, en no disposar del registre complet, necessitem establir l'inventari fins a una data de referència. Els inventaris i els fluxos anuals s'han calculat en funció dels primers 15 anys, corresponent al pic de Txernòbil de l'any 1986.

Els inventaris més elevats de <sup>210</sup>Pb en excés corresponen al testimoni SCA1, seguit dels de l'SCA5, SCA2 i SCA8, molt similars entre ells. S'aprecia doncs, una correlació entre la posició i l'inventari, on els testimonis aigües avall, en direcció a la presa, presenten un inventari de <sup>210</sup>Pb en excés majors. Per tant, la distribució dels inventaris de <sup>210</sup>Pb i <sup>137</sup>Cs coincideix amb la distribució dels ritmes de sedimentació en l'embassament, essent major en la zona de la presa que en la part central de l'embassament.

En el testimoni SCA4 no s'ha pogut determinar l'inventari de <sup>210</sup>Pb en excés referenciat als darrers 15 anys, ja que el perfil de <sup>137</sup>Cs pren uns valors d'activitat per sota del valor mínim detectable del detector, de manera que no s'aprecien els pics de cesi. Tanmateix, els valors

**Taula 5.2.9.** Inventaris de  $^{210}\text{Pb}$  en excés i  $^{137}\text{Cs}$  i fluxos anuals  $^{210}\text{Pb}$  en excés estimats en els darrers 15 anys.

Testimoni	Inventari $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ dels darrers 15 anys. ( $\text{Bq m}^{-2}$ )	Inventari total mostrejat $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ ( $\text{Bq m}^{-2}$ )	Inventari $^{137}\text{Cs}$ ( $\text{Bq m}^{-2}$ )	Flux anual $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ . ( $\text{Bq m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )
SCA 2	$2307 \pm 51$	$4920 \pm 90$	$952 \pm 23$	$192 \pm 2$
SCA 5	$3146 \pm 52$	$5581 \pm 144$	$1212 \pm 25$	$244 \pm 2$
SCA 8	$2775 \pm 18$	$4534 \pm 298$	$1134 \pm 30$	$229 \pm 3$
SCA 1	$8117 \pm 55$	$8117 \pm 55$	$908 \pm 21$	$676 \pm 2$
SCA 4	*	$6535 \pm 120$	*	*

\*El testimoni no és datable.

de cesi que s'han mesurat en les seves primeres capes indiquen una elevada dilució degut a l'efecte de l'elevada sedimentació a la zona del delta de cua.

Pel que fa a l'inventari de  $^{137}\text{Cs}$  dels testimonis mostrejats a Camarasa, tots presenten uns valors similars. Aquesta similitud s'explica per la falta de mesures gamma al llarg del perfil. Per tant, per tal d'estimar un valor d'inventari de  $^{137}\text{Cs}$  s'ha hagut d'extrapolat la concentració en les seccions on no s'havia realitzat mesura.

### 5.2.6 Flux de $^{210}\text{Pb}$ en una trampa de sediment

El flux de  $^{210}\text{Pb}$  en excés ( $q$ ) es calcula a partir de l'expressió 3.12:

$$q = \frac{A_0}{\Delta t} \cdot (1 - e^{-\lambda \Delta t})$$

on  $q$  és la taxa d'aport de  $^{210}\text{Pb}$  en excés, que se suposa constant en un interval de temps  $\Delta t$ , i  $A_0$  és l'inventari fins a la capa corresponent a aquest temps  $t$  (Sanchez *et al.*, 2000). El flux  $q$  s'ha corregit per un factor exponencial ja que no es disposa de tot l'inventari fins al sòcol de l'embassament. Llavors el flux de  $^{210}\text{Pb}$  en excés s'ha de calcular mitjançant l'inventari fins a una data coneguda, en el nostre cas  $\Delta t$  correspon als darrers 15 anys (pic de Txernòbil del 1986).

### Flux de massa

El càlcul del flux de massa consisteix en dividir el Pes sec durant el període d'estudi per la superfície de la trampa i pels dies de mostreig, en unitats de  $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (vegeu equació 4.1) (Heussner *et al.*, 1990; Heussner *et al.*, 1999).

Si comparem el flux de massa estimat mitjançant la trampa de sediment (estació SCA2),  $47 \pm 15 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , amb el flux de massa calculat a través del testimoni sedimentari estret a la mateixa estació SCA2,  $11.52 \pm 0.15 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , observem com el flux de massa de la trampa és un factor 4 vegades superior al calculat a partir del testimoni sedimentari. A la taula 5.2.11 es presenten els resultats del flux de massa i el flux  $^{210}\text{Pb}$  en excés calculat a partir de les mostres de sediment recollides per la trampa de sediment durant el període comprès entre el 17-07-00 al 16-09-01. A la taula 5.2.12 es mostren els diferents fluxos de massa estimats a partir dels testimonis sedimentaris i de la trampa de sediment.

### Flux de $^{210}\text{Pb}$ en excés

A la taula 5.2.13 es presenten els inventaris de  $^{210}\text{Pb}$  en excés i fluxos anuals de  $^{210}\text{Pb}$  en excés estimats en els darrers 15 anys. El flux de  $^{210}\text{Pb}$  mesurat a la trampa de sediment és de  $3.61 \pm 1.25 \text{ Bq m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de promig, que en un any de mostreig equivaldria a un flux de  $907 \text{ Bq m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ . Si comparem aquest flux amb el valor de flux estimat a partir del testimoni sedimentari mostrejat a la mateixa estació (SCA2), de  $192 \pm 2 \text{ Bq m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  (taula 5.2.12), observem que el de la trampa és 4.7 vegades superior. Podem comprovar que aquest factor és molt similar al factor 4 que calculem mitjançant el flux de massa de la trampa (Taula 5.2.11). En la figura 5.2.11 es mostra la relació entre el flux de massa i el flux de  $^{210}\text{Pb}$  en excés, així com la variació de la concentració de  $^{210}\text{Pb}$  en excés en funció de la cota hídrica. És interessant comprovar que l'activitat de  $^{210}\text{Pb}$  en excés de la trampa de sediment pren un valor mitjà de  $53 \pm 11 \text{ Bq kg}^{-1}$ , similar als  $49 \pm 3 \text{ Bq kg}^{-1}$  de la primera secció del testimoni sedimentari SCA2 de la zona (vegeu Figura 5.2.10). Per tant, d'aquí deduïm que l'origen del sediment de la trampa és el mateix que el de la superfície del fons.

Cal tenir en compte que la trampa estava instal·lada només a 2 m del fons de l'embassament. A aquesta profunditat molt material particulat que entra a la trampa de sediment no prové directament de la columna d'aigua, sinó del llit de l'embassament a través de la resuspensió que provoquen els corrents. Rasós (2003) determina unes concentracions elevades de matèria en suspensió en els fons de l'embassament de  $7.7 \text{ mg L}^{-1}$  a la zona de la trampa i incrementant-se en direcció a la presa, amb un valor de  $8.35 \text{ mg L}^{-1}$  a l'estació SCA1 durant el període setembre-octubre. Les trampes de sediment són una eina de gran utilitat en els estudi de fluxos sedimentaris, sobretot en el medi marí. Tanmateix la seva utilització requereix tenir en compte els diferents factors que poden influir en l'estimació del flux de massa a la columna d'aigua. Com ja hem vist, la distància al fons és un paràmetre a contemplar. Un altre factor és la situació de la trampa en la columna d'aigua en relació als corrents de la zona. Els corrents poden alterar el senyal del flux de massa, provocant variabilitat important en el flux segons la posició, per defecte o per excés. (Scholten *et al.*, 2001).

La trampa de sediment, malgrat aquest factor de diferència existent entre el càlcul del flux de massa i  $^{210}\text{Pb}$  en excés en comparació a l'estimació realitzada mitjançant els testimonis sedimentaris, si que ens permet estudiar la dinàmica dels sediments en el fons de l'embassament durant un període de temps. A partir dels registres de la trampa de sediment s'observa la relació directament proporcional entre els fluxos de massa i  $^{210}\text{Pb}$  en excés. De la mateixa manera, també s'observa que la relació d'ambdós fluxos es inversament proporcional al nivell de la cota hídrica. A la taula 5.2.11 i a la figura 5.2.11 podem apreciar com durant el mes setembre es produeix un màxim en el flux de massa i també de  $^{210}\text{Pb}$  en excés, coincidint amb un mínim de la cota hídrica. Segons Rasós (2003) en aquest mes també es produeix un màxim en la velocitat dels corrents a la capa profunda, que redistribueixen el material de la superfície de llit de l'embassament. A la Massana i a la zona de la presa les velocitats màximes que s'assoleixen durant el setembre de 2000 són de  $4.53$  i  $1.68 \text{ cm s}^{-1}$  respectivament, i esdevenen mínimes amb uns valors de  $0.86$  i  $0.92 \text{ cm s}^{-1}$  durant els mesos de juliol i agost del 2000.

**Taula 5.2.10.** Activitat de  $^{210}\text{Pb}$ , flux de massa i flux de  $^{210}\text{Pb}$  en excés en les mostres de la trampa sedimentària.

Identificació mostra	Inici de mostreig	Final de mostreig	Dies de mostreig	Camarasa Estació SCA2 Cota (m)	$^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	Pes Sec període mostrejat (g)	Flux massa* (g m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	Flux $^{210}\text{Pb}_{\text{en excés}}$ (Bq m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )
CAI 1	17-07-00	1-08-00	15	329.68	72 ± 6	28.1	38 ± 4	3.7 ± 0.2
CAI 2	1-08-00	16-08-00	15	326.76	65 ± 7	31.7	42 ± 4	3.9 ± 0.3
CAI 3	16-08-00	1-09-00	16	323.33	43 ± 4	43.3	54 ± 6	3.8 ± 0.2
CAI 4	1-09-00	16-09-00	15	319.89	56 ± 4	49.2	66 ± 7	5.4 ± 0.2
CAI 5	16-09-00	1-10-00	15	320.19	56 ± 5	53.0	71 ± 7	5.8 ± 0.3
CAI 6	1-10-00	16-10-00	15	321.56	52 ± 5	64.5	86 ± 9	67 ± 0.4
CAI 7	16-10-00	1-11-00	16	325.52	52 ± 5	44.7	56 ± 6	4.4 ± 0.3
CAI 8	1-11-00	16-11-00	15	328.12	46 ± 7	33.0	44 ± 5	3.2 ± 0.3
CAI 9	16-11-00	1-12-00	15	328.02	38 ± 5	28.1	37 ± 4	2.4 ± 0.2
CAI 10	1-12-00	16-12-00	15	329.09	42 ± 6	27.1	36 ± 4	2.5 ± 0.2
CAI 11	16-12-00	1-01-01	16	330.58	47 ± 4	44.7	56 ± 6	4.1 ± 0.2
CAI 12	1-01-01	16-01-01	15	333.44	54 ± 5	32.0	43 ± 4	3.4 ± 0.2
CAII 1	10-04-01	16-04-01	6	329.56	59 ± 10	8.8	29 ± 3	2.5 ± 0.3
CAII 2	16-04-01	1-05-01	15	330.51	36 ± 5	20.6	27 ± 3	1.7 ± 0.1
CAII 3	1-05-01	16-05-01	15	331.40	55 ± 5	31.0	41 ± 4	3.4 ± 0.2
CAII 4	16-05-01	1-06-01	15	333.30	43 ± 4	31.8	42 ± 4	2.9 ± 0.2
CAII 5	1-06-01	16-06-01	15	333.57	48 ± 6	22.3	30 ± 3	2.2 ± 0.2
CAII 6	16-06-01	1-07-01	15	329.74	56 ± 6	21.0	28 ± 3	2.3 ± 0.2
CAII 7	1-07-01	16-07-01	15	328.24	69 ± 6	25.1	33 ± 3	3.2 ± 0.2
CAII 8	16-07-01	1-08-01	16	329.51	55 ± 4	28.5	36 ± 4	2.9 ± 0.2
CAII 9	1-08-01	16-08-01	15	325.58	52 ± 4	35.9	48 ± 5	3.7 ± 0.2
CAII 10	16-08-01	1-09-01	16	322.07	81 ± 5	40.2	50 ± 5	5.4 ± 0.2
CAII 11	1-09-01	16-09-01	15	321.66	50 ± 4	37.5	50 ± 5	3.8 ± 0.2
CAII 12	16-09-01	1-10-01	15	321.26	35 ± 3	47.1	63 ± 6	3.8 ± 0.2
<i>Mitjana</i>					<i>53 ± 11</i>		<i>47 ± 15</i>	<i>3.61 ± 1.25</i>

\*Flux de massa adaptat de Rasós (2003)

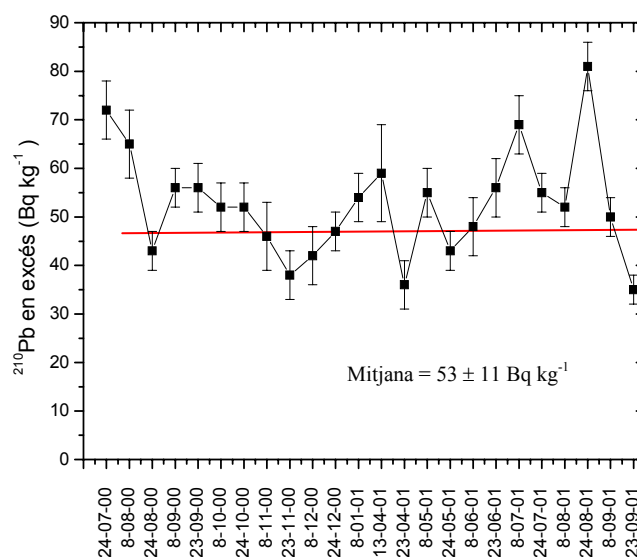
**Taula 5.2.11.** Flux de massa estimat als testimonis sedimentaris mitjançant el  $^{137}\text{Cs}$  i el flux de massa calculat a través de la trampa de sediment.

Estació	Profunditat del pic de $^{137}\text{Cs}$ (cm)	Flux massa mitjançant $^{137}\text{Cs}$ ( $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )
SCA2-trampa	-	$47 \pm 15^*$
SCA2	20.5	$11.52 \pm 0.15$
SCA5	19.5	$11.55 \pm 0.15$
SCA8	25	$16.60 \pm 0.17$
SCA1	50.5	$38.6 \pm 0.4$

\*valor promig de flux de massa adaptat de Rasós (2003).

**Taula 5.2.12.** Inventaris de  $^{210}\text{Pb}$  en excés i fluxos anuals de  $^{210}\text{Pb}$  en excés estimats en els darrers 15 anys.

Testimoni	Inventari $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ dels darrers 15 anys. ( $\text{Bq m}^{-2}$ )	Flux anual $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ . ( $\text{Bq m}^{-2} \text{a}^{-1}$ )
SCA 2	$2307 \pm 51$	$192 \pm 4$
SCA 5	$3146 \pm 52$	$244 \pm 4$
SCA 8	$2775 \pm 18$	$229 \pm 3$
SCA 1	$8117 \pm 55$	$676 \pm 5$


**Figura 5.2.10.** Variació de la concentració de  $^{210}\text{Pb}$  en excés durant el període de mostreig de la trampa sedimentària

El mes de setembre correspon al període de l'any successiu al període d'assecatment hídric (juliol-agost), on s'assoleix un desnivell màxim de la cota de fins a 14 metres respecte a la cota normal de funcionament de la resta de l'any. Aquest desnivell és degut a les baixes precipitacions d'aquesta època de l'any i a la forta demanda d'aigua per a la producció elèctrica. Com a resultat de la recuperació de les cotes normals es produeix una reactivació dels corrents que provoquen un augment del flux de, arribant a uns valors màxims de  $71 \pm 7 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  durant la segona quinzena de setembre 2000 i de  $86 \pm 9 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  durant la segona quinzena de setembre 2000. El mateix fenomen es repeteix el següent any, amb un valor de  $63 \pm 6 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  durant la segona quinzena de setembre del 2001. El flux de  $^{210}\text{Pb}$  en excés presenta els seus màxims durant la primera quinzena de setembre del 2000,  $5.8 \pm 0.3 \text{ Bq m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , i durant la segona quinzena, amb  $6.7 \pm 0.4 \text{ Bq m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . El següent any, el màxim de flux de  $^{210}\text{Pb}$  en excés es produeix lleugerament abans, durant la segona quinzena d'agost, amb un valor de  $5.4 \pm 0.2 \text{ Bq m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ .



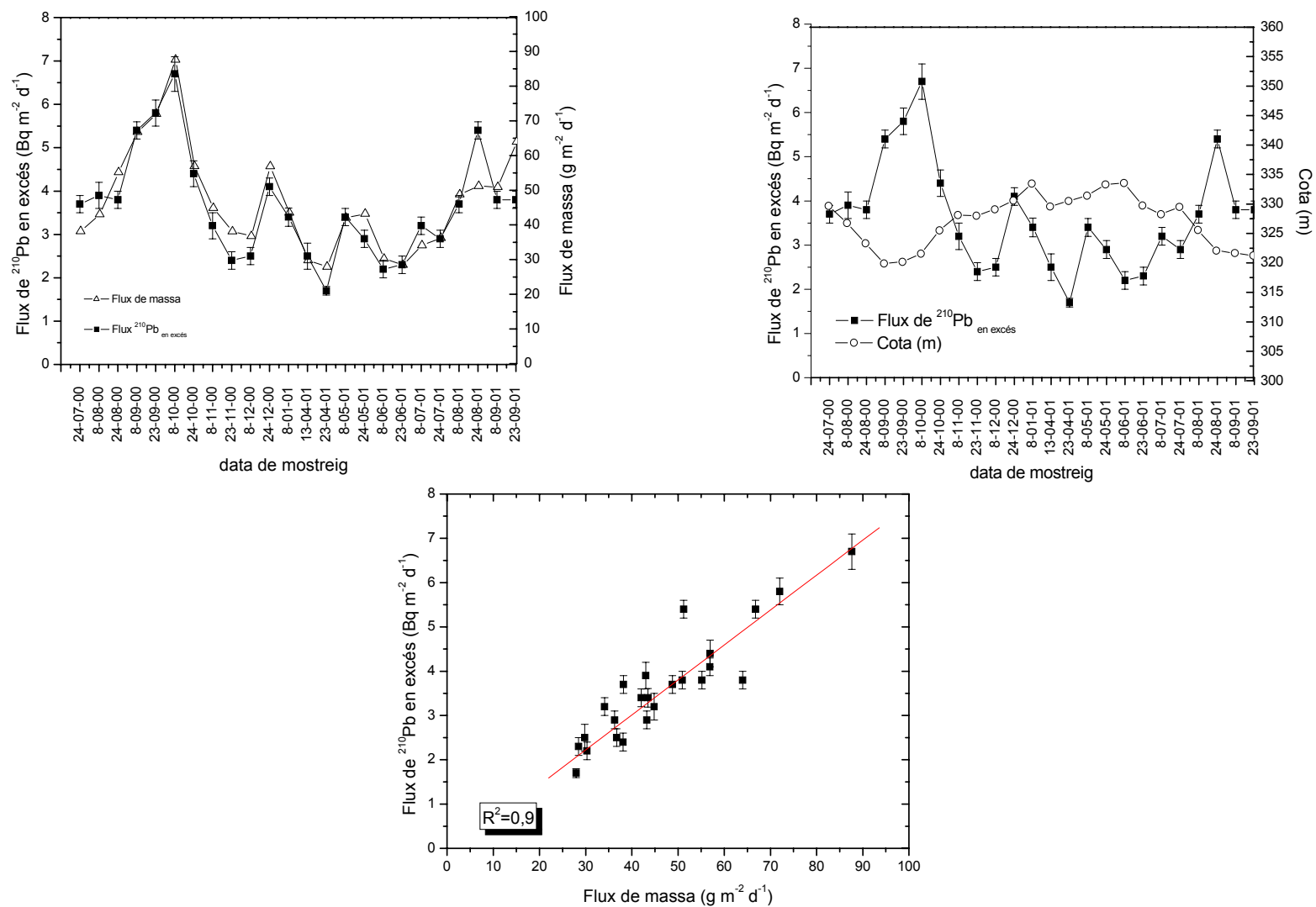


Figura 5.2.11. Relació entre el flux de massa i el flux de <sup>210</sup>Pb en excés de la trampa de sediment, i relació del flux de <sup>210</sup>Pb en excés i la cota hídrica



---

**PART III**

**FLUX ATMOSFÈRIC DE  $^{210}\text{Pb}$  i  $^{137}\text{Cs}$  A LA CONCA DE LA  
NOGUERA PALLARESA i PART ALTA DE LA NOGUERA  
RIBAGORÇANA**

---

5.3.1.	Estudi dels sòls de la conca de la Noguera Pallaresa.....	169
5.3.1.1.	Perfils de $^{210}\text{Pb}$ en excés i $^{137}\text{Cs}$ .....	169
5.3.1.2.	Inventaris de $^{210}\text{Pb}$ en excés i $^{137}\text{Cs}$ .....	170
5.3.1.3.	Flux atmosfèric de $^{210}\text{Pb}$ en excés.....	172
5.3.2.	El factor de focalització a l'embassament de Camarasa.....	176

### 5.3.1 Estudi dels sòls de la conca de la Noguera Pallaresa

#### 5.3.1.1 Perfils de $^{210}\text{Pb}$ en excés i $^{137}\text{Cs}$

La signatura isotòpica als sòls ens permet calcular el flux atmosfèric de  $^{210}\text{Pb}$  i els inventaris de cesi en una zona determinada (Nozaki *et al.*, 1978; Olsen *et al.*, 1985; Sanchez-Cabeza *et al.*, 1999), avaluar el grau de barreja del sòl i fins i tot estimar l'erosió de la conca hidrogràfica (Foster *et al.*, 1984). Els factors físics com la topografia, la litologia, les xarxes de drenatge i els factors antròpics (canvis d'usos del sòl) exerceixen un control clau en l'erosió del sòl (Avendaño *et al.*, 1999). En la bibliografia trobem molts estudis que utilitzen la tècnica del  $^{137}\text{Cs}$  en els càlculs d'erosió (Navas & Walling, 1992; Quine *et al.*, 1994; Walling & He, 1999; Zapata & García-Aguado, 2000). La metodologia consisteix en establir transectes al llarg de l'àrea d'estudi i determinar els inventaris de  $^{137}\text{Cs}$  dels sòls de cada punt del transecte. Paral·lelament es quantifica l'inventari de  $^{137}\text{Cs}$  d'un sòl de referència de la mateixa àrea que estigui inalterat (no erosionat). Seguidament es compara l'inventari de referència amb els inventaris de  $^{137}\text{Cs}$  dels demés sòls de la regió. La comparació dels inventaris ens permet diferenciar entre les zones amb una acumulació o de dipòsit de  $^{137}\text{Cs}$ , les zones estables que no pateixen erosió i les zones amb una pèrdua de cesi (erosió). Per tal de relacionar les pèrdues de  $^{137}\text{Cs}$  del sòl amb les velocitats d'erosió s'apliquen relacions empíriques com les que proposen Ritchie i col·laboradors (1974) i Campbell i col·laboradors (1986), o models teòrics com el mètode proporcional, l'aproximació gravimètrica, o els models de balanç de massa de Quine (1989). Un exemple interessant de l'ús del  $^{137}\text{Cs}$  en els càlculs erosius és el que presenta Navas (1995). En el seu treball determina els punts estables, els punts d'erosió i les zones d'acumulació de  $^{137}\text{Cs}$  al llarg d'una llera de 250 m de longitud en una conca de 0.25 km<sup>2</sup> localitzada a les Bardenas (NE de Zaragoza).

A la bibliografia es poden trobar diversos models que descriuen la distribució del  $^{137}\text{Cs}$  i el  $^{210}\text{Pb}$  en excés en els sòls. Segons Du i col·laboradors (1998), en la utilització del  $^{137}\text{Cs}$  i del  $^{210}\text{Pb}$  en excés com a eina per a la determinar de l'erosió, s'estableixen 3 possibles distribucions dels radioelements en profunditat característiques dels sòls.

$$C = a \cdot e^{-bz} \text{ per } (a > 0, b > 0) \quad (5.1)$$

$$C = a \cdot \left(1 - \left(k - \frac{z}{H}\right)^b\right) \cdot \left(k - \frac{z}{H}\right)^{b-1} \text{ per } (a > 0, b > 1, 0 < k \leq 1) \quad (5.2)$$

$$C = a \cdot \left(1 - \frac{z}{H}\right)^b \text{ per } (a > 0, b \geq 0) \quad (5.3)$$

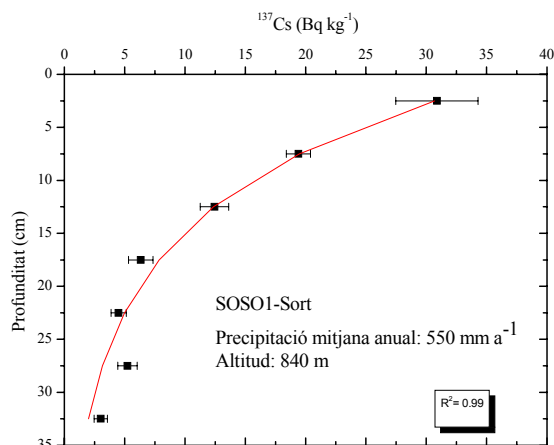
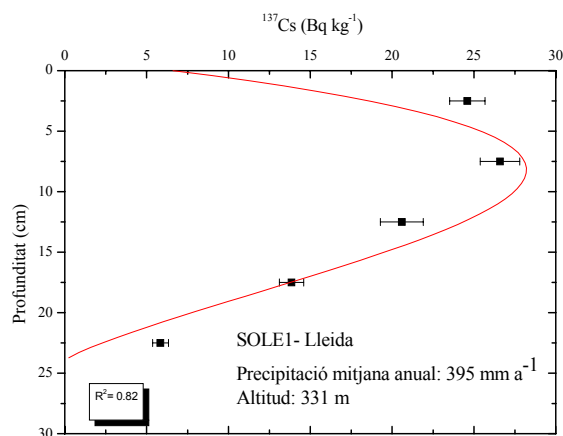
C és la concentració de  $^{137}\text{Cs}$  a una profunditat donada (Bq kg<sup>-1</sup>);

z és la profunditat;

a, b i k són coeficients de la funció;

H és el gruix fins on el  $^{137}\text{Cs}$  pot ser detectat.

El  $^{137}\text{Cs}$  i el  $^{210}\text{Pb}$  en excés tenen un comportament físico-químic similar en el sòl, amb una forta adsorció a les argiles i a la fracció orgànica, i són essencialment no bescanviables (Walling *et al.*, 1997). Els factors que poden influir en el perfil són la variabilitat en l'espai (localització en l'espai: zona còncaua o convexa), l'erosió, la bioturbació i la tipologia del sòl (estructura i distribució en profunditat de les argiles i la fracció orgànica)



**Figura 5.3.1.** Perfil de  $^{137}\text{Cs}$  del sòl SOLE1 ajustat a la funció de pic en superfície (5.2). **Figura 5.3.2.** Perfil de  $^{137}\text{Cs}$  del sòl SOSO1 ajustat a la funció exponencial (5.1).

(VandenBygaart, 1999). L'equació de pic en superfície (5.2) (Fig. 5.3.1) i l'equació exponencial (5.1) (Fig. 5.3.2) són les distribucions més habituals en sòls naturals, considerats no alterats. L'altra equació proposada (5.3) també es descriu en la bibliografia per a sòls del tipus no conreats. En la figura 5.3.1 presentem un ajust mitjançant el model de l'equació de pic al perfil de  $^{137}\text{Cs}$  del sòl SOLE1 ( $r^2 = 0.82$ ). Observem com la corba del perfil s'ajusta bé al model proposat. En la figura 5.3.2 es presenta l'ajust del perfil de  $^{137}\text{Cs}$  del SOSO1 al model exponencial (5.1), amb una molt bona correlació de  $r^2 = 0.99$ .

En la figura 5.3.3 i en les taules 9.7 a 9.13 de l'annex es presenten els perfils d'activitat del  $^{137}\text{Cs}$  i del  $^{210}\text{Pb}$  en excés de tots els sòls estudiats en aquest treball. Com podem observar, els perfils presenten el 90% de la concentració de  $^{210}\text{Pb}$  en excés i de  $^{137}\text{Cs}$  en els primers 15 centímetres, adsorbits fortament en la fracció orgànica i en les argiles (Walling *et al.*, 1997; Smith *et al.*, 1997, i Brandford *et al.*, 1997). El  $^{210}\text{Pb}$  de base pren uns valors mitjans de  $33 \pm 2$  Bq kg $^{-1}$  (SOLE1),  $14 \pm 4$  (SOBA1),  $9 \pm 3$  Bq kg $^{-1}$  (SOAG1),  $18 \pm 4$  Bq kg $^{-1}$  (SOP01),  $23 \pm 5$  Bq kg $^{-1}$  (SOCRAM) i finalment  $71 \pm 14$  en el SOSO1. Exceptuant el sòl de Sort, que a causa de la naturalesa ígnia del material presenta uns nivells més elevats, els valors d'activitat són molt similars als observats per Navas i col·laboradors (2002) en els sòls del Pirineu aragonès. Tots els sòls presenten una activitat de  $^{137}\text{Cs}$  superficial d'entre 23-31 Bq kg $^{-1}$ , excepte el sòl de Vielha (SOCRAM) que presenta una activitat més elevada, de  $106 \pm 3$  Bq kg $^{-1}$  i el de Sort, amb  $31 \pm 3$  Bq kg $^{-1}$  de  $^{137}\text{Cs}$ . Les activitats de  $^{210}\text{Pb}$  en excés en superfície són força variables. El sòl de Lleida pren un valor de  $54 \pm 7$  Bq kg $^{-1}$ . A Balaguer l'activitat superficial és de  $66 \pm 2$  Bq kg $^{-1}$  i a la zona d'Àger de  $26 \pm 1$  Bq kg $^{-1}$ , a la Pobla de Segur el  $^{210}\text{Pb}$  en excés superficial és de  $38 \pm 3$  Bq kg $^{-1}$  i finalment en el SOCRAM (Vielha) observem un valor molt més elevat que a la resta, amb  $109 \pm 2$  Bq kg $^{-1}$ .

### 5.3.1.2 Inventari de $^{210}\text{Pb}$ en excés i $^{137}\text{Cs}$

Els inventaris dels sòls ens permeten determinar el flux atmosfèric tot eliminant els possibles aportos laterals que alterarien el senyal del radionúclid (vegeu apartat 5.3.1.3).

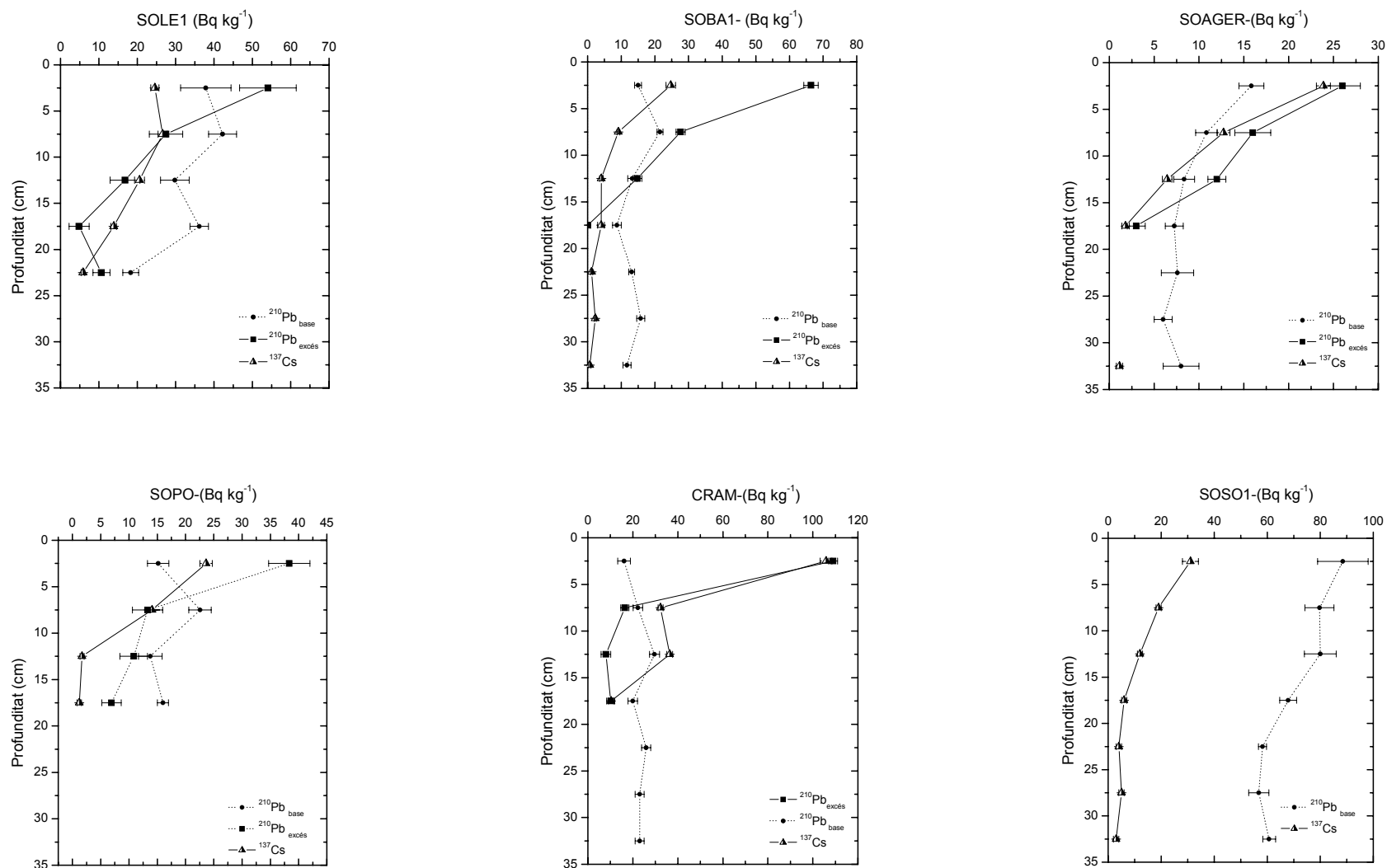


Fig 5.3.3. Perfils de  $^{210}\text{Pb}$  en excés,  $^{210}\text{Pb}$  de base i de  $^{137}\text{Cs}$  en diferents sòls obtinguts al llarg de la conca de la Noguera Pallaresa.

A la taula 5.3.1 es presenten els valors dels inventaris dels sòls mostrejats a la conca de la Noguera Pallaresa. Assumim que la totalitat dels radioelements es troben retinguts a la capa superficial del sòl i que el  $^{210}\text{Pb}$  i el  $^{137}\text{Cs}$  estan en estat estacionari entre la deposició atmosfèrica i la desintegració radioactiva. Llavors l'inventari de  $^{210}\text{Pb}$  en excés calculat en el sòl de Lleida (SOLE) és de  $2048 \pm 178 \text{ Bq m}^{-2}$  i de  $1749 \pm 44 \text{ Bq m}^{-2}$  pel  $^{137}\text{Cs}$ . L'inventari de Balaguer (SOBA) pren un valor més elevat de  $3155 \pm 85 \text{ Bq m}^{-2}$  i de  $1448 \pm 53 \text{ Bq m}^{-2}$  pel  $^{210}\text{Pb}$  en excés i el  $^{137}\text{Cs}$  respectivament. El sòl d'Àger (SOAG) mostra un inventari de  $^{210}\text{Pb}$  en excés molt similar al de Balaguer, amb  $2988 \pm 161 \text{ Bq m}^{-2}$  i un inventari de  $^{137}\text{Cs}$  de  $2414 \pm 75 \text{ Bq m}^{-2}$ . El sòl de la Pobla de Segur (SOPO) presenta un inventari de  $^{210}\text{Pb}$  en excés de  $5033 \pm 275 \text{ Bq kg}^{-1}$ , 1.7 vegades superior al d'Àger i de 2.4 vegades superior al de Lleida. L'inventari de  $^{137}\text{Cs}$  és de  $2943 \pm 107$ , 1.2 vegades més gran que el d'Àger i 1.7 vegades superior al de Lleida. Finalment el sòl de Vielha (SOCRAM) presenta el major inventari de  $^{137}\text{Cs}$ , amb  $5142 \pm 95 \text{ Bq m}^{-2}$ , 1.7 vegades superior al SOPO, 2.1 vegades superior al SOAG, 3.6 vegades més gran que el SOBA i 2.9 vegades superior al SOLE.

A taula 5.3.2 també es presenten els inventaris de diversos sòls reportats a la bibliografia. Els inventaris de  $^{210}\text{Pb}$  en excés dels diferents sòls són comparables entre ells si considerem que el flux de  $^{210}\text{Pb}$  constant en el temps. Per contra, alhora de comparar els inventaris de  $^{137}\text{Cs}$  seria necessari fer una correcció per desintegració radioactiva a la seva data de mostreig del sòl. En la figura 5.3.4 es mostra la correlació lineal entre l'inventari de  $^{137}\text{Cs}$  dels sòls mostrejats i la precipitació (veure mapa pluviomètric figura 5.3.6). La recta s'ajusta amb un factor de correlació de  $r^2=0.90$ . Podem apreciar com en les zones amb poca precipitació, com ara Lleida, Balaguer o Àger ( $400\text{-}500 \text{ mm a}^{-1}$ ), els inventaris són menors que a les regions amb pluviometries més elevades: la Pobla de Segur ( $850\text{-}900 \text{ mm a}^{-1}$ ), l'estació del CRAM o el Llac Redó, amb pluviometries anuals de  $1250\text{-}1300 \text{ mm a}^{-1}$  i  $1400\text{-}1500 \text{ mm a}^{-1}$  respectivament. Per tant, s'observa un clar control per part de la pluviometria en l'inventari total dels radioelements en els sòls.

### 5.3.1.3 Flux atmosfèric de $^{210}\text{Pb}$ en excés

El càlcul del flux de  $^{210}\text{Pb}$  en excés atmosfèric es fa a partir de la mesura dels inventaris dels radionúclids en els dipòsits naturals com ara, sòls estables, torberes i glaciers. Aquests dipòsits reben únicament l'entrada del radioelement de procedència atmosfèrica, eliminant així les possibles entrades laterals (Turekian *et al.*, 1977). Cal tenir present que el flux atmosfèric que es diposita en el sediment depèn de diferents factors com ara la latitud, la precipitació (intensitat i durada), així com la tipologia del sòl (orgànic o mineral) que determina la facilitat d'adsorció dels radioelements. El flux de  $^{210}\text{Pb}$  en excés es considera constant en una escala temporal d'anys (Smith *et al.*, 1997) i es calcula multiplicant l'inventari de  $^{210}\text{Pb}$  en excés per la constant de desintegració del  $^{210}\text{Pb}$  ( $0.0311 \text{ a}^{-1}$ ).

La raó entre el flux i la precipitació mitjana anual ens permet estimar de manera aproximada la concentració de  $^{210}\text{Pb}$  en l'aigua de pluja. A la taula 5.3.1 es presenten els resultats dels fluxos de  $^{210}\text{Pb}$  excés a la conca de la Noguera Pallaresa i l'estimació dels nivells de  $^{210}\text{Pb}$  en aigua de pluja. La ciutat de Lleida ( $395 \text{ mm a}^{-1}$ ) presenta un flux de  $63 \pm 5 \text{ Bq m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  i una concentració aproximada en l'aigua de pluja de  $159 \text{ Bq m}^{-3}$ . A les proximitats de Balaguer el flux de  $^{210}\text{Pb}$  en excés és de  $96 \pm 3 \text{ Bq m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  amb una pluviometria mitjana anual de  $450 \text{ mm a}^{-1}$  i una concentració en aigua de pluja estimada en  $213 \text{ Bq m}^{-3}$ . A la zona d'Àger ( $500\text{-}550 \text{ mm a}^{-1}$ ) el flux és molt similar al de Balaguer, amb  $91 \pm 5 \text{ Bq m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  i una estimació de  $165 \text{ Bq m}^{-3}$  de  $^{210}\text{Pb}$  en l'aigua. A la Pobla de Segur ( $850\text{-}900 \text{ mm a}^{-1}$ ) el flux és més elevat, amb



**Taula 5.3.1.** Inventaris de  $^{210}\text{Pb}$  en excés i  $^{137}\text{Cs}$ , flux atmosfèric i estimació de la concentració de  $^{210}\text{Pb}$  en aigua de pluja a partir de les mostres de sòls obtingudes a la conca de la Noguera Pallaresa.

Autor	Data de mostreig	Localització	Precipitació mitjana anual (mm)	Inventari $^{210}\text{Pb}$ en excés (Bq m <sup>-2</sup> )	Inventari $^{137}\text{Cs}$ (Bq m <sup>-2</sup> )	Flux atmosfèric $^{210}\text{Pb}$ (Bq m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	Estimació en aigua de pluja de $^{210}\text{Pb}$ (Bq m <sup>-3</sup> )
SOLE1	Febrer 2001	Lleida	395	2048 ± 178	1749 ± 44	63 ± 5	159
SOBA1	Febrer 2001	Balaguer	450	3155 ± 85	1448 ± 53	96 ± 3	213
SOAG1	Febrer 2001	Àger	500-550	2988 ± 161	2414 ± 75	91 ± 5	165
SOP01	Febrer 2001	Pobla de Segur	850-900	5033 ± 275	2943 ± 107	154 ± 8	176
SOCRAM	Juliol 2003	CRAM (Vielha)	1250-1300	-	5142 ± 95		

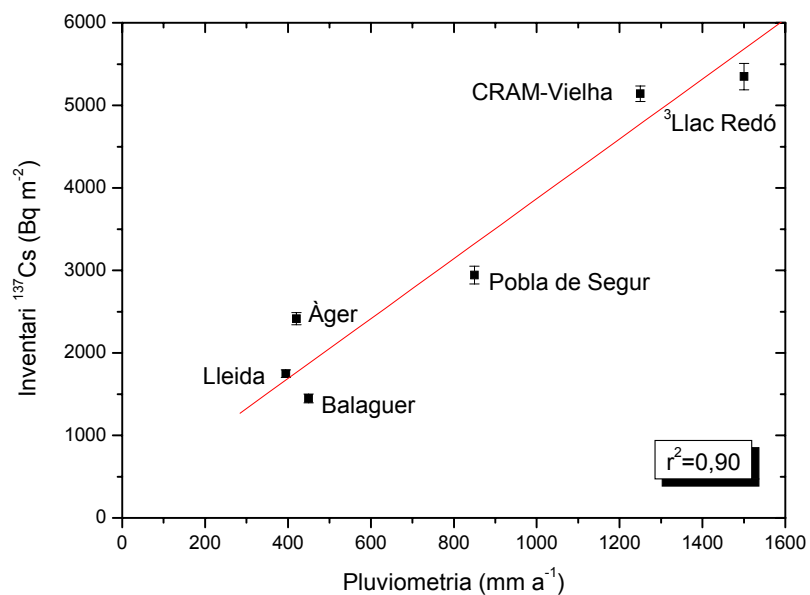
un valor de  $154 \pm 8$  Bq m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> i una concentració en pluja de  $176$  Bq m<sup>-3</sup>. Finalment, el registre del flux atmosfèric de  $^{210}\text{Pb}$  en excés a l'estació del CRAM ( $1400\text{-}1500$  mm a<sup>-1</sup>) s'ha adaptat del treball d'Appleby i col·laboradors (2000) amb un valor de  $186 \pm 10$  Bq m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>. El Llac Redó també presenta una pluviometria semblant ( $1500$  mm a<sup>-1</sup>) i Appleby i col·laboradors (2000) reporten un flux de  $255 \pm 8$  Bq kg<sup>-1</sup>. En el nostre estudi també hem afegit el punt de la península dels Alfacs al delta del riu Ebre, amb un valor de  $81.2$  Bq m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> mesurat en el nostre laboratori per Sanchez-Cabeza i col·laboradors (1999) a partir d'una mostra de tapet microbià.

Les zones seques, amb poca precipitació presenten uns inventaris i fluxos baixos (Milton, *et al.*, 2001). A la zona del delta de l'Ebre, la pluviometria és més elevada ( $559$  mm a<sup>-1</sup>) que a la capital lleidatana ( $395$  mm a<sup>-1</sup>) i com a conseqüència el flux de  $^{210}\text{Pb}$  en excés és major. Lleida està situada a l'interior i per tant presenta una major producció de gas  $^{222}\text{Rn}$  de les masses de terra que l'envolten. Tanmateix, la precipitació és la principal variable que governa el procés de deposició i per tant en ploure menys implica una menor deposició de  $^{210}\text{Pb}$  en el sòl i un inventari menor. Aquest mateix comportament s'aprecia en la resta de sòls estudiats, on els inventaris i fluxos són elevats en les zones amb més precipitacions (Pobla de Segur, SOCRAM, i Llac Redó). En la figura 5.3.5 s'expressa l'ajust lineal entre la pluviometria i el flux de  $^{210}\text{Pb}$  en excés amb un bon coeficient de correlació de  $r^2 = 0.94$ , indicant l'estreta relació entre els ambdós paràmetres. A partir d'aquesta relació, per tant, podem establir quin és el flux de  $^{210}\text{Pb}$  en excés en qualsevol punt de la conca en funció de la pluviometria de la zona.

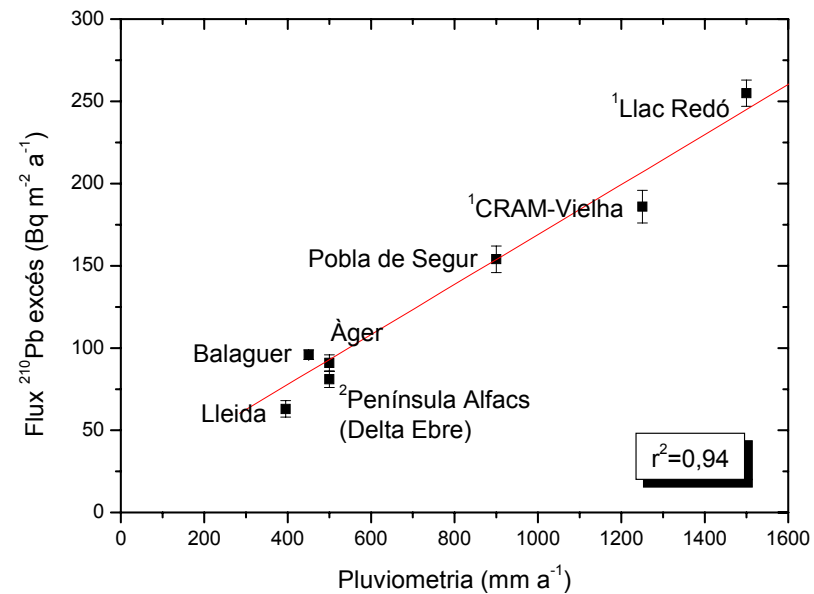
Els nostres valors de flux de  $^{210}\text{Pb}$  en excés són propers al valor promig de  $90$  Bq m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> calculat per l'Europa Central segons Dörr i Münnich (1989) a partir de la mitjana de 26 punts de mostreig repartits entre França, Itàlia, Alemanya, Irlanda, Suïssa, Dinamarca i Suècia. Turekian i col·laboradors (1977) també proposen per al continent europeu un interval de  $80$  a  $120$  Bq m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>. Winkler i col·laborador (2000) estableixen un flux mitjà de  $180$  Bq m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> a partir de mesures recollides a la localitat de Munich-Neuherberg (Sud Alemanya) des del 1981 fins al 1999. Garcia-Orellana (2004) estima un flux mitjà de  $78 \pm 13$  Bq kg<sup>-1</sup> en la conca oriental del mar Mediterrani i de  $71 \pm 23$  Bq kg<sup>-1</sup> en la conca occidental

**Taula 5.3.2.** Revisió dels valors de flux de  $^{210}\text{Pb}$  en excés mesurats a partir de sòls

Autor	Tipus mostra	Localització	Precipitació mitjana anual (mm)	Altitud (m)	$^{210}\text{Pb}$ en excés			$^{137}\text{Cs}$ en excés
					Inventari ( $\text{Bq m}^{-2}$ )	Flux atmosfèric ( $\text{Bq m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )	Estimació en aigua de pluja ( $\text{Bq m}^{-3}$ )	Inventari ( $\text{Bq m}^{-2}$ )
Appleby <i>et al.</i> , (2002)	sòl	Estany Redó	1400-1500	2240		$255 \pm 8$	175	$6911 \pm 146$
	sòl	Cram (Vielha)	1400-1500	2000		$186 \pm 10$	132	$5741 \pm 125$
Ani Rigolta Ioan (1996)	sòl	Estany Redó	1400-1500	2300	$4720 \pm 160$	147	137	$5350 \pm 160$
Sanchez-Cabeza <i>et al.</i> , (1999c)	tapet microbià	Delta de l'Ebre	558	0		81.2	146	
Graustein & Turekian (1986)	sòl	Canadian Shield			$4330 \pm 780$	135		$2687 \pm 647$
Milton <i>et al.</i> , (2001)	sòl	Petawawa, (Ontario)	$\approx 800$	$\leq 500$	5204	162		2679
	sòl	Peterborough	$\approx 800$	$\leq 500$	4370	136		1588
	sòl	Hamilton,	$\approx 800$	$\leq 500$	3380	105		1843
Smith <i>et al.</i> , (1997)	sòl	Blelham Tarn (UKt)			$4364 \pm 513$	136		$6496 \pm 110$
Dörr <i>et al.</i> , (1995)	sòl	Baden-Württemberg (Alemanya)		2400		40 – 200		
Mitchell <i>et al.</i> , (1990)	sòl	Phoenix Park (Irlanda)		784				$5071 \pm 189$
	sòl	Galway (Irlanda)		1119				$8348 \pm 237$
	sòl	Donegal (Irlanda)		2170				$8555 \pm 182$
Appleby <i>et al.</i> , (1992)	torbera	Suïssa				121–149		
He <i>et al.</i> , (1996)	sòl	Jackmoor, Devon, UK	850		3050	95	112	2000
	sòl	River Star, Devon, UK	1150		4500	162	141	2500
Heyraud, (1982)	sòl	Mónaco				110		
Theocharopoulos <i>et al.</i> , (2000)	sòl	Grècia	54	850				6000



**Figura 5.3.4.** Correlació entre l'inventari de <sup>137</sup>Cs dels sòls i la precipitació.  
<sup>3</sup>Appleby et al., (2002).



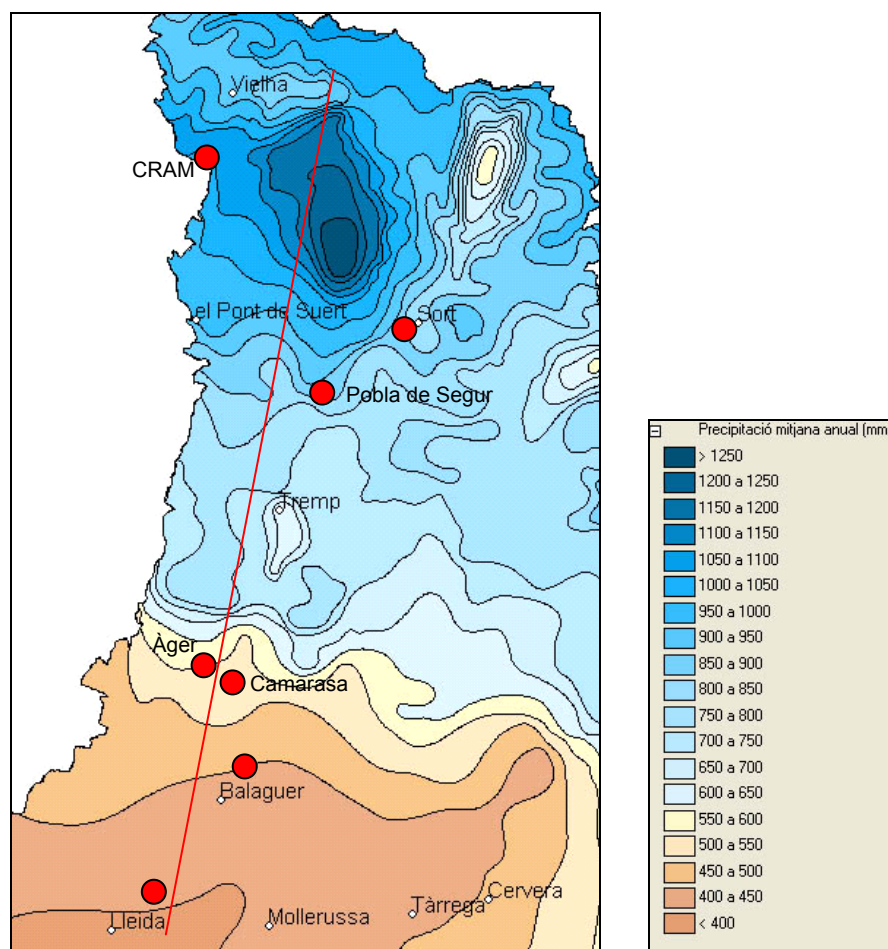
**Figura 5.3.5.** Fluxos de <sup>210</sup>Pb en excés dels sòls en funció de la precipitació.  
<sup>1</sup>Appleby et al., (2002). <sup>2</sup>Sanchez-Cabeza et al., (1999c).

mediterrània, a partir de diversos sòls mostrejats a la costa i en diferents illes. Destacar també el treball de Preiss i col·laboradors (1996) que han elaborat una completa base de dades on es recull la concentració de  $^{210}\text{Pb}$  en aire així com les diferències regionals en el flux de  $^{210}\text{Pb}$  en excés d'arreu del món (vegeu taula 5.3.2).

### **5.3.2 El factor de focalització a l'embassament de Camarasa**

El factor de focalització o “focusing” (FF) del  $^{210}\text{Pb}$  en excés expressa el grau d'acumulació de material que es sedimenta de manera diferenciada en les diferents parts del vas sedimentari que, com ja sabem, varia segons la localització en el sistema, la morfologia de la cubeta i la hidrodinàmica dels corrents. El FF es determina com la relació entre l'inventari de  $^{210}\text{Pb}$  en excés d'un sòl o testimoni sedimentari (en el nostre cas els testimonis de l'embassament de Camarasa) i l'inventari de  $^{210}\text{Pb}$  en excés d'un sòl de les proximitats que no hagi sofert processos erosius. Els inventaris de  $^{210}\text{Pb}$  en excés dels testimonis de Camarasa han estat estimats fins a una data de referència (els darrers 15 anys) mitjançant el  $^{137}\text{Cs}$  per poder-los comparar entre ells, ja que no tenim els inventaris de  $^{210}\text{Pb}$  complets, i obtenir així uns FF també comparables.

Com que no disposem d'un sòl sense erosionar a les proximitats de l'embassament de Camarasa, hem calculat l'inventari d'un sòl teòric a partir de la figura 5.3.4, on es representa l'ajust lineal del flux atmosfèric de  $^{210}\text{Pb}$  en excés en funció de la pluviometria. Mitjançant aquest ajust el flux atmosfèric estimat a la regió de l'embassament de Camarasa ( $450\text{-}500\text{ mm a}^{-1}$ ) s'estima en  $81 \pm 8\text{ Bq m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ . Com a resultat, el testimoni més proper a la presa, l'SCA1, és el que presenta una focalització de  $^{210}\text{Pb}$  en excés més important, i per tant també de material sedimentari. El seu factor és 7 i és el més elevat a causa de l'efecte barrera de la presa, que atura els corrents i fa sedimentar el material. La resta dels testimonis sedimentaris també presenten cert grau de focalització, d'entre 2 i 3 vegades superior a la quantitat de  $^{210}\text{Pb}$  atmosfèric que rep el sòl. Per tant és evident l'efecte de focalització sedimentària que provoca l'embassament en totes les seves parts de la cubeta.



**Fig 5.3.6.** Mapa pluviomètric de la conca de la Noguera Pallaresa i Noguera Ribagorçana on s'indiquen els punts de mostreig de sòls (Font: Base cartogràfica del Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya, 1996).

**Taula 5.3.3.** Inventaris de  $^{210}\text{Pb}$  en excés en els darrers 15 anys dels testimonis sedimentaris de l'embassament de Camarasa.

Mostres	Inventari $^{210}\text{Pb}$ excés (Bq m <sup>-2</sup> ) referenciat als 15 anys
SCA1	8117 ± 55
SCA8	2743 ± 18
SCA2	2307 ± 51
SCA5	3097 ± 52
SOLE1	938 ± 81
SOCA*	1215 ± 120

\*estimat per regressió. Vegeu figura 5.3.5

**Taula 5.3.4.** Factors de focalització a l'embassament de Camarasa

Testimonis sedimentaris	FF
SCA1	6.7 ± 0.7
SCA8	2.3 ± 0.2
SCA2	1.9 ± 0.2
SCA5	2.5 ± 0.3

