



**Universitat de les  
Illes Balears**

**HIDROLOGIA I**

**TRANSPORT DE SEDIMENT EN SUSPENSÍO**

**A UNA CONCA DE DRENATGE**

**DEL PLA DE MALLORCA**

*Memòria d'investigació*

**AUTOR: JOAN JOSEP ESTRANY BERTOS**

**DIRECTOR: CELSO GARCIA GARCIA**

**Departament de Ciències de la Terra**

**Juliol de 2008**

***“Un bon científic és aquell que és capaç de fer-se a sí mateix la pregunta  
correcta”.***

**Luna B. LEOPOLD, Geomorfòleg**

**HIDROLOGIA I**  
**TRANSPORT DE SEDIMENT EN SUSPENSÍO**  
**A UNA CONCA DE DRENATGE**  
**DEL PLA DE MALLORCA**

**AUTOR: JOAN JOSEP ESTRANY BERTOS**

Memòria d'investigació dirigida pel

Dr. Celso Garcia Garcia

Titular d'Escola Universitària

de Geografia Física

Universitat de les Illes Balears

Vist-i-plau

**Dr. Celso Garcia Garcia**

Departament de Ciències de la Terra

Palma, Juliol 2008

# ÍNDEX

<b>1. INTRODUCCIÓ</b> .....	1
<b>1.1. Perspectiva global</b> .....	1
<b>1.2. Context</b> .....	5
<b>1.2.1. Hidrologia</b> .....	5
<b>1.2.2. Transport de sediment</b> .....	7
<b>1.3. Antecedents a la regió mediterrània</b> .....	8
<b>1.3.1. Hidrologia</b> .....	9
<b>1.3.2. Transport de sediment en suspensió</b> .....	11
<b>1.4. Objectius</b> .....	13
<b>2. ÀREA D'ESTUDI</b> .....	15
<b>3. MÈTODES</b> .....	21
<b>3.1. Treball de camp</b> .....	21
<b>3.1.1. Construcció i instrumentació automàtica de l'estació</b> .....	21
<b>3.1.2. Mostreig de CSS</b> .....	23
<b>3.2. Treball de laboratori</b> .....	24
<b>3.2.1. Transformació del registre continu de CSS</b> .....	24
<b>3.2.2. Determinació de la CSS</b> .....	25
<b>3.3. Computació i anàlisi de dades</b> .....	26
<b>3.3.1. Dades hidrològiques</b> .....	26
<b>3.3.2. Dades de sediment en suspensió</b> .....	30
<b>4. RESULTATS</b> .....	34
<b>4.1. Hidrologia</b> .....	34
<b>4.1.1. Balanç hídric simple</b> .....	34

<b>4.1.2. Components d'escolament i corba de duració de cabals.....</b>	<b>37</b>
<b>4.1.3. Dinàmiques d'escolament base: les corbes de recessió.....</b>	<b>41</b>
<b>4.1.4. Dinàmiques de l'escolament directe: les relacions escolament-precipitació a escala temporal d'event.....</b>	<b>45</b>
<b>4.2. Transport de sediment en suspensió .....</b>	<b>48</b>
<b>4.2.1. Magnitud i duració de la concentració del sediment en suspensió (CSS).....</b>	<b>48</b>
<b>4.2.2. La relació entre cabal i concentració del sediment en suspensió Q/CSS.....</b>	<b>51</b>
<b>4.2.3. Relacions multivariants en la concentració del sediment en suspensió (CSS).....</b>	<b>52</b>
<b>4.2.4. Exportació i taxes de producció de sediment en suspensió.....</b>	<b>56</b>
<b>5. CONCLUSIONS.....</b>	<b>63</b>
<b>5.1. Hidrologia.....</b>	<b>63</b>
<b>5.2. Transport de sediment en suspensió.....</b>	<b>66</b>
<b>6. AGRAÏMENTS .....</b>	<b>70</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>71</b>

## **1 INTRODUCCIÓ.**

### **1.1. Perspectiva global**

Amb la publicació del llibre *De l'origine des fontaines* a París el 1674, on Pierre Perrault demostrà quantitativament que la pluja i la neu eren responsables del flux del riu Sena, es va produir un gran avançament en el pensament hidrològic i va suposar l'inici de la hidrologia científica. Remuntant al segle XX, els coneixements en hidrologia han anat evolucionant des de la concepció de la generació d'escolament proposada per Horton (1933) fins a la idea de l'existència d'un continu de processos que impliquen que la resposta hidrològica d'una conca de drenatge és el resultat d'un conjunt de processos actius en diferents punts d'aquesta conca (Soorooshian, 1983). Així, es considera la conca de drenatge com un sistema espacialment organitzat que permet comprendre i modelitzar correctament la variabilitat espaciotemporal de la resposta hidrològica, assimilant-la a un sistema dinàmic (Hewlett et al., 1969).

En el sistema fluvial es pot considerar l'aigua com a l'element integrador i la seva organització en el sistema conca de drenatge, el qual pot abastar tots els aspectes geogràfics (Chorley & Kates 1973, Smith 1969). És evident que es tracta d'una unitat hidrològica i també climatològica, però també ho és en la geomorfologia dinàmica (Chorley, 1969), sobre tot basant-se en els treballs ja clàssics de Rapp i Leopold i els posteriors de Schick (1977) i Dietrich & Dunne (1978). Els primers estudis de dinàmica ambiental geomorfològica realitzats en el marc d'una conca són els de Rapp (1960) en alta muntanya i de Leopold et al., 1966 en un medi semiàrid. En els dos casos es tractava d'estudis quantitativament orientats a validar teories sobre el funcionament integrat de

vessants (moviments en massa en el cas de Rapp i rentats de vessants en el cas de Leopold) i dinàmica fluvial (magnitud de les crescudes, el seu poder de transport i la seva acció mecànica), en relació a paràmetres climàtics (intensitats i períodes de retorn) i biogeogràfics (recubrimient i dinàmica vegetal). Més endavant, sorgí el concepte de balanç de sediment (Dietrich & Dunne, 1978) i amb ell els intents d'integració de totes les variables ponderant el seu respectiu valor en la dinàmica d'una conca. Amb tot, la conca de drenatge -com a unitat d'estudi- ha possibilitat un gran progrés en el coneixement dels processos hidrològics, i geomorfològics. Al concepte conca de drenatge -superfície drenada aigües amunt d'un punt definint la seva sortida- cal afegir-hi els conceptes de conca representativa i conca experimental, els quals s'han utilitzat tradicionalment en hidrologia (UNESCO-OMM, 1992):

- Representativa: conca que permet l'estudi del cicle hidrològic sense més perturbacions que les que es troben a la regió, mitjançant l'observació simultània de variables hidrometeorològiques i hidromètriques, amb l'objectiu de permetre una generalització dels resultats. La superfície d'aquestes conques varia generalment entre 1 i 250 km<sup>2</sup>.
- Experimental: és una conca en la que les característiques fisiogràfiques (freqüentment la coberta vegetal) són voluntàriament modificades amb l'objectiu d'analitzar les conseqüències hidrològiques d'aquestes modificacions. Normalment la seva superfície no supera els 4 km<sup>2</sup>.

La conca de Can Revull, objecte d'estudi d'aquesta memòria, es pot considerar com a representativa, tant per la seva superfície (1,03 km<sup>2</sup>) com pel mètode de treball, ja que no es tracta d'induir cap tipus de modificació deliberada a la

conca, sinó de mesurar els processos hidrològics i –donat el cas- mesurar les conseqüències de canvis que es puguin produir a la conca de forma aliena a la investigació.

La geomorfologia, per la seva part, té un recorregut històric de no gaire més de 100 anys, essent la ciència que estudia les formes del relleu de la superfície terrestre, els processos que l'originen i la seva evolució. Segons Brown (1970), l'estudi de les formes del relleu s'ha d'abordar des de tres perspectives principals:

1. La informació sobre les formes del relleu i sobre la distribució espacial d'aquestes formes ha de ser obtinguda mitjançant la cartografia i la mesura.
2. Aquesta informació ha de ser recollida sobre els processos que es mostren a la superfície de la terra actualment, ja que aquests processos són responsables de la producció de les formes particulars del relleu.
3. L'anàlisi dels dipòsits pot proporcionar una informació considerable sobre els processos i sobre la cronologia dels events que han tingut lloc en el passat.

Aquestes tres fonts d'informació són fonamentals per a l'estudi de la geomorfologia, però no sempre és fàcil relacionar-les i integrar-les. Així, la dificultat més important és la dicotomia entre procés i forma ja que a moltes àrees els processos que tenen lloc actualment no són els responsables de les formes presents. Una altra dificultat afegida és que els processos geomorfològics requereixen d'una instrumentació i el seu estudi és molt més laboriós que l'estudi de les formes. Per tant, es produeix un dilema entre els



geomorfòlegs: estudiar els processos o estudiar les formes. A partir d'aquí s'han desenvolupat dos tipus d'enfocaments. Ambdós estan igualment relacionats i depenen d'altres disciplines. Per una banda, el grup de formes es relaciona amb la geologia i el quaternari. Per una altra, el grup de processos ho fa de la hidrologia i la sedimentologia. Val a dir, emperò, que la informació que proporciona l'estudi dels processos és cada vegada més rellevant per a la major part de la geografia física i de la geografia humana, mentre que la informació de les formes (factors geològics/cronològics orientats a la geomorfologia) es troba cada vegada més allunyada dels esdeveniments més recents de la geografia humana. Amb tot, la millor manera de superar aquest dilema passa perquè els camps de recerca requereixin de l'anàlisi de les formes així com dels processos, de la geomorfologia i de la climatologia, de la geografia física i de la humana. Definitivament, la investigació ha de derivar en l'estudi de les relacions forma-procés ja que aquestes relacions proporcionaran resultats per comprendre el passat, pronosticar el futur i obtenir variables aplicades a d'altres àmbits de la geografia (Gregory & Walling, 1973).

A qualsevol camp d'estudi dels processos en geomorfologia, les mesures d'aquests processos és essencial. Sense les mesures, les teories i les estimacions no poden ser revalidades, a més de no poder-se establir relacions quantitatives entre la forma i el procés. Dins de l'àmbit d'aplicació de la geomorfologia fluvial, la instrumentació de la conca de drenatge pot proporcionar dades quantitatives sobre la dinàmica particular dels processos i sobre la seva magnitud i freqüència. Per tant, la comprensió dels processos hidrològics i de transport de sediments a una conca de drenatge és el procediment més indicat per proporcionar elements útils a la gestió sostenible

dels recursos hídrics i territorials (Walling & Collins, 2000). Aquesta identificació, així com la caracterització de la dinàmica espaciotemporal dels processos i formes, és un procediment de llarga durada, sovint enutjós i normalment infravalorat. Malgrat la seva importància de sobres reconeguda, les dades hidrològiques i de transport de sediment estan en clar retrocés (Takeuchi, 2002) mentre que la modelització en ple auge, encara que l'aproximació experimental de camp és del tot indispensable pel desenvolupament i avaluació d'aquests models.

## **1.2. Context**

### **1.2.1. Hidrologia**

Els conreus herbacis de secà són un dels elements agrícoles més representatius de les regions de clima mediterrani. A les Illes Balears, aquest tipus de conreu ocupa més del 25% de les terres conreades, mentre que a Espanya se supera el 40% (INE, 2003). La causa principal d'aquest important pes relatiu rau en que el clima mostra uns patrons de precipitació força irregulars que no permeten mantenir una activitat agrícola intensiva.

Els conreus herbacis necessiten créixer en sòls profunds per afavorir el desenvolupament dels seus sistemes radicals. Arabé, la textura dels sòls pot ser un factor limitant per aquests conreus, especialment pels cereals. D'aquesta manera, textures fines mostren una elevada capacitat de camp, emmagatzemant massa aigua durant els hiverns plujosos. En canvi, els sòls arenosos ofereixen una menor capacitat de camp que requereix d'elevades precipitacions a la primavera. En definitiva, les condicions edàfiques adequades

serien aquelles en que s'exhibís una elevada capacitat de camp però amb un bon drenatge (Porta et al., 1999).

A moltes regions mediterrànies, la precipitació es produeix principalment a l'hivern, seguida per una primavera més càlida i amb menor precipitació. A més a més, en aquestes regions, els conreus herbacis de secà es localitzen a sòls argilosos, fet que implica una notable disposició d'aigua gràcies a l'elevada capacitat de camp però amb punts de marcescència permanents. Per tant, aquelles plantes amb creixement ràpid i bona extensió dels seus sistemes radicals es veuran afavorides per una abundant disposició d'aigua. També cal destacar que els sòls argilosos tenen una elevada capacitat d'intercanvi catiònic i aniònic, la qual proporciona una reserva massiva de nutrients, disminuint els índexs d'aplicació de fertilitzants (Reid & Parkinson, 1981).

Tots aquests factors climàtics i edàfics descrits fan que la instal·lació d'un sistema de drenatge subsuperficial artificial o albellonatge esdevingui essencial ja que és l'única manera de drenar aquells sòls de textures fines a zones planes durant l'humit hivern mediterrani (Grimalt et al., 2002). Es tracta d'una pràctica de gestió agrícola de l'aigua a regions que estacionalment mostren nivells freàtics elevats, textures de sòls fines i vessants còncaus (Stone & Krishnappan, 1997). Aquest albellonatge evacua l'excés d'aigua del sòl, la qual impediria que l'aire i l'oxigen arribassin a les arrels de les plantes. Sense aquest drenatge artificial, les plantes tindrien importants dificultats per establir un sistema radical sa. Per tant, es proporciona el mecanisme perquè aquests sòls drenin a capacitat de camp en un termini raonablement curt de temps fent que el creixement de les plantes no es vegi significativament afectat (Skaggs et al., 1994). Aquesta tècnica s'ha practicat durant més de dos mil anys arreu

d'Europa. A alguns països com el Regne Unit, Holanda, Finlàndia o Romania més del 60% de les terres conreades estan drenades subsuperficialment (Green, 1979). Endemés, aquesta pràctica permet operacions de llaurat i sembra durant la primavera i que són dutes a terme d'una manera més eficient i oportuna. Depenent de les precipitacions estacionals, això pot afegir dies, fins a una setmana o més, a la durada del període vegetatiu, proporcionant una altra font potencial de millora del rendiment dels conreus.

### **1.2.2. Transport de sediment**

Mentre que l'albellonatge és una pràctica tradicional d'evacuació de l'excés hídric dels sòls a les zones planes on predominen els conreus herbacis de secà, a les zones abruptes s'han implementat pràctiques tradicionals de conservació del sòl suposant una reducció en l'exportació de sediments. En molts casos, aquestes pràctiques tenen com a objectiu incrementar la capacitat de retenció d'humitat així com reduir els impactes que provoca l'erosió en els vessants (*on-site impacts*) tals com la disminució de productivitat dels sòls i de les collites (Walling, 2006). Durant més de dos mil anys, als països mediterranis s'han aplicat aquestes tècniques tradicionals de conservació del sòl tals com el marjament i els parats (Grimalt et al., 1992; Zgaier & Inbar, 2005) amb l'objectiu de proporcionar una protecció efectiva dels sòls agrícoles.

L'exportació de sediment en suspensió (SS) representa la suma de l'erosió de totes aquelles zones actives dins una conca de drenatge, encara que els valors d'exportació de SS no poden ser usats com a un indicador fiable de l'erosió dels vessants aigües amunt ja que hi ha una sèrie de limitacions relacionades

amb l'emmagatzematge de sediment i l'origen heterogeni del SS (Walling & Collins, 2000).

Els valors d'exportació de SS han estat calculats tradicionalment a partir de les corbes de regressió establertes entre la concentració de SS (CSS) i el cabal, basant-se en la recollida de mostres infreqüents per determinar la CSS. La disponibilitat de registres detallats de CSS proporcionats pel monitoratge continu de la terbolesa, a més de permetre una notable millora del càlcul d'exportació del sediment, proporciona un ajut per obtenir un coneixement detallat dels processos actius de producció de SS en una conca de drenatge (Walling & Webb, 1987). A més a més, cal tenir en compte que a àrees amb un fort contrast estacional –com el Mediterrani– les corbes de regressió no poden sempre ser establertes entre el cabal i la CSS, fet que suggereix que l'energia del flux no és un factor predominant en els processos d'erosió dels sòls (Sutherland & Bryan, 1989). En aquest sentit, alguns autors (Walling, 1974; Richards & Moore, 2003; Seeger et al., 2004) han avaluat les formes multivariants incloent factors derivats de cada crescuda. Altres models han intentat millorar la comprensió de les dinàmiques del transport de SS usant tècniques com la de separació dels components de l'hidrograma i així poder establir relacions entre la CSS i el cabal (Walling & Webb, 1982).

### **1.3. Antecedents a la regió mediterrània**

Molt poca atenció s'ha esmenat al comportament hidrològic i a la dinàmica del transport de sediment d'aquells paisatges mediterranis dominats pels conreus. A més de posseir una importància ambiental i socioeconòmica destacada, cal

tenir en compte que l'agricultura és un dels factors principals en el desenvolupament de processos erosius (Douglas, 1993) així com en la modificació considerable de la majoria de processos desenvolupats en el sistema hidrològic natural (Walling, 1979).

### **1.3.1. Hidrologia**

El funcionament hidrològic particular de les conques mediterrànies és encara força desconegut malgrat els diferents estudis realitzats en els darrers vint anys. Si bé qualcunes característiques comunes poden generalitzar-se, la modelització hidrològica d'aquest funcionament presenta nous problemes, diferents dels que generalment es troben a les conques més humides (Latron, 2003).

A zones planes ocupades per usos agrícoles són pocs els estudis que han proporcionat dades sobre els processos hidrològics. Així, Ceballos & Schnabel (1998) aborden els processos hidrològics a les zones de devesa, sistema d'ús del sòl que representa més de la meitat de les terres utilitzades per l'agricultura en el sud-oest de la Península Ibèrica i que pot definir-se com un paisatge semi-natural on predomina el clima mediterrani semi-àrid. A Moussa et al. (2002), s'avalua el paper de les pràctiques de llaurat i canalització de reg sobre els events de crescuda realitzant una modelització en una conca agrícola del sud de França, dins la mateixa regió climàtica que les Illes Balears.

Si a zones planes ocupades per usos agrícoles s'han realitzat pocs estudis hidrològics, val a dir que a zones forestals i de muntanya mediterrànies si se n'han desenvolupat. Pel que fa a les zones forestals, destaca la línia

d'investigació aplicada en el massís del Montseny (Catalunya) per part del Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals de la Universitat Autònoma de Barcelona, abordant nombroses parts del cicle hidrològic i la seva modelització a conques on l'alzinar (*Quercion ilicis*) és predominant (Piñol et al., 1991, 1992, 1997, 1999). En aquest mateix sentit però a la zona de Califòrnia, Lewis et al. (2000) aborden un estudi a llarg termini d'una petita conca forestal mediterrània.

Pel que fa al comportament hidrològic a les zones de muntanya mediterrànies, són destacables les línies d'investigació que du a terme el CSIC a través de l'Institut de Ciències de la Terra "Jaume Almera" (IJA) i l'Institut Pirenaico de Ecologia (IPE), com també la Universitat de Lleida amb el Grup de Riscs Hidrològics (GRIHD). L'IJA ha desenvolupat la seva tasca de recerca a les petites conques de drenatge de Vallcebre, situades a la capçalera del riu Llobregat, en el sud-est dels Pirineus, estudiant nombroses parts del cicle hidrològic així com els impactes que genera l'abandonament de terres conreades i marjades i la seva posterior reforestació (Gallart et al., 1994, 1997, 2002; Latron, 2003; Latron & Gallart, in press). L'IPE ha centrat la seva recerca a una sèrie de petites conques de drenatge del Pirineu Central estudiant la mateixa temàtica que l'IJA (García-Ruiz et al. 2000, 2005; Lana-Renault et al., 2007). Pel que fa al GRIHD està duent a terme l'estudi hidrològic de dues conques de drenatge de superfície mitjana als Pirineus centrals (Orozco et al., submitted; Poch & Orozco, submitted<sub>[u1]</sub>). Finalment, a zones de muntanya mediterrània semiàrida s'ha realitzat un estudi sobre la resposta hidrològica de les zones cobertes per vegetació de garriga (Castillo et al., 2000).

### **1.3.2. Transport de sediment en suspensió**

El coneixement de la dinàmica i transport del SS a conques de drenatge mediterrànies ha experimentat un important desenvolupament en els darrers 20 anys. A nivell global, cal destacar els estudis de comparació de taxes de producció de sediment a diferents regions mediterrànies del Món (Inbar, 1992), la informació cartogràfica i comparativa de taxes de producció de sediment en suspensió a la conca de la mar Mediterrània (Lewin et al., 1995) o la perspectiva regional, global i temporal sobre l'exportació de sediment dels rius mediterranis (Milliman, 2006).

Amb un nivell major de detall, a escala de conca de drenatge, s'han realitzat estudis que abasten tot l'espectre climàtic mediterrani. Així, Alexandrov et al. (2003) i Achite & Ouillon (2007) estudien la dinàmica del transport i producció de SS a canals efímers de zones de clima mediterrani semiàrid. A zones també semiàrides, destaca l'estudi de l'impacte en el transport de sediment en suspensió del sistema de devesa (Schnabel, 1997).

A les zones de muntanya de clima mediterrani també s'han desenvolupat línies de recerca destacades. Així, l'IJA, l'IPE i el GRHID, els tres centres esmentats anteriorment, han realitzat també estudis del transport de sediment en suspensió a les conques de drenatge descrites a la secció 1.3.1. Els dos primers centres han enfocat la seva recerca en avaluar fonamentalment els efectes de l'abandonament de terres agrícoles i marjades (Clotet et al., 1988; Llorens & Gallart, 1992; Lasanta et al., 2000; Llorens et al., 1997; García-Ruiz et al., 2008) així com la dinàmica del transport i producció de sediments (White et al., 1997; Soler et al., 2007, 2008; Seeger et al., 2004; Nadal-Romero et al.,



2008). Pel que fa al GRIHD, ha enfocat la seva recerca en la dinàmica del transport i producció de sediments (Balasch et al., 2005; Batalla et al., 2005a).

A nivell de conques de drenatge mediterrànies humides o subhumides, destaquen els treballs desenvolupats pel Grup de Recerca Ambiental Mediterrani (GRAM), el qual ha centrat la seva recerca a la Tordera, una conca de 898 km<sup>2</sup> situada a la serralada Costero-Catalana (Batalla et al., 1995; Batalla et al., 2005b; Rovira et al., 2005; Rovira & Batalla, 2006); a unes petites conques de drenatge de les Gavarres on predominen els usos forestals amb una reduïda presència d'usos agrícoles de secà (Sala & Farguell, 2002; Outeiro et al., 2006); i finalment a l'Anoia, la conca tributària més important del riu Llobregat, amb 926 km<sup>2</sup> (Farguell, 2005; Farguell & Sala, 2005).

A més dels treballs desenvolupats pel GRAM, en conques mediterrànies humides o subhumides es poden també destacar alguns altres estudis puntuals que es descriuen sumàriament a continuació. Així, Mimikou (1982) estudia les corbes de regressió Q-CSS a 4 conques de superfície mitjana a Grècia. Iroumé (1990) analitza els valors de CSS i proporciona les taxes de producció de SS a una conca de 0,93 km<sup>2</sup> de Xile. Djorovic (1992) proporciona taxes de producció de SS durant un període d'estudi de 10 anys a una conca de 96 km<sup>2</sup> a la part central de Sèrbia. Serrat et al. (1999) avaluen la dinàmica del transport i les taxes de producció de SS a una conca de 1.045 km<sup>2</sup> del sud de França. Finalment, Pavanelli & Pagliarani (2002), estudien la dinàmica del transport de SS mitjançant el monitoratge continu de la terbolesa en una conca de drenatge de 138 km<sup>2</sup> al nord d'Itàlia.

Finalment, s'han desenvolupat estudis del transport de SS a qualcunes de les grans conques mediterrànies que contenen una heterogeneïtat important dins

el clima mediterrani. Cal destacar els estudis realitzats al riu Roine (Pont et al., 2002), al Po (Davide et al., 2003), o a l'Ebre (Vericat & Batalla, 2006).

#### 1.4. Objectius

Un projecte de recerca s'està duent a terme a la conca del torrent de na Borges d'ençà el 2004, amb l'objectiu d'establir un balanç hidrològic i sedimentològic (Estrany & Garcia, 2005). En aquest context, Can Revull és un àrea representativa seleccionada per analitzar les dinàmiques hidrològiques i sedimentològiques així com la contribució de les subconques de capçalera al torrent de na Borges. Aquest estudi pretén millorar la comprensió de la hidrologia i del transport de sediment en suspensió de les àrees dominades per conreus herbacis de secà a regions mediterrànies així com el paper que juga l'albellonatge en les variacions d'escolament i les pràctiques tradicionals de conservació del sòl en la producció i exportació de sediments.

Pel que fa a la hidrologia, es durà a terme:

- 1) Una anàlisi quantitativa de la precipitació (P), escolament (R), evapotranspiració (ET) i evapotranspiració potencial (ETP) amb l'objectiu d'elaborar un balanç hidrològic simple.
- 2) La separació dels components d'escolament (*runoff components*) com també el càlcul de diversos índexs relacionats per avaluar la freqüència i variabilitat de la resposta hidrològica a escala anual i estacional.
- 3) Una avaluació de les dinàmiques d'escolament base (*baseflow*) i d'escolament directe (*quickflow*) durant els events de crescuda aplicant

el mètode de juxtaposició i la regressió múltiple per passes, respectivament.

Pel que fa al transport de SS, el principal objectiu d'aquest estudi és analitzar-lo tenint en compte les variacions hidrològiques a escala anual, estacional i a nivell d'event. Aquest objectiu és abordat a partir de:

1. La magnitud i freqüència de les concentracions de SS.
2. La interpretació de la CSS i també de la CSS relacionada amb l'escolament directe a través dels models de regressió múltiple.
3. L'avaluació detallada de la producció i exportació de SS així com la seva magnitud i freqüència.

## 2 ÀREA D'ESTUDI

La sèquia de Can Revull (102,6 ha) se situa a la zona central de l'illa de Mallorca, als termes municipals de Sant Joan i Vilafranca de Bonany (Fig. 1).

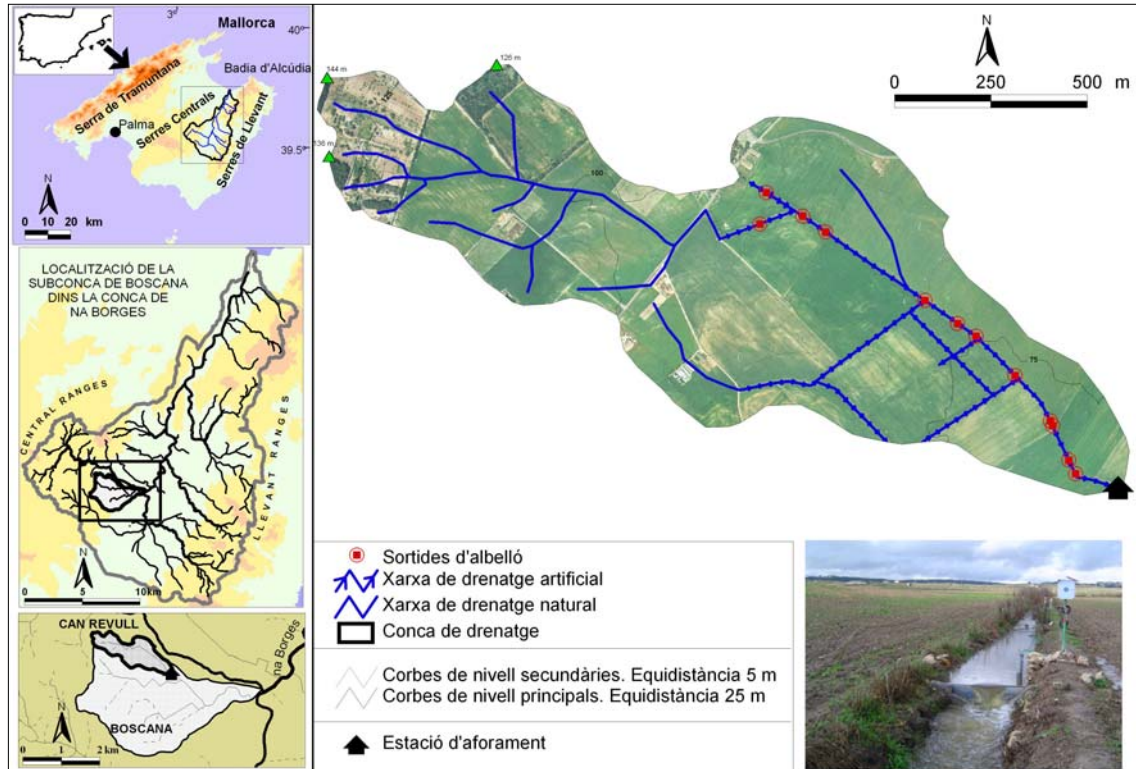


Figura 1. Mapa de la conca de Can Revull i la seva localització a Mallorca, na Borges i Boscana. La fotografia mostra l'estació d'aforament aigües amunt.

Es tracta d'una microconca que forma part de la subconca del torrent de Boscana (7,91 km<sup>2</sup>) situada a la part alta de la conca del torrent de na Borges (Estrany & Garcia, 2005). Geològicament s'ubica en els suaus relleus alpins estructurals de les serres Centrals de Mallorca caracteritzats per la presència de turbidites sinorogèniques (margues i calcarenites) del Miocè inferior, les quals es troben discordants sobre la resta de materials mesozoics i cenozoics de la zona (Jenkins et al., 1990). Els encavalcaments i plecs amb orientació aproximada N-S i desplaçament o vergència general cap a l'oest són les estructures tectòniques que predominen a la zona (ITGME, 1992; Silva et al., 2005). Les altituds oscil·len des dels 144 m de capçalera fins als 70 m.s.n.m de

l'estació d'aforament. La longitud del canal principal és de 2,4 km. El pendent mitjà de la conca és del 3,8%, mentre que el pendent mitjà del canal és del 4,7% (Taula 1).

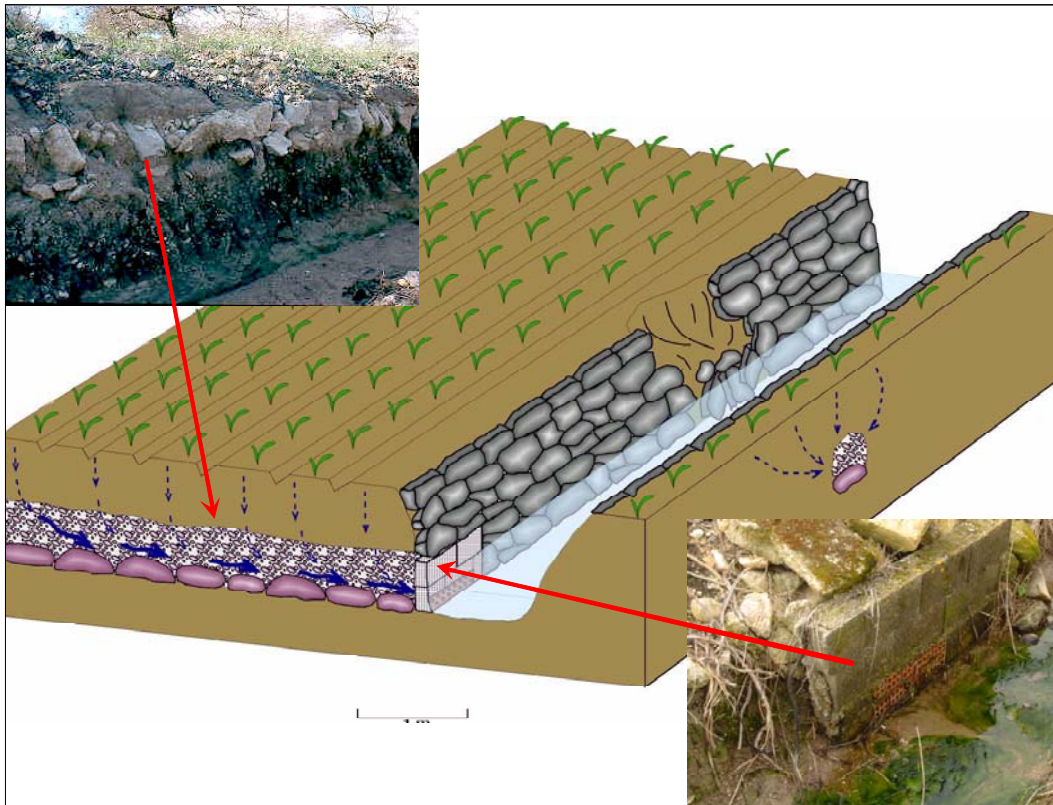
Àrea (km <sup>2</sup> )	1,06
Perímetre (km)	5,72
Altitud màxima (m.s.n.m.)	144
Altitud mínima (m.s.n.m.)	72
Longitud (m)	2,33
Longitud del canal principal (m)	2,46
Pendent mitjana canal principal (%)	4,7 (10% primers 400 m i 2% els restants 2 000 m)
Densitat de drenatge (km km <sup>-2</sup> )	5,31
Ordre de la conca	3

*Taula 1. Característiques bàsiques de la conca de drenatge*

El clima pot ser classificat com a Mediterrani Subsec, amb una temperatura mitjana anual de 16,5°C a Porreres, l'estació termomètrica més propera (B-346 Porreres de l'AEMET). La precipitació mitjana anual a l'estació pluviomètrica més propera (B-614 Boscana Nou de l'AEMET) pel període 1974-2006 és de 517 mm. La distribució estacional de la precipitació és Tardor-Hivern-Primavera-Estiu, amb un coeficient de variació interanual del 23%. El principal tret de la precipitació són les tempestes d'elevada intensitat que poden sobrepasar els 100 mm en 24 hores en un període de retorn de 25 anys (YACU, 2002). Durant l'hivern, les adveccions de l'oest amb sistemes frontals associats duen pluges generals i continuades (Romero et al., 1998). Aquest patró de precipitació fa que el règim fluvial sigui estacional, amb presència de cabal normalment des de novembre-desembre fins març-abril. El cabal mitjà diari anual durant el període de monitorització 2004-2007 fou d'aproximadament 4 l s<sup>-1</sup>. Estimada a partir del mètode de Thornthwaite (1948),

l'evapotranspiració potencial mitjana anual fou de 1.010 mm durant l'esmentat període de monitorització.

Els sòls es caracteritzen per la seva fondària i bon desenvolupament sobre sediments al·luvials del Quaternari, els quals es troben sobre les turbidites impermeables del Miocè inferior. La seva textura és franco-argilosa (Díaz Palmer et al., 2006), exhibint una elevada capacitat de camp i una elevada capacitat d'intercanvi iònic i aniònic que proporciona una important reserva de nutrients. Emperò, com ja s'havia apuntat a l'apartat 1.1, els sòls argilosos tendeixen a elevats punts de marcescència que els fa resistents al conreu. Per tant, la textura del sòl, la topografia còncava i arreica de les zones de plana i uns hiverns molt humits són els principals factors que fan necessària l'aplicació d'una pràctica tradicional de gestió agrícola com és la construcció d'un sistema d'albellonatge, el qual ocupa un 75% de la microconca. Els drenatges es troben a una fondària aproximada d'1 m i són realitzats amb la col·locació d'una o dues capes de lloses de pedra (actualment totxos) recobertes de materials porosos. Aquesta estructura es disposa al llarg dels vessants en forma d'espina de peix i amb els laterals ajaguts diagonalment (fotografia superior de la Fig.2) per acabar interceptant un drenatge principal a la part baixa del vessant descendint fins a una sèquia artificial on l'albelló aboca les seves aigües (Fig.2).



*Figura 2. Bloc diagrama del desenvolupament del sistema de drenatge subsuperficial o albellonatge. La fotografia superior il·lustra una de les capes d'enllosat per generar el flux subsuperficial. La fotografia inferior mostra una sortida d'albelló a la sèquia principal de Can Revull.*

De fet, la conducció d'aquest flux subsuperficial es realitza mitjançant tota una xarxa de sèquies que segueixen un patró geomètric ortogonal (Fig.1). En concret, la conca de drenatge de Can Revull és formada per una sèquia principal i que rep les aigües d'altres sèquies tributàries que van recollint el flux del drenatge subsuperficial. En total, s'han comptabilitzat fins a 12 sortides d'albelló a la sèquia principal (fotografia inferior de la Fig.2).

A les àrees de major pendent i topografia convexa s'han construït marjades i parats, els quals juguen un paper importantíssim en la prevenció i reducció de l'erosió del sòl. A més, aquestes pràctiques fan possible l'obtenció de més terrenys per a l'agricultura precisament en un territori on el caràcter insular suposa una limitada disponibilitat de terres (Salvà-Tomàs, 1973). Primerament es poden destacar els parats. Es tracta de murs de pedra en sec construïts

perpendicularment a les corbes de nivell, al bell mig dels comellars, amb l'objectiu de laminar les crescudes espasmòdiques i retenir sediment (Grimalt & Rodríguez, 1997). La segona tècnica és el marjament. Es tracta de murs de pedra en sec construïts paral·lelament a les corbes de nivell i que serveixen per obtenir i contenir una superfície horitzontal o amb poca inclinació, utilitzada normalment pel conreu (Grimalt et al., 1992). Ambdues pràctiques estan localitzades en la seva totalitat a la capçalera a àrees amb un pendent mitjà de 6,02% i cobrint el 10,5% de la conca de drenatge (Fig.3).

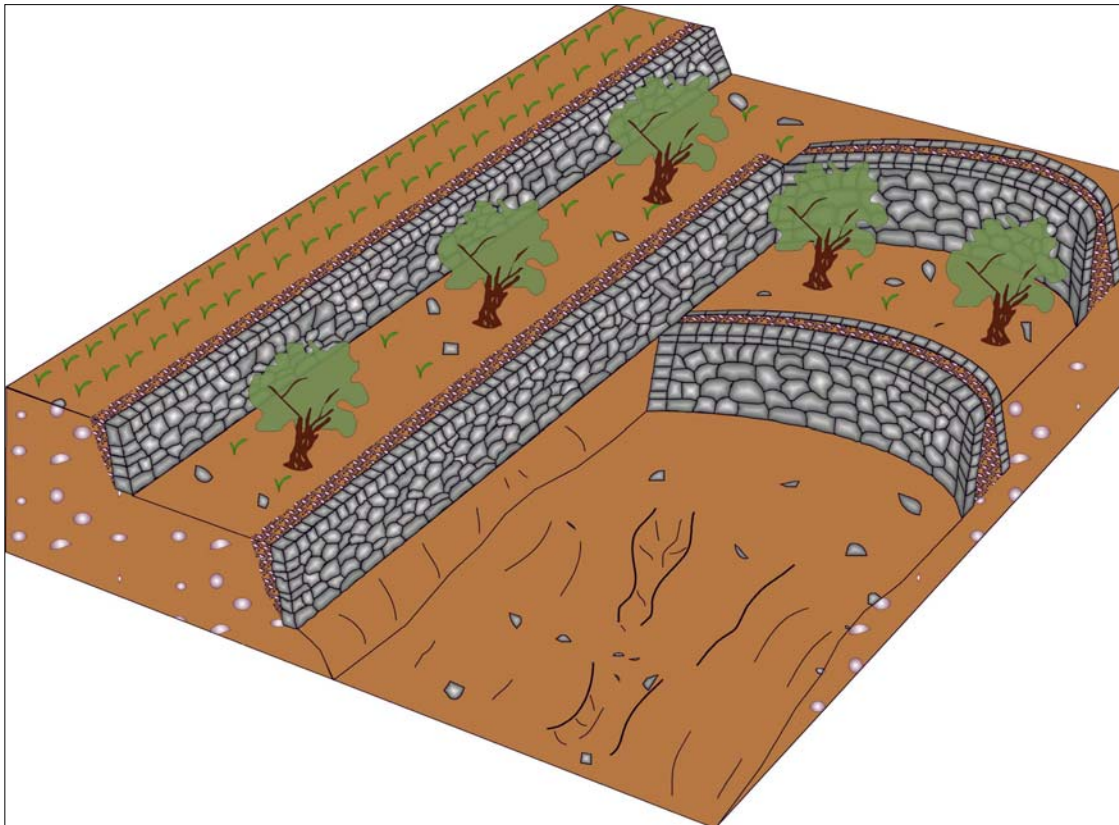


Figura 3. Bloc diagrama de marjades i parats a la capçalera de Can Revull.

Els conreus herbacis de secà són el principal ús del sòl (91%). Es troben localitzats a les zones planes i albellonades, on el pendent mitjà és de l'1,98%. Els principals conreus són el blat i la civada, els quals tenen la major demanda



hídrica durant els mesos d'abril i maig (un 65%). Aquest fet indica que aquestes espècies estan ben adaptades en aquest tipus de sòls i condicions climàtiques. Els conreus arboris de secà ocupen el 6,2% de la conca, la majoria a zones marjades situades a la capçalera. Hi predomina l'ametller i en segon terme el garrofer. El 2,7% restant de sòl és ocupat per masses forestals com l'alzinar (*Quercion ilicis*) -aliança climàtica predominant a l'illa de Mallorca- mentre que la garriga (*Oleo-Ceratonion*) és l'aliança que ocupa aquelles zones més seques i de sòls menys desenvolupats (Bonner, 1994).

### 3 MÈTODES

#### 3.1. Treball de camp

##### 3.1.1. Construcció i instrumentació automàtica de l'estació

Una estació d'aforament fou construïda el setembre del 2003 mitjançant una secció basada en un abocador de paret prima en forma de V de 90°, el qual és ideal per a fluxes d'aigua soms i velocitats molt baixes que no poden ser mesurades amb fiabilitat amb el mètode del molinet hidràulic. Es tracta d'una represa feta a partir de planxa prima de ferro galvanitzat amb els caires esmolats. Aquesta planxa es va fixar als laterals i al llit del canal amb unes extensions de ferro i la construcció d'una paret de totxos col·locada de manera transversal al sentit del flux (Fig.4).



(a)



(b)

Figura 4. (a) Construcció de la secció d'aforament i (b) visió de la planxa fixada als laterals.

Al desembre del 2003 fou instrumentada amb un acumulador de dades *Campbell Scientific CR10X* que rep senyals de nivell de la làmina d'aigua (sensor de pressió *Druck PDCR-1830-3*), de turbolesa (turbidímetre auto-netejable *McVan Analite NEP-9516-G* amb un rang de lectura de 0-1.600 mg l<sup>-1</sup>) i de conductivitat i temperatura (conductímetre i termòmetre *Campbell CS547*

amb un rang de lectura de  $0-10.000 \mu\text{S cm}^{-1}$ ). Tot plegat, de forma minutal, acumulant una dada cada quinze minuts després d'haver realitzat la mitjana aritmètica dels senyals minutals. Les dades foren descarregades setmanalment a un ordinador portàtil per procedir posteriorment a la seva anàlisi.

Entre el nivell de la làmina d'aigua i el cabal s'establí una corba de regressió seguint les formulacions estàndards fixades per la *International Organization of Standards* (1980<sub>[u2]</sub>).

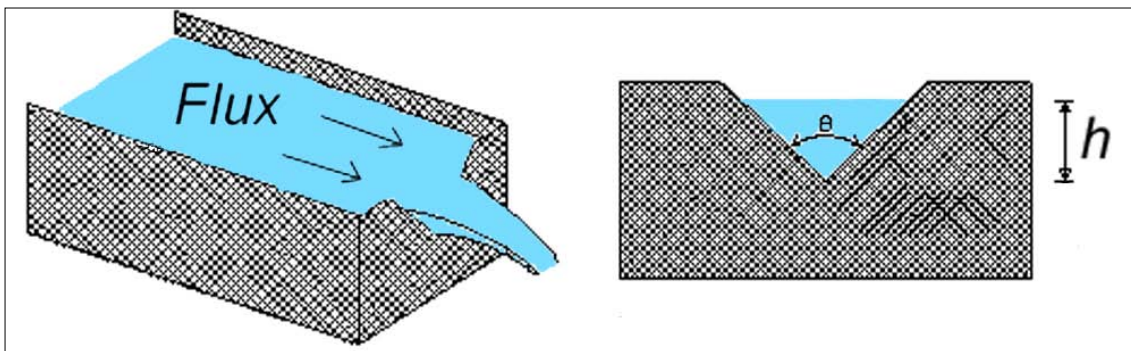


Figura 5. Diagrama de la secció basada en un abocador de paret prima en forma de V de  $90^\circ$

$$Q = 4,28C \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)(h+k)^{5/2} \quad (1)$$

on  $Q$  és el cabal ( $\text{l s}^{-1}$ ),  $C$  és el coeficient del cabal,  $\theta$  és l'angle,  $h$  és l'altura (cm) i  $k$  és el factor de correcció de l'altura (cm).

$C$  i  $k$  són estimats a partir de la següent formulació:

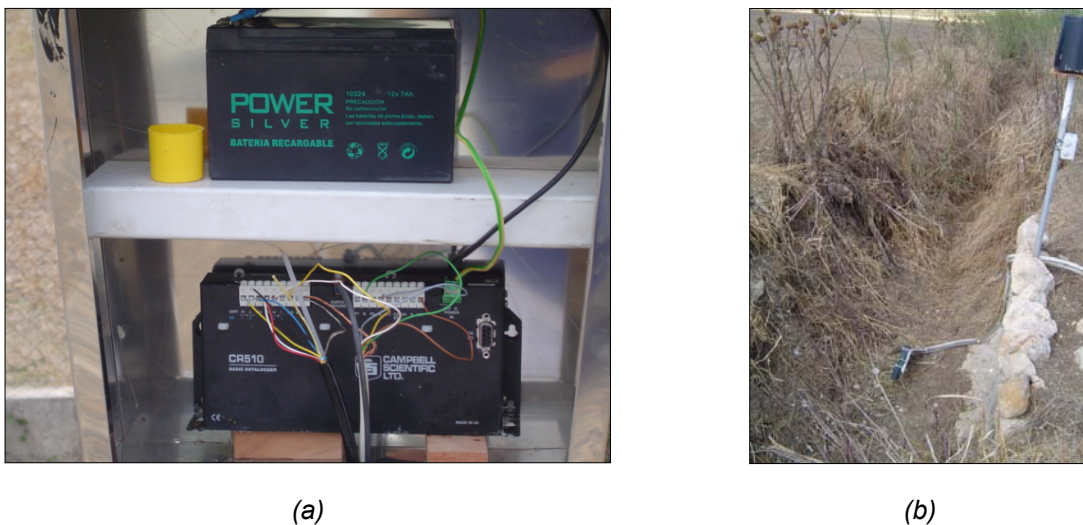
$$C = 0,607165052 - 0,000874466963\phi + 6,1039334 * 10^{-6} \phi^2 \quad (2)$$

$$k = 0,01449 - 0,00034\phi + 3,29819 * 10^{-6} \phi^2 - 1,06215 * 10^{-8} \phi^3 \quad (3)$$

on  $\phi$  és l'angle en graus.

Amb l'objectiu de minimitzar els problemes associats amb l'enfosquiment de la lent provocats pel creixement algal, el turbidímetre és netejat cada hora

mitjançant una granereta. Aquesta actua usant un mecanisme de rotació activat per l'acumulador de dades que fou prèviament programat en aquest sentit (Fig.6a). Cal considerar que l'obtenció de bons registres de terbolesa és sovint difícil. En aquest sentit, quan s'han detectat pics instantanis de terbolesa falsos, les dades han estat manipulades i corregides usant la interpolació entre el valor anterior i posterior (Wass & Leeks, 1999).



(a) Acumulador de dades i bateria; (b) localització del turbidímetre i pluviògraf.

Finalment, la precipitació i la seva intensitat foren mesurades mitjançant un pluviògraf de cassoles *Davis* que enregistra increments de precipitació de 0,2 mm i està connectat a un acumulador de dades model *HOBO H7*. Es troba ubicat a l'estació d'aforament a una altura d'1 m del terra (Fig.5b).

### 3.1.2. Mostreig de CSS

Durant el període de monitorització es varen recollir mostres de SS. Per a cabals baixos, les mostres foren recollides setmanalment de forma manual i integrant tota la columna d'aigua. El procediment consisteix en submergir la botella fins el fons del canal i llavors anar-la apujant a una velocitat constant.

Aquesta velocitat depèn de la velocitat del flux d'aigua. Així, com més ràpid és el flux, més ràpid serà apujada la mostra. El volum de mostra recollida fou de 500 ml. Addicionalment, per obtenir major informació sobre la concentració CSS es recolliren mostres manuals integrades de manera intensa durant les crescudes. Amb aquest mateix propòsit, es va instal·lar un mostrejador de botelles per sifó o *rising-stage sampler* (Finlayson, 1981). Es tracta d'una caixa estanca composta per 7 botelles de 500 ml des d'on surten dos tubs pneumàtics semirígid de niló de 5 mm de diàmetre interior seguint el principi de sifó (Fig.7). Així, el primer tub serveix d'entrada de la mostra i el segon per extreure'n l'aire.



Figura 7. Mostrejador de botelles per sifó o *rising-stage sampler*.

## 3.2. Treball de laboratori

### 3.2.1. Transformació del registre continu de CSS

La constant recerca ha demostrat que la caracterització detallada de variacions d'alta freqüència, i en particular les variacions de CSS durant períodes de crescuda, és essencial per realitzar una valoració acurada del transport de SS

(Olive & Rieger, 1985). Per això, la terbolesa ha estat usada exitosament per investigar la dinàmica del transport de SS (Gippel, 1989; 1995; Foster et al., 1992) i per millorar la fiabilitat de les estimacions de la càrrega del sediment en suspensió (Walling, 1977; Lewis, 1996). És necessari calibrar els valors proporcionats pel turbidímetre per poder relacionar-los amb la CSS. Per aquest motiu, les mostres manuals integrades i les del mostrejador de botelles per sífó han servit per crear una relació lineal entre la terbolesa i la CSS (Fig.8).

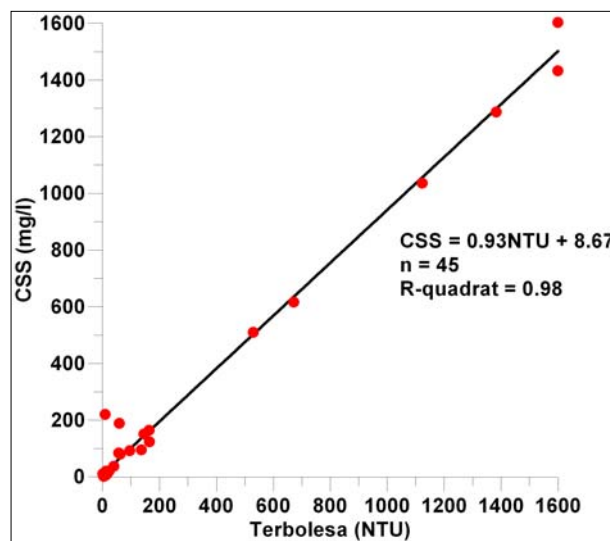


Figura 8. Calibratge entre la concentració de sediment en suspensió i la terbolesa.

### 3.2.2. Determinació de la CSS

Les mostres manuals integrades i les del mostrejador de botelles per sífó són analitzades en el laboratori per determinar la CSS mitjançant el filtratge de 250 ml a través d'un equip de filtratge *Millipore*, model *Sterfil* i uns filtres de cel·lulosa de 0,45 µm *Schleicher & Schuell* prèviament tarats mitjançant una balança analítica d'alta precisió (0,0000 mg). Una vegada les mostres s'han filtrat es deixen assecar durant una setmana en un dessecador amb gel de silici, on es van eixugant sense adquirir la humitat de l'ambient. Finalment, es

tornen a pesar proporcionant la quantitat total de sediment, la qual és dividida pel volum filtrat de mostra per així obtenir la CSS.

Les mostres són col·locades en un portafiltres per prevenir la contaminació per pols i altres partícules que pot contenir l'aire. Amb aquest procediment, totes les mostres són etiquetades amb el dia i hora de recollida i amb un únic nombre d'identificació. El nombre total de mostres recollides en aquest estudi ha estat de 105.

### **3.3. Computació i anàlisi de dades**

#### **3.3.1. Dades hidrològiques**

Després d'un període de calibratge durant la primera meitat del 2004, s'han monitoritzat 3 anys hidrològics (2004-2005; 2005-2006 i 2006-2007).

La precipitació i escolament mensuals foren agrupats per estacions (la tardor comprèn d'octubre a desembre; l'hivern de gener a març; la primavera d'abril a juny; i l'estiu de juliol a setembre). El coeficient d'escolament fou calculat a partir de la representació de l'escolament com un percentatge de la precipitació a escala anual i mensual. L'ET es calculà com la quantitat de precipitació que no es convertí en escolament a escala mensual. L'ETP (Thornthwaite, 1948) va ser calculada a partir de la temperatura diària obtinguda a l'estació B-346 de l'AEMET, localitzada a 7,5 km al sud-oest de Can Revull. Diverses relacions entre aquestes variables foren determinades a través de regressió lineal.

La separació de components de l'hidrograma es va dur a terme per a cada crescuda. Les tècniques de separació de components són nombroses i es poden dividir en dos grups principals (Nathan & McMahon, 1990): aquelles que

assumeixen que l'escolament base respon durant una crescuda simultàniament a l'escolament directe i, aquelles que tenen en compte els efectes de l'emmagatzematge subsuperficial que es genera als marges del canal i que assumeix que la recessió de l'escolament base continua després de l'inici de l'escolament directe. Entre d'altres, el mètode de la línia directa s'inclou en el primer grup (Chow et al., 1988). L'escolament directe i l'escolament base foren separats a partir de la projecció semi-logarítmica de l'hidrograma, generant una separació en segments de la corba de recessió. Així, es pot distingir cada component d'escolament de manera individual traçant una línia de pendent constant que comença en el punt d'aixecament de l'hidrograma i acaba en el segon segment de recessió que suposa el final de l'escolament directe. La separació de components s'ha realitzat per a 20 crescudes al llarg dels 3 anys hidrològics estudiats.

La corba de duració de cabals o *flow duration curve (FDC)* és un dels mètodes que mostren millor i ofereixen més informació sobre el rang de cabals que exhibeix una conca, des de cabals baixos fins a events de gran magnitud. Es tracta d'una relació entre un cabal determinat i el percentatge de temps en que aquest cabal és igual o superat, informant sobre la relació entre la magnitud i la freqüència dels cabals (Smakhtin, 2001). A Can Revull, s'han dissenyat *FDCs* per a cada component d'escolament a partir de les dades quinzeminutals de cabal. L'objectiu és valorar com les característiques de la conca controlen cadascun dels components d'escolament a escala anual i estacional. Per a cada *FDC*, dos índexs estàndard foren derivats a partir de l'escolament total, escolament base i escolament directe sempre que els valors de cabal fossin superiors a  $0 \text{ l s}^{-1}$ . Es tracta de l'índex de variabilitat i l'índex 30/70. Lane i Lei



(1950) definiren l'índex de variabilitat com la desviació estàndard dels logaritmes comuns dels cabals en intervals de 10% entre el 10 i el 90% de la distribució de freqüències acumulativa. Les conques amb un cabal més sostingut, són aquelles amb una major capacitat d'emmagatzematge d'aigua, tendint a tenir un menor índex de variabilitat que aquelles conques amb major percentatge d'escolament directe i, per tant, menor capacitat d'emmagatzematge. Igualment, les *FDCs* amb un major pendent són indicatives d'aquells canals amb una major variabilitat que aquells que tenen un pendent menor. El pendent, per tant, serà usat per comparar les diferents respostes estacionals de l'escolament. Qualcunes aproximacions per estimar el pendent inclouen índexs dels extrems a la mediana o mitjana de cabals, o a l'inrevés (Peters, 1994). Una d'aquestes aproximacions és l'índex 30/70, el qual expressa el cabal que supera el 30% del temps fins aquell que supera el 70% del temps.

Per afegitó, amb l'objectiu d'estandarditzar la valoració del comportament de cada component de l'escolament, s'han aplicat dos índexs. El primer, l'índex de resposta per indicar el percentatge total de precipitació que es transforma en escolament directe. El segon, l'índex d'escolament base o *Base Flow Index* (BFI), definit com un índex adimensional entre la mitjana de cabal corresponent a l'escolament base i la mitjana del cabal total. A conques amb una elevada contribució subterrània o subsuperficial, el BFI s'acosta a 1. En canvi, per a canals efímers s'acosta a 0 (Smakhtin, 2001).

Mitjançant l'aplicació del mètode clàssic de juxtaposició o *matching strip method* (Toebe & Strang, 1964; Nathan & McMahon, 1990), s'ha realitzat una anàlisi dels períodes de recessió. Aquest mètode suposa la projecció de les

corbes de recessió en una projecció semi-logarítmica, fet que permet visualitzar els cabals molt baixos. Amb l'ajut del programa gràfic *Grapher v.1.24*, cada període de recessió és juxtaposat sobre un eix d'ordenades comú i ajustat horitzontalment sobre els eixos d'abscisses amb l'objectiu d'aconseguir el conjunt de la corba de recessió. Per obtenir els volums de reserva disponibles per a l'escolament fou derivada i integrada una expressió no lineal. Els resultats explicaran la forma en que l'emmagatzematge natural alimenta el canal. Qualcuns autors assenyalen que és necessari un mínim de 10 anys per obtenir estimacions fiables dels paràmetres de recessió (Tallaksen, 1995). Ara bé, la baixa freqüència de dies amb pluja a les regions mediterrànies permet aconseguir períodes de recessió majors i més llargs (Latron, 2003). A més a més, gener és el mes amb la menor ETP i amb una mitjana de dies de pluja molt baixa per mor de la presència d'altres pressions continentals fredes a la Mediterrània occidental.

<b>Condicions antecedents</b>		<b>Condicions de crescuda</b>	
<b><i>Precipitació com a índex d'humitat al sòl</i></b>		<b><i>Precipitació i variables derivades</i></b>	
PA1d	Precipitació antecedent 1 dia abans (mm)	Ptot	Precipitació total de l'event (mm)
PA3d	Precipitació antecedent 3 dies abans (mm)	Pvol	Volum de precipitació caigut a la conca (m <sup>3</sup> )
PA7d	Precipitació antecedent 7 dies abans (mm)	IPmitjana	Intensitat de precipitació mitjana (mm)
PA15d	Precipitació antecedent 15 dies abans (mm)	IPmax30'	Intensitat de precipitació màxima en 30' (mm)
PA21d	Precipitació antecedent 21 dies abans (mm)	IPmax5'	Intensitat de precipitació màxima en 5' (mm)
		<b><i>Variables d'escolament</i></b>	
		Q <sub>max</sub>	Pic de cabal màxim (l s <sup>-1</sup> )
		Q <sub>runoff</sub>	Escolament directe (mm)
		<b><i>Relacions temporals entre la precipitació i l'escolament</i></b>	
		T tempesta	Duració de la tempesta (min)
		T iniciQ	Interval de temps entre l'inici de la tempesta i l'inici de la crescuda (min)
		T per a Q	Interval de temps entre la mediana de la tempesta i el pic de cabal (min)

*Taula 2. Variables de les condicions antecedents i de crescuda usades a la regressió múltiple per passes per explorar les relacions precipitació-escolament.*

Per a cada crescuda, totes les variables hidrometeorològiques foren derivades i classificades en 2 grups (Taula 2): condicions antecedents i condicions de crescuda. Aquestes variables foren disponibles per a 26 events, 9 dels quals corresponen a 3 events multi-pic inclosos en els 20 events esmentats prèviament. Amb tot, diverses regressions múltiples per passes foren aplicades per analitzar les relacions precipitació-escolament utilitzant el paquet estadístic SPSS. Amb la probabilitat d'un valor menor de F a cada passa es van descartant les variables independents. Així, es va usar un nivell F del 5%. Per tant, les variables ja introduïdes a l'equació de regressió foren eliminades si la seva probabilitat F era suficientment elevada. El mètode acaba quan cap altra variable no és susceptible de ser inclosa o eliminada. La influència exacta de cadascuna d'aquestes variables fou mesurada a través dels coeficients  $\beta$ . Aquests coeficients són paràmetres dimensionals i mesuren l'efecte d'una variable independent particular sobre la variació de la variable dependent i, com són dimensionals, poden ser directament comparades (Gregory & Walling, 1973).

### **3.3.2 Dades de sediment en suspensió**

La disponibilitat de registres detallats de CSS proporcionats per la monitorització continua de la terbolesa va permetre l'estudi acurat dels patrons de comportament de la producció de SS a partir de la relació entre la CSS i el cabal. Aquesta relació o corba de regressió (*rating curve*) per a una conca de drenatge reflecteix un patró d'erosió i el funcionament dels processos de redistribució del sediment (*sediment delivery*) des dels vessants proporcionant

un punt de partida útil i fàcilment accessible per aïllar i interpretar els aspectes més destacats de la resposta de la conca en el transport de SS (Walling, 1974).

En aquest sentit, i amb l'objectiu d'aconseguir una comprensió més encertada de la interpretació de la dinàmica del SS, el conjunt de dades fou dividit a nivell estacional en termes d'aquells valors de SS corresponents a la branca ascendent (*rising stage*) i d'aquells valors de SS corresponents a la branca descendent (*falling stage*) de l'hidrograma (Hall, 1967; Walling & Webb, 1983; Batalla & Sala, 1994).

Igualment, les funcions no lineals de caràcter potencial s'utilitzaren per descriure la regressió entre el SS i el cabal.

$$CSS = aQ^b \quad (4)$$

Els coeficients de regressió *a* i *b* foren obtinguts per la regressió de mínims quadrats ordinaris en logaritmes de les dades de SS i cabal. Aquests coeficients també foren usats per explicar els patrons inicials d'erosió i el funcionament dels processos de redistribució del sediment.

<b>Relacions temporals entre l'escolament i el sediment en suspensió</b>	
<i>T sediment</i>	Duració de l'event de sediment en suspensió (min)
<i>T inici CSS</i>	Interval de temps entre l'inici de la tempesta i l'inici del transport de SS (min)
<b>Variables d'escolament</b>	
<i>Icres</i>	Índex d'intensitat de crescuda definit com (Qmax – Qprecedent) / Temps crescuda
<b>Precipitació i variables derivades</b>	
<i>IPmitjana</i>	Intensitat de precipitació mitjana (mm)
<i>IPmax30'</i>	Intensitat de precipitació màxima en 30' (mm)

*Taula 3. Variables independents usades a la regressió múltiple per passes per explicar les dinàmiques del transport de sediment en suspensió*

Per a cada event, es varen seleccionar aquelles variables independents que es varen deduir com a importants en el control de la mobilització de sediment

durant una tempesta i així introduir-les en una anàlisi multivariant. Aquestes variables estan relacionades amb la precipitació, l'escolament i les relacions temporals entre l'escolament i el SS (Taula 3). A l'igual que per a la hidrologia, aquestes variables foren disponibles per a 26 events, 9 dels quals corresponen a 3 events multi-pic inclosos en els 20 events esmentats prèviament. La CSS mitjana fou definida com a variable dependent. A més, la mitjana de CSS corresponent a l'escolament directe (CSS-directe) també fou classificada com a variable dependent ja que la dinàmica de cabal base ha estat identificada com a un tret hidrològic característic tenint en compte que les característiques topogràfiques i geològiques es veuen reforçades per l'albellonatge (consultar secció 4.1). Aquest fet causa que el SS mobilitzat per l'escolament directe sigui diluït. Per aquest motiu, s'aplicà un model mixt simple que permeté separar l'escolament directe i el CSS corresponent de l'escolament total com també d'aquell relacionat a l'escolament base (Walling & Webb, 1982; Carling, 1983).

Totes aquestes regressions múltiples per passes foren desenvolupades a partir de la subdivisió de les dades tenint en compte tots els events, l'estació de l'any i segons si l'event fos d'un sol pic o multi-pic. Pel que fa a la darrera subdivisió, el límit entre pics dels events multi-pic i les seves variables associades fou establert en el mínim cabal enregistrat entre pics. Pel que fa a la subdivisió estacional esmentada, cal considerar que s'ha fet només tenint en compte l'estació seca i l'humida per mor de que el baix nombre d'events dificultava l'aplicació de les regressions múltiples fent servir la divisió tradicional en quatre estacions. En aquest sentit, l'hivern és el període humit comprès entre octubre i març (ambdós inclosos) i l'estiu és el període sec definit entre abril i setembre

(ambdós inclosos). L'anàlisi de correlacions de *Pearson* fou aplicat amb l'objectiu d'avaluar la magnitud de les relacions entre variables (Taula 4).

	T sediment	T inici SSC	l cres	IPmax30'	Ipmitjana	CSS-directe	CSS-total
T sediment	1	0.09	0.07	0.19	0.15	0.22	0.32
T inici SSC		1	-0.04	-0.18	-0.21	-0,19	-0.20
l cres			1	0.32	0.24	<b>0.62</b>	<b>0.64</b>
IPmax30'				1	<b>0.96</b>	<b>0.81</b>	<b>0.81</b>
Ipmitjana					1	<b>0.84</b>	<b>0.82</b>
CSS-directe						1	<b>0.97</b>
CSS-total							1

Taula 4. Matriu de correlació de *Pearson* entre els paràmetres calculats. Els coeficients en negreta són significatius a un nivell de 0,01 i en itàlica a un nivell de 0,05<sub>[u3]</sub>

Amb tot, diverses regressions múltiples per passes foren aplicades amb l'objectiu d'analitzar els patrons de SS utilitzant el paquet estadístic *SPSS*. El mètode d'introducció de variables emprat fou el mateix que l'utilitzat per analitzar les relacions precipitació-escolament (veure secció 3.3.1).

Finalment, amb l'objectiu de conèixer la producció de SS de la conca (sediment *yield*) es calculà la càrrega de SS a partir de la integració dels valors quinzeminutals de CSS derivats dels registres de terbolesa amb els valors quinzeminutals de cabal extrets de l'estació d'aforament:

$$L = \sum_{i=1}^n (C_i Q_i) \quad (5)$$

on L és la càrrega de SS (kg),  $C_i$  és la CSS ( $\text{mg l}^{-1}$ ) i  $Q_i$  és el cabal ( $\text{l s}^{-1}$ ) sumat sobre tot el període de monitorització, n.

## 4 RESULTATS

### 4.1. Hidrologia

#### 4.1.1. Balanç hídric simple

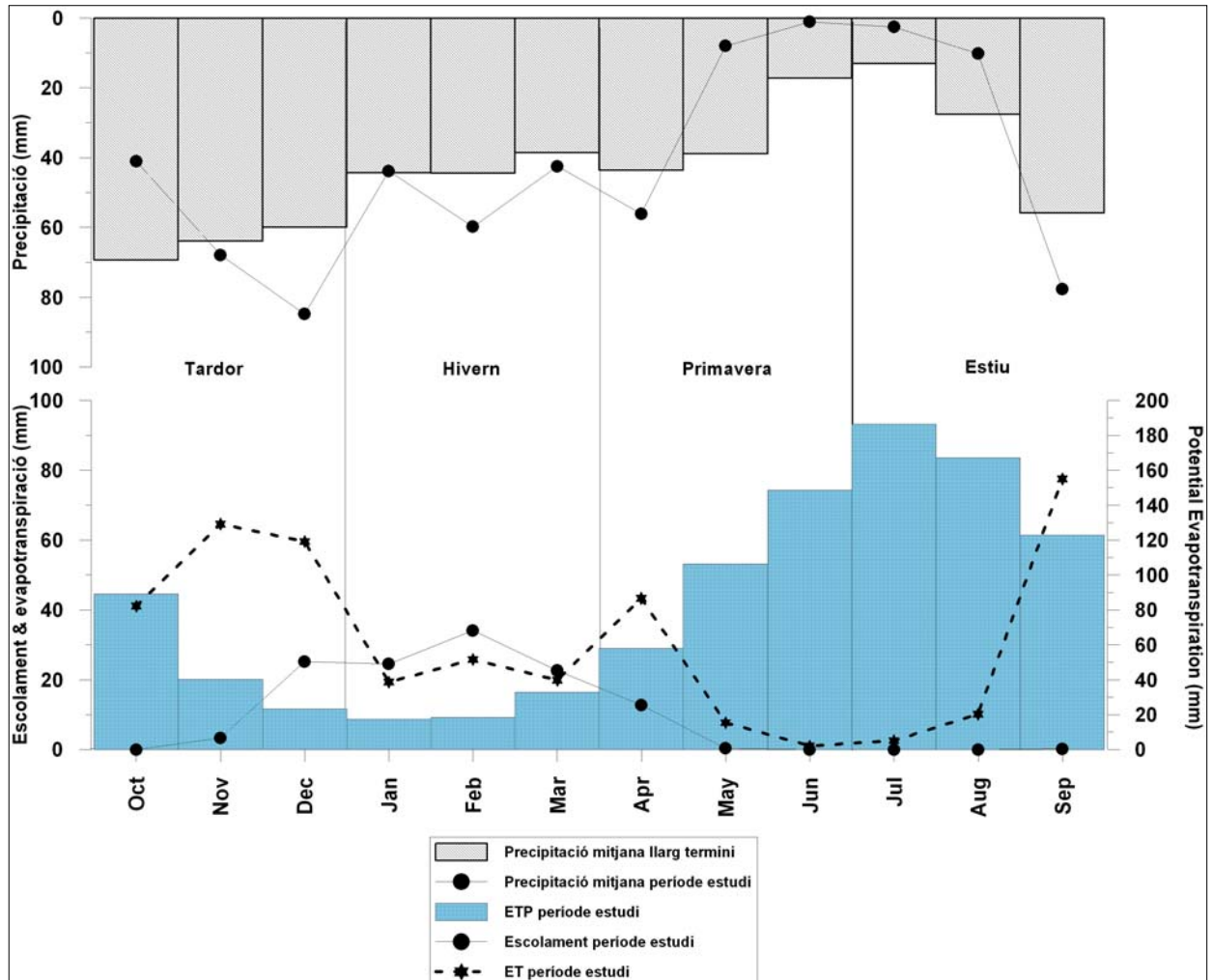


Figura 9. Balanç hidrològic simple: precipitació mitjana mensual, escolament i evapotranspiració durant el període d'estudi (2004-2007). Els histogrammes il·lustren la distribució de la precipitació (superior) i la evapotranspiració potencial (inferior) durant el període d'estudi i a llarg termini (1974-2006).

La figura 9 i la taula 5 representen una descripció general del comportament hidrològic de la conca. Aquest balanç hidrològic simple mostra la precipitació a llarg termini (1974-2006) i la P, R, ET i ETP durant el període d'estudi 2004-2007. La P mitjana anual durant aquests 3 anys d'estudi fou de 496 mm. Tenint en compte que la mitjana anual pel període 1974-2006 havia estat de 517 mm

amb un coeficient de variació del 22,7%, els tres anys estudiats es poden considerar com a normals. Emperò, a una escala estacional s'han observat una sèrie de diferències destacades durant el període d'estudi: la primavera mostra valors de P molt baixos, fins i tot més baixos que l'estiu, l'estació més seca pel període 1974-2006. A més, a escala mensual, l'octubre és el més plujós a llarg termini, però durant el període d'estudi s'observà una important reducció; just el mateix fenomen que s'observà de maig a agost (ambdós inclosos). En canvi, novembre, desembre, febrer, març i abril mostren valors de P durant el període d'estudi molt per damunt dels enregistrats a llarg termini.

	1974-2006				2004-2007						
	Precipitació mitjana mm	%	Precipitació mitjana mm	%	Escolament mitjà mm	%	Coeficient escolament	ET mitjana mm	%	ETP mitjana mm	%
Autumn	193,2	37	193,7	39	28,6	23	14,7	165,2	44	152,6	15
Winter	127,3	25	146,1	29	81,2	66	55,5	65,0	17	68,4	7
Spring	99,7	19	65,2	13	13,1	11	20,1	52,1	14	312,8	31
Summe	96,4	19	90,4	18	0,2	0	0,2	90,3	24	476,6	47
Annual	516,7	100	495,5	100	123,0	100	24,8	372,5	10	1.010,4	100

*Taula 5. Valors de precipitació estacionals, anuals i relatius a llarg termini (1974-2006) i valors de precipitació, escolament, coeficient d'escolament, ET i ETP durant el període d'estudi (2004-2007).*

Els valors de R mostraren un patró un tant diferenciat al de P. Així, l'hivern fou l'estació amb el valor major (R=81 mm), seguit de la tardor, primavera i estiu amb valors de R de 28, 13 i 0,2 mm respectivament. Els coeficients d'escolament foren de 55,5; 20,1; 14,7 i 0,2% respectivament, amb una mitjana anual del 24,8%. Aquests coeficients d'escolament són molt elevats si es comparen amb aquells observats a d'altres conques amb condicions hidroclimàtiques similars. Així, els coeficients d'escolament no solen ser menors del 10% però tampoc superiors al 25% (Ceballos & Schnabel, 1998). Aquests elevats coeficients d'escolament poden ser inicialment explicats per l'elevada capacitat de camp dels sòls i la presència de l'albellonatge.



L'estiu és l'estació amb l'ETP més elevada (477 mm), seguit de la primavera, tardor i finalment l'hivern amb 313, 153 i 68 mm respectivament. Mentrestant, l'ET apunta un patró diferenciats, condicionat per la distribució estacional de la P. Per tant, la tardor va tenir la major ET (165 mm), seguida per l'estiu, l'hivern i la primavera amb 90, 65 i 52 mm, respectivament.

Entre els principals elements del balanç hidrològic (P, R i ET) s'han establert relacions de regressió lineal. Val a dir que cap d'elles fou significativa ( $R^2 < 0,2$ ), tal i com ja havia estat descrit a altres conques mediterrànies (Ceballos & Schnabel, 1998; Latron et al., 2008). La manca de significància en aquestes relacions simples és explicada per l'elevat nombre d'escenaris evapotranspiratius (Taula 5), havent-hi períodes humits (finals de tardor i tot l'hivern) durant els quals l'aportació d'aigua supera la demanda evapotranspirativa mentre que en els períodes secs l'aportació d'aigua no cobreix aquestes demandes (finals de primavera i tot l'estiu).

Maldament aquesta manca de relacions lineals, el balanç hidrològic simple mostra una successió general de tres períodes al llarg de l'any determinats per l'ETP. Aquesta successió general ha estat descrita per altres autors a petites conques de muntanya on el clima experimenta canvis relacionats amb l'altitud (Gallart et al., 2002; Latron et al., 2008). D'aquesta manera, la distribució estacional de l'ETP i de la P provocaren la següent successió:

a) La demanda evapotranspirativa a la primavera i a l'estiu és molt elevada. Els sòls s'eixuguen i es clivellen fent que l'albellonatge no funcioni. Amb aquestes condicions, només les curtes tempestes però d'elevada intensitat de darreries d'estiu són capaces de reomplir únicament els horitzons més

superficials del sòl (a excepció d'aquells events de més llarga durada o que es tornin a repetir, tal com va succeir el setembre del 2006).

b) Un període de transició, a principis de tardor i a principis de primavera, durant el qual la precipitació incrementa les reserves hídriques de la conca. Després d'això s'enceta un flux d'aigua cap el canal.

c) Un període humit que comença a mitjans o finals de tardor i dura tot l'hivern just quan les reserves hídriques de la conca han estat reomplides i les pèrdues per ET són baixes si es comparen amb els volums de P. Amb aquestes condicions, la majoria de P és disponible per a l'escolament directe.

#### **4.1.2. Components d'escolament i corba de duració de cabals (FDC)**

L'anàlisi dels components del balanç hidrològic simple proporciona només una visió parcial sobre l'avaluació dels efectes hidrometeorològics de les diferents característiques de l'escolament. Per millorar l'avaluació de la variabilitat de la resposta hidrològica i la influència de les característiques de la conca, l'escolament fou separat en directe i base a 20 events. Conseqüentment, varen ser dissenyades les corbes de duració de cabals a escala anual i estacional (Fig.10) així com també els índexs relacionats per a l'escolament total i per a cadascun dels seus components proporcionant més informació sobre la resposta hidrològica de la conca i les seves causes subjacents.

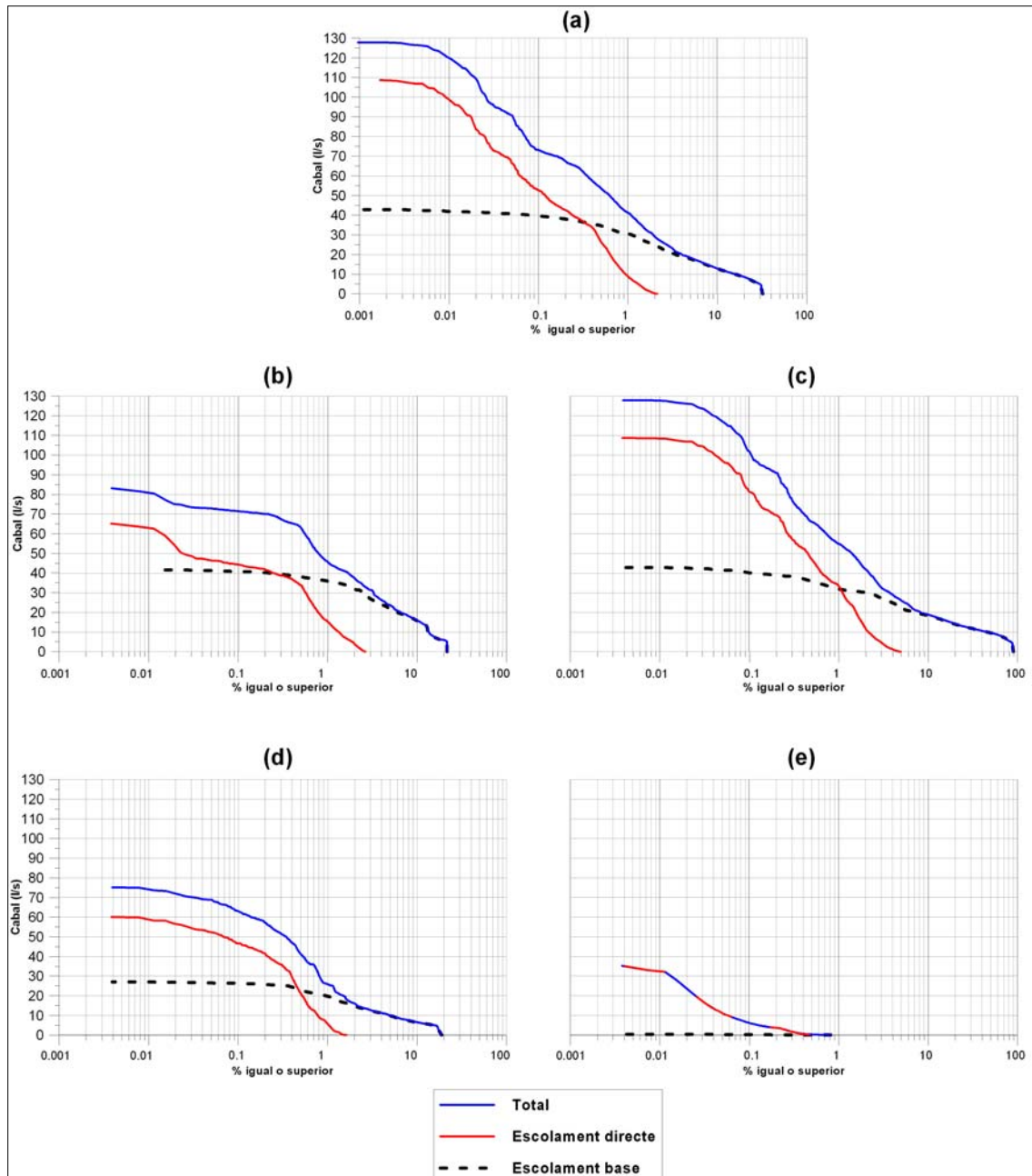


Figura 10. Corbes de duració per a l'escolament total, base i directe durant el període d'estudi: (a) anual; (b) tardor; (c) hivern; (d) primavera i (e) estiu.

A escala anual, durant un 32,4% del temps la sèquia presentà escolament. L'índex de variabilitat mostra un valor baix (0,201) indicant que la dinàmica d'emmagatzematge fou molt important, fet que es confirma pel valor relatiu de l'escolament directe, el qual hi fou present durant només un 2,1% del temps (Taula 6). A més, a escala estacional es varen observar diferències significatives:

Estació	Escolament total	Escolament directe	Escolament total	
	%	%	Índex Var.	Índex 30/70
Tardor	21,73	2,65	0,270	0,686
Hivern	89,98	4,94	0,167	0,838
Primavera	18,88	1,62	0,190	0,773
Estiu	0,82	0,47	-----	-----
<b>Anual</b>	<b>32,37</b>	<b>2,13</b>	<b>0,201</b>	<b>0,786</b>

Taula 6. Valors relatius estacionals i anuals d'escolament total i directe durant el període d'estudi 2004-2007. Índex de variabilitat i índex 30/70 de l'escolament total a escala estacional i anual Durant el període d'estudi (2004-2007).

- L'hivern presentà escolament un 90% del temps així com el menor índex de variabilitat de totes les estacions (0,17), experimentant les dinàmiques d'emmagatzematge més destacades de l'any. En canvi, el valor de l'índex 30/70 (0,84) denota que la variabilitat de cabals durant l'hivern fou molt ampla - encara que en períodes curts- ja que els sòls es troben a capacitat de camp i la precipitació és majoritàriament disponible per a l'escolament directe. Com a conseqüència d'això, l'escolament directe està present un 4,9% del temps, essent el valor relatiu estacional més destacat.
- La tardor presentà escolament un 21,8% del temps, només superada per l'hivern. En aquest cas, l'índex de variabilitat és el més elevat (0,27) ja que a principis de l'estació el dèficit d'humitat del sòl és màxim i la precipitació ha de reomplir les reserves hídriques de la conca. Per aquest mateix motiu, l'índex 30/70 és el menor encara que l'escolament directe hi fou present un 2,7% del temps.
- La primavera presentà escolament un 18,9% del temps amb un índex de variabilitat del 0,19 demostrant clarament que les dinàmiques d'emmagatzematge són encara significants ja que les reserves hídriques encara no han estat molt reduïdes per l'ET. En conseqüència, l'escolament

directe denota una resposta relativament ràpida a la precipitació, fent que l'índex 30/70 fos més elevat que el de la tardor, encara que l'escolament directe només està present durant un 1,6% del temps.

- Finalment, l'estiu no ha estat analitzat ja que l'escolament només es presentà en un 0,8% del temps.

(a)

<b>Anys</b>	Escol. directe mm	Escol. directe %	Escol. base mm	Escol. base %	Índex resposta	BFI
2004-05	10,5	6,1	162,8	93,9	2,34	0,94
2005-06	14,5	14,1	87,9	85,9	2,71	0,86
2006-07	9,2	9,9	84,1	90,1	2,03	0,90
Mitjana període	11,4	10,0	111,6	90,0	2,35	0,90
<b>Estacions</b>	Escol. directe mm	Escol. directe %	Escol. base mm	Escol. base %	Índex resposta	BFI
Tardor	3,1	10,7	25,5	89,3	1,54	0,89
Hivern	6,2	7,7	74,9	92,3	4,52	0,92
Primavera	1,9	14,7	11,2	85,3	3,48	0,85
Estiu	0,2	96,8	0,0	3,2	0,19	0,03

(b)

Estacions	2004-05				2005-06				2006-07			
	Precipit. mm	Escol. directe mm	Índex resposta	Escol. base mm	Precipit. mm	Escol. directe mm	Índex resposta	Escol. base mm	Precipit. mm	Escol. directe mm	Índex resposta	Escol. base mm
Estiu	53,7	0,0	0,0	0,0	103,2	0,0	0,0	0,0	114,4	0,5	0,4	0,0
Tardor	273,9	7,2	2,6	63,6	176,5	0,0	0,0	0,0	130,8	2,0	1,5	12,9
Hivern	105,8	3,3	3,1	91,9	189,2	14,3	7,6	87,9	143,4	1,1	0,8	44,9
Primavera	17,6	0,0	0,0	7,3	65,7	0,2	0,2	0,0	112,2	5,6	5,0	26,3
Estiu	53,7	0,0	0,0	0,0	103,2	0,0	0,0	0,0	114,4	0,5	0,4	0,0
Anual	451,0	10,5		162,8	534,6	14,5		87,9	500,8	9,2		84,1

Taula 7. (a) Valors relatius i totals per a cada component d'escolament, l'índex de resposta i el BFI durant cada any hidrològic amb les mitjanes estacionals. (b) Valors totals de precipitació i cada component d'escolament així com també l'índex de resposta per a cada estació de cada any hidrològic.

La taula 7 mostra valors a escala anual i estacional de P, escolament directe, escolament base, índex de resposta i BFI. A més, els valors de mitjana estacional d'aquestes variables per a cada any hidrològic. Els resultats de l'aplicació d'aquests índexs permeten resumir el comportament de cada component d'escolament:

a) L'índex de resposta mostrarà valors baixos (mitjana = 2,4%) indicant que les pèrdues amb elevats dèficits d'humitat en el sòl estan clarament

relacionades amb l'ETP. Així, a escala estacional, l'hivern tingué l'índex de resposta més elevat (mitjana = 4,5%), assolint valors de fins al 7,6% durant l'any 2005-2006 ja que els events de precipitació tingueren lloc durant el període de menor ETP. Mentrestant, la primavera presentà el segon índex de resposta més elevat (mitjana = 3,5%) ja que les reserves hídriques de la conca encara eren importants. Encara que la tardor presentà valors de precipitació més elevats que la primavera, l'índex de resposta fou menor segons el descrit a la secció 4.1.1 pel període de transició.

b) L'índex d'escolament base o BFI fou del 0,92 durant el període d'estudi en que el canal presentà escolament. A més, la majoria d'escolament fou base evidenciant els efectes que la geologia i la topografia de la zona tenen en els períodes de cabal base així com justificar la necessitat de l'albellonatge, malgrat que en el 67,6% del temps la sèquia no presentàs escolament. A escala estacional, el BFI només exhibí un valor baix durant l'estiu (0,03), essent a més l'única estació on l'escolament directe fou predominant ja que el comportament fou efímer a través de crescudes espasmòdiques o *flash-floods*.

#### **4.1.3. Dinàmiques d'escolament base: les corbes de recessió**

Els components d'escolament i el seu comportament han estat examinats a escala anual i estacional a través de diversos índexs. A més, les dinàmiques particulars de cada component foren examinades a nivell d'event. En termes generals, cal destacar una vegada més que l'escolament base és controlat per l'aquífer superficial no confinat format als sòls profunds desenvolupats sobre materials al·luvials quaternaris els quals es troben sobre les turbidites

impermeables del Miocè inferior. Aquest domini de l'escolament base per part de l'aqüífer superficial no confinat es veu reforçat per l'albellonatge. A més a més, l'escolament base també es troba influenciat pels efectes estacionals tals com les variacions en la P i en l'ET. En conseqüència, i considerant que l'emmagatzematge d'aigua al sòl i l'albellonatge controlen intrínsicament l'escolament base, era necessari dur a terme una anàlisi de les corbes de recessió tenint en compte les variables hidrometeorològiques.

S'han seleccionat 17 períodes de recessió que van des dels 3 fins els 17 dies a partir del cabal instantani mesurat diàriament a les 6.00 h UTC sempre i quan la pluja fos negligible. Els cabals oscil·len entre els 127,98 i 1,48 l s<sup>-1</sup>. Posteriorment, usant el mètode de juxtaposició, es varen derivar 3 corbes de recessió mestres (CRM) extretes del conjunt de línies comunes (Fig.11) destacant la influència particular de l'ETP:

1. No influenciada. La mitjana diària de l'ETP fou 0,55 mm. La duració va ser de 22 dies i és representativa d'aquelles recessions succeïdes a finals de desembre, gener i principis de febrer.
2. Influenciada 1. La mitjana diària de l'ETP fou de 0,98 mm. La duració va ser de 17 dies i és representativa d'aquelles recessions succeïdes a finals de febrer i març.
3. Influenciada 2. La mitjana diària de l'ETP fou de 1,91 mm. La duració va ser de 13 dies i és representativa d'aquelles recessions ocorregudes a l'abril.

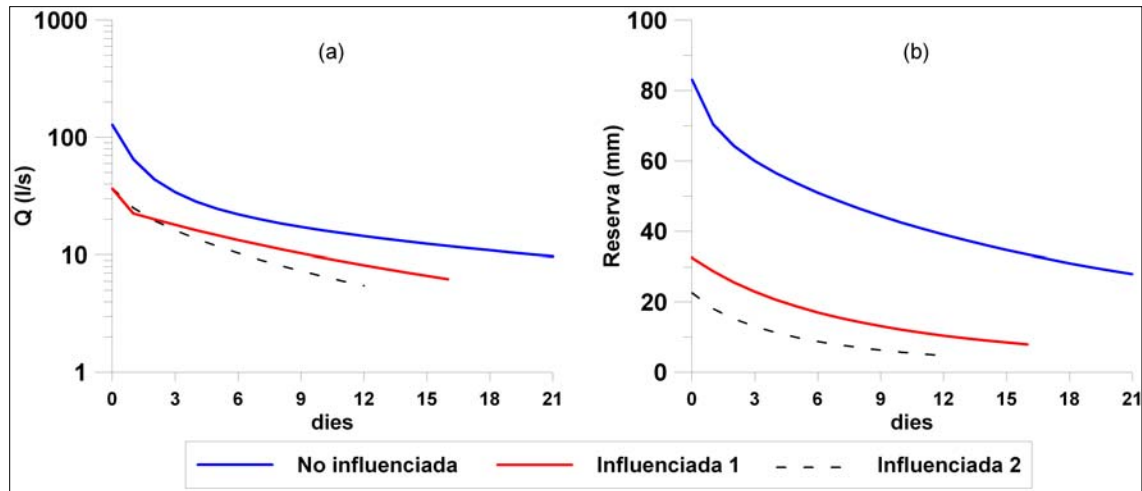


Figura 11. (a) Corbes de recessió mestre; i (b) evolució dels volums de reserva disponibles per a l'escolament.

Una vegada construïdes les CRMs, és interessant escollir i ajustar una expressió matemàtica que tradueixi la disminució de cabals en funció del temps. Aquest procés és útil, per una banda, per comparar el comportament de conques diferents i, per una altra, per determinar l'evolució de les reserves d'aigua d'una conca durant la recessió. Si el que interessa és conèixer l'evolució de les reserves hídriques d'una conca, com n'és el cas, és necessari un bon ajustament de tot el conjunt de la corba (Toebe & Strang, 1964). Aquest ajustament a partir d'una expressió matemàtica pot ser realitzat de diverses maneres (Tallaksen, 1995). Ara bé, el model d'emmagatzematge-escolament que més bé s'ajusta a un aqüífer superficial no confinat és el *Deput-Boussinesq*. Es tracta d'una solució exacta pel diferencial no lineal de l'equació d'escolament, essent una funció hiperbòlica de segon grau

$$Q = \frac{Q_0}{(1 + X_0 * t)^2} \quad (6)$$

on  $Q$  és el cabal ( $l s^{-1}$ ),  $t$  el temps d'escolament (dies) i  $X_0$  és un coeficient de recessió no constant. L'equació produeix l'escolament des d'un aqüífer no confinat i proporciona un bon ajustament per a les condicions que compleixin



aquests requisits. De totes formes, val a dir que qualcunes vegades les corbes de recessió no s'acaben d'ajustar correctament en aquesta equació, tal i com ha succeït amb Can Revull. Latron (2003) suggerí la següent solució per millorar l'ajustament de la corba de recessió:

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{(1 + X_i * t)^2} \quad (7)$$

Per a les tres corbes  $n=2$ , amb els paràmetres optimitzats aplicant una regressió no lineal limitada amb SPSS. Aquestes equacions han estat integrades per mesurar les reserves disponibles per a l'escolament, amb les quals pot ser estimat usant la següent equació:

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{(1 + X_i * t)} \quad (8)$$

on  $R$  és la reserva disponible per a l'escolament (mm).

Tal i com mostra el coeficient de recessió (Taula 8), els segments amb molt de pendent de la part superior de la CRM no influenciada semblen reflectir que l'emmagatzematge superficial respon ràpidament a les precipitacions però s'exhaureix de manera bastant ràpida. Tot i això, les altres parts de la corba tenen coeficients de recessió més baixos demostrant una bona capacitat de retenció al mantenir un 34% de les reserves hídriques al final del període de recessió gràcies a la suau topografia, a la geologia i a la textura del sòl. Els coeficients de recessió de les CRM influenciades 1 i 2 demostren la influència de l'ETP en les parts baixes d'aquestes corbes, retenint únicament el 25 i 21% respectivament de les reserves hídriques al final de cada període de recessió. De manera similar, els volums de reserva inicials són clarament diferents per a

cada CRM. Així, per a la CRM no influenciada el volum inicial fou de 83 mm, mentre que per a les influenciades 1 i 2 fou de 33 i 23 mm respectivament.

CRM	Equació	ETP mitjana per dia (mm)	Q <sub>0</sub> (ls <sup>-1</sup> )	Q <sub>7</sub> (ls <sup>-1</sup> )	Q <sub>13</sub> (ls <sup>-1</sup> )	R <sub>0</sub> (mm)	R <sub>7</sub> (mm)	R <sub>13</sub> (mm)	X <sub>0</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>13</sub>
No influenciada	$Q = \frac{106.2}{(1+0.54*t)^2} + \frac{21.8}{(1+0.03*t)^2}$	0,55	128,0	22,1	14,4	83,1	51,0	39,0	0,125	0,035	0,030
Influenciada 1	$Q = \frac{25.5}{(1+0.06*t)^2} + \frac{11.1}{(1+210.92*t)^2}$	0,98	36,6	13,3	8,2	32,6	17,1	10,5	0,091	0,064	0,064
Influenciada 2	$Q = \frac{22.4}{(1+0.09*t)^2} + \frac{14.5}{(1+0.53*t)^2}$	1,91	36,9	10,3	5,5	22,6	8,8	4,8	0,133	0,096	0,093

Taula 8. Equacions de les corbes de recessió, cabal (Q), reserva màxima disponible (R) i coeficient de recessió (X) per a t = 0, 7 i 13 dies.

#### 4.1.4. Dinàmiques de l'escolament directe: les relacions escolament-precipitació a escala temporal d'event

Tot i representar només el 2,1% del període d'estudi, l'escolament directe representa la resposta de la conca a la precipitació. Per això, les relacions precipitació-escolament foren analitzades, incloent variables hidrometeorològiques derivades dels 26 events. Les variables foren agrupades com a independents (condicions antecedents i precipitació) i com a dependents (relacionades amb el cabal). Les variables independents poden ser classificades segons les teories sobre els mecanismes de generació de l'escolament: a) variables de la intensitat de precipitació relacionades amb la teoria de Horton; b) condicions antecedents i precipitació total relacionades amb la teoria de Dunne. Segons Horton (1933), la saturació del sòl pot esdevenir quan les intensitats de precipitació superen la saturació de la conductivitat hidràulica del sòl. A més, la durada de la precipitació ha de ser més gran que el temps de saturació (*ponding time*). Si la intensitat de la

precipitació és menor que la conductivitat hidràulica, l'escolament es produeix si el nivell freàtic és elevat (Dunne & Black, 1970). Per tant, la saturació del sòl és resultat d'un increment del nivell freàtic.

Diverses regressions múltiples per passes s'han aplicat amb les variables en forma lineal i logarítmica, essent el pic de cabal màxim ( $Q_{max}$ ) i l'escolament directe ( $Q_{dir}$ ) les variables dependents. Amb l'objectiu d'avaluar la magnitud de les relacions entre variables, es va aplicar l'anàlisi de les correlacions de *Pearson*, introduint ambdós tipus de variables. Es va trobar que les variables dependents eren més significatives en format logarítmic, mentre que les variables independents ho eren més en format lineal. Totes les variables independents incloses en les regressions múltiples estaven correlacionades i eren significatives ( $p < 0,05$ ) amb les dues variables dependents.

$$\text{Log}Q_{max} = 1.248 + 0.005X_1 + 0.006X_2 + 0.015X_3 - 0.013X_4 \quad \text{Log}Q_{runoff} = 2.644 + 0.016X_1 + 0.038X_3 - 0.015X_5 - 0.001X_6$$

on	Coeficients $\beta$	
	$Q_{max}$	$Q_{runoff}$
$Q_{max}$ ; Pic de cabal màxim ( $l \text{ s}^{-1}$ )		
$Q_{dir}$ ; Escolament directe (mm)		
$X_1$ ; Precipitació antecedent 3 dies abans (mm)	0,328	0,572
$X_2$ ; Precipitació antecedent 7 dies abans (mm)	0,530	-----
$X_3$ ; Precipitació total de l'event (mm)	0,658	0,974
$X_4$ ; Intensitat de precipitació mitjana (mm)	-0,492	-----
$X_5$ ; Intensitat de precipitació màxima en 5' (mm)	-----	-0,716
$X_6$ ; Interval de temps entre la mediana de la tempesta i el pic de cabal (min)	-----	-0,474

Taula 9. Equacions derivades de les relacions precipitació-escolament aplicant la tècnica de regressió múltiple per passes així com els coeficients  $\beta$  derivats

La taula 9 mostra les equacions derivades. En tots els casos els coeficients de correlació estaven als voltants del 0,85. Aquestes equacions varen ser usades només com a mínims quadrats descriptius per ajustar-se a les dades de la conca, sempre sense anar més enllà dels límits pels quals foren derivades.

Amb tot, aquestes equacions resumeixen els processos hidrològics que prenen part en la generació de l'escolament a la conca:

- La primera equació explica el comportament del  $Q_{max}$ , el qual integra els dos components d'escolament. Tal i com indiquen els valors estacionals de BFI, quan l'escolament és present, l'escolament base i l'albellonatge jugaren un paper importantíssim durant la major part del període d'estudi. Conseqüentment, les condicions antecedents són importants en la generació d'escolament, fet corroborat per les 2 variables relacionades que formen part de l'equació: precipitació antecedent 3 i 7 dies abans de l'event. Els coeficients  $\beta$  (0,33 i 0,53 respectivament) indiquen que el  $Q_{max}$  és major quan el sòl és a capacitat de camp. Igualment, si la precipitació total de l'event és major, el  $Q_{max}$  serà major. El seu coeficient  $\beta$  (0,66) és el major de totes les variables, indicant que és la variable més influent. Finalment, la intensitat de precipitació mitjana mostra una tendència negativa (coeficient  $\beta$  és -0,49) per mor de que les intensitat de precipitació més elevades es produeixen quan la conductivitat hidràulica del sòl no està saturada i l'escolament base és baix o nul, causant que el  $Q_{max}$  sigui menor encara que les intensitats de precipitació siguin majors.

- La segona equació explica només un dels components d'escolament:  $Q_{dir}$ . En aquest cas, les condicions antecedents no són tan importants com a la primera equació. Per tant, la precipitació antecedent dels 3 dies previs és l'única variable de condicions antecedents dins l'equació. El seu coeficient  $\beta$  (0,57) és més baix que el de les variables de condicions antecedents a la primera equació. En canvi, les variables relacionades amb la precipitació com són la precipitació total de l'event i la intensitat de precipitació cada 5 minuts són les més significatives a l'estar relacionades directament amb  $Q_{dir}$ . Així, el

coeficient  $\beta$  de la precipitació total de l'event fou 0,97, essent més significatiu que a la primera equació. Igual que a la primera equació, la intensitat de la precipitació modifica negativament l'equació. Emperò aquesta vegada encara molt més ja que la variable utilitzada és la intensitat de precipitació cada 5 minuts. El coeficient  $\beta$  fou també major, indicant una influència significativa. Finalment, una segona variable il·lustrà una tendència negativa dins l'equació: l'interval de temps en minuts entre la mitjana de l'event de precipitació i el  $Q_{max}$ . Si aquest interval de temps és més llarg,  $Q_{dir}$  serà menor indicant que la conductivitat hidràulica del sòl no està saturada, causant que el  $Q_{dir}$  sigui menor ja que les reserves hídriques del sòl no estan completes.

En definitiva, ambdues variables,  $Q_{max}$  i  $Q_{dir}$  estan influenciades principalment pel mecanisme de Dunne. La capacitat de reserva hídrica del sòl ha de ser completa abans que qualsevol escolament sigui generat. Per aquest motiu, les variables hortonianes produeixen una tendència negativa en el comportament hidrològic –principalment al  $Q_{dir}$  - sobretot quan la pluja és torrencial, fet que sol ocórrer a finals d'estiu i durant la tardor justament quan l'escolament base no és present o insignificant. Per aquest motiu, els valors d'escolament són menors.

## **4.2. Transport de sediment en suspensió**

### **4.1.1. Magnitud i duració de la concentració del sediment en suspensió (CSS)**

La magnitud del CSS d'un curs fluvial està molt relacionada amb la magnitud<sup>[u4]</sup> del sediment en suspensió produït a la seva conca de drenatge. El volum

d'escolament també exercirà un control important ja que la mitjana de concentració representa la càrrega anual dividida pel volum d'escolament anual (Walling, 1996). La figura 12 i la taula 10 informen sobre els valors quinzeminutals de cabal i CSS durant el període d'estudi així com també de les corbes de duració i freqüència per aquests valors.

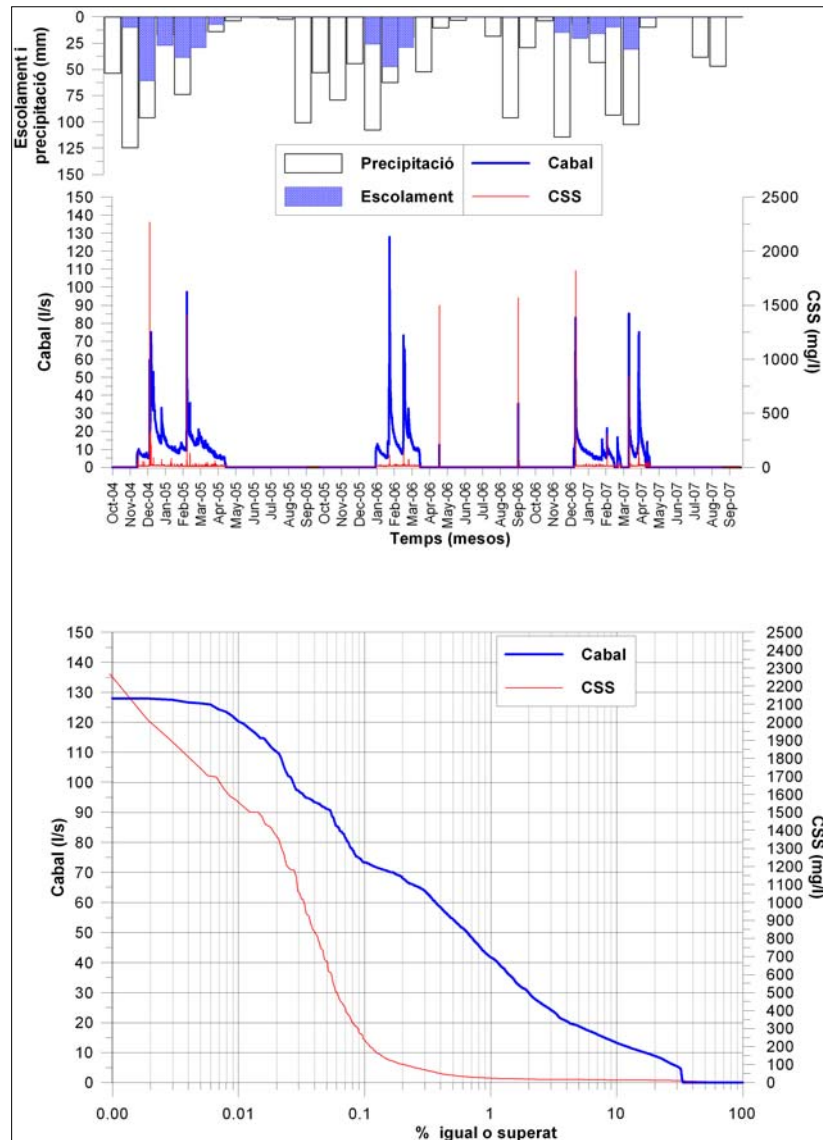


Figura 12. (a) Cabal i CSS basats en les lectures quinzeminutals; els histogrames il·lustren la precipitació i l'escolament mensuals durant el període d'estudi (2004-2007) i (b) corbes de duració de cabal i CSS durant el període d'estudi (2004-2007).

Considerant que el canal restà sec durant el 67,9% del període d'estudi, les estadístiques de SS només foren calculades quan l'escolament era present.

Per tant, la mitjana anual de la CSS va ser de  $17.3 \text{ mg l}^{-1}$ . La CSS màxima fou de  $2.270 \text{ mg l}^{-1}$  tot i que la majoria de pics oscil·laren normalment entre els 100 a  $500 \text{ mg l}^{-1}$ . Valors comparables han estat exposats a d'altres conques mediterrànies amb usos del sòl similars (Sala & Farguell, 2002) així com a ambients humits temperats (Wass & Leeks, 1999). La corba de duració de CSS indica que les concentracions romangueren per davall dels  $15 \text{ mg l}^{-1}$  durant un 79% del període d'estudi quan l'escolament era present. CSS superiors als  $100 \text{ mg l}^{-1}$  només es donaren durant un 0,6% del temps.

	Total	Tardor	Hivern	Primavera	Estiu
Concentració mitjana ( $\text{mg l}^{-1}$ )	17	24	14	20	116
Desviació estàndar	53	93	20	57	295
Concentració màxima ( $\text{mg l}^{-1}$ )	2.270	2.270	1.416	1.632	1.569
Coefficient de Variació (%)	307	385	137	292	254

*Taula 10. Estadístiques bàsiques dels valors generals i estacionals de CSS durant el període d'estudi 2004-2007.*

La variabilitat de la CSS fou molt elevada tal i com indica el coeficient de variació anual (307%). Aquesta variabilitat és més destacada que en d'altres conques mediterrànies (Batalla & Sala, 1994; Llorens et al., 1997; Farguell, 2005), fet que s'explica pels forts contrastos estacionals, clarament relacionats amb l'efecte dilució associat amb les diferents i variades dinàmiques estacionals de l'escolament base (veure secció 4.1). Aquestes dinàmiques relacionades amb els diferents efectes dilució estacionals causaren que les estacions equinoccials mostrassin els majors coeficients de variació (tardor 385%; primavera 292%) ja que la contribució de l'escolament base varia àmpliament dependent de les condicions anteriors. En canvi, les estacions solsticials mostraren els menors coeficients de variació (hivern 137%; estiu

254%) ja que la contribució de l'escolament base fou molt elevada i sostinguda durant l'hivern mentre que a l'estiu no n'hi hagué.

#### 4.2.2. La relació entre cabal i concentració del sediment en suspensió Q/CSS

Regressions	a	b	r <sup>2</sup>	n
Total	16,209	0,157	0,01	2.115
Estiu	81,060	-0,263	0,03	443
Hivern	5,802	0,424	0,09	1.672
Branca d'ascens	6,754	0,486	0,17*	548
Branca de descens	24,614	0,020	0,00	1.567
Ascens d'estiu	8,419	0,456	0,13*	148
Descens d'estiu	275,731	-0,610	0,17*	297
Ascens d'hivern	5,236	0,545	0,20*	400
Descens d'hivern	5,353	0,419	0,08	1.270

Taula 11. Forma de la equació i ajust de les relacions entre la CSS i el cabal durant el període d'estudi 2004-2007. \* Correlacions significatives al nivell de 0,05.

La magnitud i duració de la CSS ha proporcionat una primera aproximació en l'avaluació de la producció de SS a la conca evidenciant que per a un cabal determinat, les concentracions són majors a l'estiu que a l'hivern. La corba de regressió (*rating curve*) i els seus paràmetres relacionats *a* i *b* reflecteixen el patró d'erosió d'una conca de drenatge. No obstant, com les variacions del cabal només expliquen entre un 1 i un 20% de la varianza del SS (Taula 11), no va ser possible analitzar el patró d'erosió i el funcionament dels processos de redistribució del sediment utilitzant els paràmetres de regressió (Syvitski et al., 2000). La manca important de correlació entre el cabal i la CSS demostra que l'energia hidràulica no fou el factor predominant en els processos d'erosió del sòl i el posterior transport de sediment en el canal.



### 4.2.3. Relacions multivariants en la concentració del sediment en suspensió (CSS)

La manca de correlació entre el cabal i la CSS reflectida en la dispersió de les corbes de regressió implica que deuen ser altres els factors que controlen el subministrament de SS al canal. Amb tot, l'anàlisi multivariant hauria de millorar la comprensió dels mecanismes que controlen aquest procés.

(a)

<b>Variables dependents</b>					
<b>CSS-total</b>			<b>CSS-directe</b>		
Subdivisió	Equació	R <sup>2</sup> ajustat	Equació	R <sup>2</sup> ajustat	
<i>General</i>	$-105.622 + 0.095X_1 + 2754.326X_3 + 11.493X_5$	0,901	$-170.738 + 6262.596X_3 + 31.191X_5$	0,880	
<i>Hivern</i>	$-97.207 + 0.076X_1 + 2329.822X_3 + 16.147X_5$	0,959	$-239.237 + 0.143X_1 + 3928.361X_3 + 49.245X_5$	0,974	
<i>Estiu</i>	$22.325 + 9.649X_5$	0,833	$81.386 - 0.595X_1 + 31.154X_4$	0,996	
<i>Pic</i>	$-126.181 + 0.105X_1 + 2872.609X_3 + 11.571X_6$	0,926	$-184.591 + 6933.951X_3 + 30.712X_5$	0,899	
<i>Multi-pic</i>	$-58.194 + 1.073X_2 + 13.705X_4$	0,974	$-130.246 + 2.124X_2 + 24.578X_4$	0,959	

(b)

<b>Coefficients <math>\beta</math></b> <i>Variables Independents</i>	<i>General</i>		<i>Hivern</i>		<i>Estiu</i>		<i>Pic</i>		<i>Multi-pic</i>	
	CSS total	CSS directe	CSS total	CSS directe	CSS total	CSS directe	CSS total	CSS directe	CSS total	CSS directe
$X_1$ ; Duració de l'event de SS (min)	0,256		0,144	0,110		-0,405	0,236			
$X_2$ ; Interval de temps entre l'inici de la tempesta i l'inici del transport de SS (min)									0,496	0,525
$X_3$ ; Índex d'intensitat de la crescuda	0,493	0,447	0,426	0,293			0,523	0,481		
$X_4$ ; Intensitat màxima de precipitació en 30' (mm)									0,734	0,704
$X_5$ ; Intensitat de precipitació mitjana (mm)	0,697	0,732	0,576	0,717	0,926	1,065	0,686	0,716		

Taula 12. (a) Equacions derivades per a la CSS-total i per a la CSS-directa aplicant la tècnica de la regressió múltiple per passes i (b) els coeficients  $\beta$  derivats.

L'explicació dels processos de transport de SS fou millorada significativament a través de les equacions de regressió múltiple. D'aquesta manera, si el cabal

únicament explicava un màxim del 20% de la variança del SS, les variables de regressió múltiple assoliren nivells d'explicació de la variança del SS entre el 83 i el 99%. La taula 12 mostra les equacions i els valors del coeficient  $\beta$  que permeten interpretar els processos involucrats en el subministrament de sediment al canal. Posteriorment, la CSS i la CSS-directa foren comparades a través dels coeficients  $\beta$  tenint en compte totes les subdivisions realitzades en el conjunt total de dades:

- Equacions generals. La intensitat de la precipitació ( $I_{prec}$ ) fou la variable més significativa, tant per a la CSS-total com per a la CSS-directa. Arabé, va ser més important a la CSS-directa (0,732) que a la CSS-total (0,697) ja que la  $I_{prec}$  juga un paper molt important en la mobilització de SS per part de l'escolament directe, el qual és generat principalment als vessants. La intensitat de crescuda ( $I_{cres}$ ) és la segona variable més significativa (veure la taula 3 per tenir més detalls sobre la seva estimació). En aquest cas, només una mica més influent en la CSS-total (0,493) que a la CSS-directa (0,447). El rentatge del canal per part de cabals elevats està directament relacionat amb la  $I_{cres}$ . En aquest sentit, quan l'escolament base és present de manera perllongada, es produeixen una diversitat de processos físics i biològics dins el canal que provoquen un increment de l'emmagatzematge de sediment disponible el qual serà fàcilment remogut per aquests processos de rentatge relacionats amb la  $I_{cres}$  (Imeson, 1977; Walling & Webb, 1982; Carling, 1983). Per contra, durant l'estiu el segellament i encrostiment són els processos més comuns que redueixen la disponibilitat de sediment en el canal (Zhu et al., 1999). Finalment, la durada de l'event de SS fou significativa a l'equació de la CSS- total ja que el nombre d'events d'hivern fou més important que els d'estiu. Per afegit, la

durada dels events estiuencs fou més curta que la dels d'hivern per mor de que les tempestes d'elevada intensitat que es produeixen a l'estiu són de curta durada, a més de l'absència d'escolament base.

- Equacions estacionals. Ja que els paràmetres físics controlen el subministrament de SS al canal de diverses formes durant els períodes secs i humits, les equacions estacionals haurien d'evidenciar millor aquests processos. Així, la  $I_{prec}$  torna a ser la variable més influent durant l'hivern i l'estiu, tant per a la CSS- total com per a la CSS-directa. Tot i això, fou més important en la CSS-directa que en la CSS- total tal i com ha estat explicat a les equacions generals. Una anàlisi més detallada mostra com la  $I_{prec}$  és més significativa durant l'estiu al predominar intensitats elevades de precipitació associades a sistemes convectius, mentre que a l'hivern domina la pluja extensa i continuada vinculada a sistemes frontals (Romero, 2001). La  $I_{cres}$  també controla la CSS- total i la CSS-directa durant l'hivern, mentre que a l'estiu no és important perquè l'escolament base no hi és present o és insignificant. Inversament a les equacions generals, els coeficients  $\beta$  de la  $I_{cres}$  durant l'hivern són clarament diferents entre la CSS- total (0,426) i la CSS-directa (0,293), ja que la  $I_{cres}$  és una variable directament relacionada amb l'energia hidràulica del canal, la qual provoca el rentatge del sediment generat per processos biològics i físics i que és emmagatzemat al canal durant els períodes en que l'escolament base és present de manera perllongada, sobretot durant l'hivern. Finalment, la durada de l'event de SS és significativa només a la CSS-directa durant l'estiu (-0,405) denotant que un increment de la durada de l'event és associada amb una disminució de la CSS-directa, ja que quan

l'event dura més implica la presència d'un període de recessió que genera escolament base i que provoca un efecte diluïó.

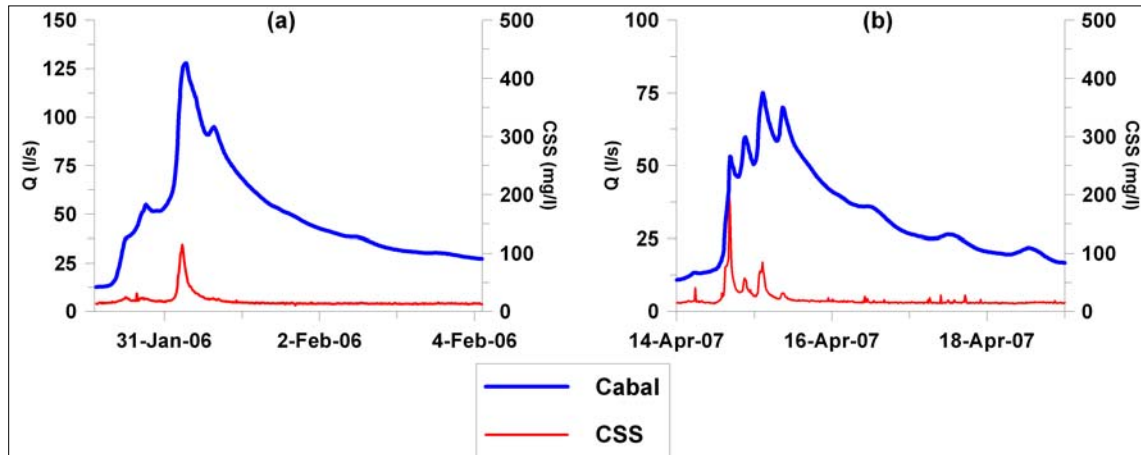


Figura 13. Exemples de crescudes (a) d'un sol pic i (b) multi-pic

- Equacions d'events de pic individual o multi-pic. La figura 13 mostra un exemple d'event de pic individual i d'un event multi-pic. Els events multi-pic es produeixen quan la ciclogènesi mediterrània genera sistemes de baixes pressions associats de fronts de pluja continuada i extensa que es van succeint (Romero, 2001). Per una altra banda, els events de pic individual estan relacionats a d'altres condicions sinòptiques com sistemes convectius o sistemes frontals atlàntics. Les equacions d'event de pic individual mostren una dinàmica del SS molt semblant a la de les equacions generals ja que un 77% dels events són de pic individual. En canvi, les equacions d'event multi-pic mostren un patró ben diferenciat. La  $I_{prec}$  continua essent la variable més significativa mitjançant la intensitat de precipitació màxima en 30'; mentre que la  $I_{cres}$  és reemplaçada ja que el primer pic fou considerat com a un event de pic individual. Per tant, els processos de rentatge relacionats amb la  $I_{cres}$  no tenen lloc, fent que la relació temporal entre la P i el SS sigui la segona variable més

significativa, revelant que la CSS s'incrementa quan el desfasament entre l'inici de la tempesta i l'inici del transport de SS és més llarg.

#### **4.2.4. Exportació i taxes de producció de sediment en suspensió**

Durant el període d'estudi, l'exportació total estimada va ser de 9.962 kg, la qual cosa representa una taxa de producció mitjana anual de 3,1 t km<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>. Les taxes de producció anuals foren de 4,5; 2,2 i 2,7 t km<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> respectivament (Taula 13).

<b>Any</b>	<b>Exportació (kg)</b>	<b>Taxa producció (t km<sup>2</sup> yr<sup>-1</sup>)</b>	<b>Escolament (mm)</b>
2004-05	4.753,3	4,5	173,3
2005-06	2.325,9	2,2	102,8
2006-07	2.883,3	2,7	92,7
<b>Mitjana període</b>	<b>3.320,8</b>	<b>3,1</b>	<b>122,9</b>

*Taula 13. Exportació, taxes de producció de sediment en suspensió i escolament durant el període d'estudi 2004-2007.*

La manca d'estudis de transport de sediment a conques agrícoles mediterrànies dificulta qualsevol intent de comparació de les taxes de producció. En canvi, si es considera que l'ús del sòl és probablement el factor de control dominant dels fluxos de SS en àrees de relleus suaus, contràriament al que succeeix a regions muntanyenques on els processos naturals continuen dominant (Syvitski, 2003), la rompuda de terres en aquestes àrees de relleus suaus hauria d'incrementar les taxes de producció de sediment amb més d'un ordre de magnitud (Douglas, 1993). A més, és un efecte que s'incrementa com més petita sigui l'àrea de drenatge ja que les conques més petites tenen una major capacitat de resposta hidrològica a més d'una menor capacitat d'emmagatzematge dels sediments erosionats (Milliman & Syvitski, 1992). Amb aquests paràmetres condicionants s'haurien d'il·lustrar unes taxes de producció

de sediment elevades ja que Can Revull drena un àrea de només 1 km<sup>2</sup> i hi predominen els usos agrícoles. Emperò, les taxes de producció de sediment foren molt menors si es comparen amb aquelles calculades per diversitat d'autors en d'altres conques de clima mediterrani (Milliman & Mead, 1983; Inbar, 1992; Walling & Webb, 1996; Batalla et al., 2005a; Batalla et al., 2005b; Achite & Ouillon, 2007), fins i tot a conques forestals. Aquest fet pot ser relacionat amb una combinació de diversos factors. El primer de tots està relacionat amb aquelles àrees de major pendent i de topografia convexa que han estat modificades històricament per la construcció d'estructures de retenció per evitar l'erosió tals com marjades i parats (veure secció 1.2.2 i secció 2). El segon factor està relacionat a les àrees planes que són ocupades majoritàriament per conreus herbacis de secà, conreus que estan associats inicialment amb taxes d'erosió elevades (Kosmas et al., 1997). Però, a les àrees planes de Can Revull la connectivitat entre els vessants i el canal és pràcticament nul·la perquè la sèquia s'ha construït per sobre del tàlveg natural a més del predomini de formes topogràfiques còncaves. Ambdós factors provoquen que el sediment no sigui transferit als canals.

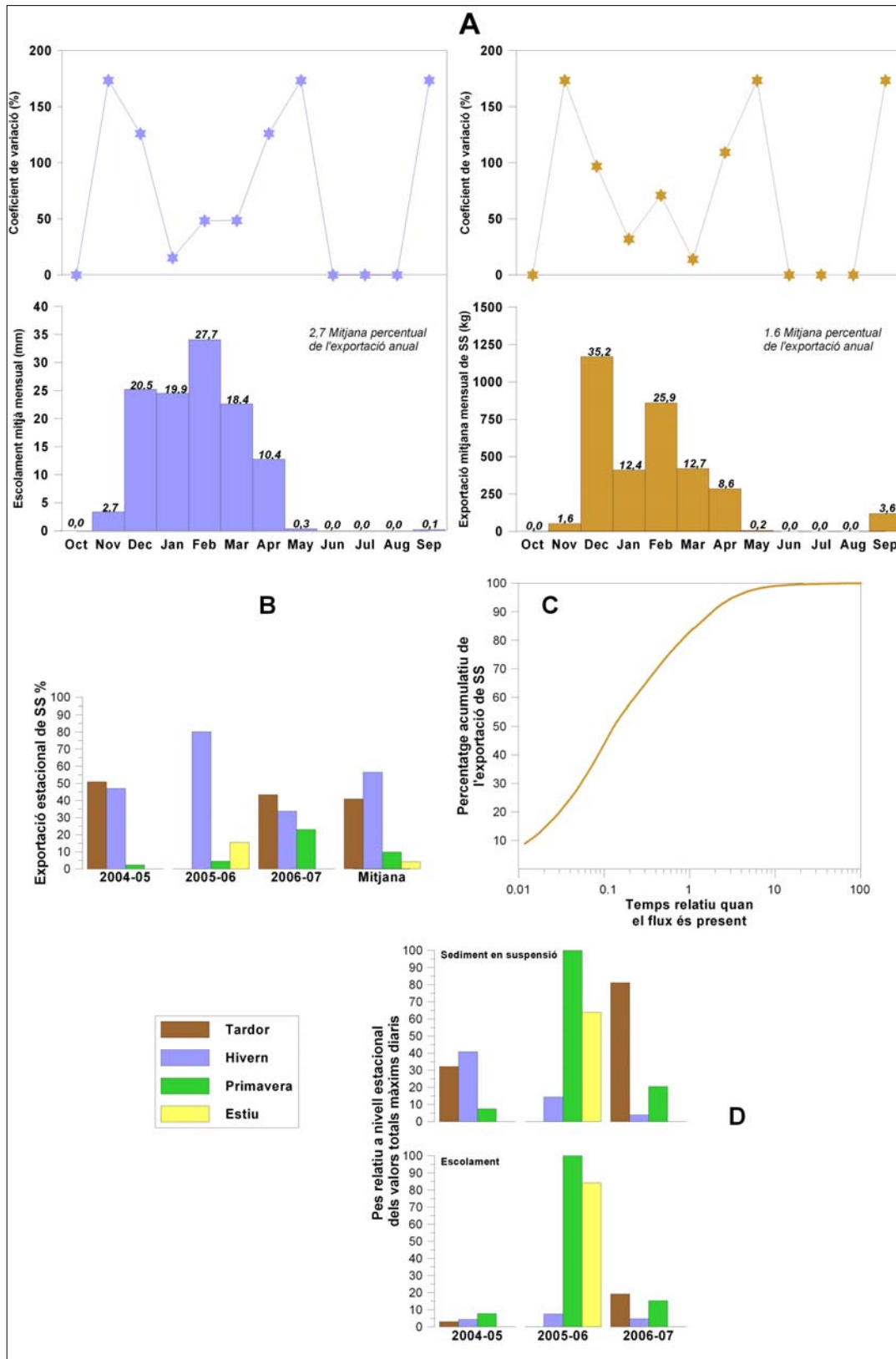


Figura 14. Avaluació de l'exportació de SS durant el període d'estudi (2004-2007): (a) Exportació mitjana mensual d'escolament i SS així com els valors dels coeficients de variació respectius; (b) Importància relativa de l'exportació estacional de SS per a cada any hidrològic i de tot el període d'estudi; (c) Corba de duració acumulativa d'exportació de SS; (d) Importància relativa estacional de l'escolament i exportació de SS màxims diaris.

La figura 14A mostra l'exportació mitjana anual de SS i de l'escolament pel període d'estudi a més dels seus coeficients de variació. Les formes generals de l'exportació de SS i de l'escolament mostren algunes diferències significatives. Així, l'exportació màxima de SS es va produir al desembre quan el sediment disponible als vessants llaurats de capçalera és remogut (Fig.15).



*Figura 15. La fotografia mostra un dels xaragalls efimers formats a l'inici del període d'hivern a la zona de capçalera*

Durant el gener, la Mediterrània occidental normalment es troba sota la influència d'altres pressions fredes que estableixen el temps. Així, l'exportació de sediment al gener fou molt menor que al desembre, mentre que l'escolament fou molt similar gràcies al predomini de l'escolament base reforçat per l'albellonatge. Al febrer, els fronts atlàntics tornen a aportar més pluja incrementant el ja elevat escolament base mantingut gràcies als baixos valors d'ET. Conseqüentment, el febrer enregistra el màxim mensual d'escolament. En canvi, el transport de SS fou menor que el desembre evidenciant un exhauriment del sediment mobilitzat als vessants durant el desembre, afegint que la cobertura vegetal d'aquests vessants ja és major pel creixement dels conreus herbacis. A més, al febrer la mobilització de sediment al canal és més important per mor dels processos de rentatge vinculats a la generació física i



biològica de sediment relacionada amb la presència perllongada d'escolament base.

El règim anual de l'exportació de SS és anàleg al d'escolament. Així, el període comprès entre desembre a febrer suposa el 73% del transport de SS anual i el 68% de l'escolament anual. Per contra, als mesos d'estiu el transport de SS queda restringit i menys del 13% de l'exportació anual de SS és transferida en el període de 6 mesos comprès de l'abril al setembre (ambdós inclosos). En ambients humits temperats, l'escolament és relativament més important que l'exportació de SS durant l'estiu (Walling & Webb, 1982). En canvi, a Can Revull, l'escolament estiuenc representa menys de l'11% de l'escolament anual ja que el comportament efímer és predominant. L'analogia d'aquests règims es recolza en uns coeficients de variació molt similars dels valors derivats de la mitjana mensual de l'exportació de SS i de l'escolament.

Si la comparació a escala mensual ha estat possible, a escala estacional ha estat difícil d'establir. A més, si la CSS mostrà un comportament estacional, l'exportació de SS no mostra aquest mateix patró. L'estacionalitat no és consistent any per any i no implica que en una estació es puguin exportar la mateixa o similar quantia de SS (Fig.14B) per mor de la irregularitat en els patrons estacionals dels climes mediterranis.

Per analitzar l'exportació de SS amb més detall, és necessari estudiar la periodicitat del transport de SS. Així, la realització de corbes de duració acumulatives de les exportacions de SS basades en els valors quinzeminutals quan l'escolament era present, proporciona una millor perspectiva del transport de SS. Exportacions elevades, associades a tempestes de curta durada, són més evidents amb la informació de la durada de l'exportació expressada en

format acumulatiu (Fig.14C). Aquestes dades indiquen que el 50% de l'exportació total fou remoguda durant només un 0,13% del període d'estudi quan l'escolament era present. La major part (90%) del SS fou transportat en només un 1,09% del temps quan l'escolament era present. La manca d'efectivitat de transport del SS durant els períodes de cabals baixos també s'evidencia pel fet de que menys de l'1% de l'exportació total de SS fou transferida durant un període de temps que suposa un 90% del període d'estudi.

La figura 14D mostra la importància dels events de major magnitud en el transport de SS i en l'escolament. Els valors foren calculats a partir de les dades instantànies quinzeminutals i també estan expressades com a un percentatge de l'exportació total estacional. Quan l'escolament era present, l'event diari més extrem de cada estació va tenir un impacte molt major en el transport de SS que a l'escolament. Les proporcions poden variar considerablement a nivell estacional i anual per mor de la distribució irregular de la P típica del clima mediterrani. A l'any 2004-2005, el màxim diari de l'exportació de SS suposà un 20% de l'exportació estacional de SS mentre que el màxim diari d'escolament només comptabilitzà un 3,7% del volum estacional. Per altra banda, durant l'any hidrològic 2005-2006 el pes relatiu del valor màxim diari de l'exportació estacional de SS fou del 44,5%, mentre que per a l'escolament estacional fou del 47,9%. Així, durant l'any hidrològic 2004-2005 els principals events de P tingueren lloc a finals de tardor i durant l'hivern quan les reserves hídriques de la conca havien estat recarregades i les pèrdues per ET eren mínimes comparades amb la P. Amb aquest escenari, importants volums d'escolament base foren generats permetent diferències significants

entre les proporcions relatives dels valors màxims diaris de SS i d'escolament. En canvi, durant l'any 2005-2006 els principals events de P es produïren durant la primavera i l'estiu just quan la demanda evapotranspirativa era molt elevada, els sòls estaven secs i l'escolament base no era present. Amb aquestes condicions, les poques tempestes de curta durada i elevada intensitat que es produïren provocaren que el pes relatiu a nivell estacional dels valors màxims diaris d'escolament fos més important que el de l'exportació de SS.

## 5 CONCLUSIONS

S'ha realitzat una anàlisi del comportament hidrològic i del transport de sediment en suspensió en una petita conca de drenatge del Pla de Mallorca durant un període d'estudi de 3 anys a través del monitoratge continu del cabal i de la terbolesa. Aquesta conca és particularment interessant per l'activitat agrícola extensiva herbàcia de secà i per l'aplicació de pràctiques tradicionals d'evacuació del sobrant d'aigua del sòl i de prevenció de l'erosió dels sòls. Després d'aquest estudi detallat, s'han pogut extreure una sèrie de conclusions que es proposen separatament per a la hidrologia i el transport de SS.

### 5.1. Hidrologia

1. El balanç hidrològic simple proporciona una visió general del comportament de les variables hidrològiques a escala estacional i confirma que l'ETP és la principal variable que controla les dinàmiques hidrològiques de la conca. El coeficient d'escolament mitjà anual fou relativament elevat (24,8%) per mor de la presència de l'albellonatge en sòls amb una elevada capacitat d'emmagatzematge. La manca de significació de les relacions lineals<sup>[u5]</sup> establertes entre la precipitació i l'escolament a escala anual i estacional pot ser relacionada amb el curt període de temps en que s'ha desenvolupat l'estudi i al limitat rang d'escenaris evapotranspiratius. Com a conseqüència, només fou possible observar la successió de tres períodes hidrològics diferenciats al llarg de l'any.

2. Les corbes de duració de cabal (FDC) mostren que el flux només va ser present durant un 32,4% del temps, mentre que l'escolament directe quedà

reduït a un 2,1% del temps. Tot i això, hi ha qualcunes diferències significatives a escala estacional. Així, mentre que a l'hivern hi va haver flux durant un 90% del temps, a l'estiu només n'hi va haver un 0,8%. L'escolament directe fou present un 4,9% del temps a l'hivern mentre que només un 0,5% a l'estiu. Aquestes diferències estacionals es poden observar millor aplicant l'índex de variabilitat i l'índex 30/70, els quals confirmen la successió dels tres períodes hidrològics diferenciats on les dinàmiques d'emmagatzematge d'aigua al sòl i l'albellonatge juguen un paper molt important en la generació d'escolament.

3. L'índex de resposta i l'índex d'escolament base (BFI) són dos bons indicadors del comportament de cadascun dels components de l'escolament. L'índex de resposta fou baix (2,4%) a escala anual, indicant elevats dèficits d'humitat en el sòl, clarament relacionats amb l'ETP. A escala estacional, els valors de l'índex de resposta es corresponen clarament amb la successió dels tres períodes hidrològics associats amb les dinàmiques d'emmagatzematge d'aigua al sòl. Aquests períodes estan clarament definits per la mitjana anual del BFI (0,92), indicant una elevada contribució d'escolament subsuperficial per mor de les aportacions de l'aqüífer no confinat que es generen als sòls profunds, aportacions que es veuen incrementades pel funcionament de l'albellonatge.

4. Una anàlisi acurada dels períodes de recessió ha permès valorar la importància d'aquestes dinàmiques d'escolament base. Així, tres corbes de recessió mestre (CRM) varen ser distingides segons diferents escenaris evapotranspiratius, els quals se situen temporalment a finals de tardor i l'hivern (CRM no influenciada), finals d'hivern (CRM influenciada 1) i principis de primavera (CRM influenciada 2). El model Deput-Boussinesq per a aqüífers no

confinats superficials va ser aplicat, mentre que els volums de reserva disponibles per a l'escolament foren calculats per integració. Entre les tres CRM es varen poder establir remarcables diferències. Així, la CRM no influenciada durà 22 dies amb una reserva hídrica disponible al final del període de recessió de 83 mm, mentre que la CRM Influenciada 1 durà 17 dies amb 33 mm de reserva hídrica al final del període de recessió. Finalment, la CRM influenciada 2 durà només 13 dies amb 23 mm de reserva hídrica disponible al final del període de recessió.

5. Finalment, es varen establir diverses regressions múltiples per passes per analitzar les relacions pluja-escolament. El pic de cabal màxim ( $Q_{max}$ ) i l'escolament directe ( $Q_{dir}$ ) foren les variables dependents i diverses variables de condicions antecedents relacionades amb la precipitació foren les variables independents. Ambdues variables dependents es varen veure influenciades principalment pels mecanismes de generació d'escolament de Dunne ja que les reserves hídriques de l'aqüífer superficial i l'albellonatge han d'estar recarregats abans de que qualsevol flux sigui generat. Per aquest motiu, les variables hortonianes mostraren una influència negativa en el comportament hidrològic, sobretot l'escolament directe, ja que quan la precipitació era torrencial al final de l'estiu i durant la tardor, l'escolament base no era present o era insignificant, per la qual cosa, els valors d'escolament foren menors.

Aquests resultats proporcionen una informació valuosa sobre les dinàmiques hidrològiques d'una conca representativa dels usos del sòl al Pla de Mallorca, o sia, per l'agricultura herbàcia de secà i l'albellonatge. En definitiva, es pot concloure que són dues les variables que condicionen el funcionament hidrològic d'aquestes àrees:

a) L'ETP fou la variable més influent a escala anual i estacional, generant una successió de tres períodes hidrològics diferenciats. A més, jugà un paper important en el control de les dinàmiques d'escolament base originalment controlades per unes capacitats de camp elevades en els sòls argilosos, els quals generen unes importants reserves hídriques disponibles per a l'escolament però que es veuen dràsticament reduïdes amb petits increments de l'ETP.

b) La capacitat d'emmagatzematge al sòl i l'albellonatge són les altres dues variables influents en la generació d'escolament. Ambdues expliquen els elevats valors anuals del coeficient d'escolament i el control exercit sobre la resposta de l'escolament directe. En canvi, les variables relacionades amb la intensitat de la precipitació indiquen una influència negativa en el comportament hidrològic, ja que la resposta hortoniana es veu limitada durant les estacions seques per la manca d'escolament base que provoca que els valors totals d'escolament siguin menors.

## **5.2. Transport de sediment en suspensió**

1. La mitjana anual de concentració de sediment en suspensió fou de  $17,3 \text{ mg l}^{-1}$ , amb un valor màxim assolit de  $2.270 \text{ mg l}^{-1}$ . Val a dir, emperò, que les concentracions màximes oscil·laren normalment entre els 100 i  $500 \text{ mg l}^{-1}$ . Valors comparables han estat exposats a d'altres conques amb usos del sòl similars a ambients mediterranis. Les concentracions romangueren per davall de  $15 \text{ mg l}^{-1}$  durant un 79% del període d'estudi quan l'escolament era present; i superaren els  $100 \text{ mg l}^{-1}$  només durant un 0,6% del temps. No obstant, la

variabilitat de la CSS fou molt elevada (CV 307%), essent molt més gran que en d'altres conques mediterrànies. Aquesta gran variabilitat s'explica pels forts contrastos estacionals de les dinàmiques d'escolament base, els quals s'associen a diferents graus de dilució.

2. Els paràmetres de les corbes de regressió foren derivats i haguessin pogut ser usats per explicar el patró inicial de l'erosió i el funcionament dels processos de redistribució de sediment. Emperò, les variacions del cabal només explicaren entre un 1 i un 20% de la variança del SS, demostrant que l'energia hidràulica no fou el factor predominant en els processos d'erosió del sòl.

3. La regressió múltiple per passes fou aplicada per a la CSS i per a la CSS-directa, produint valors de  $R^2$  que oscil·laren entre 0,83 i 0,99. La interpretació dels valors de  $\beta$  mostren que la intensitat de la precipitació fou la variable més significativa, sobretot per a la CSS-directa ja que la intensitat de precipitació implica que l'escolament directe mobilitza el sediment dels vessants. Aquest procés té lloc principalment durant l'estiu quan predominen les precipitacions convectives i la disponibilitat de sediment és major als vessants desproveïts de vegetació. Per una altra banda, la intensitat de crescuda és la segona variable més influent, controlant només les regressions general i d'hivern. És més significativa per a la CSS-total que per a la CSS-directa ja que la intensitat de crescuda està directament relacionada amb els processos de rentatge dins del canal. Per tant, quan l'escolament base és present, el rentatge mobilitza fàcilment el sediment emmagatzemat al canal que ha estat generat per processos físics i biològics. En canvi, durant l'estiu la disponibilitat de sediment és reduïda per mor dels processos de segellament i encrostiment.



4. L'exportació total transportada fou calculada en 9,96 t durant el període d'estudi, oferint una taxa de producció específica de sediment en suspensió de  $3,1 \text{ t km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ . Es tracta d'un valor baix que pot ser explicat per dos factors: (a) històricament, les zones de capçalera foren modificades mitjançant marges i parats per evitar l'erosió; (b) a les zones planes, la topografia còncava i la desviació del canal per damunt del tàlveg natural proporciona una baixa connectivitat entre els vessants i el canal que limita els processos de redistribució del sediment al llarg del sistema fluvial.

5. La majoria del sediment fou transportat durant curts períodes de temps. Un 50% de l'exportació total fou remoguda en només un 0,13% del període d'estudi. A més, quan l'escolament base era present, l'event diari més extrem de cada estació va tenir un impacte molt major en el transport de SS que a l'escolament. Contràriament, quan la demanda evapotranspirativa fou molt elevada i l'escolament base no era present, les tempestes d'alta intensitat i curta durada varen causar que el pes relatiu a nivell estacional dels valors màxims diaris d'escolament fos més important que el de l'exportació de SS.

Per concloure, es pot assegurar que la variabilitat de l'escolament base i les pràctiques tradicionals de conservació del sòl restringeixen el transport de sediment en suspensió de la manera següent:

a) Els forts contrastos estacionals de les dinàmiques de l'escolament base associades a diferents graus de dilució proporcionen una elevada dispersió de la CSS i en les corbes de regressió, indicant que altres factors controlen l'aportació de SS. La intensitat de precipitació és la variable més significativa en l'aportació de SS. En canvi, quan l'escolament base és present, els processos físics i biològics generen sediment en el canal el qual és fàcilment remogut per

cabals elevats. Mentrestant, quan l'escolament base no és present, només la intensitat de precipitació és la variable que proporciona sediment al canal, majoritàriament des dels vessants.

b) Les taxes de producció de sediment en suspensió a Can Revull són al manco d'un ordre de magnitud inferior a la resta de conques mediterrànies estudiades, fins i tot aquelles on predomina un ús del sòl forestal. El cas de Can Revull exemplifica la contribució de les pràctiques tradicionals en la reducció substancial de l'exportació de sediment en suspensió, inclús a un ambient altament energètic com els de la regió mediterrània.

## **6 AGRAÏMENTS**

Aquest treball s'ha beneficiat del projecte REN2001-0281 "Caracterización hidrológica y transporte de sedimentos bajo diferentes usos del suelo en la cuenca del torrent de na Borges (Mallorca)" i del conveni amb el Ministerio de Medio Ambiente "Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Erosión y la Desertificación (RESEL)".

S'agraeix a Sebastià Barceló Sansó l'amabilitat i predisposició per crear l'estació d'aforament a Can Revull, finca de la seva propietat. Igualment, l'ajut tècnic durant el procés de construcció i en el treball de camp de Joan Miquel Carmona.

## 7 BIBLIOGRAFIA

Alexandrov Y, Laronne JB, Reid I. 2003. Suspended sediment concentration and its variation with water discharge in a dryland ephemeral channel, northern Negev, Israel. *Journal of Arid Environments* **53** (1): 73-84.

Balash JC, Batalla RJ, Poch RM, Vericat D. 2005. Patterns of suspended sediment transport in two forested Mediterranean mountainous basins (Ribera Salada, Catalan Pre-Pyrenees, NE Spain). A: *Geomorphological Processes and Human Impacts in River Basins*, Batalla RJ, Garcia C. (eds.). IAHS Publication No. 299, International Association of Hydrological Science: Wallingford; 131-138.

Batalla RJ, Sala M. 1994. Temporal variability of suspended sediment transport in a Mediterranean sandy gravel-bed river. A: *Variability in Stream Erosion and Sediment Transport*, Olive LJ, Loughran RJ, Kesby JA. (eds.). IAHS Publication No. 224. International Association of Hydrological Science: Wallingford; 299-305.

Batalla RJ, Sala M, Werrity A. 1995. Sediment budget focused in solid material transport in a subhumid Mediterranean drainage basin. *Zeitschrift für Geomorphologie* **39** (2): 249-264.

Batalla RJ, Garcia C, Balash JC. 2005a. Total sediment load in a Mediterranean mountainous catchment (the Ribera Salada River, Catalan Pre-Pyrenees, NE Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie* **49** (4): 495-514.

Batalla RJ, Garcia C, Rovira A. 2005b. A decade of sediment transport measurements in a large Mediterranean river (the Tordera, Catalan Ranges, northeast Spain). A: *Catchment Dynamics and River Processes. Mediterranean and Other Climate Regions*, Garcia C., Batalla, RJ. (eds). Elsevier; 117-140.

Bonner A. 1994. *Plantes de les Balears*. Editorial Moll: Palma de Mallorca; 147 p.

Brown EH. 1970. Man shapes the Earth. *Geographical Journal* **136** (1): 74-85.

Carling PA. 1983. Particulate dynamics, dissolved and total load, in two small basins, northern Pennines, UK. *Hydrological Sciences Journal* **28**: 355-375.

Castillo V, Gómez-Plaza A, Martínez-Mena M, Albaladejo J. 2000. Respuesta hidrológica en medios semiáridos: las cuencas experimentales de la Sierra del Picarcho, Murcia (España). *Cuadernos de Investigación Geográfica* **26**: 81-94.

Ceballos A, Schnabel S. 1998. Hydrological behaviour of a small catchment in the dehesa landuse system (Extremadura, SW Spain). *Journal of Hydrology* **210**: 146-160.

Chorley R. 1969. The drainage basin as the fundamental geomorphic unit. A: *Water, Earth and Man*, Chorley R. (ed.): Wiley: London; 77-100.

Chorley R, Kates RW. 1973. Introduction. A: *Water, Earth and Man*, Chorley R. (ed.): Wiley: London; 1-10.

Chow VT, Maidment DR, Mays LW. 1988. *Applied Hydrology*. McGraw Hill: New York; 572 p.

Davide V, Pardos M, Diserens J, Ugazio G, Thomas R, Dominik J. 2003. Characterisation of bed sediments and suspension of the river Po (Italy) during normal and high flow conditions. *Water Research* **37** (12): 2847-2864.

Diaz Palmer A, Garcia C, Servera J, Úbeda X. 2006. Spatial variability of total nitrogen, total carbon and organic carbon content in the top-soil of the Na Borges basin, Mallorca, Spain. *Zeitschrift für Geomorphologie / NEUE FOLGE* **143**: 83-94.

Dietrich WE, Dunne T. 1978. Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplement. Band 29*: 191-206.

Djorovic M. 1992. Ten-years of sediment discharge measurement in the Jasenica research drainage basin, Yugoslavia. A: *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions*, Walling DE, Davies T, Hasholt B. (eds.). IAHS Publication No. 209. International Association of Hydrological Science: Wallingford; 37-40.

Douglas I. 1993. Sediment transfer and siltation. A: *The Earth as Transformed by Human Action*, Turner BL, Clark WC, Kates RW, Richards JF, Mathews JT, Meyer WB. (eds.). Cambridge University Press: Cambridge; 215-234.

Dunne T, Black RD. 1970. Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. *Water Resources Research* **6**: 1296-1311.

Estrany J, Garcia C. 2005. Monitoring suspended sediment fluxes in the Na Borges basin, Mallorca, Spain. A: *Geomorphological Processes and Human Impacts in River Basins*, Batalla RJ, Garcia C. (eds.). IAHS Publication No. 299, International Association of Hydrological Science: Wallingford; 119-125.

Farguell J. 2005. *Suspended sediment dynamics and yield in the Mediterranean Anoia River basin under different land uses*. Tesi doctoral no publicada. Universitat de Barcelona: Barcelona; 217 p.

Farguell J, Sala M. 2005. Seasonal suspended sediment concentrations and their relationship with discharge in the Anoia River Basin, NE Spain. A: *Geomorphological Processes and Human Impacts in River Basins*, Batalla RJ, Garcia C. (eds.). IAHS Publication No. 299, International Association of Hydrological Science: Wallingford; 111-116.

Farguell J, Sala M. 2005. Seasonal trends of Suspended Sediment Concentration in a Mediterranean Basin (Anoia River, NE Spain). A: *Soil erosion and sediment redistribution in river catchments. Measurement, Modelling and Management*, Owens PN, Collins AJ. (eds.). Cabi Publishing; 85-93.

Finlayson B. 1981. The analysis of stream suspended loads as a geomorphological teaching exercise. *Journal of Geography in Higher Education* **5**: 23-35.

Foster IDL, Millington R, Grew RG. 1992. The impact of particle size controls on stream turbidity measurements: some implications for suspended sediment yield estimation. A: *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins*, Bogen J, Walling DE, Day TJ. (eds.). IAHS Publication No. 210, International Association of Hydrological Science: Wallingford; 51-62.

Gallart F, Llorens P, Latron G. 1994. Studying the role of old agricultural terraces on runoff generation in a small Mediterranean mountainous basin. *Journal of Hydrology* **159**: 291-303.

Gallart F, Latron G, Llorens P, Rabadà D. 1997. Hydrological functioning of mediterranean mountain basins in Vallcebre, Catalonia: Some challenges for hydrological modelling. *Hydrological Processes* **11** (9): 1263-1272.

Gallart F, Llorens P, Latron G, Regüés D. 2002. Hydrological processes and their seasonal controls in a small Mediterranean mountain catchment in the Pyrenees. *Hydrology and Earth System Science* **6** (3): 527-537.

García-Ruiz JM, Martí-Bono C, Arnáez J, Beguería S, Lorente A, Seeger M. 2000. Las cuencas experimentales de Arnás y San Salvador en el Pirineo Central español: escorrentía y transporte de sedimento. *Cuadernos de Investigación Geográfica* **26**: 23-40.

García-Ruiz JM, Arnáez J, Beguería S, Seeger M, Martí-Bono C, Regüés D, Lana-Renault N, White S. 2005. Runoff generation in an intensively disturbed, abandoned farmland catchment, Central Spanish Pyrenees. *Catena* **59** (1): 79-92.

García-Ruiz JM, Regüés D, Alvera B, Lana-Renault N, Serrano-Muela P, Nadal-Romero E, Navas A, Latron J, Martí-Bono C, Arnáez J. 2008. Flood

generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the central Pyrenees. *Journal of Hydrology* **356** (1-2): 245-260.

Gippel CJ. 1989. The use of turbidimeters in suspended sediment research. *Hydrobiologica* **176/177**: 354-379.

Gippel CJ. 1995. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams. *Hydrological Processes* **9**: 83-97.

Green FH. 1979. *Field Drainage in Europe: a quantitative survey*. Institute of Hydrology, Wallingford, England. Report 57.

Gregory KJ, Walling DE. 1973. *Drainage Basin Form and Process. A geomorphological approach*. Edward Arnold (Publishers) Ltd: London; 458 p.

Grimalt M, Blázquez M, Rodríguez R. 1992. Physical factors, distribution and present land-use of terraces in the Tramuntana mountain range. *Pirineos* **139**: 15-25.

Grimalt M, Rodríguez R. 1997. Caracterització dels murs de pedra transversals als cursos d'aigua del terme de Manacor (Mallorca). A: *La pedra en sec. Obra, paisatge i patrimoni*, FODESMA (ed.). Consell Insular de Mallorca: Palma de Mallorca; 285-293.

Grimalt M, Rodríguez R, Ferrer I, Reynés A, Alomar G. 2002. Paisatge i pedra en sec a Mallorca. *Mètode: Revista de difusió de la investigació de la Universitat de València* **36**: 40-43

Hall DG. 1967. The pattern of sediment movement in the River Tyne. A: *Symposium on River Morphology*, IAHS Publication No. 75. General Assembly of Bern. International Association of Hydrological Science Publication: Wallingford; 117-140.

Hewlett JD, Lull HW, Reinhart KG. 1969. In defense of experimental watersheds. *Water Resources Research* **5** (1): 306-316.

Horton RE. 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle: EOS, *Transactions, American Geophysical Union* **14**: 446-460.

Imeson AC. 1977. Splash erosion, animal activity and sediment supply in a small forested Luxembourg catchment. *Earth Surface Processes* **2**: 153-160.

Inbar M. 1992. Rates of Fluvial Erosion in Basins with a Mediterranean Type Climate. *Catena* **19**: 393-409.

Instituto Nacional de Estadística -INE- 2003. *Anuario Estadístico de España*. Ministerio de Economía y Hacienda: Madrid; 755 p.

Instituto Geológico y Minero de España –ITGME- 1992. *Mapa geológico de España E. 1:50 000*. ITGME: Madrid.

International Organization of Standards, 1980. *Water flow measurement in open channels using weirs and venturi flumes - Part 1: Thin plate weirs*. ISO 1438/1-1980(E).

Iroumé A. 1990. Assessment of Runoff and Suspended Sediment Yield in a Partially Forested Catchment in Southern Chile. *Water Resources Research* **26** (11): 2637-2642.

Jenkins HC, Sellwood BW, Pomar L. 1990. *A Field Excursion Guide to the Island of Mallorca*. Geologists' Association Guides. The Geologist's Association: London; 93 p.

Kosmas C, Danalatos N, Cammeraat LH, Chabart M, Diamantopoulos J, Farand R, Gutierrez L, Jacob A, Marques H, Martinez-Fernandez J. 1997. The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *Catena* **29** (1): 45-59.

Lana-Renault N, Latron J, Regüés D. 2007. Streamflow response and water-table dynamics in a sub-Mediterranean research catchment (Central Pyrenees). *Journal of Hydrology* **347** (3-4): 497-507.

Lane EW, Lei K. 1950. Streamflow variability. *American Society of Civil Engineering Transactions* **20**: 1084-1134.

Lasanta T, Garcia-Ruiz JM, Perez-Rontome C, Sancho-Marcen C. 2000. Runoff and sediment yield in a semi-arid environment: the effect of land management after farmland abandonment. *Catena* **38** (4): 265-278.

Latron J. 2003. *Estudio del funcionamiento hidrológico de una cuenca mediterránea de montaña (Vallcebre, Pirineos Catalanes)*. Tesi doctoral. Universitat de Barcelona: Barcelona; 269 p.

Latron J, Soler M, Llorens P, Gallart F. 2008. Spatial and temporal variability of the hydrological response in a small Mediterranean research catchment (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Hydrological Processes* **22** (6): 775-787.

Latron J, Gallart F. Runoff generation processes in a small Mediterranean research catchment (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Journal of Hydrology*, In Press, Accepted Manuscript.



Leopold LB, Wolman MG, Miller JP. 1964. *Fluvial Processes in Geomorphology*. A Series of Books in Geology. W.H. Freeman and Company: San Francisco and London; 522 p.

Leopold LB, Emmett WW, Myrick W. 1966. *Channel and hillslope processes in a semi-arid area, New Mexico*. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 352-C.

Lewin J, Macklin MG, Woodward JC. 1995. *Mediterranean Quaternary River Environments*. A.A. Balkema: Rotterdam.

Lewis J. 1996. Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation. *Water Resources Research* **32**: 2299-2310.

Lewis D, Singer MJ, Dahlgren RA, Tate KW. 2000. Hydrology in a California oak woodland watershed: a 17-year study. *Journal of Hydrology* **240** (1-2): 106-117.

Llorens P, Gallart F. 1992. Small Basin Response in a Mediterranean Mountainous Abandoned Farming Area: Research Design and Preliminary Results. *Catena* **19**: 309-320.

Llorens P, Queralt I, Plana F, Gallart F. 1997. Studying solute and particulate sediment transfer in a small Mediterranean mountainous catchment subject to land abandonment. *Earth Surface Processes & Landforms* **22** (11): 1027-1035.

Milliman JD. 2006. Water and sediment delivery from Mediterranean rivers: regional, global and temporal perspectives. A: *Fluxes of small and medium-size Mediterranean rivers: impact on coastal areas*, Briand F. (Ed.). Ciesm Workshop monograph 30: 19-22.

Milliman JD, Meade RH. 1983. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology* **91** (1): 1-21.

Milliman JD, Syvitski JPM. 1992. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *Journal of Geology* **100**: 525-544.

Mimikou M. 1982. An investigation of suspended sediment rating curves in western and northern Greece. *Hydrological Sciences Journal* **27** (3-9): 369-383.

Moussa R, Voltz M, Andrieux P. 2002. Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes* **16** (2): 393-412.

Nadal-Romero E, Latron J, Martí-Bono C, Regüés D. 2008. Temporal distribution of suspended sediment transport in a humid Mediterranean badland

area: The Araguás catchment, Central Pyrenees. *Geomorphology* **97** (3-4): 601-616.

Nathan RJ, McMahon TA. 1990. Evaluation of Automated Techniques for Base Flow and Recession Analysis. *Water Resources Research* **26**: 1465-1473.

Olive LJ, Rieger WA. 1985. Variation in suspended sediment concentration during storms in five small catchments in southeast New South Wales. *Australian Geographical Studies* **23** (1): 38-51.

Orozco M, Poch RM, Batalla RJ, Balasch JC. Hydrochemical balance of Mediterranean mountainous basins in relation to land uses (The Ribera Salada, Catalan Pre-Pyrenees, NE Spain). *Hydrological Processes* (submitted).

Outeiro L, Farguell J, Úbeda X, Sala M. 2006. Estudio de las variaciones de caudal y transporte de sedimentos durante eventos de crecidas en dos cuencas (forestal y agrícola). A: *Geomorfología y territorio: Actas de la IX Reunión Nacional de Geomorfología*, Pérez-Alberdi A, López-Bedoya J. (eds.). Servicio de Publicacións e Intercambio Científico: Santiago de Compostela; 645-653.

Pavanelli D, Pagliarani A. 2002. Monitoring Water Flow, Turbidity and Suspended Sediment Load, from an Apennine Catchment Basin, Italy. *Biosystems Engineering* **126**: 1-6.

Peters NE. 1994. Hydrologic processes. A: *Biogeochemistry of Small Watersheds: A Tool for Environmental Research. Scope 51*, Moldan B, Cerny J. (eds.). Wiley: Chichester; 189-206.

Piñol J, Lledó MJ, Escarré A. 1991. Hydrological balance of two Mediterranean forested catchments (Prades, northeast Spain). *Hydrological Sciences Journal* **36** (2): 95-107.

Piñol J, Àvila A, Escarré A, Lledó MJ, Rodà F. 1992. Comparison of the hydrological characteristics of three small experimental holm oak forested catchments in NE Spain in relation to larger areas. *Vegetatio* **99/100**: 169-176.

Piñol J, Beven K, Freer J. 1997. Modelling the hydrological response of Mediterranean catchments, Prades, Catalonia. The use of distributed models as aids to hypothesis formulation. *Hydrological Processes* **11**: 1287-1306.

Piñol J, Àvila A, Escarré A. 1999. Water balance in catchments. A: *Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests*, Rodà et al. (eds.). Ecological Studies Vol. 137, Springer-Verlag; 273-282.

Poch RM, Orozco M. Stormflow hydrochemistry in two nested Pre-Pyrenean basins. *Journal of Hydrology* (submitted).

Pont D, Simonnet JP, Walter AV. 2002. Medium-term Changes in Suspended Sediment Delivery to the Ocean: Consequences of Catchment Heterogeneity and River Management (Rhône River, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **54**: 1-18.

Porta J, López-Acevedo M, Roquero C. 1999. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi Prensa: Madrid; 876 p.

Rapp A. 1960. Recent development of mountain slopes in Kárkevagge and surroundings, northern Scandinavia. *Geografiska. Annaler* **42**: 65-200.

Reid I, Parkinson R. 1981. Too wet, too dry: Clay soil problems. *Soil and Water Management* **9**: 7-9.

Richards G, Moore RD. 2003. Suspended sediment dynamics in a steep, glacier-fed mountain stream, Place Creek, Canada. *Hydrological Processes* **17** (9): 1733-1753.

Romero R, Guijarro JA, Ramis C, Alonso S. 1998. A 30-year (1964–93) daily rainfall data base for the Spanish Mediterranean regions: first exploratory study. *International Journal of Climatology* **18**: 541–560.

Romero R. 2001. Sensitivity of a heavy rain producing Western Mediterranean cyclone to embedded potential vorticity anomalies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **127**: 2559-2597.

Rovira A, Batalla RJ, Sala M. 2005. Fluvial sediment budget of a Mediterranean river: the lower Tordera (Catalan Coastal Ranges, NE Spain). *Catena* **60** (1): 19-42.

Rovira A, Batalla RJ. 2006. Temporal distribution of suspended sediment transport in a Mediterranean basin: The Lower Tordera (NE SPAIN). *Geomorphology* **79**: 58-71.

Sala M, Farguell J. 2002. Exportación de agua y sedimento en dos pequeñas cuencas mediterráneas bajo diferentes usos del suelo. Sistema Costero Catalán. *Cuaternalario y Geomorfología* **16** (1-4): 97-109.

Salva-Tomás PA. 1973. *Estructura Agraria del Pariatge*. Departament de Geografia. Tesi de Llicenciatura no publicada, Facultat de Filosofia i Lletres, Universitat de Barcelona: Barcelona; 244 p.

Schick AP. 1977. A tentative sediment budget for an extremely arid watershed in the Southern Negev. En: D.O. Doehring (Ed.): *Geomorphology in arid regions*. Binghamton, NY, 139-163.

Schnabel S. 1997. *Soil erosion and runoff production in a small watershed under silvo-pastoral landuse (dehesas) in Extremadura, Spain*. Geoforma Ediciones; 160 p.

Seeger M, Errea MP, Begueria S, Arnaez J, Marti C, Garcia-Ruiz JM. 2004. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish pyrenees. *Journal of Hydrology* **288** (3-4): 299-311.

Serrat P. 1999. Present sediment yield from a Mediterranean fluvial system: the Agly river (France). *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* **329** (3): 189-196.

Silva PG, Goy JL, Zazo C, Giménez J, Fornós J, Cabero A, Bardají T, Mateos R, González-Hernández FM, Hillaire-Marcel C, Bassam G. 2005. Mallorca Island: geomorphological evolution and neotectonics. In *Field Trip Guides of Sixth International Conference on Geomorphology (vol. II)*, Desir G, Gutiérrez F, Gutiérrez M (eds.). University of Zaragoza: Zaragoza; 433-472.

Skaggs RW, Breve MA, Gilliam JW. 1994. Hydrologic and Water-Quality Impacts of Agricultural Drainage. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* **24** (1): 1-32.

Smith CT. 1969. The drainage basin as an historical basis for human activity. En: R. Chorley (Ed.): *Water, Earth and Man*. Wiley, London, 101-112.

Stone M, Krishnappan BG. 1997. Transport Characteristics of Tile-Drain Sediments from an Agricultural Watershed. *Water, Air and Soil Pollution* **99**: 89-103.

Syvitski JPM, Morehead MD, Bahr DB, Mulder T. 2000. Estimating fluvial sediment transport: the rating parameters. *Water Resources Research* **36**: 2747-2760.

Syvitski JPM. 2003. The supply of flux of sediment along hydrological pathways: Anthropogenic influences at the global scale. *Global and Planetary Change* **39** (1-2): 1-11.

Smakhtin VU. 2001. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology* **240**: 147-186.

Soler M, Regüés D, Latron J, Gallart F. 2007. Frequency-magnitude relationships for precipitation, stream flow and sediment load events in a small Mediterranean basin (Vallcebre basin, Eastern Pyrenees). *Catena* **71** (1): 164-171.

Soler M, Latron J, Gallart F. 2008. Relationships between suspended sediment concentrations and discharge in two small research basins in a mountainous Mediterranean area (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Geomorphology* **98** (1-2): 143-152.

Soorooshian S. 1983. Surface water hydrology: On line estimations. *Review of Geophysics and Space Physics* **28** (2): 285-290.

Sutherland RA, Bryan RB. 1989. Flow Dynamics and the Variability of Suspended Sediment in a Semiarid Tropical Stream, Baringo District, Kenya. *Geografiska Annaler* **72** A: 23-39.

Takeuchi, K. 2002. IAHS decade of the Prediction of Ungauged Basins. *IAHS Newsletter* **74**: 2-3.

Tallaksen LM. 1995. A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology* **165**: 349-370.

Thornthwaite CW. 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review* **38**: 55-94.

Toebe C, Strang DD. 1964. On recession curves 1: Recession equations. *Journal of Hydrology* **3**: 2-15.

UNESCO-OMM 1992. *Glosario hidrológico internacional, en cuatro idiomas (Inglés, Español, Francés, Ruso)*, 2ª edició, UNESCO-OMM: Paris/Ginebra. <http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/HINDEST.HTM>

Vericat D, Batalla RJ. 2006. Sediment transport in a large impounded river: The lower Ebro, NE Iberian Peninsula. *Geomorphology* **79** (1-2): 72-92.

Walling DE. 1974. Suspended sediment and solute yields from a small catchment prior to urbanization. A: *Fluvial Processes in Instrumented Watersheds. Studies of small watersheds in the British Isles*, Gregory, KJ, Walling DE. (eds.). Institute of British Geographers: London; 169-191.

Walling DE. 1977. Suspended sediment and solute response characteristics of the River Exe, Devon, England. A: *Research in Fluvial Systems*, Davidson-Arnott R, Nickling W. (eds.). Geo Abstracts: Norwich; 58-87.

Walling DE. 1979. Hydrological Processes. A: *Man and Environmental Process*, Gregory KJ, Walling DE. (eds.). Dawson: Folkestone; 57-81.

Walling DE. 1996. Suspended sediment transport by rivers: a geomorphological and hydrological perspective. *Archives Hydrobiological Special Issues Advanced Limnology* **47**: 1-27.

Walling DE. 2006. Human impact on land–ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology* **79** (3-4): 192-216.

Walling DE, Webb BW. 1982. Sediment availability and the prediction of storm-period sediment yields. A: *Recent Developments in the Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield*, Walling DE. (ed.). IAHS Publication No. 137, International Association of Hydrological Sciences: Wallingford; 327-337.

Walling DE, Webb BW. 1983. Patterns of sediment yield. A: *Background to Paleohydrology*, Gregory KJ. (ed.). John Wiley and Sons: New York; 69-100.

Walling DE, Webb BW. 1987. Suspended load in gravel-bed rivers: UK experience. A: *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*, Thorne CRB, Bathurst JC, Hey RD. (eds.). John Wiley and Sons Ltd: London; 691-723.

Walling DE, Collins AL. 2000. *Integrated Assessment of Catchment Sediment Budgets: A Technical Manual*. UK Department for International Development: Exeter.

Wass PD, Leeks GJL. 1999. Suspended sediment fluxes in the Humber catchment, UK. *Hydrological Processes* **13** (7): 935-953.

White S, Garcia-Ruiz JM, Marti C, Alvera B, Del Barrio G. 1997. Sediment transport in a high mountain catchment in the central Spanish Pyrenees. *Physics and Chemistry of The Earth* **22** (3-4): 377-380.

YACU, 2002. *Estudio de caracterización del régimen extremo de precipitaciones en la isla de Mallorca. Memoria*. Secció d'Estudis i Projectes, Direcció General de Recursos Hídrics, Conselleria de Medi Ambient, Govern de les Illes Balears: Palma de Mallorca; 67 p.

Zgaier A, Inbar M. 2005. The influence of soil saturation on the stability of abandoned agricultural hillslope terraces under Mediterranean climatic conditions. A *Catchment Dynamics and River Processes: Mediterranean and other Climate Regions*, Garcia C, Batalla RJ. (eds.). Elsevier: Amsterdam; 69-86.

Zhu TX, Band LE, Vertessy RA. 1999. Continuous modeling of intermittent stormflows on a semi-arid agricultural catchment. *Journal of Hydrology* **226** (1-2): 11-29.