



# Dinámica hidrológica y sedimentológica en una cuenca representativa mediterránea. Riera de Vernegà (1993-2012)

Edinson Efren Pacheco Betancur

**ADVERTIMENT.** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) i a través del Dipòsit Digital de la UB ([diposit.ub.edu](http://diposit.ub.edu)) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**ADVERTENCIA.** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) y a través del Repositorio Digital de la UB ([diposit.ub.edu](http://diposit.ub.edu)) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING.** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) service and by the UB Digital Repository ([diposit.ub.edu](http://diposit.ub.edu)) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

Facultat de Geografia i Història  
Universitat de Barcelona

Programa de Doctorado: Geografía, Planificación Territorial y Gestión Ambiental

**DINÁMICA HIDROLÓGICA Y SEDIMENTOLÓGICA EN UNA CUENCA REPRESENTATIVA  
MEDITERRÁNEA. RIERA DE VERNEGÀ (1993-2012)**

Presentado por:

Edinson Efren Pacheco Betancur

Para optar al título de Doctor en: Geografía. Planificación Territorial y Gestión  
Ambiental

El Director de la Tesis

El Director de la Tesis

Dr. Xavier Úbeda Cartaña

Dr. Joaquim Farguell Pérez

Departament de Geografia Física i Anàlisi  
Geogràfica Regional. Universitat de  
Barcelona.

Departament de Geografia Física i Anàlisi  
Geogràfica Regional. Universitat de  
Barcelona.

Barcelona, 30 de septiembre de 2013

---

---

*A mi esposa: Kateřina Říhová*

*Důležitý krok pro mě i pro ni*

---

---

## AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia y, muy especialmente, a mis padres, por el incondicional apoyo que he recibido y que aún continúo recibiendo. Miguel Pacheco y Ana Betancur son los responsables de que haya llegado hasta este punto de mi formación profesional; siempre, con su esfuerzo, tenacidad, generosidad y amor, han alimentado mis esperanzas y llenado mis anhelos de la complicidad necesaria para materializarlos y convertirlos en realidad. A ellos todos mis agradecimientos.

Al Dr. Xavier Úbeda, por su confianza, colaboración, disposición y dedicación en este proceso. Su apoyo, capacidad y profesionalismo han hecho posible la realización de esta tesis doctoral. Fue una la persona clave para el buen desarrollo de cada una de mis etapas profesionales dentro de la Universidad. Será un honor poder seguir contando con su amistad.

Al Dr. Joaquim Farguell, quien con diligencia, amabilidad y conocimiento ha acompañado la elaboración de este documento, haciendo valiosos, críticos y pertinentes aportes. Le agradezco su paciencia y motivación.

A la Dra. Maria Sala, por haber empezado toda esta aventura.

A los integrantes del Grup de Recerca Ambiental Mediterrània. Especialmente a Luís y Alex, por su trabajo, el apoyo recibido y la colaboración prestada tanto en campo como en la información elaborada, sin ellos habría sido imposible la elaboración de esta tesis doctoral.

A todos los compañeros del Departament de Geografia Física i Anàlisi Geogràfica Regional, y compañeros de Máster y Doctorado de la Universidad de Barcelona, quienes con su amistad y cariño han hecho de este proceso una experiencia formativa, cálida y enriquecedora.

A todos los amigos, compañeros y colegas que en mi país, Colombia, han acompañado y apoyado mi desarrollo profesional.

A todos aquellos que de una u otra manera han hecho posible la realización de este proyecto. Muchas gracias

---

Proyectos a los cuales hemos de agradecer:

A las Acciones Complementarias del Ministerio de Ciencia y Tecnología durante los años 2006 hasta 2013: Mantenimiento de Cuenca Experimental: CGL2006-27869-E, CGL2007-31019-E, CGL2008-04178-E, CGL2010-12086-E.

Al proyecto: "Dynamique des paysages, érosion et développement durable dans les montagnes méditerranéennes", del Ministerio de Ecología del Gobierno de Francia.

Al "Comissionat per a Universitats i Recerca del DIUE de la Generalitat de Catalunya" por subvencionar durante el periodo 2009-2013 al GRAM (Grup de Recerca Ambiental Mediterrània SGR2009:1515

A l'Agrupació d'Humanitats de la Facultat de Geografia i Història de la Universitat de Barcelona por todas las ayudas otorgadas durante el periodo 2005-2013.

A los Serveis Científico-Tècnics de la Universitat de Barcelona.

---

## ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos.....	V
Índice General.....	VII
Índice por capítulos.....	IX
Índice de Tablas.....	XV
Índice de Figuras.....	XVII
Resumen.....	XXV
I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
II. ÁREA DE ESTUDIO.....	15
III. METODOLOGÍA.....	43
IV. PRECIPITACIÓN Y RESPUESTA HIDROLÓGICA.....	57
V. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	105
VI. DISCUSIÓN.....	131
VII. CONCLUSIONES.....	167
VIII. BIBLIOGRAFÍA.....	171

---

---

## ÍNDICE POR CAPÍTULOS

### CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.	Introducción al estudio de la cuenca de la riera de Vernegà.....	2
1.1.	El estudio de cuencas representativas. ....	6
1.2.	Los usos del suelo. ....	8
1.3.	Hidrología y transporte de sedimentos en cuencas mediterráneas. ....	10
2.	Objetivos.....	13

### CAPÍTULO II: ÁREA DE ESTUDIO

1.	Localización de les Gavarres y principales características. ....	16
2.	Usos del suelo de les Gavarres. ....	19
2.1.	Cambios de uso del suelo y zonas más importantes. ....	23
3.	Localización de la cuenca de Vernegà y principales características.....	26
4.	Estudio de cambios de uso del suelo en la riera de Vernegà.....	31
5.	Planes Técnicos de Gestión y Mejora Forestal (PTGMF) en Mas Bassets.....	35
5.1.	Los objetivos del PTGMF para el caso de Mas Bassets.....	36
5.2.	Sobre la parte económica en la elaboración y ejecución del PTGMF. ....	38
5.3.	Densidad de la red de caminos en la cuenca de Vernegà. ....	40

---

## **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA**

1. Trabajo de campo.....	44
1.1. Estaciones de Aforo.....	44
1.1.1. Calibración y caudal de las estaciones de aforo.....	46
1.2. Equipo de monitoreo.....	48
1.3. Recolección de datos meteorológicos.....	49
1.4. Medida de los pozos y de la humedad.....	51
2. Análisis de datos y trabajo de laboratorio.....	52
2.1. Agrupación de los datos en los dos periodos de estudio.....	53
2.2. Análisis de las crecidas.....	53
2.3. Trabajo de laboratorio.....	54

## **CAPÍTULO IV: PRECIPITACIÓN Y RESPUESTA HIDROLÓGICA**

1. Análisis anual.....	58
1.1. Análisis de la precipitación anual.....	58
1.1. Análisis de la escorrentía anual.....	59
1.1.1. Análisis de la escorrentía anual en el periodo 1993-2005.....	59
1.1.2. Análisis de la escorrentía anual en el periodo 2005-2012.....	59
2. Análisis estacional.....	60
2.1. Análisis estacional de la precipitación.....	61
2.2. Análisis estacional de la escorrentía en el periodo 1993-2005.....	61

---

2.3.	Análisis de la escorrentía en el periodo 2005-2012. ....	62
2.4.	Análisis de la correlación estacional entre la escorrentía y la precipitación...	63
3.	Análisis mensual.....	63
3.1.	Análisis mensual de la precipitación.....	63
3.1.1.	Análisis de la frecuencia de precipitación mensual. ....	64
3.2.	Análisis de la escorrentía mensual. ....	65
3.2.1.	Relación de la escorrentía superficial en las dos estaciones de aforo.....	66
3.2.2.	Análisis de la escorrentía mensual en el periodo 1993-2005. ....	67
3.2.3.	Estudio detallado del periodo 1993-2005.....	67
3.2.4.	Análisis de la escorrentía mensual en el periodo 2005-2012. ....	68
4.	Análisis del caudal. ....	71
4.1.	Análisis de la frecuencia de caudal en el periodo 2005-2012. ....	71
4.2.	Análisis de los periodos de retorno del caudal para la estación de aforo de Campàs en todo el estudio (1993-2012). ....	72
5.	Análisis del nivel del agua subterránea y humedad de los suelos. ....	72
5.1.	Dinámica mensual de los tres pozos de medición.....	72
5.2.	Análisis de la activación de la escorrentía superficial y su relación con el nivel del pozo 3. ....	74
5.3.	Registros de la humedad del suelo en la Cuenca. ....	77
6.	Análisis de las crecidas. ....	78
6.1.	Análisis general de las crecidas.....	79
6.2.	Análisis entre la precipitación que genera una crecida y la escorrentía directa.	80

---

6.3.	Análisis de las crecidas del periodo 1993-2005.....	80
6.4.	Análisis de las crecidas del periodo 2005-2012.....	82
6.5.	Análisis de las crecidas según su tipología.....	84
6.5.1.	Resumen periodo 1993-2005.....	85
6.5.2.	Resumen periodo 2005-2012.....	85
6.5.3.	Grupo 1.1. Crecidas sin caudal base previo y un caudal máximo. ....	86
6.5.4.	Grupo 1.2. Crecidas sin caudal base previo y más de un caudal máximo. ...	88
6.5.5.	Grupo 2.1. Crecidas con caudal base previo y un solo caudal máximo. ....	93
6.5.6.	Grupo 2.2. Crecidas con caudal base previo y más de un caudal máximo. .	95
6.6.	La Nevada del 7 y 8 de marzo de 2010. ....	103

## **CAPÍTULO V: TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

1.	Análisis de la concentración de sedimentos a nivel general en las dos estaciones. .....	106
1.1.	Análisis de la frecuencia de la concentración de sedimentos. ....	109
1.2.	Análisis de la concentración de sedimentos a nivel de crecidas. ....	110
1.2.1.	Análisis de las histéresis de la concentración de sedimentos en suspensión en crecidas. ....	113
2.	Análisis de la producción de sedimentos .....	115
2.1.	Análisis anual de la producción de sedimentos.....	115
2.2.	Análisis estacional de la producción de sedimentos. ....	117
2.3.	Análisis mensual de la producción de sedimentos en las dos estaciones de aforo durante el periodo 2005-2012.....	118

---

3. Análisis iónico. ....	121
3.1. Análisis iónico de la lluvia. ....	121
3.2. Análisis iónico de la escorrentía superficial. ....	122
3.3. Análisis iónico año a año. ....	123
3.3.1. Análisis iónico en la estación de Bosc. ....	124
3.3.2. Análisis iónico en la estación de Campàs. ....	125
3.4. Análisis iónico de los tres pozos. ....	127
3.4.1. Análisis iónico año a año de los tres pozos. ....	128

## **CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN**

1. Dinámica hidrología de la cuenca. ....	132
1.1. Efectos de uso del suelo en la dinámica hídrológica de la cuenca. ....	136
1.2. Fluctuación del nivel del agua subterránea. ....	137
2. Influencia de las vertientes en la hidrología y el transporte de sedimento. ....	137
2.1. Áreas agrícolas. ....	138
2.2. Áreas forestales y planes técnicos de gestión forestal. ....	141
3.3. Contribución de los caminos forestales. ....	151
3. Dinámica del transporte de sedimentos. ....	157
3.1. Concentración de sedimentos en suspensión. ....	157
3.1.1. Histéresis entre la concentración de sedimentos en suspensión y las crecidas. ....	158
3.2. Concentración de sedimentos en disolución. ....	159

---

3.3. Producción de sedimentos. ....	160
4. Calidad de las aguas. ....	161
<b>CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES.....</b>	<b>167</b>
<b>CAPÍTULO VIII: BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>171</b>

---

## ÍNDICE DE TABLAS

### Tablas Capítulo II

Tabla 1: Porcentaje de cobertura del suelo para todos los años de estudio.....	23
Tabla 2: Área de uso del suelo para el año 1957 en el macizo de les Gavarres.....	24
Tabla 3: Áreas para los tres años de estudio.....	24
Tabla 4. Propiedades físicas y químicas del suelo (0-5 cm) bajo diferentes tipos de vegetación. Valores de los iones en ppm. ....	28

### Tablas Capítulo IV

Tabla 1. Promedio de escorrentía superficial y coeficiente de escorrentía anual en los dos periodos de estudio. ....	59
Tabla 2. Promedio de: precipitación, escorrentía y coeficiente de escorrentía en las tres estaciones del año durante el periodo 1993-2005. ....	62
Tabla 3. Precipitación, escorrentía y coeficiente de escorrentía media en las tres estaciones del año durante el periodo 2005-2012. ....	62
Tabla 4. Correlación entre la precipitación y la escorrentía total. ....	63
Tabla 5. Profundidad del pozo 3 antes y después de una crecida. ....	75
Tabla 6. Valores medios mensuales de las 44 crecidas del estudio. ....	79
Tabla 7. Tabla de correlación entre la precipitación de una crecida y su escorrentía directa.....	80
Tabla 8. Resumen general de las crecidas del periodo 1993-2005.....	81
Tabla 9. Resumen de las crecidas del periodo 2005-2012. ....	83
Tabla 10. Resumen de los registros de crecidas para el periodo 1993-2005.....	85

---

Tabla 11. Resumen de los registros de crecidas para el periodo 2005-2012..... 86

Tabla 12. Resumen de las crecidas del 27 de octubre al 25 de noviembre de 2011. ... 102

### **Tablas Capítulo V**

Tabla 1. Estadística descriptiva de los registros del caudal y la concentración de los sedimentos en suspensión y disolución. .... 107

Tabla 2. Producción de sedimentos en disolución y en suspensión total anuales en el periodo 2005-2012. .... 116

Tabla 3. Escorrentía, Producción de sedimentos en suspensión y disolución promedio estacional para el periodo 2005-2012 para Bosc y Campàs..... 118

### **Tablas Capítulo VI**

Tabla 1. Recopilación de datos de cuencas experimentales. .... 134

Tabla 2. Comparación de los datos obtenidos en trabajos realizados en la cuenca de Vernegà con los estudios resumidos en Fu et al., (2009)..... 155

Tabla 3. Concentraciones máximas admisibles y promedios iónicos de los puntos de muestreo en la riera Vernegà durante el periodo 2005-2012. .... 162

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Figuras Capítulo II

Figura 1. Ubicación de les Gavarres y de la cuenca de la riera de Vernegà.....	16
Figura 2. Mapa geológico de les Gavarres.....	17
Figura 3. Usos del suelo para el macizo de les Gavarres para el año 1957.....	20
Figura 4. Usos del suelo en el macizo de les Gavarres para el año 1987.....	21
Figura 5. Usos del suelo para el macizo de les Gavarres para el año 1997.....	22
Figura 6. Usos del suelo en el macizo de les Gavarres para el año 2007.....	22
Figura 7. Áreas de captación de Bosc y Campàs. ....	27
Figura 8. Mapa litológico de la cuenca de la riera Vernegà. ....	28
Figura 9. Porcentaje de los diferentes tipos biológicos de la vegetación de la cuenca. ....	30
Figura 10. Porcentaje de los diferentes tipos de estrategias de reproducción de la vegetación de la cuenca. ....	30
Figura 11. Usos del suelo en la cuenca del río Vernegà para el año 1957.....	32
Figura 12. Usos del suelo en la cuenca del río Vernegà para el año 2007.....	32
Figura 13. Ortofotomapa de la Cuenca del río Vernegà: a) año 1957. b) año 2009. c) año 2011.....	34
Figura 14. Usos del suelo en la cuenca del río Vernegà después del año 2011.....	35
Figura 15. Ejemplo de bosque denso sin gestionar dentro de la finca de Mas Bassets. ....	36
Figura 16. Imagen de la parcela 1ª donde se puede comprobar el desbroce del sotobosque. ....	37

---

Figura 17. Aprovechamiento de madera de pino en la parcela a4. ....	38
Figura 18. Cronosecuencia de las actuaciones en las diferentes parcelas resultantes del PTGMF de Mas Bassets.....	39
Figura 19. Ejemplo de mantenimiento de camino forestal en la finca de Mas Bassets. ....	40
Figura 20. Caminos forestales que atraviesan el área de estudio.....	41

### **Figuras Capítulo III**

Figura 1. Material de medición distribuido en toda el área de estudio.....	44
Figura 2. Secciones de medición de las dos estaciones de aforo.....	46
Figura 3. Curva de calibración de caudal en la estación de aforo Bosc. ....	47
Figura 4. Equipo de monitoreo de la esorrentía y muestreador automático.....	49
Figura 5. Equipo de la estación meteorológica. ....	50
Figura 6. Correlación de los datos pluviométricos de la estación manual y la estación meteorológica (1993-2006).....	51
Figura 7. Medida de los pozos. ....	52
Figura 8. Filtraje de muestras. ....	55

### **Figuras Capítulo IV**

Figura 1. Precipitación media anual en la Cuenca de Vernegà. (1982-2012). ....	58
Figura 2. Distribución de la precipitación y la esorrentía total desde el año hidrológico 1993/94 hasta 2011/12 es las estaciones de aforo de Bosc y Campàs.....	60
Figura 3. Distribución estacional de la precipitación en la cuenca de Vernegà (1982-2012).....	61

---

Figura 4. Diagrama ombrotérmico. ....	64
Figura 5. Histograma de precipitación mensual acumulada. ....	65
Figura 6. Promedio de precipitación y escorrentía superficial mensual en las dos estaciones. ....	66
Figura 7. Relación entre la escorrentía total mensual en las dos estaciones durante el periodo 2005-2012. ....	66
Figura 8. Escorrentía y precipitación media mensual (periodo 1993-2012). ....	67
Figura 9. Figura 12. Escorrentía y precipitación media mensual (periodo 1993-2012). ....	69
Figura 10. Rotura de ramas ocasionada por la nevada de marzo de 2010. ....	70
Figura 11. Frecuencia de caudal horario en las dos estaciones (2005-2012). ....	71
Figura 12. Análisis del periodo de retorno para los caudales máximos horarios durante un año natural en la Riera Vernegà, durante el periodo 1993-2012. ....	72
Figura 13. Variación promedio mensual del nivel de los pozos. ....	73
Figura 14. Nivel del pozo 1 y 3 durante los años 1998 y 1999. ....	74
Figura 15. Nivel del pozo 3, nivel promedio de activación de la escorrentía, precipitación y escorrentía superficial de Campàs. ....	76
Figura 16. Relación mensual de la escorrentía de Campàs y el nivel del pozo 3 durante el periodo 2005-2012. ....	77
Figura 17. Porcentaje de humedad promedio mensual en 5 puntos diferentes de la cuenca. ....	78
Figura 18. Distribución mensual de las crecidas en todo el estudio (1993-2012). ....	78
Figura 19. Relación de la escorrentía directa de la escorrentía de base en las dos estaciones (periodo 2005-2012). ....	84
Figura 20. Distribución de las crecidas por grupos. ....	84
Figura 21. Crecida del 2 al 6 de diciembre de 1998. ....	87

---

Figura 22. Del 18 al 20 de octubre de 2006.....	87
Figura 23. Del 25 al 28 de noviembre de 1997.....	88
Figura 24. Del 8 al 11 de diciembre de 1995.....	89
Figura 25. Del 18 al 25 de diciembre de 1997.....	89
Figura 26. Del 11 al 16 de octubre de 2005.....	90
Figura 27. Del 31 de enero al 5 de febrero de 2009.....	91
Figura 28. Del 8 al 11 de febrero de 2010.....	92
Figura 29. Del 10 al 15 de octubre de 2010.....	92
Figura 30. Del 27 al 30 de octubre de 2011.....	93
Figura 31. Crecida del 4 al 8 de noviembre de 1993.....	94
Figura 32. Del 15 al 18 de diciembre de 1995.....	94
Figura 33. Crecida del 19 al 23 de febrero de 2003 en las dos estaciones de aforo.....	95
Figura 34. Del 14 al 20 de Febrero de 1994.....	96
Figura 35. Crecidas del 9 al 16 y del 23 al 31 de enero de 1996.....	96
Figura 36. Crecida del 9 al 20 de enero de 1997.....	97
Figura 37. Del 9 al 14 de abril y del 7 al 9 de mayo de 2002.....	98
Figura 38. Del 25 al 2 de marzo de 2003.....	99
Figura 39. Del 8 al 11 de abril de 2003.....	99
Figura 40. Del 26 de enero al 1 de febrero de 2006.....	100
Figura 41. Del 16 al 21 de febrero de 2010.....	101
Figura 42. Del 10 al 15 de octubre de 2010 y del 12 al 17 de Marzo de 2011.....	102
Figura 43. Del 4 al 8 y del 19 al 25 de noviembre de 2011.....	103

---

Figura 44. Nevada del 7 al 19 de marzo de 2010 .....	104
--	-----

## **Figuras Capítulo V**

Figura 1. Correlación del caudal y la concentración de sedimentos en la estación de aforo de Bosc durante el periodo 2005-2012. ....	108
--	-----

Figura 2. Correlación del caudal y la concentración de sedimentos en la estación de aforo Campàs durante el periodo 2005-2012. ....	108
---	-----

Figura 3. Histograma de la frecuencia de concentración de sedimentos en suspensión y disolución en la estación de aforo Bosc para el periodo 2005-2012. ....	109
--	-----

Figura 4. Histograma de la frecuencia de concentración de sedimentos en suspensión y disolución en la estación de aforo Campàs para el periodo 2005-2012. ....	110
--	-----

Figura 5. Crecida del 18 al 20 de Octubre de 2006 en la estación de aforo de Bosc... ..	111
---	-----

Figura 6. Crecida del 18 al 20 de octubre de 2006 en la estación de aforo de Campàs. ....	111
---	-----

Figura 7. Crecida del 4 al 8 de noviembre de 2011 en la estación de aforo Bosc.....	112
---	-----

Figura 8. Crecida del 15 al 17 de noviembre de 2011 en la estación de aforo de Campàs. ....	113
---	-----

Figura 9. Crecida del 18 y 19 de octubre de 2006 en la estación de aforo de Bosc.....	114
---	-----

Figura 10. Primer pico de la crecida e histéresis del 12 al 13 de marzo de 2011 en la estación de aforo de Bosc. ....	114
---	-----

Figura 11. Análisis de la histéresis de la crecida del 4 al 8 de noviembre en Bosc y del 15 al 17 de noviembre de 2011 en Campàs. ....	115
--	-----

Figura 12. Distribución media estacional en las dos estaciones de aforo para la producción de sedimentos. ....	117
--	-----

Figura 13. S.S. y S.D. total mensual en Bosc y Campàs en el periodo 2005-2012.....	120
--	-----

Figura 14. Promedio iónico de la lluvia en Campos e interceptación durante los años	
---	--

---

2005 y 2009. ....	122
Figura 15. Promedio iónico en las dos estaciones (periodo 2005-2012). ....	123
Figura 16. Concentración iónica promedio anual en la estación de Bosc. ....	125
Figura 17. Concentración iónica promedio anual en la estación de aforo Campàs. ....	127
Figura 18. Análisis iónico de los tres pozos en la cuenca de Vernegà. ....	128
Figura 19. Análisis iónico anual en los tres pozos. ....	130

## **Figuras Capítulo VI**

Figura 1. Trampa de sedimento tipo Gerlach para la medida de la erosión en vertientes (bosque y campo agrícola). ....	138
Figura 2. Campo agrícola recién labrado. ....	139
Figura 3. Regueros en uno de los campos agrícolas tras el periodo de siembra y una lluvia de otoño. ....	139
Figura 4. Regueros en la parcela agrícola. ....	140
Figura 5. La estación de Bosc totalmente colmatada por sedimento. ....	142
Figura 6. Actuaciones sobre el lecho del río en octubre 2006. ....	143
Figura 7. a. Instalación de una trampa “siltfence” en un área de alcornoques gestionada mediante el PTMGF. b. Sedimento atrapado en la trampa (20/2/2007). .	145
Figura 8. Simulación de lluvia en la parcela de bosque gestionado de pinos. ....	146
Figura 9. Trabajos de limpieza en la estación de aforo de Bosc después de la crecida de octubre 2005. ....	148
Figura 10. Simulación de lluvia en un camino forestal. ....	152
Figura 11. Márgenes de los caminos erosionados por las diferentes precipitaciones. ....	153

---

Figura 12. a. Estudio sobre la jerarquización de los caminos forestales en la cuenca de Vernegà. b. En la fotografía puede observarse como se ve la roca madre desnuda lo que facilita que el agua de escorrentía circule con mucha facilidad en estos caminos forestales. ....	155
Figura 13. Imagen de un camino cruzando la riera de Vernegà.....	157
Figura 14. Promedio, máximo y mínimo del pH en las dos estaciones de aforo. ....	164
Figura 15. Promedio, máximo y mínimo de la conductividad en las dos estaciones de aforo. ....	165



---

## Resumen

El objetivo principal de este estudio es la cuantificación y relación de la precipitación, humedad del suelo, nivel de los acuíferos, escorrentía y el transporte de sedimentos en dos diferentes usos del suelo (agrícola y forestal), realizado en la cuenca de la riera de Vernegà. La exposición de resultados se divide en dos periodos, el primero desde 1993 hasta 2005 y el segundo de 2005 a 2012 con una clara influencia en la hidrología por la gestión forestal acaecida en la cuenca.

La riera de Vernegà es tributaria de primer orden del río Ter y se localiza en el noreste de la Península Ibérica, específicamente en la vertiente sur del macizo de les Gavarres (Girona). El área de captación total de la cuenca (2,5 km<sup>2</sup>) cuenta con una combinación de usos agrícolas y forestales que es controlada por la estación de aforo denominada Campàs. El uso únicamente forestal en la parte alta de la cuenca es controlada por la estación de aforo Bosc (1,60 km<sup>2</sup>). En la cuenca se encuentran caminos forestales no pavimentados. La litología general es granito, a menudo meteorizado formando acumulaciones de una estructura muy débil en la superficie. Esta cuenca está influenciada por un clima mediterráneo subhúmedo y tiene una temperatura media anual de 15°C.

Para la medición de la precipitación y la temperatura se cuenta con la estación meteorológica: Cassà de la Selva. El equipo de monitoreo para cada una de las dos estaciones de aforo consiste en: un limnógrafo donde se registra gráficamente la profundidad del agua; un dispositivo (Tipo Divers) de medición automática de la columna de agua; y un muestreador automático (tipo ISCO), para el muestreo del transporte de sedimentos en suspensión y sólidos en disolución. Semanalmente también se mide el nivel de profundidad de 3 pozos para determinar el nivel de los acuíferos, adicionalmente se mide la humedad del suelo en 5 puntos distribuidos en toda la cuenca.

La precipitación media anual (años hidrológicos de octubre a septiembre), del periodo 1983-2012, es de 688 mm, con una desviación estándar de 179 mm. El estudio de la distribución estacional de las precipitaciones muestra que la mayoría ocurre durante el otoño seguido de la primavera e invierno, con un 34%, 25% y 23% respectivamente. La escorrentía superficial se concentra en los meses de octubre a junio, siendo siempre el flujo constante en todos los años de este estudio de febrero a abril.

La escorrentía media anual en Bosc para el periodo 1993-2005 es de 6,8 mm, y para

---

Campàs de 66,84 mm y para el segundo periodo 2005-2012 en Bosc es de 33,1 mm y para Campàs de 92 mm. Por tanto el aumento de la esorrentía media en las estaciones de aforo es importante, siendo para Bosc del 89,8% y Campàs del 64,0% atribuyéndose estos cambios a la implantación de los Planes Técnicos de Gestión y Mejora Forestal. Los mayores registros se dan en octubre de 2005 (36,9 mm en Bosc y 143,2 mm en Campàs).

En total se han logrado registrar 44 crecidas, de las cuales 22 corresponden al periodo 1993-2005 y 22 al periodo 2005-2012. En todo el estudio, el mes donde se registran mayores crecidas es febrero, con 9 crecidas, seguido de abril con 7 y noviembre con 6, durante los meses de junio a septiembre no se registraron crecidas. En octubre es donde se generan los mayores valores, destacándose entre ellas la de del año 2005 donde la esorrentía directa fue para Bosc de 22,7 mm y para Campàs de 133,4 mm.

El transporte de sedimentos se refiere a la carga de sedimentos en disolución y suspensión durante el periodo 2005-2012. La producción de sedimentos en suspensión promedio en Bosc es de 0,94 t/km<sup>2</sup>año y en Campàs de 4,34 t/km<sup>2</sup>año, y se concentran mayoritariamente en los momentos de las crecidas; sin embargo, en las dos estaciones de aforo estos valores son menores en comparación con la producción de sedimentos en disolución con 1,54 t/km<sup>2</sup>año en Bosc y 7,10 t/km<sup>2</sup>año en Campàs.

La calidad del agua en la riera de Vernegà en todos los años de estudio no muestra niveles superiores a los niveles guía o estándares europeos para aguas naturales. Solo se encontraron valores que superaban los niveles máximos permitidos por la legislación española en diferentes muestreos del agua del acuífero a través de los tres pozos control. Los elementos que destacaban por contaminación fueron fosfatos, nitratos y nitritos. Una vez los campos dejaron de abonarse con nitratos en 2007, los niveles descendieron a valores por debajo de valores máximos permitidos.

---

## Summary

The main objective of this study is the quantification and relation of precipitation, soil moisture, groundwater level, runoff and sediment transport in two different land uses (agriculture and forestry), conducted in the Vernegà basin. The presentation of results is divided in two periods, the first from 1993 to 2005 and the second from 2005 to 2012 with a clear influence of the forest management which took place at the beginning of the century on the hydrology of the basin.

The Vernegà River is a first order tributary of the Ter River and is located in the northeast of the Iberian Peninsula, specifically on the south side of the Gavarres massif (Girona province). The total area of the catchment is 2.5 km<sup>2</sup> and it has a combination of agricultural and forestry uses controlled by the gauge station called Campàs which close the outlet. The forested area at the top of the basin is controlled by the gauging station called Bosc (1.60 km<sup>2</sup>). In the basin there are a large number of unpaved roads. The lithology is mainly granite, often forming accumulations of weathered material of very weak structure on the surface. This basin is influenced by a Mediterranean humid climate and has an average annual temperature of 15°C.

The measure of precipitation and temperature is recorded in a meteorological station (Cassà de la Selva). The equipment for each of the two monitoring stations consists in a water level recorder, a device (Type Divers) for the automatic measurement of the water level, and an automatic water sampler (ISCO type) for sampling sediment transport in suspension and dissolved. Weekly, it is also measured the level of depth in 3 wells to determine the level of aquifers, additionally it is measured the soil moisture at 5 points distributed throughout the basin.

The mean annual precipitation (October to September), from 1983 to 2012, is 688 mm, with a standard deviation of 179 mm. The study of the seasonal distribution of rainfall shows that most often occurs during the spring, autumn and winter, with 34%, 25% and 23% respectively. Surface runoff is concentrated from October to June, recording always constant flow in all years of this study from February to April.

The average annual runoff for the period 1993-2005 in Bosc was 6.8 mm, and 66.84 mm in Campàs and for the second period 2005-2012 Bosc was 33.1 mm and 92 mm in Campàs. Thus the increase in average runoff was important; being for Bosc 89.8% and Campàs 64.0% attributed these changes to the implementation of Forest Management Plans. The mayor records are given in October 2005 (36.9 mm in Bosc and 143.2 mm in

---

Campàs).

In total there have been 44 floods recorded, of which 22 are for the period 1993-2005 and 22 in 2005-2012. Throughout the study, the month with major recorded flood is February, with 9 floods, April with 7 and November with 6. During the months of June to September there were no floods. October is where the highest values are generated; a special mention is the flood of 2005 where 22.7 mm were registered in Bosc and 133.4 mm in Campàs.

Sediment transport refers to the sediment load in solution and suspension during the period 2005-2012. The average of suspended sediment yield in Bosc was 0.94 t/km<sup>2</sup>yr and 4.34 t/km<sup>2</sup>yr in Campàs, this transport is mainly due to floods, however, in both gauging stations the values are lower compared to sediment yield in solution with 1.54 t/km<sup>2</sup>yr in Bosc and 7.10t/km<sup>2</sup>yr in Campàs.

The water quality in Vernegà River in all years of study does not show levels above European levels or standards guide for natural waters. Only values were found exceeding the maximum levels permitted by Spanish legislation in different aquifer water samples across the three monitoring wells. The elements were highlighted by pollution phosphates, nitrates and nitrites. Once the fields fertilized with nitrates stopped in 2007, the levels fell to values below permitted maximum values.

# Capítulo I: Introducción y objetivos



## 1. Introducción al estudio de la cuenca de la riera de Vernegà.

La instrumentalización de la cuenca de la riera de Vernegà (Girona) como cuenca representativa empezó en el año 1992 gracias a un proyecto europeo coordinado por la Dra. Maria Sala que llevaba por título “Desertification risk assessment and land use planning in a Mediterranean coastal area (1992-1994)”. Este proyecto sirvió también para crear el GRAM (Grup de Recerca Ambiental Mediterrània) que ha llevado a cabo la investigación en la cuenca.

El objetivo principal de la investigación en aquel entonces era conocer el impacto de los usos forestales y agrícolas en la escorrentía y el transporte de sedimento en un medio de montaña mediterránea. Metodológicamente el estudio se basaba en la instrumentación y monitorización de dos pequeñas cuencas integradas, Bosc y Campàs, la primera totalmente forestada y la segunda incluyendo campos de cultivo.

Tanto por el sustrato, por la pluviosidad y los conjuntos vegetales, el área de estudio es representativa del medio ambiente natural y los usos del suelo tradicionales de gran parte del Sistema Costero Catalán y concretamente del macizo de les Gavarres donde se halla la cuenca de Vernegà. Es interesante resaltar que se trata de un área con un elevado riesgo de incendio forestal, así como de unos usos forestales que, en muchos casos, van siendo paulatinamente transformados en usos turísticos, lo cual eleva el riesgo de incendios, de erosión y por tanto, de desertificación.

La mayor parte de la cuenca de Vernegà se ubica en la propiedad de Mas Bassets, a 148 metros de altitud. En el momento de comenzar la investigación en la cuenca, la propiedad se dedicaba a la agricultura tradicional extensiva de forrajes para el engorde de terneros y a la cría de animales de granja. Sin embargo la extensión más importante correspondía a un bosque de alcornoques con pinos. El sustrato es granítico y la erosión ha producido una acumulación de sedimentos arenosos en las depresiones. La precipitación media del lugar estaba alrededor de los 675 mm/año. El inventario de vegetación recoge, entre otras más minoritarias, las siguientes especies: en el estrato arbóreo, *Quercus suber* acompañado de *Pinus pinea*, *Pinus pinaster*, *Quercus ilex* y *Quercus pubescens*; en los estratos arbustivos se encuentran *Arbutus unedo*, *Erica arborea*, *Cistus monspelienses*, *Cistus salviifolius*, *Ulex parviflorus* y las lianas *Lonicera implexa*, *Smilax aspera* y *Rubia peregrina*.

Para el completo estudio y alcanzar el objetivo principal de la investigación se monitoreó durante un periodo bastante amplio de tiempo las vertientes de la cuenca.

Se trataba de valorar la dinámica hidrológica y los procesos de erosión responsables de la aportación de las vertientes al agua y sedimento de la cuenca de Vernegà. Para ello se instrumentalizaron una parcela de bosque, una parcela con matorral y un campo de cultivo, todas ellas relativamente cerca de la estación de aforos de Campàs y de la estación meteorológica. También se estudiaron los caminos forestales dado que se consideraban como la fuente más importante de escorrentía y erosión.

Las parcelas de bosque y matorral fueron seleccionadas en base a su representatividad dentro de la cuenca y en el ámbito del sector norte del Sistema Costero Catalán, tanto en relación a la vegetación como a la litología. El campo de cultivo es asimismo representativo de los cultivos forrajeros extensivos que pueden encontrarse en estos montes. El camino forestal estudiado tiene características similares en toda el área del macizo de les Gavarres.

En los primeros años de la década de los años 90, ya toda la instrumentalización estaba completada y se empezaron a generar una serie de datos a nivel de parcelas y de cuenca que se fueron publicando en diferentes medios: *abstracts*, artículos, informes y presentaciones en congresos, tanto nacionales como internacionales.

Desde que empezó el proyecto hasta el año 2005, existió un convenio RESEL (Red de estaciones para el estudio de la erosión) con el Ministerio de Medio Ambiente que subvencionaba el mantenimiento y la toma de datos de la cuenca y así anualmente se emitía un informe. También se obtuvo un proyecto del Ministerio de Ciencia y Tecnología en el año 1997, una vez ya finalizado el proyecto europeo, que llevaba por título “Evaluación de recursos hídricos y transporte sólido en cuencas forestales mediterráneas con distintos usos del suelo: Aproximación regional y experimental”. Desde el año 2005 hasta la actualidad, el mantenimiento de la cuenca experimental y del tratamiento de los datos se ha llevado a cabo gracias a 4 acciones complementarias con el título “Mantenimiento de cuenca representativa”.

Así mismo, otros proyectos paralelos ayudaron al conocimiento de los aspectos edafológicos e hidrológicos de la cuenca, como el titulado “Calidad de las aguas de las rieras de Arbúcies, Ridaura y Vernegà” del Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya, y otros convenios como el PECOS “The role of equilibrium-desequilibrium state of natural or cultivated terrestrial ecosystems trough an ecosystemic interdisciplinary methodology” con la Universidad de Bucarest.

También hay que mencionar en este apartado el trabajo DEA (Diploma de Estudios Avanzados) de Joaquim Farguell que llevaba por título “Relaciones de lluvia escorrentía en una cuenca de montaña baja mediterránea. Macizo de les Gavarres” y el trabajo final de carrera de Ivan Matamoros con el título “Implementación de una

infraestructura geomática en una microcuenca instrumentada en les Gavarres”, que sirvió también para establecer una colaboración con el Departament d’Enginyeria del Terreny de la Universitat Politècnica de Catalunya.

A continuación se resumirán los diferentes trabajos de carácter hidrológico que han sido publicados por el grupo de investigación en diferentes revistas y que han tenido a la cuenca de Vernegà como escenario de la investigación.

Maria Sala, Jesús Pernas, Xavier Úbeda y Ramon J. Batalla. (1994): Studying downstream influence of land use changes on runoff, solutes and sediment transport in a hilly Mediterranean coastal area. Conference on assessment of Hydrological temporal variability and changes. European network of experimental and representative basins (ERB): 179-187.

En este artículo se estudiaron dos cuencas, la cuenca de la riera de la Verneda, de la cual la cuenca de Vernegà, marco de estudio de esta tesis, es un tributario y la cuenca de Ridaura, mucho más antropizada urbanísticamente. Se compararon las diferentes generaciones de escorrentía en diferentes puntos de muestreo, representativos de diferentes usos del suelo, así como también las concentraciones de sedimento en suspensión y solutos. También se hacía un especial análisis de las crecidas habidas en los dos años de investigación y, aunque con pocos episodios, se daban ya algunos valores de caudales base y de aportaciones específicas en cada punto. Ya se evidenciaba que aguas abajo de las dos cuencas el sedimento, tanto en suspensión como en disolución aumentaba. También se concluía con los datos significativos de las crecidas en el cómputo total de toda la aportación anual de las cuencas, datos que serán discutidos en esta tesis doctoral.

Xavier Úbeda, Maria Sala. (1997): Spatial and temporal variations in the soil characteristics of an agricultural field and their relation to erosion. Méditerranée, nº 1.2: 41-44.

En este artículo se presentaba datos de los cambios que ocurren en los campos agrícolas de uso tradicional en la cuenca de Vernegà y como los diferentes estadios a lo largo del año: labrado, siembra, crecimiento y recolección tienen relación con el riesgo de generar más erosión. También se estudiaron diferentes parámetros del suelo, como la estabilidad estructural, la humedad y la capacidad de infiltración en cada época y en comparación con el uso de suelo forestal. Se evidenciaba que los campos agrícolas tenían más riesgo a ser erosionados y a generar más escorrentía debido a una menor capacidad de infiltración, una menor estabilidad estructural y una desprotección aérea frente a la precipitación. La época con más riesgo de erosión era la época de siembra, debido a que el suelo estaba totalmente desprotegido, allanado para introducir las

semillas y tenía lugar en otoño, época que como sabemos se dan las tormentas más intensas en la cuenca.

Xavier Úbeda, Lourdes Reina, Maria Sala. (1998): Cuantificación de la erosión en un camino forestal de un bosque típico mediterráneo de *Quercus suber*. Norba X: 185-196.

Este artículo al igual que el anterior, pretendían conocer cuál era la aportación de los diferentes usos del suelo al cómputo global de generación de escorrentía y de erosión en la totalidad de la cuenca. Los caminos forestales se conocen como los usos que hacen una aportación mayoritaria a nivel hidrológico. Se notaron también diferencias de cantidades producidas de escorrentía y erosión dependiendo de la estación del año, siendo el otoño la estación del año que generaba más escorrentía y erosión, y era de destacar como el verano, que a nivel de canal no llega a llevar escorrentía, a nivel de parcela de camino forestal sí que generaba una escorrentía instantánea gracias a las intensas tormentas del mes de agosto, pero no suficientes para llegar a generar caudal en el lecho de la riera de Vernegà.

Xavier Úbeda, Maria Sala. 2001. Chemical concentrations in overland flow from different forested areas in a Mediterranean Environment: burned forest at different fire intensity and unpaved road. Z. Geomorph. N. F. 45 (2): 225-238.

En este artículo, aunque también aparecían datos de una zona forestal quemada próxima a la cuenca, aparecían datos de la concentración de solutos en dos de los usos del suelo de la cuenca: forestal y caminos forestales. Además en la parte forestal se diferenciaban las vertientes abiertas y cerradas de vegetación. Con un total de tres años de estudio se podía concluir como a nivel de concentración, eran las vertientes del bosque aclarado las que eran más concentradas de iones, seguidas por las del camino forestal y las del bosque denso, aunque con valores muy similares. Por área controlada, era el camino forestal el uso del suelo que generaba más escorrentía, seguida del bosque aclarado y por último el bosque cerrado.

Maria Sala, Joaquim Farguell. (2002): Exportaciones de agua y sedimento en dos pequeñas cuencas mediterráneas bajo diferentes usos del suelo. Sistema Costero Catalán. Cuaternario y Geomorfología, 16 (1-4): 97-109.

Este artículo analizaba un periodo de los 20 años de control de escorrentía y erosión en la cuenca de Vernegà. Se comparaba, como se hace en esta tesis doctoral la influencia de los campos agrícolas al cómputo total de sedimento en suspensión y en disolución en la cuenca. También se estimaba el papel que las crecidas podían tener en la aportación total de la cuenca y se hacía una valoración del total de erosión por

hectárea y año que se producía en la cuenca. Todos estos datos eran anteriores a que se empezaran los trabajos de gestión forestal en la cuenca. También se ponía relevancia al hecho de la irregularidad. Irregularidad entre años, así como también entre eventos, ocasionadas por la época del año que tienen lugar estos eventos así como los trabajos en cada uso del suelo. Este artículo fue la publicación surgida a partir del trabajo DEA de Joaquim Farguell.

Luís Outeiro, Joaquim Farguell, Xavier Úbeda. (2010): The impact of agriculture on solute and suspended sediment load on a Mediterranean watershed after intense rainstorms. *Earth surface processes and landforms*, 35: 549-560.

El artículo de 2010, ya analizaba por separado el papel que tenían las crecidas debidas a fenómenos tormentosos y que generaban eventos importantes de generación de escorrentía y transporte de sedimentos en suspensión y disolución en la cuenca. Todos los registros son del segundo periodo de esta tesis doctoral, el periodo post tratamientos silvícolas dentro del plan técnico de gestión forestal. El artículo hace relevancia a la diferenciación de los eventos dependiendo del uso del suelo forestal y agrícola y también en relación a la intensidad de precipitación. Se destaca, como en trabajos anteriores, lo importante y la significación que tiene este tipo de eventos en el cómputo total de aportación de la cuenca de Vernegà.

Iván Matamoros, Ana Novella, Francesc Pros, Carles Gracia, Edinson Pacheco, Xavier Úbeda. (2012): Estudio de un perfil de erosión mediante aplicaciones topográficas. *Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología*, Santander:

Este artículo, que es parte del trabajo final de carrera de Iván Matamoros se centra en el estudio de los caminos como fuente de sedimento. Después de realizar una topografía muy al detalle de un camino forestal en el que se observa movimiento de material anualmente, lo fundamental es comprobar cómo se observa una erosión, pero también una sedimentación. El resultado es que durante el año hidrológico en estudio hubo más sedimentación que erosión. Este dato es importante, ya que consideramos los caminos como fuente de sedimento, pero no todo el sedimento movilizado acaba directamente en el curso fluvial, sino que hay una gran parte que queda sedimentado gracias a las macro o micro topografías del terreno.

### **1.1. El estudio de cuencas representativas.**

El estudio de cuencas representativas puede realizarse desde muchas perspectivas: socioeconómicas, medioambientales o gubernamentales, que permiten un análisis plural e interdisciplinar con el objetivo de encontrar las actuaciones más importantes para su protección, gestión y aprovechamiento. En este trabajo analizamos las

dinámicas hidrológicas de la cuenca de Vernegà ligadas a las condiciones climáticas mediterráneas litorales.

Las cuencas representativas ofrecen un esencial conocimiento para reconocer los procesos hidrológicos y erosivos bajo diferentes usos del suelo.

El estudio de cuencas representativas se estableció firmemente durante los años 60 y proporcionó información valiosa sobre el control de procesos de escorrentía y erosión que suceden en el flujo hídrico de una cuenca (Burt y Walling, 1984). Durante las siguientes décadas, especialmente en los años 90, hubo un gran interés en el estudio de cuencas pequeñas con el fin de recoger datos para establecer el balance de agua y sedimento en España. Uno de los primeros trabajos fue realizado por Clotet (1984), quien encontró que las cuencas son el mejor escenario para la comprensión de la dinámica geomorfológica y el movimiento de sedimentos, siendo su caso, una cuenca de 22 km<sup>2</sup> ubicada en el pre-pirineo. Estudios similares se llevaron a cabo por diferentes autores en una amplia gama de tamaños y características de cuencas a fin de comprender sus dinámicas hidrográficas (Llorens, 1991; Batalla, 1993; Rabadà, 1995; Ceballos, 1997; Balasch, 1998; Farguell, 2004 y más recientemente, Estrany, 2009 o Lana-Renault, 2011).

Desde los años 80 se incrementan los estudios hidrológicos en cuencas experimentales con el objetivo principal de conocer los mecanismos y los procesos de transformación de lluvia en escorrentía, particularmente, su magnitud, frecuencia y tasas de transporte de sólidos. En este sentido, son interesantes los trabajos dedicados a comprobar cómo los cambios en los usos del suelo, dado el proceso de abandono de los campos de cultivo tradicionales y su reconversión en masa forestal, inciden en la respuesta hidrológica de las cuencas. Son destacables las investigaciones de García-Ruiz et al., (1995) y Lasanta et al., (2000) en el Pirineo aragonés; Batalla y Sala (1994) en la cuenca de Arbúcies en el Montseny; Clotet y Gallart (1986); Clotet et al., (1988) y Llorens et al., (1997) en el Pre-Pirineo.

Puntualmente, y en relación con esta tesis, hay que señalar los estudios de Sala et al., (1994) y Sala y Farguell (2002) en la cuenca experimental de Vernegà, que se centraron en las dinámicas fluviales en áreas forestales y de agricultura. También, el de Sala (2003) dedicado a la problemática de la impermeabilización del suelo y sus consecuencias a nivel hidrológico en el río Ridaura.

Los trabajos realizados en diferentes ámbitos y a diferentes escalas espacio-temporales siguen aportando información valiosa para verificar hipótesis establecidas sobre procesos de generación de escorrentía. Especialmente aquellas que aportan información de la diferencia de cobertura vegetal y el cambio de usos del suelo, ya que

dichos aspectos son factores valiosos en la interpretación de la dinámica hidrológica de una cuenca.

A partir de lo anterior, cobran cada vez mayor importancia las investigaciones desarrolladas en cuencas experimentales litorales que arrojen información que permita analizar, entender y proyectar las dinámicas hidrológicas de las cuencas mediterráneas frente al proceso de cambio global, así como las amenazas y riesgos derivados del comportamiento extremo de las mismas, con el propósito de que sirvan de referencia, orienten y apoyen los procesos de gestión y toma de decisiones vinculados a las cuencas. En este sentido, es importante señalar que aspectos como las cantidades de agua que pueden llegar a transportar los ríos, el tiempo de respuesta de las precipitaciones para generar escorrentía, así como el conocimiento de los episodios extremos y sus características, son datos imprescindibles para la gestión y el manejo de cuencas.

## **1.2. Los usos del suelo.**

Esta situación hace que el uso del suelo sea uno de los factores con efectos más directos sobre la respuesta hidrológica, y este hecho es uno de los aspectos más importantes estudiados de manera global (Cernusca et al., 1996; Debussche et al., 1999; Rabbinge y Diepen, 2000; Taillefumier y Piégay, 2003; Palang et al., 2005; Rounsevell et al., 2006). Estos cambios tienen lugar en la mayoría de los casos en cuencas de primer orden como es el caso de la riera de Vernegà, y en muchos lugares estas consecuencias se deben al abandono de las zonas agrícolas, y el consecuente aumento de las áreas forestales (Gallart y Llorens, 2003; García-Ruiz et al., 2008). Sin embargo, con el fin de mejorar los beneficios del uso forestal, el bosque se somete a técnicas de gestión que pueden afectar las condiciones de captación (Scott, 1997; Monte et al., 2005). Una de las consecuencias es la probabilidad de una menor cantidad de caudal base llegue a los cauces de los ríos principales, creando una escasez de este recurso durante el año hidrológico (Parry et al., 2000; Milly et al., 2005) situación que se agrava debido a las demandas crecientes de agua (MIMAM, 2000; PNUMA, 2000; IPCC, 2007).

Cada vez hay más evidencia de que una sólida comprensión de la dinámica espacio-temporales de uso y manejo del suelo son fundamentales para la comprensión de los procesos de escorrentía superficial y que sustenta las estrategias de mitigación (Fiener et al., 2011).

La riera de Vernegà, se encuentra dentro del ámbito de les Gavarres en la parte sureste y está constituida por dos usos de suelo: agrícola y forestal, que en su gran

mayoría se han mantenido durante los últimos 50 años, caso que no es típico de todo el ámbito mediterráneo, derivado del abandono de aprovechamiento agrícola y la posterior repoblación de viviendas de segunda residencia.

En los últimos siglos, las montañas mediterráneas se han visto afectadas por los cambios a gran escala en su uso del suelo relacionados con la presión de la población (Taillefumier y Piegay, 2003; Mazzoleni et al., 2004). Pendientes pronunciadas, orientadas al sur que antes se cultivaban intensamente hoy en día son objeto de abandono (Guido y Pussi, 1993; Lasanta-Martínez et al., 2005), y grandes áreas han sido forestadas (Ortigosa et al., 1990). Muchos estudios han demostrado que este tipo de evolución de la cubierta vegetal actúa modificando parámetros hidrológicos (van Lanen et al., 1993; Gallart et al., 1994; Beguería et al., 2003; López-Moreno et al., 2006).

El macizo fue declarado en el año de 1992 como “Espai d’Interès Natural” (PEIN) por el “Govern de la Generalitat de Catalunya”, y finalmente aprobado en el año 2006 por el “Departament de Medi Ambient i Habitatge” con el objetivo de preservar y recuperar los valores naturales, paisajísticos y culturales con desarrollo socioeconómico de la población (Nebot y Baqués, 2004). Ocupa un área de 286,8 km<sup>2</sup> donde predomina la propiedad privada (92,8%) sobre la propiedad pública, permitiendo que la propiedad forestal sea muy fragmentada, con una mayoría de fincas que no superan las 25 ha (Consorti de les Gavarres, 2007). De toda la superficie incluida en el PEIN, actualmente más del 90% son bosques, dejando muy por debajo, en tan solo un 5%, el espacio dedicado a las actividades agrícolas.

En la cuenca han tenido lugar “Plans de Gestió Forestal de Catalunya” desde finales de los años 90. Estas prácticas consisten esencialmente en el desbroce del sotobosque para favorecer el desarrollo del alcornocal y los pinos, que son las dos especies de mayor aprovechamiento de la región, situación que genera una alteración en términos de interceptación e infiltración del suelo, la escorrentía superficial y la disponibilidad de sedimento para ser transportado. Contexto que convierte a la cuenca en un área de estudio representativa para todo el ámbito de les Gavarres y de la costa litoral catalana con situaciones similares.

Los usos del suelo, que “a priori” podemos dividir en dos, forestal y agrícola, tienen una complejidad en sí mismos. Parte del área forestal fue objeto de uno de estos Planes Técnicos de Gestión Forestal y en la parte agrícola hay una gran cantidad de caminos forestales con una dinámica hidrológica particular.

Por tanto, toda la investigación se ha basado en dos puntos de muestreo (forestal y agrícola). El primer punto se denomina “Bosc” con un área de captación de 1,60 km<sup>2</sup>

que mide la contribución de la parte forestal de bosque mediterráneo y el segundo punto de control se llama “Campàs”, ubicado en la salida de la cuenca, y con un área total de 2,57 km<sup>2</sup>, registra los valores de toda el área de captación, siendo una combinación de usos forestales y una área agrícola.

En la actualidad las inundaciones de núcleos urbanos ubicados en zonas de litoral mediterráneo catalán, asociadas a procesos de precipitación de gran intensidad, son cada vez más recurrentes y con consecuencias más catastróficas (Saurí y Ribas, 1993). Estos cambios de la respuesta de la lluvia en las áreas de captación inducidos por el aumento de la urbanización es uno de los más dramáticos impactos humanos en el ciclo hidrológico. El efecto básico del incremento de áreas urbanas en los procesos de lluvia-escorrentía es acusado en episodios de tormentas, donde se incrementa el potencial de inundaciones en las zonas llanas próximas a la desembocadura. Estos efectos se pueden ver en costas mediterráneas las cuales muestran un incremento progresivo marcado por el aumento de áreas urbanizadas, específicamente relacionadas con el aumento del turismo de costas (Sala, 2003). Además, favorecen el deterioro del medio ambiente, ocasionando un aumento en los niveles de riesgo relacionados con, por ejemplo, incendios forestales y sequías, entre otros (Ribas et al., 2002).

Las inundaciones y los factores que las favorecen están directamente ligados con la acción antrópica en el ciclo del agua, como son el aumento de superficies impermeables debido a la construcción de viviendas y de carreteras, que produce, a su vez, el aumento de la escorrentía y la ocupación de las planicies de inundación por construcciones, interfiriendo en el flujo fluvial natural (Sala, 2003), debido a que dinámicas poblacionales como la migración y la urbanización ejercen presiones adicionales sobre los recursos hídricos locales (UNESCO, 2010).

### **1.3. Hidrología y transporte de sedimentos en cuencas mediterráneas.**

En el ámbito mediterráneo influyen muchos factores que influyen sobre las dinámicas hidrogeomorfológicas en las cuencas. Por ello, su estudio es muy importantes en la interpretación los recursos hídricos (Lindim et al., 2011).

La cuenca de la riera Vernegà es representativa para evaluar las dinámicas fluviales y sedimentológicas en dos diferentes usos del suelo (agrícola y forestal) en la costa mediterránea de la península ibérica. Por un lado los cultivos herbáceos de secano extensivos son uno de los elementos agrícolas más representativos de la región mediterránea, que debe ser uno de los principales factores que afectan a los procesos de erosión. (Estrany, et. al., 2012). Por otro lado, el abandono de áreas forestales es

típico en el ámbito mediterráneo.

Las áreas mediterráneas se caracterizan por una marcada irregularidad en el régimen de precipitación y alta evapotranspiración estacional, por lo general conduce a un período de déficit de agua en el verano. Por esta razón, las relaciones entre las precipitaciones y la escorrentía en estas regiones son más complejas que los de las zonas húmedas (Lana Renault et. al., 2007). Sus cuencas fluviales se caracterizan por tener cursos de aguas semipermanentes o efímeras, pero también por importantes crecidas ocasionales asociadas a lluvias torrenciales (Conacher y Sala, 1998). La riera de Vernegà, presenta una aridez estival constante siendo intermitente.

El estudio de la hidrografía y los volúmenes de escorrentía (esencialmente el volumen del flujo de tormenta) ha sido un enfoque clásico de la hidrología de cuencas durante décadas. Hewlett y Hibbert, 1967 y Woodruff y Hewlett, 1970 estudiaron las relaciones precipitación-escorrentía en la escala de eventos para definir un factor de captación respuesta hidrológica en la escala anual.

La literatura ofrece casos de estudios en parcelas que relacionan la precipitación, la precipitación total y el transporte de sedimentos en suspensión, desarrollados en ambientes montañosos (Yair y Enzel, 1987; Regués y Gallart, 2004; Seeger et al., 2004 y Nadal-Romero et al., 2008 ), la mayoría describen procesos hidrogeomorfológicos en áreas agrícolas (Arnáez et al., 2007; Ramos y Martínez-Casasnovas, 2007; Marques et al., 2008 y Estrany et al., 2012).

Las crecidas han sido analizadas individualmente y con un mayor detenimiento. Se han agrupado dependiendo de la dinámica que las ha caracterizado. Las crecidas, producidas a menudo por fenómenos tormentosos muy localizados temporalmente, son muy importantes en términos de cantidad de agua generada, ya que, por ejemplo, para el periodo 2005-2012 representan el 70% de la escorrentía total superficial. En total se registraron 44 crecidas, de las cuales 22 corresponden al periodo 1993-2004 y 22 crecidas corresponden al periodo 2005–2012. En general, la respuesta hidrológica de las crecidas indican que la escorrentía directa está influenciada por la precipitación total y la duración de cada evento, además de la precipitación de los días anteriores (López-Tarazón et al., 2010), situación que sucede en la riera de Vernegà.

Otro aspecto a destacar del estudio es el continuo monitoreo de las aguas subterráneas, especialmente durante el periodo 2005-2012, ya que, las características litológicas de la cuenca, tiene un papel predominante sobre los acuíferos, y su influencia se relaciona con la naturaleza de la interacción entre las aguas subterráneas y la escorrentía superficial del sistema hidrológico (Sear et. al., 1999). La influencia principal de los acuíferos sobre la escorrentía base (como afluente). Y el flujo de canal

hacia los acuíferos en crecidas (como efluentes). En acuíferos, la química del agua varía de acuerdo con las características de las recargas de agua, la solubilidad de los minerales presentes a lo largo del recorrido del flujo, y la influencia de las prácticas agrícolas que hayan realizado, como la aplicación de abonos.

Durante las últimas décadas el interés por el estudio de la intensidad del transporte de sedimento se ha incrementado y ha sido largamente cuantificado en diferentes escalas y métodos. Uno de los aspectos estudiados es el efecto de la agricultura intensiva ubicada en llanuras de inundación y sus implicaciones en el impacto sobre la geomorfología de una cuenca debido a episodios de precipitaciones extremas (Hoyle et al., 2008). Estudios sobre la sedimentación han sido ampliamente utilizados como base para la evaluación de las tasas de erosión o degradación del suelo en cuencas de cabeceras. (Fournier, 1960; Jansson, 1962; Walling and Webb, 1986; Walling, 1990; Moody and Martin, 2001; Braken and Kirkby, 2005; Harmel et al., 2006).

Algunos estudios del transporte de sedimentos en suspensión han sido llevados a cabo en cuencas mediterráneas bajo fuertes contrastes estacionales y temporales. Sin embargo, pocos estudios de transporte de sedimentos en suspensión se han llevado a cabo en las cuencas hidrográficas mediterráneas bajo fuerte periodicidad en el tiempo por más de 20 años (Inbar, 1992; Batalla et al., 1995; Sala and Farguell, 2002; Alexandrov et al., 2003; Rovira et al., 2005; Estrany, 2009; Outeiro et al., 2011; Lana-Renault, 2011). Y específicamente en la misma cuenca riera de Vernegà, se han realizado estudios desde el año 1993 utilizando los datos que aquí se trabajan, utilizando las mismas metodologías, pero que en un principio hacen referencia las implicaciones de las áreas forestales y agrícolas en la variabilidad hidrológica y sedimentológica, y posteriormente, en esta tesis, se hace una aportación a la investigación involucrando los efectos de los PTGMF; incluso siendo comparada con áreas próximas, o estudios realizados dentro de la misma riera de Vernegà (Batalla y Sala, 1994; Sala y Farguell, 2002; Outeiro et al., 2010).

En otras palabras, no sólo las propiedades hidráulicas del flujo, sino también el suministro de los sedimentos de la cuenca de captación (Graf, 1988), la intensidad de las precipitaciones, su distribución espacial (Alexandrov et al., 2003), la cantidad y tasa de escorrentía, y las distancias de las aguas en el canal principal (Williams, 1989) determinan las dinámicas hidrogeomorfológicas de las cuencas. En consecuencia, los resultados de estos estudios son difíciles de cuantificar y generando siempre una dispersión que pueden subestimar o sobrestimar considerablemente los datos (Horowitz, 2003).

## 2. Objetivos.

El objetivo de la investigación en un primer momento, como se ha comentado al inicio de este capítulo, fue conocer el impacto de los usos forestales y agrícolas en la escorrentía y el transporte de sedimento en un medio de montaña mediterránea (Macizo de les Gavarres, Girona) en la cuenca representativa de Vernegà. Para ello se delimitaron dos pequeñas cuencas integradas, Bosc y Campàs, con dos estaciones de aforo, la primera totalmente forestada y la segunda incluyendo campos de cultivo.

Con el paso del tiempo y de los acontecimientos que tuvieron lugar en la cuenca, se creyó necesario tener también como objetivo de estudio otra variable: los efectos sobre la dinámica hidrogeomorfológica de la ejecución de un Plan Técnico de Gestión y Manejo Forestal. La exposición de resultados se divide en dos periodos, el primero desde 1993 hasta 2005 y el segundo de 2005 a 2012 con una clara influencia en la hidrología de la gestión forestal.

Esta tesis, pues, estudia las relaciones de la precipitación, humedad del suelo, carga de los acuíferos, escorrentía y transporte de sedimentos, a nivel anual, estacional y mensual durante el periodo 1993-2012, con especial atención al papel de las crecidas registradas, durante los dos periodos de estudio.



## Capítulo II: Área de estudio



## 1. Localización de les Gavarres y principales características.

El macizo de les Gavarres, constituye, junto con el macizo del Begur, el extremo septentrional de la Cordillera Litoral Catalana. Tiene la forma de un gran arco que se abre hacia el norte, entre las comarcas del Baix Empordà y el Gironès, con una extensión de 286,83 km<sup>2</sup> (Figura 1) repartidos por una veintena de municipios: Calonge, Castell-Platja d'Aro, Corçà, Cruïlles-Monells-Sant Sadurní de l'Heura, Forallac, la Bisbal d'Empordà, Mont-ras, Palafrugell, Palamós, Santa Cristina d'Aro, Torrent y Vall-llobrega en la comarca del Baix Empordà, y Cassà de la Selva, Celrà, Girona, Juià, Llagostera, Llambilles, Madremanya, Quart y Sant Martí Vell en la comarca del Gironès. (Situación geográfica y administrativa incluida en el decret 328/92, de 14 de diciembre de 1992).

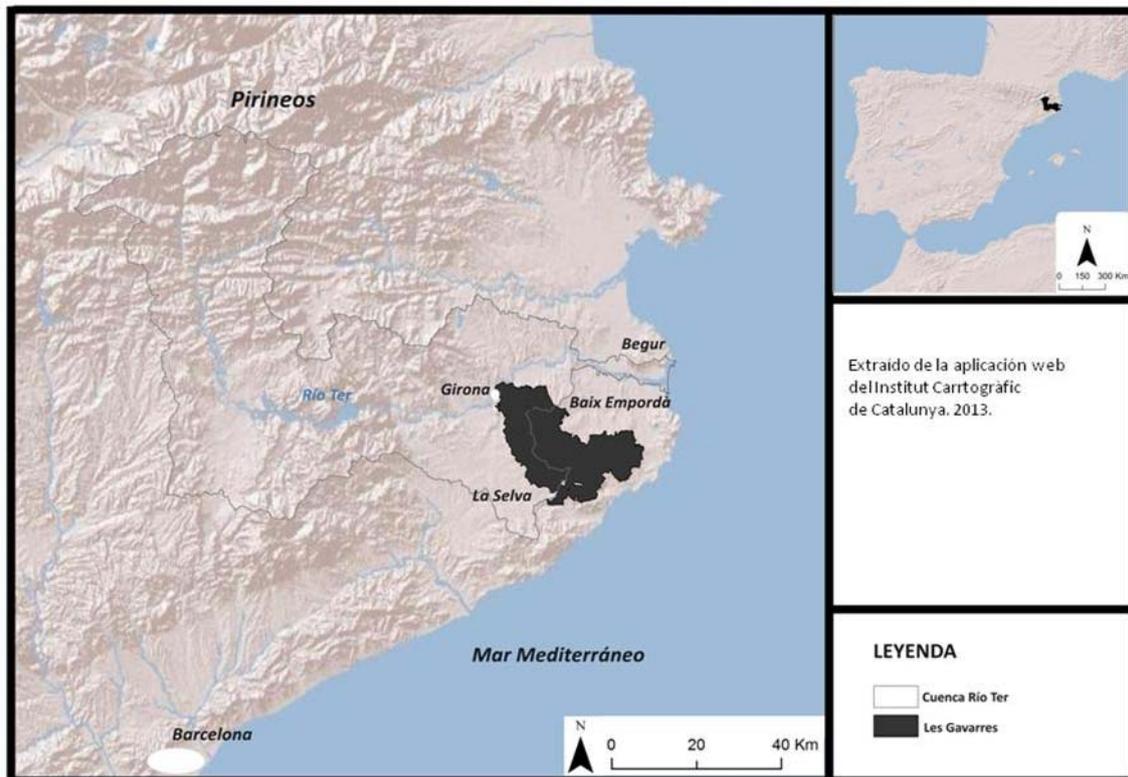
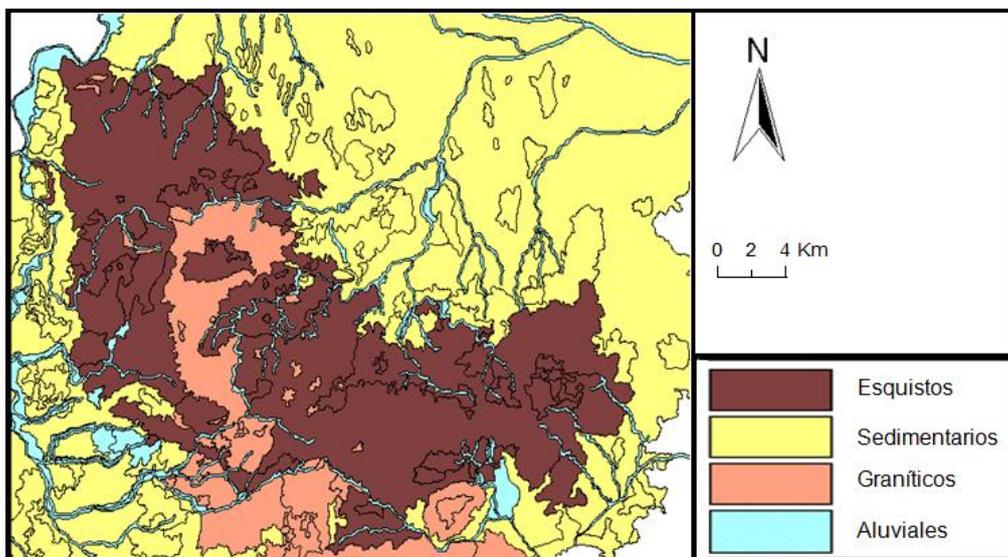


Figura 1. Ubicación de les Gavarres y de la cuenca de la riera de Vernegà.

El macizo limita al norte con la llanura del Baix Empordà mediante una serie de colinas, conocidas con el nombre de Pregavarres, al noreste con la Cordillera Transversal, que en este punto separa las llanuras del Empordà y de la Selva; al oeste limita con la Selva y al sur con la Vall d'Aro, pequeña depresión donde el Ridaura separa las Gavarres del macizo de l'Ardenya o Cadiretes.

Es un macizo de formas redondeadas, que tiene como puntos más elevados los “Monts Bessons de Les Gavarres” y “Puig d’Arques”, con 533 y 527 metros respectivamente. Otros picos destacados son el de la Verge dels Àngels (485 m), el Montigalà (467 m), Santa Pellaia (353 m), el Puig Cargol (363m) y el Montnegre (285 m) (ConSORCI de Les Gavarres, 2007).

En la Figura 2 se presenta la distribución geológica más importante del macizo de les Gavarres; en la mitad norte predominan las pizarras que, al disgregarse, forman un relieve más escarpado, con valles encajonados. En la mitad sur, en cambio, predominan los granitos, que cuando se meteorizan forman el “sauló”. En este sector, las cumbres son más redondeadas y los valles más abiertos. En la parte más alta del macizo hay un eje central donde predominan los esquistos y las cuarcitas. En general, son abundantes las vetas de rocas filonianas, como el cuarzo. En las partes más bajas aparecen materiales sedimentarios depositados con posterioridad a la formación del macizo.



**Figura 2. Mapa geológico de les Gavarres.**

La red hidrográfica de las Gavarres está formada por nueve cuencas (Onyar, Ter, Rissec, Daró, Torrent de Peratallada, Torrent Gran de Pals, Aubí, riera de Calonge y Ridaura), a las que aportan sus aguas una gran cantidad de arroyos y torrentes (las rieras de Verneda, de Vall-llobrega, de Benlloch y de la Ganga y los torrentes de Cavorca y del Folc, entre muchos otros). La mayoría de estos arroyos desaguan en las cuencas del Onyar y del Daró, las más extensas del macizo.

Los caudales de los arroyos son muy irregulares, dado que las lluvias se concentran sobre todo a finales de verano y principios de otoño, cuando el agua caliente del Mediterráneo entra en contacto con los frentes fríos procedentes del Atlántico. En

estas condiciones, se pueden formar riadas con crecidas que, de vez en cuando, llegan a inundar las llanuras (Sala, 2003).

El macizo de les Gavarres, desde el punto de vista climático se sitúa en la zona de clima mediterráneo septentrional. El clima es mediterráneo sub-húmedo con una precipitación media anual de alrededor 650 mm, de tipo intermitente o de temporada debido a la variabilidad estacional típica del Mediterráneo. Las mayores precipitaciones se producen durante el otoño y la primavera, mientras que las condiciones más áridas se producen durante el verano. Este patrón de lluvias provoca mayor escurrimiento durante finales de otoño, invierno y principios de la primavera (Sala y Farguell, 2002).

La vegetación de les Gavarres cuenta con un paisaje homogéneo en función de la visión de un gran bosque de alcornoques acompañados de arbustos y matorrales típicos (PEIN, 2006). Las masas forestales dominantes son de especies esclerófilas, destacándose los *Quercus ilex* y *Quercus suber*, posteriormente, masas mixtas de *Quercus suber* y *Pinus pinea*, tramos de vegetación de ribera en los torrentes y antiguas plantaciones de *Castanea sativa* y *Pinus pinaster* dispersos por el territorio.

Los *Quercus suber* se distribuyen por las zonas más soleadas y secas, sobre todo en las cumbres y las laderas graníticas orientadas a mediodía, aunque su área de distribución se amplió hacia zonas de *Quercus ilex* durante el desarrollo de la industria corchera. Los claros de encinares mejor conservados se concentran en las cumbres más elevadas y hondonadas sombrías. (Sala, 1977). Posteriormente, la crisis del sector corchotaponero favoreció la sustitución por *Pinus pinaster* y *Pinus halepensis*, o su abandono. Actualmente hay grandes dudas sobre la distribución potencial del alcornoque en las Gavarres e incluso si formaría una comunidad forestal natural en ausencia de actividad humana. La recesión de los alcornoques cuando no se favorece su explotación forestal así lo hace pensar. ([www.institut català del suro.cat](http://www.institut català del suro.cat)).

Entre el sotobosque más típico de les Gavarres encontramos una gran cantidad de arbustos (*Phillyrea angustifolia* L., *Rhamnus alaternus* L., *Pistacia lentiscus* L., *Arbutus unedo* L., *Phillyrea latifolia* L., *Evonymus europaeus* Mill., *Cistus ladanifer* L., *Crataegus monogyna* Jacq., *Erica arborea* L., *Ruscus aculeatus* L., *Genista scorpius* (L.) DC. in Lam. et DC. subsp. *Scorpius*, ...) y lianas (*Hedera helix* L. *Lonicera periclymenum* L., *Smilax aspera* L., ...).

Los matorrales y prados aparecen como respuesta a la degradación de los bosques originarios producida básicamente por talas o aclaradas desmesuradas y por los incendios forestales. (Sala, 1977) La vegetación de las malezas más características de este espacio está constituida básicamente por arbustos como: *Erica arborea* L., *Cistus*

*monspeliensis* L. y *Cistus ladanifer* L., acompañados de *Erica scoparia* L. subsp. *scoparia*, *Calicotome spinosa*., *Rosmarinus officinalis* L., *Smilax aspera* L. y *Retama monosperma* (L.) Boiss.

Uno de los principales usos que se le ha dado a les Gavarres es el aprovechamiento de los recursos madereros. Antiguamente se utilizaban para la construcción y la fabricación de herramientas. Las plantas leñosas eran utilizadas por panaderos, alfareros, hornos de cal y muchas otras industrias. Actualmente muchos antiguos encinares son matorrales arbolados o bosques de rebrote, derivado del abandono generalizado de muchas fincas desde mediados del siglo XX, que se tradujo en una lenta recuperación del bosque mediterráneo (ConSORCI de les Gavarres, 2007).

En las últimas décadas la costa litoral catalana ha presentado progresivamente transformaciones relacionadas con el desarrollo turístico, favoreciendo el incremento de urbanizaciones, acción que se repite de forma generalizada en todo el arco Mediterráneo (Sala, 2003). Además, favorecen el deterioro del medio ambiente, ocasionando un aumento en los niveles de riesgo relacionados con, por ejemplo, inundaciones, incendios forestales, sequías, entre otros (Ribas et al., 2002).

Les Gavarres cuenta con un “Pla d’Espai d’Interès Natural” (PEIN) por el “Govern de la Generalitat de Catalunya”, y finalmente aprobado en el año 2006 por el “Departament de Medi Ambient i Habitatge” con el objetivo de preservar y recuperar los valores naturales, paisajísticos i culturales con desarrollo socioeconómico de la población (Nebot y Baqués, 2004). Ocupa un área de 286,8 km<sup>2</sup> donde predomina la propiedad privada (92,8%) sobre la propiedad pública, permitiendo que la propiedad forestal sea muy fragmentada, con una mayoría de fincas que no superan las 25 ha (ConSORCI de les Gavarres, 2007). De toda la superficie incluida en el PEIN, actualmente más del 90% son bosques, dejando muy por debajo, por tan solo un 5%, dedicado a las actividades agrícolas.

Es por ello el interés del estudio hidrológico y de erosión de la riera de Vernegà, ya que dada su ubicación en les Gavarres y su cobertura del suelo es un ejemplo de lo que ha sucedido en el macizo. Este estudio puede ayudar a entender las consecuencias de los cambios ocasionados por el abandono paulatino de los bosques y la introducción de nuevas prácticas de gestión forestal una vez el macizo de les Gavarres fuera declarado Espai d’Interès Natural.

## 2. Usos del suelo de les Gavarres.

Como se ha mencionado en los objetivos, el presente trabajo tiene como base para la

interpretación de las variaciones hidrológicas y sedimentológicas los diferentes usos del suelo y los cambios acaecidos en los últimos años con la aplicación de los Planes Técnicos de Gestión Forestal, por este motivo se presenta este apartado de los usos del suelo en les Gavarres y de los cambios habidos desde mitad del siglo XX.

Para el estudio de los usos del suelo y su evolución en las últimas décadas se ha trabajado sobre las bases disponibles desde el año 1957. La obtención de la información para este año proviene a partir de las imágenes de ortofotomapa del vuelo americano (Figura 3).- resultando de su interpretación cartográfica un total de 6 categorías generales, que responden a los usos más importantes que se estudian en el macizo de les Gavarres.

1.- Bosque Abierto, 2.- Bosque Cerrado, 3.- Cultivos, 4.- Terrazas, 5.- Prados y herbáceas, 6.- Sin datos.

Los bosques abiertos corresponden a aquellas zonas boscosas que no poseen una gran densidad de árboles de copa alta y que bajo la fotointerpretación se identifica una gran cantidad de sotobosque presente. La información sin datos corresponde a las pequeñas áreas que no pudieron ser identificadas y no han sido adaptadas para disminuir el nivel de error (Figura 3).

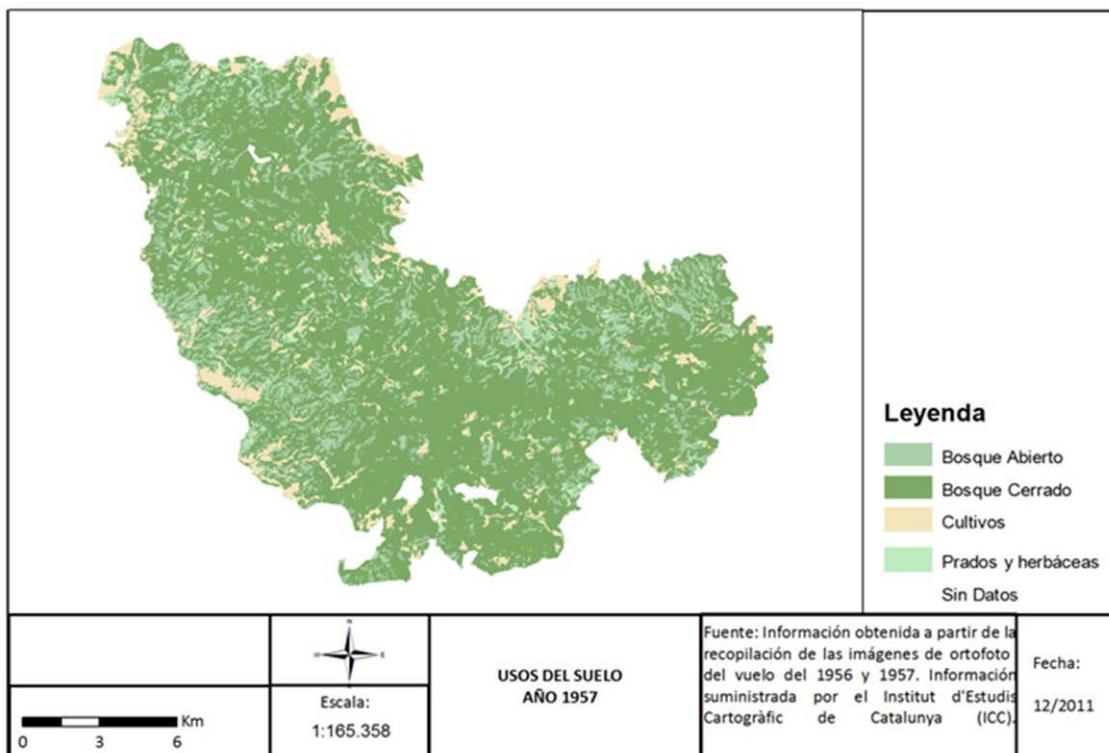


Figura 3. Usos del suelo para el macizo de les Gavarres para el año 1957.

La base para la clasificación de los usos del suelo para el año 1987, 1997 y 2005-2007

(2007 a partir de ahora), ha sido obtenida de los datos web del “Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya”, por tanto sólo se ha requerido delimitar la zona de estudio para el análisis del uso del suelo en cada uno de los años.

La clasificación de los usos del suelo en Cataluña 1987 se ha caracterizado en 22 categorías a partir de la base de referencia LANDSAT-TM bajo el método de captura de tratamiento de datos multitemporales captados por el sensor Thematic Mapper del satélite Landsat (Figura 4). Debido al perfeccionamiento en la tecnología utilizada para la obtención de los mapas de usos del suelo de Cataluña, se ha considerado oportuno adecuar el mapa correspondiente al año 1987 a las técnicas utilizadas en el mapa del año 1997. Esta modificación facilitará el análisis comparativo entre los mapas de toda la serie.

De las 22 Categorías que se encuentran en todo el ámbito de Cataluña para los años 1987 y 1997 en el ámbito de les Gavarres sólo se encuentran 15 (Figura 5). Para el caso de las categorías del año 2007 (Figura 6), han sido combinadas las 138 categorías de tal manera que quedaran igual que las 22 categorías que los años anteriores.

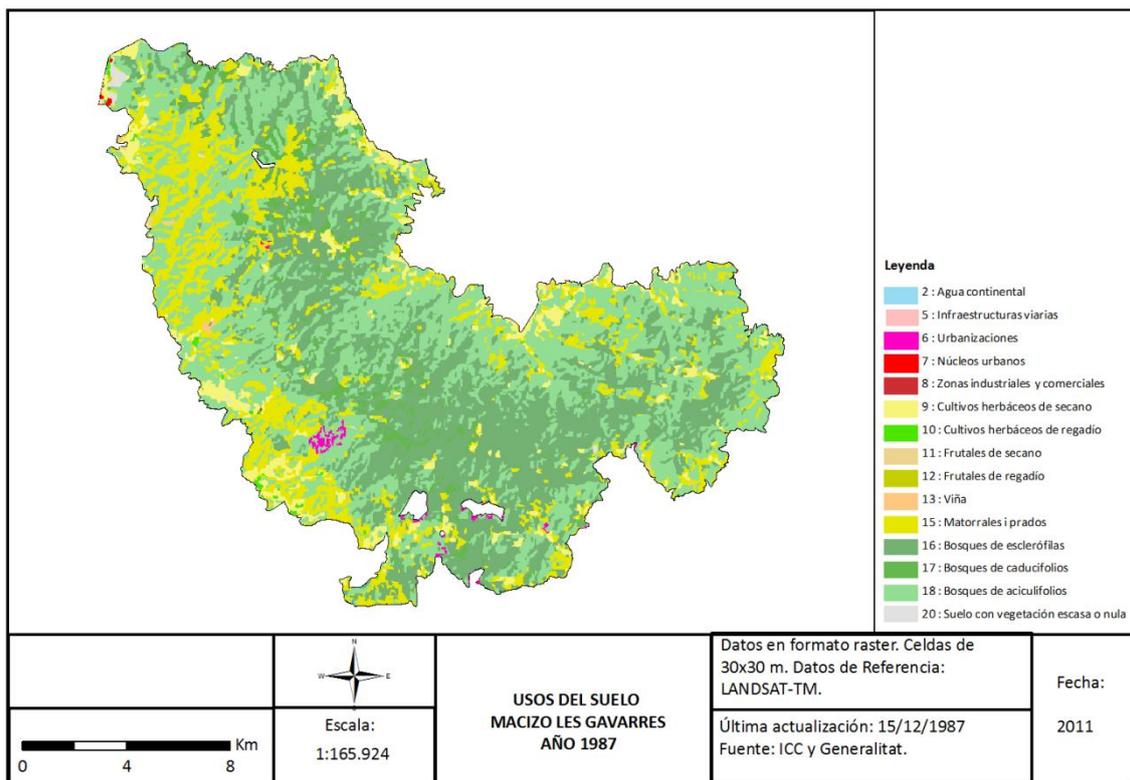


Figura 4. Usos del suelo en el macizo de les Gavarres para el año 1987.

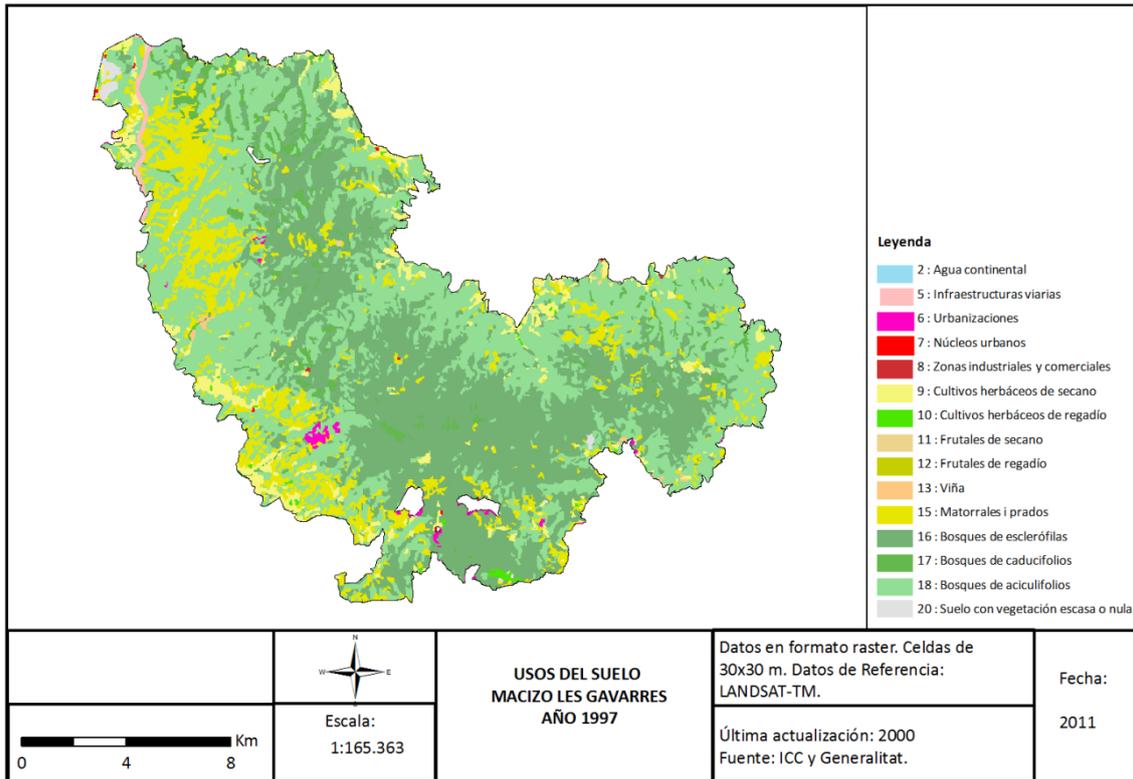


Figura 5. Usos del suelo para el macizo de les Gavarres para el año 1997.

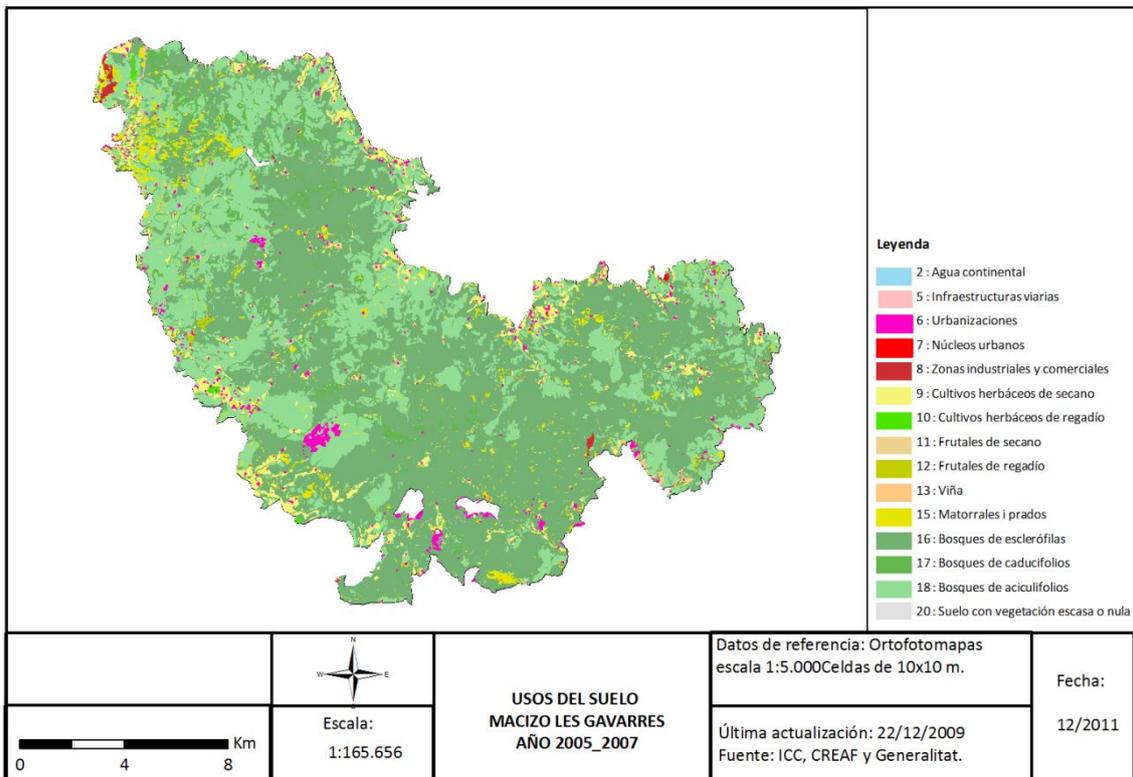


Figura 6. Usos del suelo en el macizo de les Gavarres para el año 2007.

## 2.1. Cambios de uso del suelo y zonas más importantes.

En la Tabla 1 se resumen en porcentaje las cuatro características más importantes del macizo de acuerdo a los usos (el porcentaje total del año 1957 no llega al 100% dada la calidad de las imágenes que se han tratado). Para el caso general de las infraestructuras se refiere a las categorías de: núcleos urbanos, urbanizaciones, zonas industriales e infraestructuras viarias; siendo un resultado porcentual muy bajo. Los porcentajes de cultivos han disminuido en un 3% entre el año 1957 y 1987 y mantenido durante los siguientes años. En el caso de las categorías de matorrales (que incluye las categorías de bosques claros para el año 1957; prados y vegetación escasa para los años 1987 a 2007), ha mantenido una tendencia hacia la disminución, especialmente entre los años 1987 y 2007. Se resalta que para el año 1957 el macizo de los Gavarres mantenía un aprovechamiento constante, especialmente de las áreas forestales, siendo entonces muy probable que el porcentaje de matorrales fuese más alto dado el aprovechamiento maderero de los bosques, pasando de un 17% a un 4% respectivamente.

Las coberturas de bosques son mayoritarias en todos los años de estudio notándose una tendencia al aumento del bosque desde el año 1957 y 2007, situación que determina un abandono del aprovechamiento forestal y agrícola que aumenta la masa forestal y disminuye las áreas de prados, herbáceas y especialmente de cultivos.

**Tabla 1: Porcentaje de cobertura del suelo para todos los años de estudio.**

Porcentaje de cobertura	1957 (%)	1987 (%)	1997 (%)	2007 (%)
Infraestructuras	0%	0%	1%	1%
Matorrales	18%	17%	12%	4%
Cultivos	9%	6%	5%	5%
Bosques	72%	76%	82%	90%
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

En la Tabla 2 se encuentran las áreas de usos del suelo para el año 1957, destacándose que mayoritariamente corresponden a bosques cerrados, siendo de 207,48 km<sup>2</sup>, seguido muy por debajo del valor los bosques abiertos, esta categoría tiene una interpretación particular, ya que, debido a la calidad de las imágenes de ortofotomapa corresponden a aquellas zonas donde efectivamente la densidad de bosque es muy baja, pero no es posible diferenciar de forma clara si corresponden también a la categoría de prados y herbáceas, siendo la suma de las dos categorías de 51,12 km<sup>2</sup>. Una categoría adicional que se ha introducido es el de terrazas, ya que dada la misma circunstancia, no era posible diferenciar los usos mediante la aplicación Idrisi si correspondían a infraestructuras urbanas ó terrazas agrícolas; por tanto, alberga todas

las categorías de infraestructura que se diferencian en años posteriores, en un total de 5,46 km<sup>2</sup>. También se destaca un área de 3,73 km<sup>2</sup> sin datos para aquellos puntos que no fue posible diferenciar el uso.

**Tabla 2: Área de uso del suelo para el año 1957 en el macizo de les Gavarres.**

Usos	1957 área (km <sup>2</sup> )
Bosque Abierto	39,1
Bosque Cerrado	207,5
Cultivos	19,0
Terrazas	5,5
Prados y Herbáceas	12,6
Sin Datos	3,7
<b>Total</b>	<b>286,8</b>

A partir de aquí, la evaluación de los cambios de uso del suelo en el macizo son más explícitos dado el nivel de información disponible para los años 1987, 1997 y 2007. En total el PEIN de les Gavarres posee 286,83 km<sup>2</sup> (Tabla 3) de área de los cuales más del 75% en los tres años corresponden a áreas de Bosques, siendo entonces en estas categorías donde se presentan los mayores cambios. A continuación se describirá uno a uno los cambios más importantes durante el periodo 1987 - 2007:

**Tabla 3: Áreas para los tres años de estudio.**

CATEGORÍAS	1987 área (km <sup>2</sup> )	1997 área (km <sup>2</sup> )	2007 área (km <sup>2</sup> )
2 : Agua continental	0,0	0,0	0,0
5 : Infraestructuras viarias	0,0	1,1	0,8
6 : Urbanizaciones	0,9	1,0	2,4
7 : Núcleos urbanos	0,1	0,1	0,1
8 : Zonas industriales y comerciales	0,0	0,1	0,6
9 : Cultivos herbáceos de secano	16,6	13,2	12,6
10 : Cultivos herbáceos de regadío	0,7	0,9	0,4
11 : Frutales de secano	0,4	0,1	0,6
12 : Frutales de regadío	0,2	0,0	0,3
13 : Viña	0,2	0,4	0,4
15 : Matorrales y prados	48,1	34,6	10,5
16 : Bosques de esclerófilas	93,3	104,7	167,3
17 : Bosques de caducifolios	10,4	9,1	9,6
18 : Bosques de aciculifolios	115,1	120,2	81,1
20 : Suelo con vegetación escasa o nula	0,7	1,1	0,2
<b>Total general</b>	<b>286,8</b>	<b>286,8</b>	<b>286,8</b>

Para el caso de la “categoría 2: Infraestructuras viarias” no ha sido caracterizado en el

año 1987 debido a la generalización de la metodología utilizada para la interpretación de los usos de la época; y su disminución en el año 2007 se debe al aumento de la precisión en la delimitación de las áreas y por consiguiente más exacta.

La categoría de Infraestructuras viarias, entre los años 1987 y 1997 fue el momento en el que se construyó el tramo de la Autopista A-7 que atraviesa el extremo noroeste del macizo, por ello dada la resolución del año 1987 no presenta datos, pero al año 1997 si que presenta un aumento de área de 1,08 km<sup>2</sup>, y posteriormente, para el año 2007, la definición de los polígonos permite una mejor precisión de las áreas, por ello la disminución del área total.

El mismo efecto en la precisión para el año 2007 originó un aumento significativo en la categoría Urbanizaciones, haciendo pasar en un aumento del 11% aproximadamente entre los años 1987 y 1997 a pasar a un 56% entre los años 1997 y 2007; uno de los efectos que se le puede adjudicar es que en antiguas zonas donde solo contemplaba áreas forestales ahora existe el nivel de definición en la imagen para la interpretación que permitió distinguir aquellas viviendas aisladas ubicadas entre zonas boscosas.

Para el caso de las categorías agrícolas, como frutales y cultivos de secano y regadío, tienen una tendencia hacia la disminución. La categoría con mayor cobertura es la de cultivos herbáceos de secano, que para el año de 1987 tiene un área de 16,64 km<sup>2</sup> y para el año 2007 de 12,57 km<sup>2</sup> evidenciando una disminución del (%) debido al abandono de las actividades agrícolas que generó nuevas propuestas de aprovechamiento de dichos campos en usos forestales. Los cultivos de viña, a pesar de tener un área pequeña han mantenido un aumento, en los tres años, uso agrícola que tenía un gran impacto en años anteriores, y parece que dadas las demandas del uso, el aumento del aprovechamiento va cada vez en aumento.

Como conclusiones a este apartado podemos decir que los bosques han aumentado un 18% desde el año 1957 hasta el año 2007, y es en estas categorías de cobertura donde se han presentado los mayores cambios, atribuyéndose al abandono de las zonas agrícolas. Situación que vislumbra un abandono del aprovechamiento forestal y agrícola que aumenta la masa forestal. La razón por la cual los hábitats de especies esclerófilas han aumentado en un 44%, se debe a la intención de proteger el aprovechamiento forestal del alcornoque y al mantenimiento forestal que disminuye las competencias naturales.

En general se nota un descenso de los cultivos durante los años 1957 y 1987 de un 3% y una estabilización de los mismos durante los años 1997 y 2007, posiblemente debido a las actuaciones de protección realizadas una vez es declarado el macizo como PEIN. Un caso especial es el de los cultivos herbáceos de secano los cuales entre el año de

1997 a 2007 sólo descendió en 0,64 km<sup>2</sup>.

Los bosques aciculifolios han disminuido de 115,08 km<sup>2</sup> (año 1987, Tabla 3), hasta llegar a 81,12 km<sup>2</sup> para el año 2007. Por el contrario han aumentado de área los bosques de esclerófilas, pasando de 93,31 km<sup>2</sup> (año 1987) al 167,25 km<sup>2</sup> (año 2007). Además la categoría de cultivos de secano ha descendido, pasando de 16,64 km<sup>2</sup> (año 1987) a 12,57 km<sup>2</sup> (año 2007), situación que como veremos ha sido lo contrario a los eventos producidos en la riera Vernegà donde incluso se han generado aumentos.

A continuación nos centraremos en las características de La cuenca de la riera de Vernegà como área de estudio representativa de dos de los usos del suelo más representativos en les Gavarres, como son los bosques y los cultivos.

### **3. Localización de la cuenca de Vernegà y principales características.**

La cuenca de la riera de Vernegà (2,5 km<sup>2</sup>) está ubicada en el lado suroeste del macizo de les Gavarres. La cuenca es considerada de primer orden según Strahler y es afluente de la riera de la Verneda, afluente del río Onyar, y a su vez del río Ter. Las altitudes de la cuenca van desde los 440 m en el Puig Gros hasta los 150 m en la estación de aforo de Campàs situado a la salida de la cuenca (Figura 7).

La estación de aforo que controla la superficie forestal, llamada “Bosc”, está ubicada a una altitud de 190 m.s.n.m. con un área de captación de 1,60 km<sup>2</sup>. Campàs con 2,57 km<sup>2</sup> corresponde a toda el área de estudio, su altitud es de 150 m.s.n.m. con una combinación de los usos forestales (incluidos los de la estación Bosc) y agrícolas (ubicados en la parte baja de la cuenca).

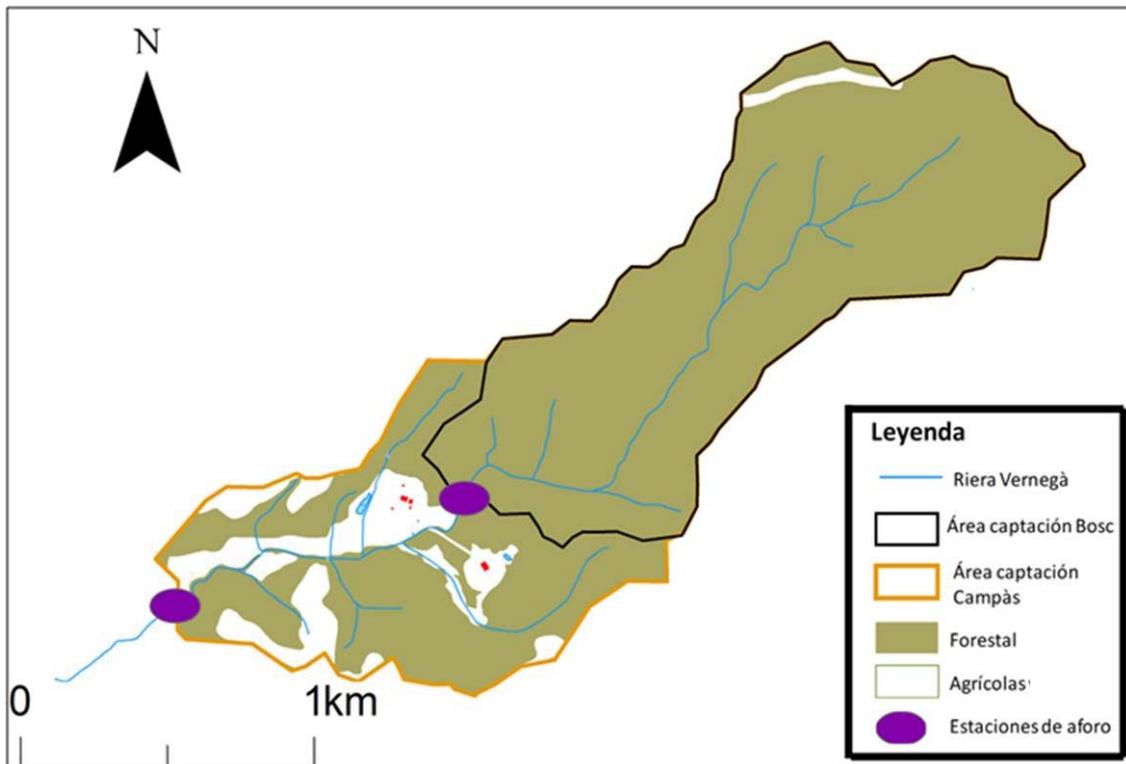


Figura 7. Áreas de captación de Bosc y Campàs.

La litología de la cuenca de Vernegà consiste principalmente en granitos con presencia de rocas metamórficas y depósitos aluviales en la llanura (Figura 8) formando acumulaciones de material con una estructura muy débil (Farguell y Sala, 2002).

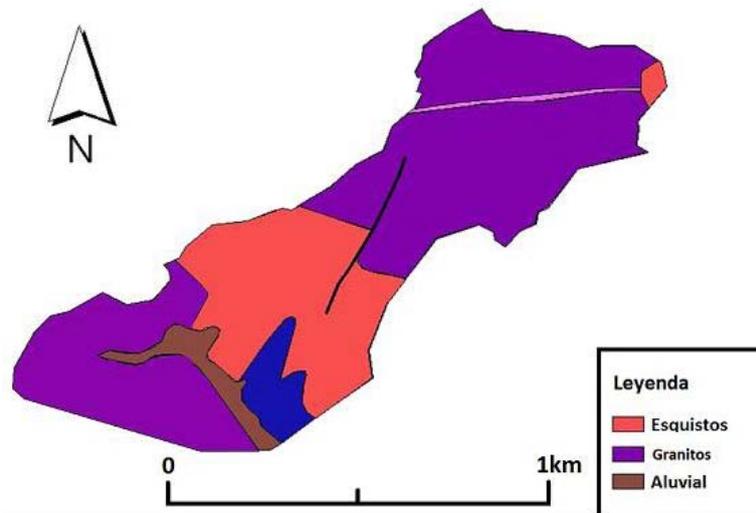


Figura 8. Mapa litológico de la cuenca de la riera Vernegà.

El suelo en la cuenca de estudio de Vernegà está sobre sustrato granítico y según Úbeda (1994) se clasifica como Luvisoles. Están mayoritariamente compuestos de arena (80%) y mucho menor en el limo (18%) y arcilla (2%) y tienen una textura franca-arenosa. Tienen una alta estabilidad estructural, ya que de media sólo el 3,2% del material se descompone según el método de impacto de lluvia y una porosidad que oscila entre 54,3 y 63,7%. La capacidad de infiltración es muy alta y muestra una reducción con el tiempo en la tasa de infiltración suave, lo que indica que la porosidad es buena, incluso a niveles más profundos. En relación a su composición química, son suelos ácidos. El color del suelo en la escala de Munsell (1975) varía de un marrón amarillento y marrón oscuro y este hecho está relacionado con el contenido de materia orgánica, mayor en el suelo donde hay plantados *Quercus robur* y más bajos en el suelo de *Pinus pinaster*. En la siguiente tabla hay un resumen de los valores de diferentes parámetros edáficos localizados en diferentes tipos de vegetación.

Tabla 4. Propiedades físicas y químicas del suelo (0-5 cm) bajo diferentes tipos de

## vegetación. Valores de los iones en ppm.

	<i>Quercus suber</i>	<i>Quercus ilex</i>	<i>Quercus robur</i>	<i>Pinus pineae</i>	<i>Pinus pinaster</i>
	10 YR 5/4	10 YR 5/4	10 YR 4/3	10 YR 5/3	10 YR 5/4
<b>Color Munsell</b>	(Yellowish Brown)	(Yellowish Brown)	(Brown/Dark Brown)	(Brown)	(Yellowish Brown)
<b>% Materia Orgánica</b>	8,6	12,5	19,3	10,0	8,1
<b>% Arena</b>	86	86	86	88	75
<b>% Limos</b>	4	5	8	4	4
<b>% Arcilla</b>	10	9	6	8	21
<b>pH (H<sub>2</sub>O)</b>	5,35	6,36	6,22	6,69	5,7
<b>EC (mS/cm)</b>	0,12	0,27	0,12	0,11	0,19
<b>% Carbono</b>	2,84	3,43	6,82	3,29	3,95
<b>% Nitrógeno</b>	0,15	0,22	0,36	0,14	0,14
<b>Relación C/N</b>	18,32	14,59	18,94	23,5	28,21
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	5,15	3,71	6,64	5,71	1,89
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	1,66	1,29	2,32	2,83	1,04
<b>Na<sup>+</sup></b>	11,98	9,06	9,71	6,96	10,5
<b>K<sup>+</sup></b>	5,33	3,55	2,71	7,87	4,87
<b>ESP (%)</b>	49,66	51,44	45,41	29,78	57,37
<b>Al<sup>3+</sup></b>	1,69	0,76	0,7	0,64	2,14
<b>Mn<sup>2+</sup></b>	0,59	0,01	0,01	0,12	0,05
<b>Fe<sup>2+</sup></b>	2,22	0,69	0,62	1,18	2,57
<b>Zn<sup>2+</sup></b>	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01
<b>P</b>	0,18	0,01	0,37	0,27	0,34
<b>S</b>	3,33	4,1	2,84	1,31	2,88
<b>SiO<sub>2</sub></b>	9,21	5,08	5,3	5,6	9,8

Dos niveles del agua subterráneas pueden distinguirse en el área, el nivel del agua subterránea superior se localiza en el depósito aluvial cuaternario de arenas, el cual coincide con el área de captación de Bosc. El nivel del agua subterránea inferior que es más profundo y conectado a la zona de depresión de La Selva ubicada al sur del macizo de les Gavarres coincide con el área de captación de Campàs (Farguell y Sala, 2002). La vegetación de la cuenca se encuentra dentro de la asociación *Quercetum ilicis galloprovinciale*, se compone principalmente de bosques mixtos dominados por *Quercus suber*, pero donde también se puede encontrar *Quercus ilex*, *Quercus robur*, *Pinus pinea* y *Pinus pinaster*. El estrato arbustivo está compuesto principalmente por *Erica arborea*, *Arbutus unedo*, *Cistus monspeliensis*, *Cistus salvifolius*, *Calicotone spinosa*, *Rosmarinus officinalis* y *Ulex parviflorus*, *Lonicera implexa*, *Phillyrea latifolia*, *Rosa sempervirens*, *Ruscus aculeatus*, *Viburnum tinus*, *Carex distachya*, *Caluna vulgaris*, *Timus vulgaris*, *Rubus ulmifolius*, *Cistus slaviifolius*, *Lavandula stoechas*, *Brachypodium retesum*, *Genista triflora*, entre otras. El estrato de herbáceas está dominado por Lianas, *Carex* y *Rubia peregrina* (Úbeda, et. al. 2012).

De acuerdo a la clasificación de los tipos biológicos (Figura 9) producidos per Raunkiaer

(1934), que evalúa la posición de las especies por sus brotes durante la temporada desfavorable de renovación y saber desde donde se pueden regenerar las plantas, en la cuenca de estudio son en mayoría fanerófitas (75%), seguido por caméfitas (11%), hemicriptófitas (11%) y, finalmente, geófitas (2,8%). Esta distribución se realiza de acuerdo con otros estudios que indican que los bosques mediterráneos pueden estar compuestos por aproximadamente el 80% de fanerófitas (Terradas, 2001).

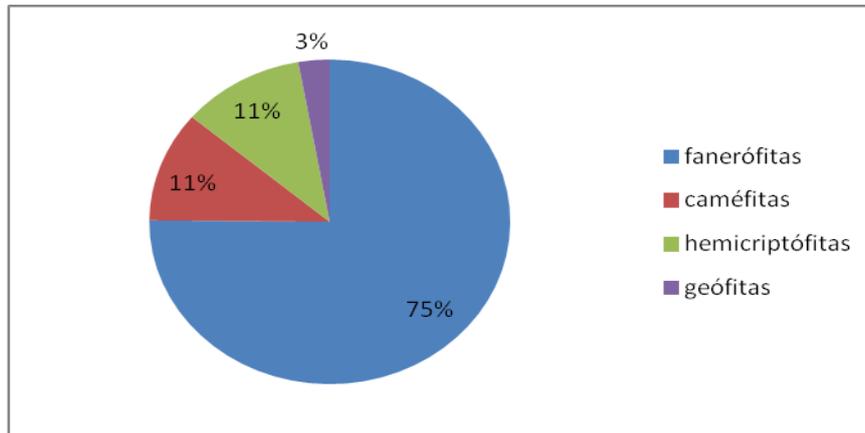


Figura 9. Porcentaje de los diferentes tipos biológicos de la vegetación de la cuenca.

De acuerdo a la estrategia de la reproducción (Figura 10) parece que la mayoría de las especies, más del 50% son rebrotadoras (70,8%), seguido de germinadoras (25%) y de tipo mixto un 4,2%. La vegetación mediterránea se adapta bien a las perturbaciones como los incendios (Terrades, 2001) y uno de sus principales estrategias es de rebrotar después de un incendio.

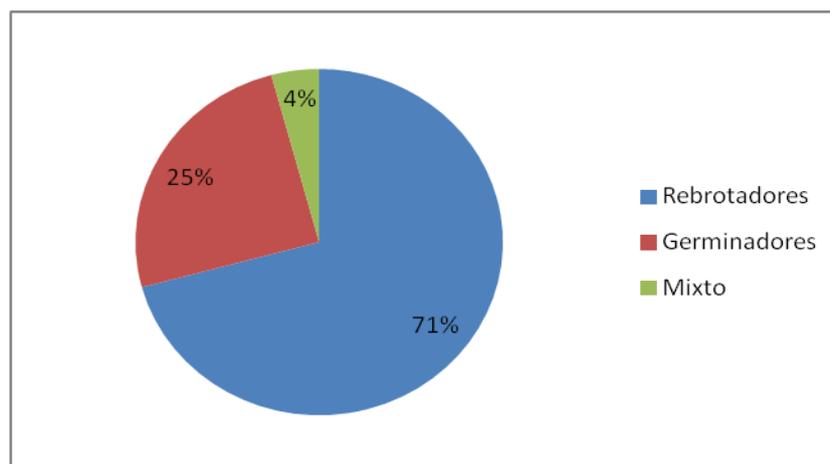


Figura 10. Porcentaje de los diferentes tipos de estrategias de reproducción de la vegetación de la cuenca.

#### 4. Estudio de cambios de uso del suelo en la riera de Vernegà.

La cuenca del río Vernegà sirve como ejemplo de observación de los cambios que se han generado a través de los años de estudio en les Gavarres, especialmente es un marco representativo de las categorías de bosques y cultivos ya que son estas categorías las que mayoritariamente forman parte en la cuenca. La Figura 11 corresponde a los usos del suelo del año 1957 y la Figura 12 al año 2007; son los dos años en los que se encuentra mayor variabilidad del análisis y en ellos se compara de forma más clara la información que ha sido obtenida de los ortofotomapas y las que se han obtenido de la información obtenida del Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya.

Para las dos Figuras se han generalizado los usos del suelo de la misma manera que se realizó para la todas les Gavarres. De primera mano se observa que mayoritariamente toda la cuenca corresponde a zonas de bosques. En 1957 el bosque abierto corresponde mayoritariamente a bosques aciculifolios y los bosques cerrados corresponden mayoritariamente a bosques de esclerófilas. Para el caso de los cultivos agrícolas entre los dos años, hay un mayor alcance de detalle de los datos para el año 2007 dada la metodología de elaboración; es el caso de las viviendas que se encuentran dentro de la cuenca que ya existían mucho antes del año 1957 y de la diferenciación de las zonas de cultivos en comparación con las coberturas de matorrales y prados. Un cambio importante dentro de la cuenca es el cultivo del sector sur de la cuenca, ya que para el año 1957 se denota una gran área de aprovechamiento que para el año 2007 ya no se gestionaba, son los grandes cambios que se pueden asociar al abandono de prácticas agrícolas de todo el ámbito de les Gavarres que ha aumentado las coberturas boscosas y de matorrales y prados.

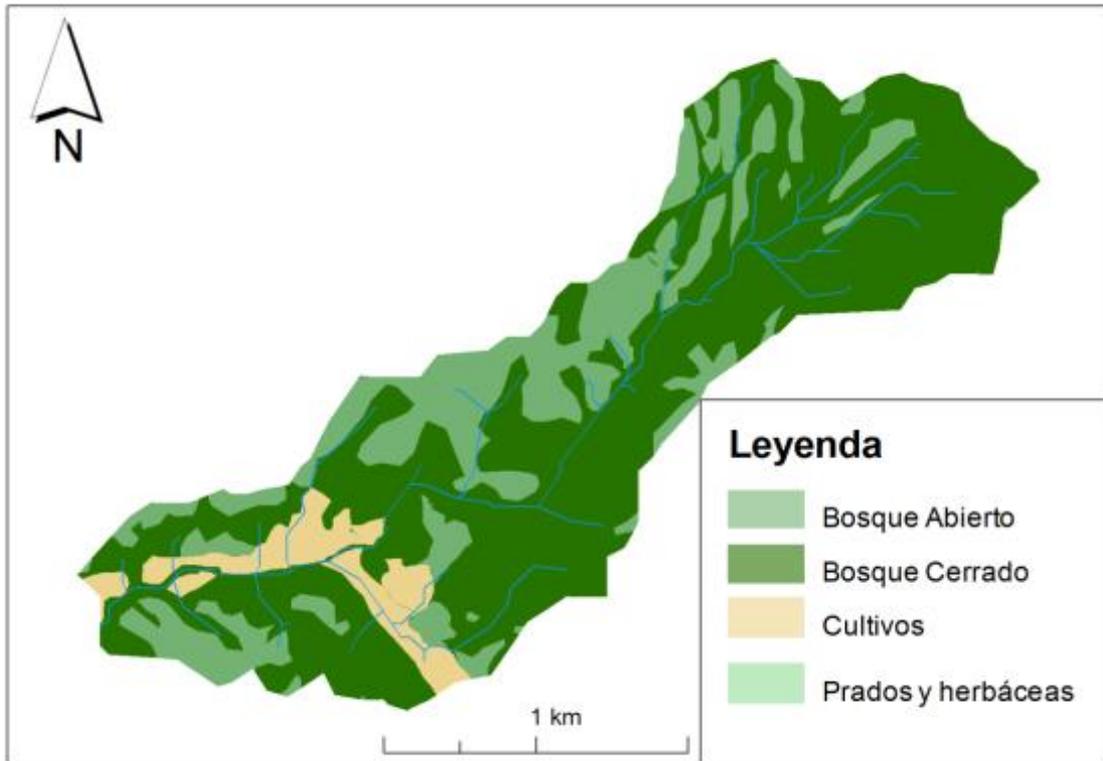


Figura 11. Usos del suelo en la cuenca del río Vernegà para el año 1957.

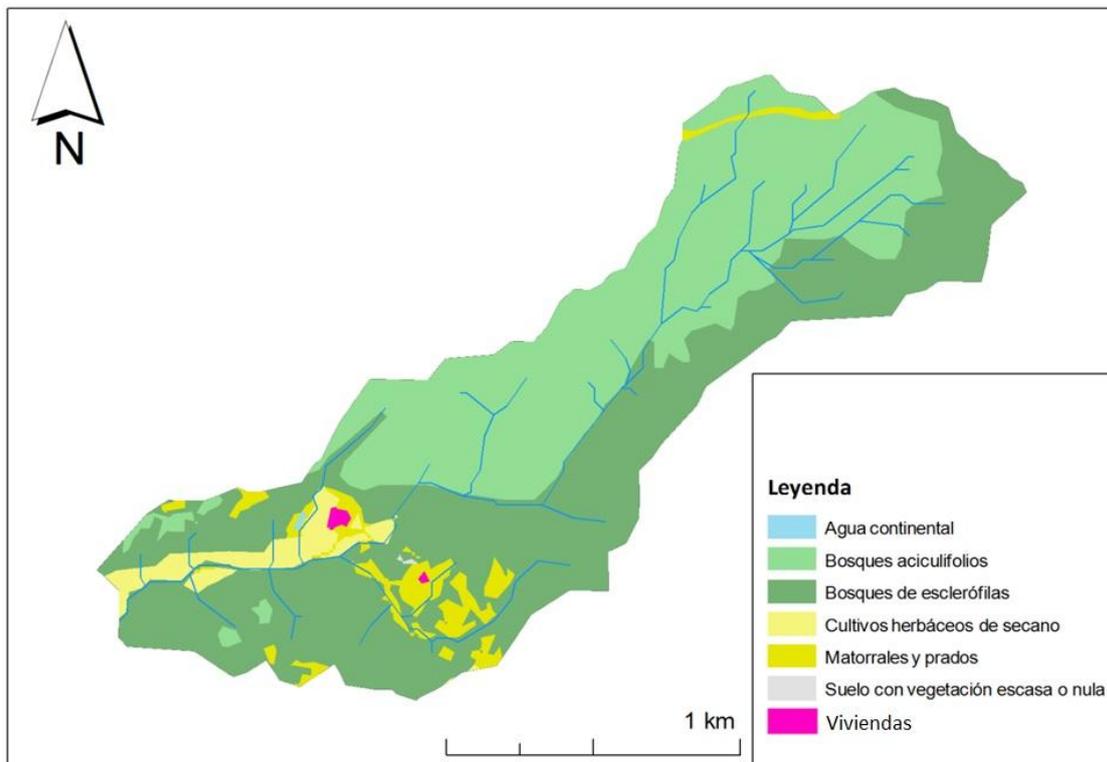


Figura 12. Usos del suelo en la cuenca del río Vernegà para el año 2007.

En la Figura 13 se presenta las imágenes de ortofotomapa disponibles del ICC, de los años 1957, 2009 y 2010. En ellas se observa la localización de los campos de cultivos aproximadamente en la planicie en el centro de la cuenca,.

La imagen del año 1957 muestra una mayor extensión de los campos de cultivo además de una mayor actividad de uso en las áreas forestales, ya que para aquel entonces, la mayoría del aprovechamiento de la cuenca era maderero y agrícola. Una particularidad a mencionar es que el pequeño embalse que aparece en las fotos actuales no existía para 1957. Se trata de un punto de agua para abastecimiento en caso de incendio forestal. De igual manera se visualiza una mayor densidad de caminos agrícolas que permitían el acceso a los recursos madereros. Posteriormente, la imagen del año 2009 lo primero que denota es el desaprovechamiento del cultivo en la zona sur, y la pérdida de caminos agrícolas debido al abandono.

A partir de ello y de los trabajos de campo que se han realizado desde el año 1992 se puede concluir que los cambios más notorios que se han generado en la cuenca se basan en el aprovechamiento forestal menos intensivo y el abandono de los campos agrícolas de una de las dos propiedades que conforma la cuenca.

Actividades posteriores derivadas del PEIN han favorecido la recuperación de las pistas, de la gestión de los bosques y de recuperación de campos agrícolas en las dos propiedades (Figura 13, c) favoreciendo un equilibrio que se había perdido.





**Figura 13. Ortofotomapa de la Cuenca del río Vernegà: a) año 1957. b) año 2009. c) año 2011.**

Finalmente el uso del suelo que corresponde a cultivos herbáceos y de secano tiene un área de  $0,13\text{km}^2$ , y de matorrales y prados corresponde a  $0,07\text{ km}^2$  correspondiendo a un total aproximado de  $0,20\text{ km}^2$  correspondientes a áreas con muy baja cobertura vegetal (Figura 14).

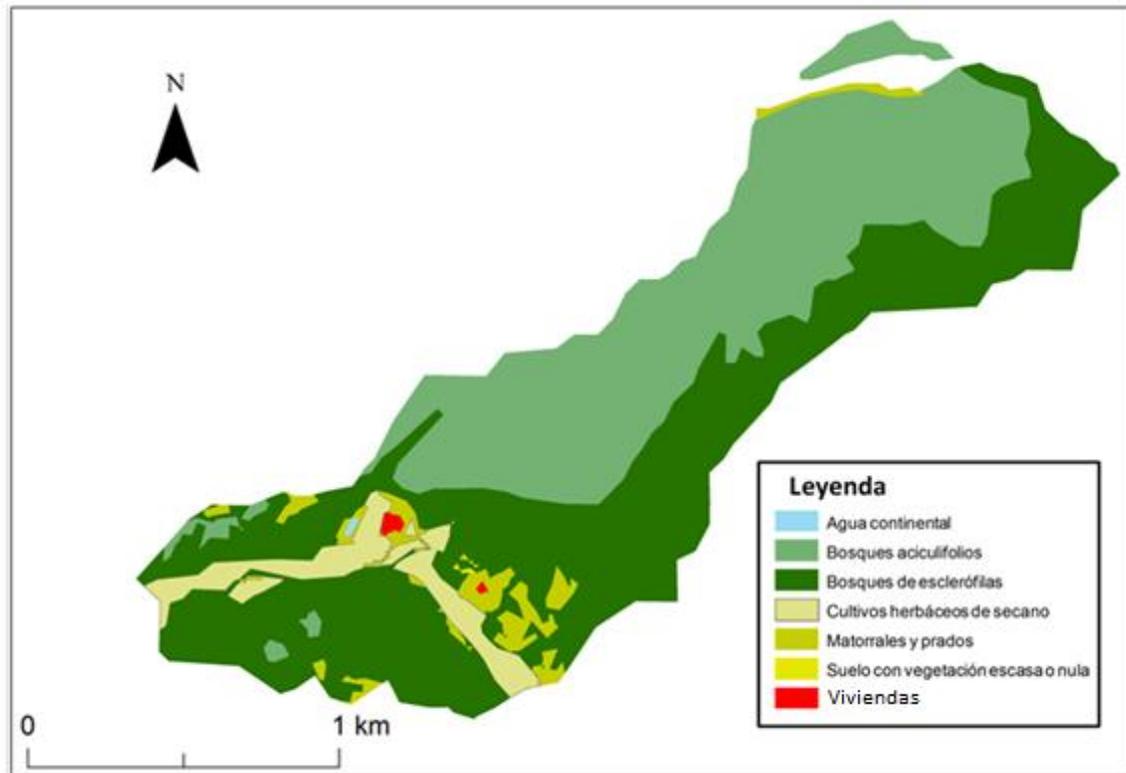


Figura 14. Usos del suelo en la cuenca del río Vernegà después del año 2011.

## 5. Planes Técnicos de Gestión y Mejora Forestal (PTGMF) en Mas Bassets

Desde el Centro de la Propiedad Forestal de la Generalitat de Catalunya se llevan a cabo la redacción, aprobación y supervisión de los instrumentos de ordenación forestal cuyo objetivo es facilitar la gestión de las fincas forestales y mejorar su rentabilidad, basados en unos criterios determinados. Los instrumentos de ordenación forestal (IOF) engloban varias figuras de ordenación en la planificación forestal catalana:

- 1.- Plan técnico de gestión y mejora forestal
- 2.- Plan simple de Gestión forestal
- 3.- Proyecto de ordenación

Todos estos instrumentos son documentos de ordenación forestal aplicables a bosques privados, que permiten programar la realización de trabajos de gestión y mejora forestal por un plazo máximo establecido. La planificación la propone el propietario al Centro de la Propiedad Forestal (CPF), el cual, una vez supervisado el informe técnico de los servicios del CPF puede aprobarlo, devolverlo con observaciones o denegar su

aprobación.

Un PTGMF es un instrumento de ordenación para la gestión de fincas forestales con una superficie a ordenar igual o superior a 25 hectáreas. Mas Bassets tiene un plan técnico de gestión y mejora forestal (PTGMF) ya que la finca tiene un total de 161,6 hectáreas ordenadas con este Plan. El Plan debe garantizar la mejora, la sostenibilidad y la multifuncionalidad de los sistemas forestales; hacer una parcelación forestal cuidadosa de la finca; considerar e integrar los planes de ordenación territorial, principalmente en el ámbito de la prevención y la lucha contra incendios forestales ; introducir normas silvícolas para garantizar la regeneración de la masa arbórea y minimizar los riesgos de erosión y de incendio; definir las infraestructuras para mejorar la realización de los aprovechamientos, y planificar las actividades agropecuarias vinculadas a los terrenos forestales que disminuyen la combustibilidad, favorezcan el mantenimiento de los ecosistemas y en preserven la biodiversidad. Esta figura normalmente es empleada para la ordenación de los montes privados.

### 5.1. Los objetivos del PTGMF para el caso de Mas Bassets.

En el momento de empezar la gestión forestal a finales de los años 90 y principios del 2000, el estado del bosque en la finca era de “muy sucio”, con gran dificultad para el muestreo de parcelas para sus inventarios y hacer cálculos de la posibilidad de aprovechamiento (Figura 15).



**Figura 15. Ejemplo de bosque denso sin gestionar dentro de la finca de Mas Bassets.**

El objetivo final de la finca es la regeneración del alcornoque, y se hará de forma

gradual en función de cada parcela.

1.- Regeneración del alcornoque: se tiene que obtener un bosque irregular que asegure la regeneración natural y la producción de corcho (Figura 16). Se tendrá a eliminar el resto de árboles de las unidades de regeneración excepto en rodales donde haya una mayor cantidad de pinos.



**Figura 16. Imagen de la parcela 1ª donde se puede comprobar el desbroce del sotobosque.**

2.- Aprovechamiento de la madera de pino: Se realizarán cortas de pinos de un diámetro superior a 30 cm de madera (Figura 17). El tipo de bosque que se espera tener es un bosque irregular regenerado por semilla. Se tiende a reducir el pino blanco frente al pino piñonero.



**Figura 17. Aprovechamiento de madera de pino en la parcela a4.**

3.- Potenciación de la encina: En aquellas áreas donde tenga presencia y le favorezcan las condiciones ambientales, explotación de leña a largo término.

4.- Sotobosque: Desbroce. Estudiar la posibilidad de mantenerlo controlado con rebaños y la posibilidad de comercializar subproductos del aclarado.

Para alcanzar estos objetivos se tienen que hacer en cada una de las parcelas unas actuaciones particulares. Algunas de estas actuaciones son: poda, desbroce de sotobosque, extracción del corcho, preparación del suelo y siembra de alcornocques y conservación de caminos forestales y de la línea eléctrica de 500 metros dentro de la parcela 1A.

## **5.2. Sobre la parte económica en la elaboración y ejecución del PTGMF.**

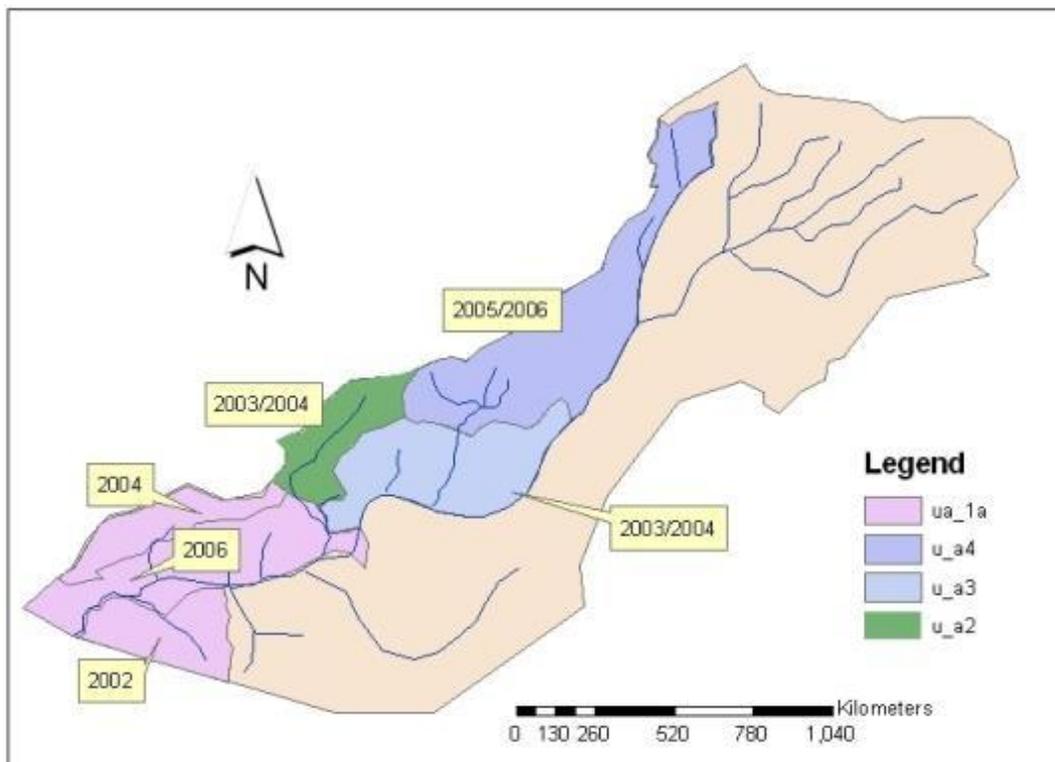
“La parte económica del plan de gestión está planificada en el mismo plano asociado al plan de actuaciones donde hay descrita la parte de gastos en base a los costes unitarios de cada una de las tareas (costos unitarios son por ejemplo coste hora por hombre con sierra, coste por hora de oruga, etc. así como el tiempo que dura una tarea, hora hombre por hectárea).

Cada una de las tareas también puede tener la parte de ingresos que puede ser por un aprovechamiento (madera pinos, cáscara de corcho...) o bien a las ayudas para llevar a cabo las tareas del bosque sujetos a subvención. La valoración de las ayudas las publica cada año la Generalitat de Catalunya así como los términos para poder acceder a las ayudas, esto en base a las tareas prioritarias o por importes máximos para tareas y

todos aquellos términos que se pueden reglamentar de ejecución como de concesión.

Una vez recibidas todas las peticiones se hace la evaluación y decisión sobre los expedientes. Las tareas subvencionadas deben estar después certificadas en terreno por un técnico del centro de la propiedad forestal (CPF) y se entregan los recibos de los trabajos y también se hace la medición de las superficies donde se han hecho las actuaciones (desbroces, podas, quemas,...). Una vez certificado el propietario puede cobrar la subvención. Los importes subvencionados no cubren los costes reales de los trabajos lo que cada vez hace más difícil la limpieza de bosque ya que todos los ingresos asociados al bosque son bajos (madera para sierra, madera para papel, corcho, leña). La redacción del plan de gestión está subvencionado por la Generalitat con un importe que depende de las existentes en regular” (Jesús Soler, propietario de Mas Bassets, comunicación oral, 2013).

La finca de Mas Bassets no cubre toda la cuenca de la riera de Vernegà como puede verse en la Figura 18. La parte no coloreada del mapa corresponde a la finca de Can Bota, que empezó hacer trabajos de gestión forestal en 2012. La finca de Mas Bassets representa el 45% del total de la cuenca.



**Figura 18. Cronosecuencia de las actuaciones en las diferentes parcelas resultantes del PTGMF de Mas Bassets.**

### 5.3. Densidad de la red de caminos en la cuenca de Vernegà.

En la actualidad hay una densa red de caminos como puede comprobarse en la Figura 20. No todos los caminos tienen la misma categoría aunque todos ellos están sin asfaltar. Hay caminos caracterizados como “pistas” (Figura 19), por los cuales pueden circular automóviles, “senderos” los cuales sirven para llegar a las áreas agrícolas y tienen unas anchuras reducidas y “brechas”, vías que en algunos lugares van siendo absorbidos por la masa forestal. Con los Planes Técnicos de Gestión Forestal algunos de estos caminos forestales se han recuperado.



**Figura 19. Ejemplo de mantenimiento de camino forestal en la finca de Mas Bassets.**

Se incluye este apartado y el mapa de la Figura 20 porque como se verá en apartados posteriores, los caminos forestales tienen un papel tan importante en la hidrología de la cuenca como lo pueden tener los demás usos del suelo.

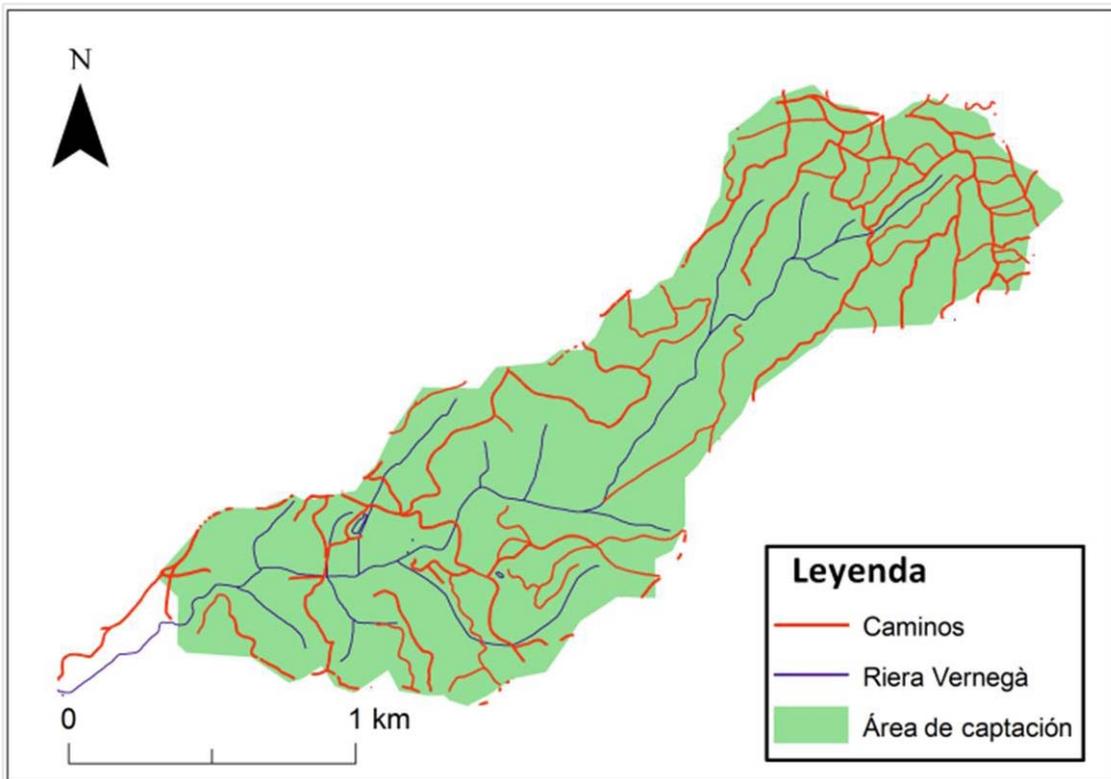


Figura 20. Caminos forestales que atraviesan el área de estudio.



# Capítulo III: Metodología



## 1. Trabajo de campo.

La instrumentalización de la cuenca de Vernegà cuenta con: dos estaciones de aforo (Bosc y Campàs), una estación meteorológica completa instalada el año 1993, tres pozos en los cuales se mide la profundidad del agua de los acuíferos y tres totalizadores de precipitación; uno ubicado en la parte baja de la cuenca cerca de la estación de Campàs y que lleva como nombre “Campos”, y dos más en la parte alta de la cuenca llamados “Cantallops”, y “Capçalera”, adicionalmente se instaló un totalizador cerca de Campàs pero debajo de las copas de los árboles con el objetivo de evaluar la diferencia de la precipitación con respecto al totalizador “Campos” y con nombre “Interceptación” (Figura 1).

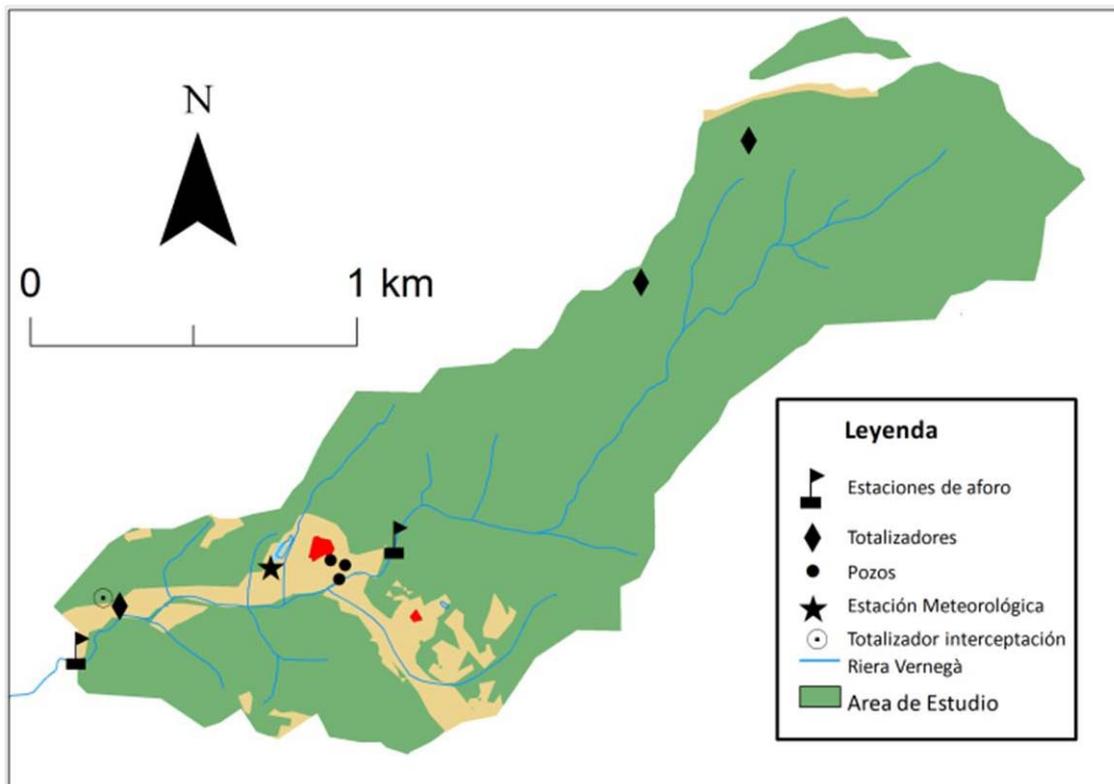


Figura 21. Infraestructura distribuida en toda el área de estudio.

### 1.1. Estaciones de Aforo.

La sección de medición de Bosc es una fina cresta compuesta por un triángulo con un ángulo de 45° y una sección rectangular que se abre en la parte superior del vertedero. Para la sección en “v” se ha estimado una capacidad total de 0,255 m<sup>3</sup>/s (Figura 2). La estación se ha calibrado mediante los cálculos de sección V-notch medidos in situ

mediante molinete hidráulico (Tipo OTT).

La estación de Campàs se construyó el año 1994 con el propósito de obtener una sección de medida fija, invariable y fiable en un punto de la riera, donde se instalan aparatos que miden las variables que permiten obtener el caudal del río. Está equipada con un canal en el lecho del río compuesto por un triángulo en “v” y un rectángulo en la parte superior del vertedero (Figura 2). Para calcular el flujo se ha usado la fórmula de V-notch para crestas triangulares. Los valores teóricos obtenidos encajan bien con los valores medios medidos in situ mediante molinete (tipo OTT).

Adicionalmente se ha construido para cada estación de aforo su caseta de control a una altura de 0,7 m en Bosc y de 2,0 para Campàs, donde se almacena el material de medición del caudal y los muestreadores automáticos de sedimento.

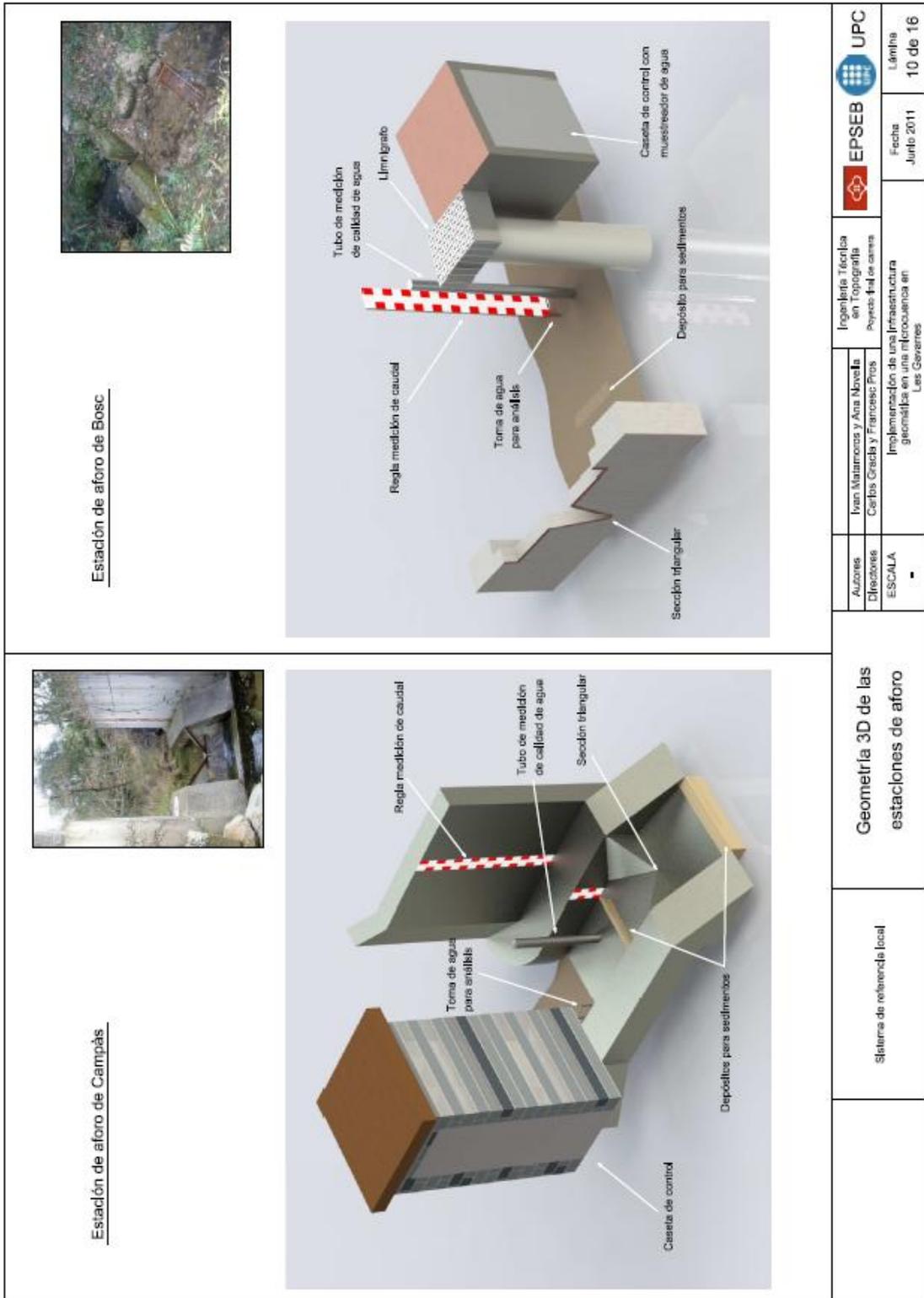


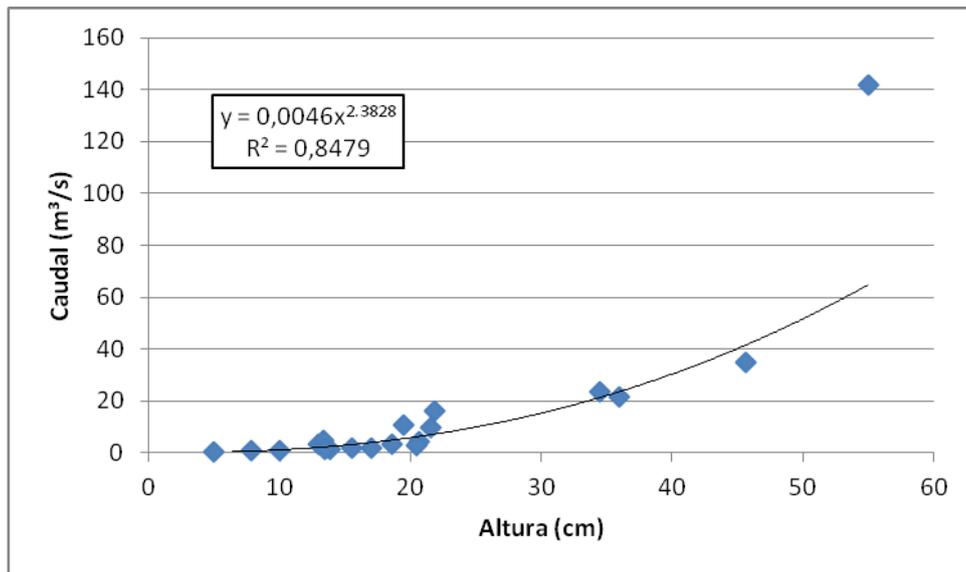
Figura 22. Secciones de medición de las dos estaciones de aforo.

**1.1.1. Calibración y caudal de las estaciones de aforo.**

La calibración para transformar los valores de altura en caudal para las dos estaciones,

se han realizado de dos formas.

Para determinar el flujo de descarga en la estación de Bosc, fue necesario un monitoreo puntual del caudal usando el molinete hidráulico (tipo OTT) para la fórmula de sección media. En total se registraron 10 valores manuales, a los cuales se ajustó la ecuación exponencial. Dicha curva es la utilizada para todo el periodo de estudio. (Figura 3).



**Figura 23. Curva de calibración de caudal en la estación de aforo Bosc.**

En el caso de la estación de Campàs, la construcción de la estación de aforo se hizo en base a los caudales registrados durante el periodo Octubre de 1992 – Junio 1993. Los caudales registrados estaban entre 0,18 m³/s aplicándose la fórmula para relacionar el calado y el caudal a partir de la ecuación teórica V-notch, que depende del área por la cual atraviesa la columna de agua traduciendo el valor en el caudal que pasa por toda la estación de aforo (recordemos que la estación de Campàs está compuesta por dos secciones: la base inicial en “v” y la parte superior es un rectángulo).

Para el vertedero triangular usamos:

$$Q = \frac{8}{15} C_e \sqrt{2g \tan \frac{1}{2} (\Phi)} h e^{2,5} \eta$$

Donde,  $C_e$  = Coeficiente de gasto efectivo, en este caso  $C_e=0,5782$

$h_e$ = Carga efectiva =  $h+H_h$ ;  $K_h$  varía en función del ángulo del vertedero, en este caso

45° correspondiendo  $kh = 0,00015\text{m}$ .

Para el caso del vertedero rectangular la fórmula es:

$$Q = 0,201 + \{0,031842 - [0,030639 \times (a - 0,4)] + [7,3183 \times (a - 0,4)^2] - [4,4039 \times (a - 0,4)^3] + [2,1684 \times (a - 0,4)^4] - [0,38621 \times (a - 0,4)^5]\} \sqrt{h}$$

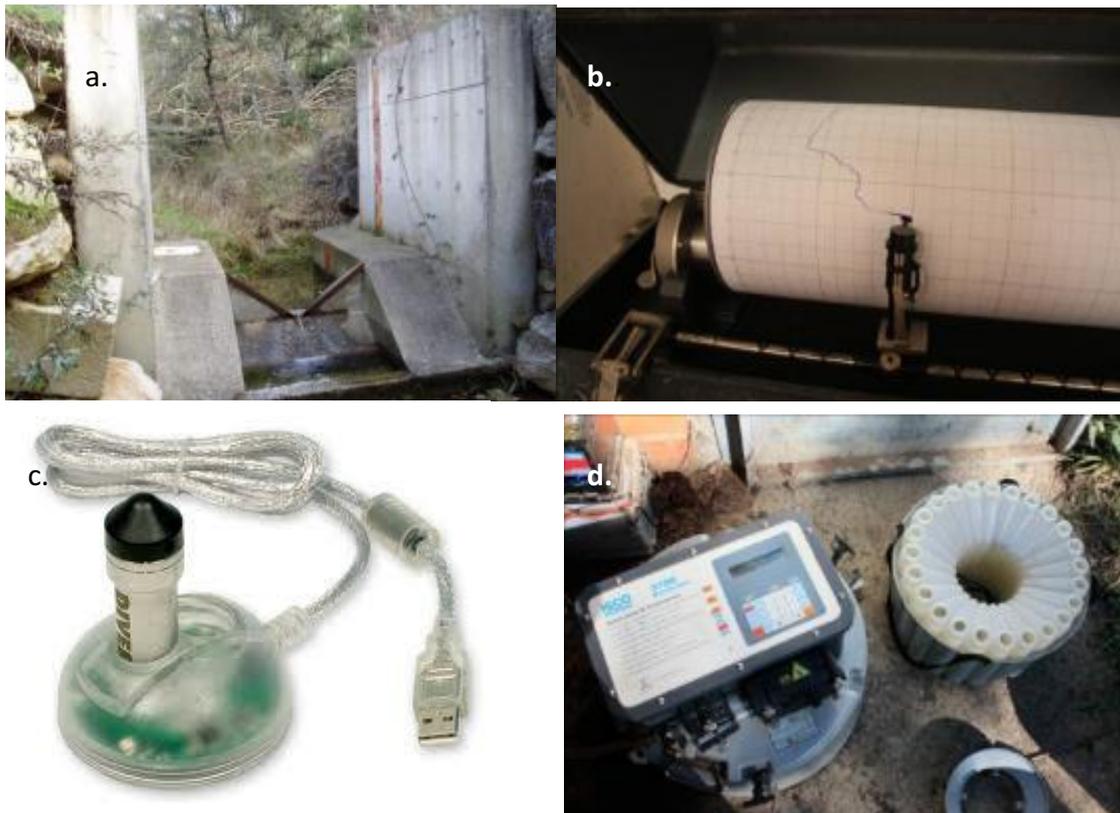
Donde: a = Altura en metros.

## 1.2. Equipo de monitoreo.

El equipo de monitoreo para las dos estaciones de aforo, consta de un limnógrafo (Figura 4) que registra la altura del agua usando un flotador que oscila con la altura del agua quedando registrado en un limnograma el cual se cambia con una periodicidad semanal. En la base, como complemento de medición se han instalado un dispositivo de medición de presión automático (tipo Diver; Figura 4); para ello se mide la presión atmosférica adicionalmente mediante un barómetro (tipo BaroDiver, instalado en la estación Campàs) para extraer el valor de presión de la columna de agua.

Para la recolección de muestras en momentos de crecidas se ha instalado en cada estación de aforo un muestreador automático (ISCO 3700; Figura 4) que recoge hasta 24 muestras automáticamente una vez se le determina el tiempo de inicio y de intervalo entre muestra y muestra. Las boquillas de entrada están ubicadas horizontalmente a una altura de 0,1 m. Cada botella donde se recoge la muestra tiene una capacidad de 1 l para Campàs y de 0,75 l para Bosc.

Después de cada crecida, las botellas se recogen y se llevan al laboratorio para el análisis de la determinación de sedimentos en suspensión y en disolución. Por tanto, para la recolección de muestras puntuales o caudales inferiores a  $0,006 \text{ m}^3/\text{s}$  (que habitualmente corresponde al caudal base de la cuenca en la estación de aforo Campàs), se muestrea con una periodicidad semanal utilizando una botella (1l de capacidad y un diámetro en la boquilla de 5cm), que se coloca en la sección en “v” en las dos estaciones de aforo. Cuando los periodos de caudal base son bajos se recogen las muestras con una periodicidad quincenal.



a) Estación de aforo Campàs (Sección en "V"), b) Limnógrafo, c) Diver, d) Muestreador automático.

**Figura 24. Equipo de monitoreo de la escorrentía y muestreador automático.**

Uno de los grandes inconvenientes que presenta el sistema es el no tener instalado un arranque remoto, por tanto, los muestreadores se inician manualmente configurando la fecha y hora de inicio. Para ello se evalúa la previsión por parte del Servei Meteorològic de Catalunya y se visita la cuenca con anterioridad al evento para calibrar los muestreadores.

**1.3. Recolección de datos meteorológicos.**

Desde el mes de marzo de 1993 Se instaló la estación meteorológica que llevó el nombre de Mas Bassets, su información estaba conectada a *dataloggers* y por medio de un ordenador portátil se descargaba la información en ficheros. Hacia el año 1998 la estación meteorológica pasó, mediante un convenio de colaboración, a manos de la Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques que gestiona el Servei Meteorològic de Catalunya (SMC), integrada a la Xarxa d'Equipaments Meteorològics de la Generalitat de Catalunya (Xemec), creada por la Ley 15/2001, y la estación desde entonces lleva el nombre de Cassà de la Selva (municipio donde se halla la cuenca); actualmente la información es consultable vía web desde la entidad.

La estación está ubicada aproximadamente en el centro de toda el área de captación de la cuenca (ETRS89 UTM Huso 31N: 494031X, 4636048Y) a una altura de 177 m; la estación meteorológica mide los siguientes parámetros: precipitación (mm), temperatura (°C), humedad relativa (%), radiación solar (W/m<sup>2</sup>), velocidad del viento a 2 m (m/s) y dirección del viento a 2 m (grados) (Figura 5). El pluviógrafo instalado es de tipo balancín. Cada vuelco de una cuchara de balancín representa 0,1 mm y está dotado de una unidad automática de almacenamiento de la información que permiten registrar la intensidad de la precipitación en periodos horarios.

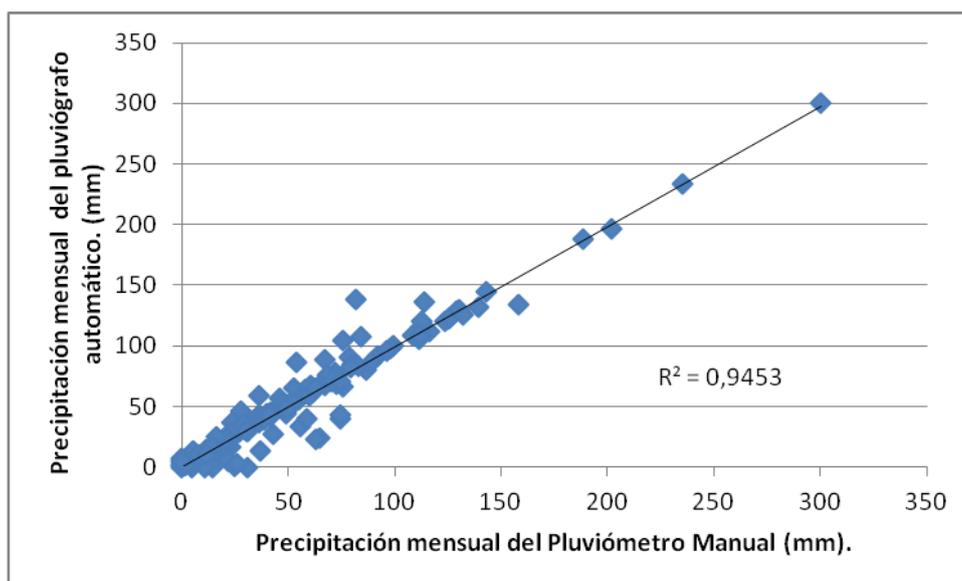


**Figura 25. Equipo de la estación meteorológica.**

Desde el año 1983 hasta el año 2006 había instalado un pluviómetro totalizador tipo Hellman, ubicado cerca de la masía Mas Bassets que registraba los datos de precipitación una vez finalizaba el evento, anotando los días de lluvia y la cantidad total en mm de la precipitación.

Conjuntamente con los datos de la estación meteorológica (1993-2012) se ha realizado una correlación mensual con los datos del totalizador de los años coincidentes con el fin de establecer una serie de 31 años de datos continuos de precipitación (1983-2012).

La Figura 6 presenta la correlación de  $R^2=0,94$  entre la precipitación mensual del totalizador manual y del pluviógrafo de la estación meteorológica. Por lo tanto, para una caracterización e interpretación general de las condiciones pluviométricas de la zona de estudio desde el año 1983/84 hasta el año 2012 se han trabajado los datos del pluviómetro totalizador para los años 1983 a 1993 y de la estación meteorológica para los años 1993 hasta 2012.



**Figura 26. Correlación de los datos pluviométricos de la estación manual y la estación meteorológica (1993-2006).**

Adicionalmente, desde el año 2005, se instalaron a lo largo de la cuenca tres pluviómetros totalizadores. Dos son tipo Hellman, uno de ellos está instalado en la vertiente noroeste muy próxima a la cabecera de la montaña a una altura de 309 m y de nombre “Capçalera” (ETRS89 UTM Huso 31N: 495408X, 4637159Y) y el segundo está ubicado próximo a la estación de aforo Campàs en medio de los campos de cultivos a una altura de 160 m y de nombre Campàs (ETRS89 UTM Huso 31N: 493547X, 4635920Y). El pluviógrafo acondicionado como totalizador está a una altura de 277 y cuyo nombre es “Cantallops” (ETRS89 UTM Huso 31N: 495063X, 4636726Y), se encuentra en la zona alta en la vertiente noroeste.

El totalizador “Interceptació” se instaló con el objetivo de diferenciar la precipitación en zonas abiertas como los campos agrícolas y las zonas boscosas, para así valorar el papel que desempeña la interceptación de los árboles en el área de captación de la estación de aforo Campàs.

#### **1.4. Medida de los pozos y de la humedad.**

Adicionalmente se mide semanalmente la profundidad de las aguas subterráneas en tres pozos localizados en la parte central de la cuenca para determinar las dinámicas de los acuíferos a través del periodo de estudio.

La medida se realiza mediante una sonda piezómetro, unida a una cinta métrica de 50 m (Figura 7). Esta sonda incorpora un dispositivo acústico para indicar el momento en

el cual la sonda entra en contacto con el agua.

Dichas profundidades a pesar de que no concuerden en exactamente con el nivel de los acuíferos, dada la presión que ejerce el suelo sobre el agua que hace que el agua que se encuentra en los pozos esté por encima del nivel real de los acuíferos, es un referente de las dinámicas del nivel con respecto a los episodios de lluvia y su comportamiento en las estaciones del año. Dichas variaciones permiten una mejor interpretación de su relación con la escorrentía superficial.



**Figura 27. Medida de los pozos**

Adicionalmente para entender el papel del suelo y las dinámicas sub superficiales de la cuenca, se realizan 5 mediciones de la humedad del suelo desde el año 2008. Estas mediciones se realizan en los mismos lugares donde se encuentran los totalizadores y la estación meteorológica y llevan el mismo nombre (Figura 5).

## 2. Análisis de datos y trabajo de laboratorio.

Toda la información cartográfica de la zona de estudio, incluyendo la descripción de las áreas de captación han sido calculadas usando los datos disponibles del “Institut Cartografic de Catalunya” en ArcGIS 9.3 (ver área de estudio). Para una mejor interpretación administrativa y científica de los datos, todos los resultados se analizan de acuerdo al año hidrológico (de octubre a septiembre), siendo el otoño de octubre a diciembre, el invierno de enero a marzo, la primavera de abril a junio y el verano de julio a septiembre.

Una vez calibradas las estaciones de aforo, los pasos que se realizan para obtener los registros necesarios para el estudio de cuencas son los siguientes: a) se mide la altura del nivel de agua para las dos estaciones, b) la altura (m) se transforma en caudal ( $m^3/s$ ) usando la curva de calibración para la estación de Bosc y la calibración teórica de Campàs, c) Se transforma en unidad volumétrica ( $m^3$ ) y, d) se relaciona con el área de la cuenca resultando la escorrentía superficial en mm, valor que se obtiene en

función del área (km<sup>2</sup>) por donde drena el agua del área de captación. El valor de coeficiente de escorrentía (%) es la relación entre la escorrentía y la precipitación sobre un periodo de tiempo dado (Chow, 1994).

Los resultados generales son horarios, debido al tipo de instrumentalización y resolución temporal de la estación meteorológica y de las estaciones de aforo. Posteriormente se agrupan de acuerdo a las necesidades, ya sean diarias, mensuales, estacionales o anuales.

### **2.1. Agrupación de los datos en los dos periodos de estudio.**

Como se ha mencionado en el apartado de introducción, el estudio se ha dividido en dos periodos: 1993-2005 y 2005-2012. Esta división se corresponde a la ejecución de los Planes técnicos de Gestión Forestal y sus repercusiones hidrológicas y sedimentológicas a partir de la gran precipitación ocurrida en octubre de 2005.

Para el primer periodo (1993-2005) en la estación de aforo de Bosc los años útiles han sido: 1994-95; 1997-98; 1998-99; 2002-03. Y para la estación de aforo de Campàs son: 1993-94; 1994-95; 1995-96; 1996-97; 1998-99; 1999-00; 2002-03. Existe una gran diferencia de la escorrentía en el año 1994/5 entre Bosc y Campàs, hay que tener en cuenta que durante los tres primeros meses la estación de aforo no funcionó correctamente.

Para el segundo periodo (2005-2012) todos los años se han registrado en su totalidad y sin interrupciones. También, es en este periodo donde se han podido tratar mejor los datos en función del transporte de sedimentos tanto en suspensión como en disolución, además de que en este periodo se incorporaron factores adicionales de medición como el nivel de los pozos y de la humedad que ayudan a la interpretación de la dinámica hidrológica de la cuenca.

### **2.2. Análisis de las crecidas.**

En estos 20 años de investigación de la cuenca, se ha intentado reconstruir la mayor cantidad de crecidas posibles con tal de tener información suficiente de la respuesta hidrológica de la cuenca y así evaluar el papel de los usos del suelo y las actividades forestales, además de la alta variabilidad climática, propia del mediterráneo.

Para la representación gráfica de las crecidas se utiliza el hidrograma para la observación de la relación precipitación-escorrentía, que permite la interpretación del comportamiento hidrológico de la cuenca en aspectos como: tiempo de respuesta de

la crecida en función de la intensidad máxima, tiempo de respuesta entre las dos estaciones y escorrentía directa. Analizando los siguientes aspectos principales:

- Precipitación total (mm).
- Intensidad máxima de precipitación en 5min (mm/h).
- Escorrentía directa (mm).
- Coeficiente de escorrentía, calculado como la relación entre la escorrentía directa y la precipitación (%).
- Caudal máximo ( $m^3/s$ ).
- Tiempo de la precipitación y la escorrentía superficial (horas).
- Tiempo de respuesta entre la intensidad máxima de precipitación y el caudal máximo (horas).

Para el año 2003, se cuenta con tres crecidas bien registradas para ambas estaciones, y a partir de aquí se tendrá una mejor interpretación de la dinámica de escorrentía y respuesta de la cuenca en función de las dos estaciones.

La precipitación que no se retiene en la superficie y tampoco se infiltra en el suelo después de fluir a través de la cuenca se conoce como escorrentía directa (mm). Esta escorrentía es la que se diferencia en las crecidas de las cuencas para evaluar su magnitud y respuesta respecto al caudal base o las condiciones que anteceden al evento (Chow, 1994).

Para diferenciar la escorrentía de base de la escorrentía directa, se ha dibujado el logaritmo del caudal contra el tiempo en escala lineal, de tal manera que presente el punto de inicio de la escorrentía directa, hasta el punto donde disminuye el flujo de agua y la escorrentía pasa a ser nuevamente de base, derivada de lo retenido en superficie e infiltrado en el suelo.

Existen muchas metodologías para determinar los tiempos de respuesta entre la precipitación y su transformación a escorrentía, por ejemplo, el método de cálculo del centro de masas de la precipitación y la escorrentía, este hecho hace que el tiempo de inicio se desplace unas horas y el de final se ubique más cerca del caudal máximo (Shaw, 1984). Para este estudio, y para facilitar el conteo y registro de los datos dada su cantidad, se ha tomado desde el momento en que se inicia la precipitación hasta el inicio de la escorrentía directa. Además se diferencia el tiempo desde el momento en que ocurre la precipitación máxima y el caudal máximo de la crecida.

### **2.3. Trabajo de laboratorio.**

Para diferenciar los sedimentos en disolución y suspensión se filtraron las muestras

utilizando un filtro de celulosa con un diámetro de 0,45  $\mu\text{m}$ , pasando 100ml de muestra por el filtro al vacío (Figura 8). Posteriormente fueron secados y pesados (g). En dicho resultado no se diferencia el diámetro de las partículas ni se realizó la incineración del material vegetal. Por tanto corresponde al general del transporte de sedimentos en suspensión. A partir del resultado de laboratorio se extrapoló el resultado con el caudal obtenido (g/s) y se generalizó para los registros semanales de la escorrentía y la diferencia de sedimento en suspensión que transcurrió en el periodo de estudio.



**Figura 28. Filtraje de muestras para el cálculo de sedimento en suspensión y separación de muestra para posterior análisis químico.**

Los análisis químicos así como el total de disueltos de las muestras se han realizado en el Laboratorio de Geografía Física de la Universidad de Barcelona y en los Servicios Científico-Técnicos de la misma Universidad. Los parámetros químicos analizados para las muestras de precipitación, escorrentía y agua subterránea de los pozos han sido los siguientes:

- 1.- pH y conductividad eléctrica mediante pHímetro y conductímetro.
- 2.- Bicarbonatos, cloruros, nitratos, nitritos y fosfatos mediante métodos colorimétricos.
- 3.- Calcio, sodio, magnesio, potasio, sulfatos, hierro, aluminio, manganeso, zinc y silicio, mediante Plasma de Inducción (ICP).

La unidad de medida para los resultados de concentración de los parámetros químicos es el mg/l o ppm (parte por millón).



# Capítulo IV: Precipitación y Respuesta hidrológica



## 1. Análisis anual.

### 1.1. Análisis de la precipitación anual.

La precipitación media anual de todos los años de estudio comprendidos durante los años hidrológicos 1983 al 2012 es de 688 mm, con una desviación estándar de 180,4 mm y un coeficiente de variación de 26%. La mayoría de las precipitaciones se encuentran entre un rango de 500 y 800mm. Las precipitaciones que superan los 1000 mm son las de los años 1987/88 y 2003/04 con 1010 mm y 1038 mm respectivamente (Figura 1). En el caso de las precipitaciones mínimas el año 1993/94 es el registro más relevante de todo el periodo de estudio, ya que sólo se generaron 292 mm de precipitación, caso que fue extremo en todo el ámbito mediterráneo catalán (Espelta, 2006). Otros años por debajo de la media son 1984/85 y 1986/87 con 411,0 mm y 433,0 mm respectivamente. Cabe destacar que a partir del año 2000/01 las precipitaciones anuales se acercan más a la media e incluso se encuentran las mayores precipitaciones acumuladas (caso 2003/04).

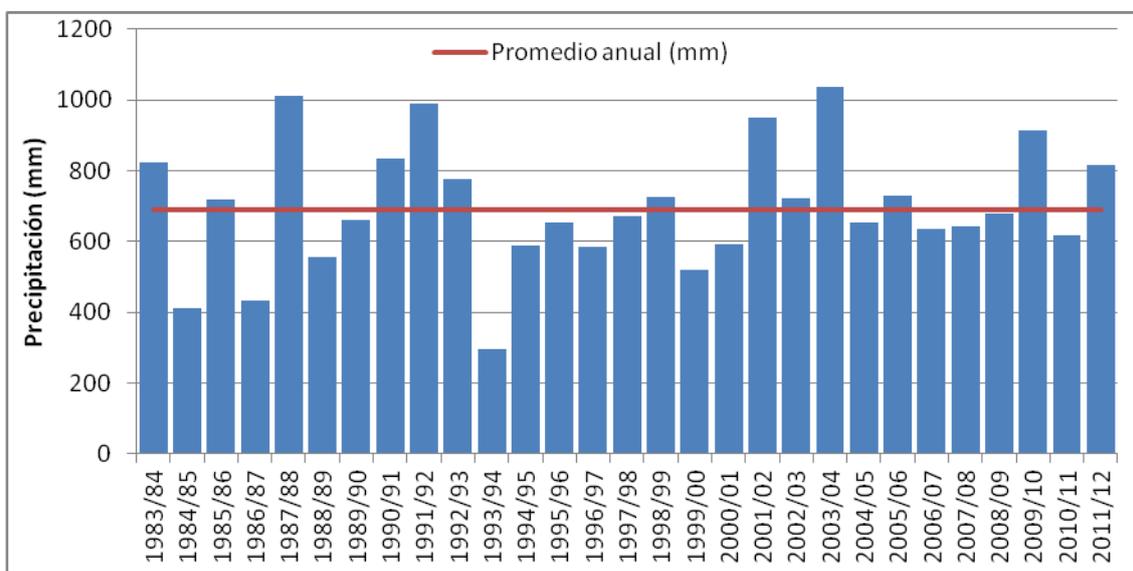


Figura 129. Precipitación media anual en la Cuenca de Vernegà. (1983-2012).

## 1.2. Análisis de la escorrentía anual.

La escorrentía media anual en Bosc para el periodo 1993-2005 es de 6,8 mm, y para Campàs de 66,84 mm y para el segundo periodo 2005-2012 en Bosc es de 33,1 mm y para Campàs de 92 mm (Tabla 1). El coeficiente de escorrentía medio para los dos periodos no es muy elevado, siendo el mayor valor en la estación Campàs durante el segundo periodo con 13%.

**Tabla 1. Promedio de escorrentía superficial y coeficiente de escorrentía anual en los dos periodos de estudio.**

Periodos	Precipitación (mm)	Escorrentía (mm)		Coeficiente de escorrentía (%)	
		Bosc	Campàs	Bosc	Campàs
1993-2005	594,8	6,8	33,1	1,1	5,6
2005-2012	719,3	66,8	92,0	9,3	12,8

Si evaluamos el total de la escorrentía en los dos periodos es mayor en Campàs con respecto a Bosc, siendo superior en un 82% para el primero y del 57% para el segundo periodo. Además el aumento de la escorrentía media en las estaciones de aforo es importante, siendo para Bosc del 982% y Campàs del 278%, lo mismo sucede, como puede verse en la tabla 1 con el coeficiente de escorrentía.

### 1.2.1. Análisis de la escorrentía anual en el periodo 1993-2005.

En la estación de aforo de Campàs, de los 8 años registrados, la escorrentía total superficial máxima registrada fue de 164,2 mm en el año hidrológico 1995/96 (Figura 2); que no corresponde a la precipitación anual máxima registrada en el periodo que fue en el año 1998/99 con 726 mm. Para Bosc la escorrentía mayor tuvo lugar en el año hidrológico 2002/03 con 15,2 mm. Existe una gran diferencia de la escorrentía en el año 1994/5 entre Bosc y Campàs, debido a que durante los tres primeros meses la estación de aforo de Bosc no funcionó correctamente. En Campàs se acumularon para ese año 146,8 mm de escorrentía y 4,2 mm en Bosc.

### 1.2.2. Análisis de la escorrentía anual en el periodo 2005-2012.

Aunque la precipitación anual máxima alcanzada tuvo lugar en el año 2009/10 con 915,5 mm (Figura 2), el año hidrológico que más escorrentía acumuló fue 2005/06 con 88,8 mm para Bosc y 261,5 mm para Campàs, único año de estudio que supera los 200 mm de escorrentía anual. El año 2007/08 fue el que generó la menor escorrentía con

0,2 mm para Bosc y 3,5 mm para Campàs, a pesar de que no fue el año con la precipitación más baja. Otro aspecto a destacar es que a pesar de la diferencia de precipitación entre los años 2010/11 (618 mm) y 2011/12 (815 mm), la escorrentía en Campàs es semejante con 103 y 110 mm respectivamente.

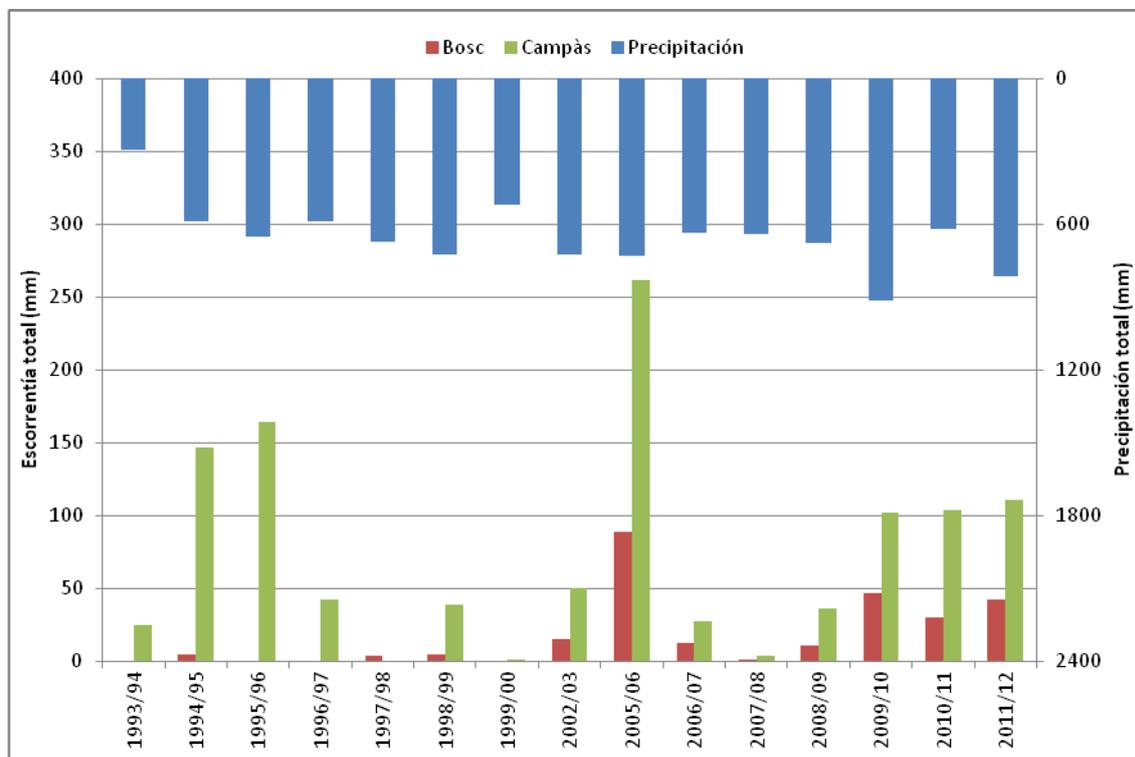


Figura 2. Distribución de la precipitación y la escorrentía total desde el año hidrológico 1993/94 hasta 2011/12 es las estaciones de aforo de Bosc y Campàs.

## 2. Análisis estacional.

En general la escorrentía ocurre de otoño a primavera, sin embargo existen algunos años en que la escorrentía no se produce hasta invierno, además, la respuesta hidrológica del verano es, desde una perspectiva de los 20 años hidrológicos, casi nula. Esta situación le otorga al otoño un papel importante a la dinámica hidrológica, ya que, si se dan años con una gran cantidad de precipitación, que puede ser en corto periodo de tiempo (menos de 1 semana) o se dan en varias precipitaciones a lo largo del otoño, la escorrentía superficial se mantiene durante el invierno, donde las precipitaciones y la temperatura en promedio disminuyen y posteriormente, con el aumento de las precipitaciones de primavera la escorrentía continúa hasta la llegada del verano.

### 2.1. Análisis estacional de la precipitación.

El estudio de la distribución estacional de las precipitaciones muestra que la mayoría ocurre durante el otoño con un 34%, siendo similares las precipitaciones en el invierno y primavera, 25% y 24% respectivamente (Figura 3), no obstante son estas estaciones las que tienen un mayor coeficiente de variación (47% y 46%). Para invierno, el año 1995/96 registró un 40% de la precipitación, siendo el valor máximo y el registro mínimo fue de 8% en el 1989/90. Para primavera el año con mayor precipitación fue 2001/02 con más del 50% y en el año 2005/06 sólo se registró el 0,2%.

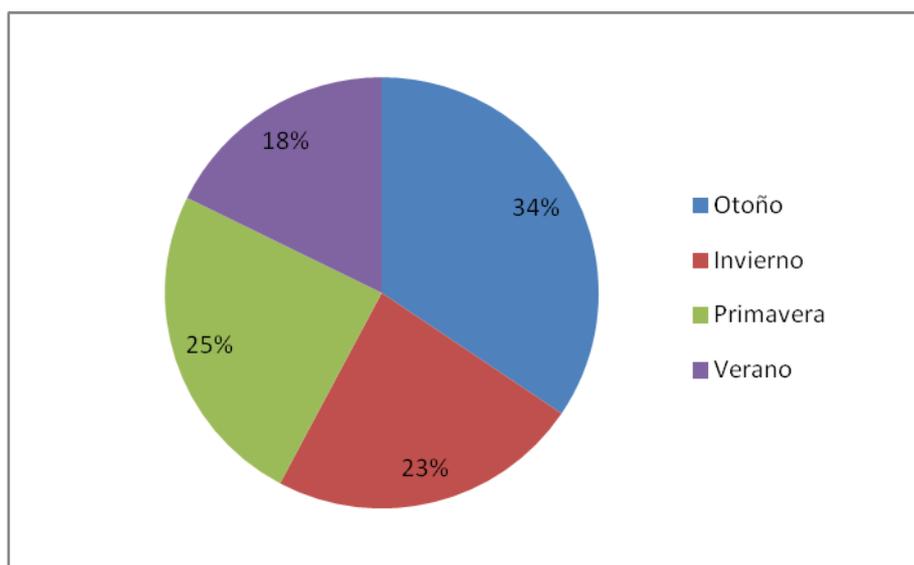


Figura 3. Distribución estacional de la precipitación en la cuenca de Vernegà (1983-2012).

### 2.2. Análisis estacional de la escorrentía en el periodo 1993-2005.

El invierno es la estación del año donde se produce la mayor escorrentía superficial al igual que el coeficiente de escorrentía (Tabla 2), también es la estación del año donde la diferencia entre las dos estaciones es mayor. Comparando las dos estaciones de aforo, el porcentaje de escorrentía media de Bosc en otoño y primavera es igual (a pesar de que el coeficiente de escorrentía en otoño es cercano a cero), y en Campàs varía en cada estación, siendo mayor en otoño. Uno de los aspectos que se puede destacar es la capacidad de respuesta de la cuenca en otoño, ya que es la estación del año donde se generan las mayores precipitaciones.

**Tabla 2. Promedio de: precipitación, escorrentía y coeficiente de escorrentía en las tres estaciones del año durante el periodo 1993-2005.**

	Precipitación (mm)	Escorrentía Bosc (mm)	Escorrentía Campàs (mm)	Coeficiente de Escorrentía Bosc (%)	Coeficiente de Escorrentía Campàs (%)
<b>Otoño</b>	68,8	0,3	7,9	0,4	11,5
<b>Invierno</b>	43,4	1,7	10,2	4,0	23,5
<b>Primavera</b>	61,8	0,3	1,3	0,5	2,1
<b>Verano</b>	41,7	0	0	0	0

### 2.3. Análisis de la escorrentía en el periodo 2005-2012.

En el segundo periodo observamos un patrón diferente, ya que en promedio es el otoño donde la precipitación con 79,9 mm y las escorrentías de Bosc con 4,8 mm y 16,2 mm en Campàs son superiores al invierno (Tabla 3), como sucedió en el periodo anterior. En invierno la diferencia de la escorrentía entre Bosc y Campàs no es tan marcada, y la diferencia de la escorrentía entre Bosc y Campàs es menor respecto al periodo anterior.

**Tabla 3. Precipitación, escorrentía y coeficiente de escorrentía media en las tres estaciones del año durante el periodo 2005-2012.**

	Precipitación (mm)	Escorrentía Bosc (mm)	Escorrentía Campàs (mm)	Coeficiente de Escorrentía Bosc (%)	Coeficiente de Escorrentía Campàs (%)
<b>Otoño</b>	79,9	4,8	16,2	6,0	20,3
<b>Invierno</b>	65,1	4,3	10,2	6,5	15,7
<b>Primavera</b>	54,6	1,9	4,2	3,6	7,7
<b>Verano</b>	40,2	0	0	0	0

En total para todo el periodo de estudio 2005-2012, tenemos que la escorrentía superficial en la estación de aforo de Bosc fue de 231,5 mm y de 644,1 mm en Campàs. Este valor es muy importante, ya que es en este periodo donde podemos contabilizar en su totalidad y sin interrupciones lo que sucedió en ambas estaciones, encontrándose que la escorrentía de Bosc es un 70% menos en promedio anual de la escorrentía en Campàs.

## 2.4. Análisis de la correlación estacional entre la escorrentía y la precipitación.

La correlación general (1993-2012) entre la precipitación y la escorrentía superficial en función de la estacionalidad anual a nivel general no es muy alta (Tabla 4). Con todo, la mejor correlación ocurre en otoño, con  $R^2= 0,6$  para Bosc y Campàs, seguido por el invierno ( $R^2= 0,4$ ) y la primavera (alrededor de  $R^2= 0,3$ ).

En Bosc la correlación de otoño es mejor en el primer periodo ( $R^2= 0,7$ ) en comparación con el segundo; la correlación del invierno y la primavera para el primer periodo es casi nula, demostrando una baja respuesta de la escorrentía superficial durante esta estación del año, en el segundo periodo la correlación mejora en estas dos estaciones.

Para Campàs las correlaciones de otoño y primavera en los dos periodos son similares, siendo ligeramente mayor la segunda respecto a la primera. La correlación de primavera en el segundo periodo aumenta de manera importante con respecto al periodo anterior, pasando de ser casi nula a tener un  $R^2= 0,55$ .

**Tabla 4. Correlación entre la precipitación y la escorrentía total.**

R <sup>2</sup>	Bosc			Campàs		
	1993-2012	1993-2005	2005-2012	1993-2012	1993-2005	2005-2012
<b>Otoño</b>	0,60	0,71	0,66	0,60	0,55	0,61
<b>Invierno</b>	0,40	0,06	0,32	0,40	0,41	0,45
<b>Primavera</b>	0,30	0,00	0,39	0,34	0,00	0,55

Es importante resaltar una alta variabilidad de los registros año tras año, encontrándose un gran número de precipitaciones con respuesta cero en la escorrentía, especialmente en invierno y primavera donde es más acusada.

## 3. Análisis mensual.

### 3.1. Análisis mensual de la precipitación.

La Figura 4 presenta el diagrama ombrotérmico con la distribución de la precipitación y temperatura mensual siguiendo un régimen típicamente mediterráneo. Con una disminución marcada de la precipitación entre los meses de junio a agosto, siendo julio con el menor registro de 21 mm; y con un aumento de la temperatura durante los

mismos meses, coincidiendo los meses de julio y agosto con 22,5°C. Las precipitaciones más importantes ocurren en promedio en los meses de octubre y noviembre con 105 mm y 76 mm respectivamente. En el resto de meses la precipitación se mantiene regular. Las temperaturas son bastante suaves siendo el valor mensual mínimo enero con 6,5°C. Además no existe ningún mes que en promedio las temperaturas sean negativas, a pesar de que hay días puntuales bajo cero en la cuenca.

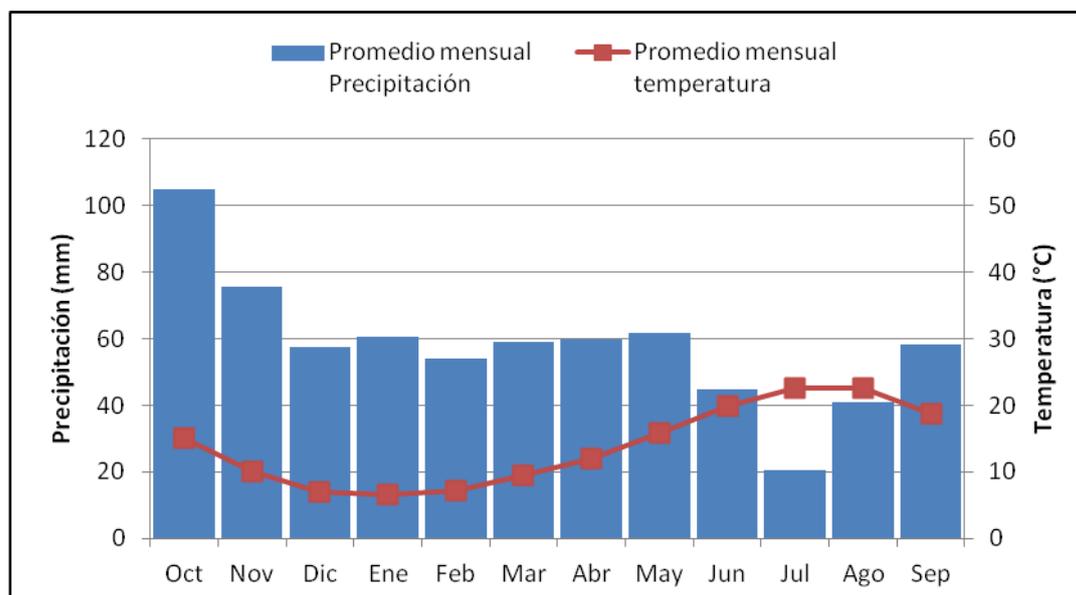


Figura 4. Diagrama ombrotérmico.

### 3.1.1. Análisis de la frecuencia de precipitación mensual.

Las precipitaciones oscilan entre los 0 y 348 mm mensuales, los valores cero corresponden a un 8%, y un 47% de las precipitaciones son inferiores a 50 mm. Los registros que están en el rango de 200 y 250 mm corresponden al 2% y es en este rango donde se encuentra la precipitación de octubre de 2005/06 con 250 mm y que ocasionó la crecida más importante registrada en todo el estudio, y es en octubre donde se acumulan las mayores precipitaciones mensuales; es el caso de octubre de 1987/88 que presenta las mayores precipitaciones de todos los meses estudiados con un total de 347,5 mm. Este caso, al igual que noviembre 2011/12 con una precipitación de 309,8 mm, solo ocurren en el 0,8% de los casos y contar con estos registros es muy importante para entender la dinámica de la cuenca.

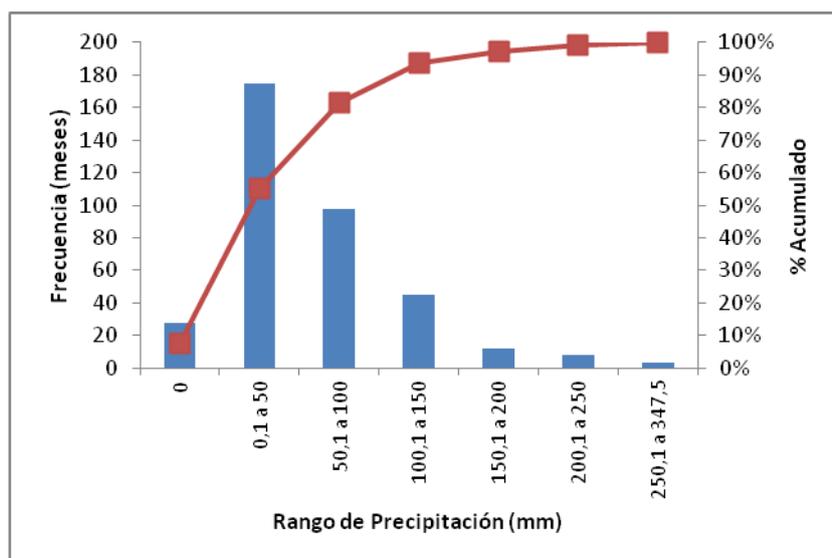


Figura 5. Histograma de precipitación mensual acumulada.

### 3.2. Análisis de la escorrentía mensual.

La escorrentía media de todo el periodo de estudio muestra que los valores altos se producen en los meses de octubre y enero (19,46 mm y 18,36 mm respectivamente) para el caso de la estación de Campàs; y noviembre y febrero para el caso de la estación de Bosc (3,63 y 3,54 mm respectivamente) (Figura 6). Sin embargo la escorrentía de octubre y enero les sigue en magnitud.

En general se observa que los momentos de mayor respuesta hidrológica de la cuenca se genera en octubre, con una disminución continua hasta enero, donde la cuenca responde muy bien a las precipitaciones, a pesar de que en este periodo no se concentran en promedio las de mayor magnitud, y a partir de aquí, van descendiendo hasta el mes de mayo (1,54 mm en Bosc y 4,29 mm en Campàs), donde la cuenca aumenta la respuesta debido al aumento de las precipitaciones de abril y mayo. Los registros “cero” para todo el periodo de estudio se repiten de julio a septiembre.

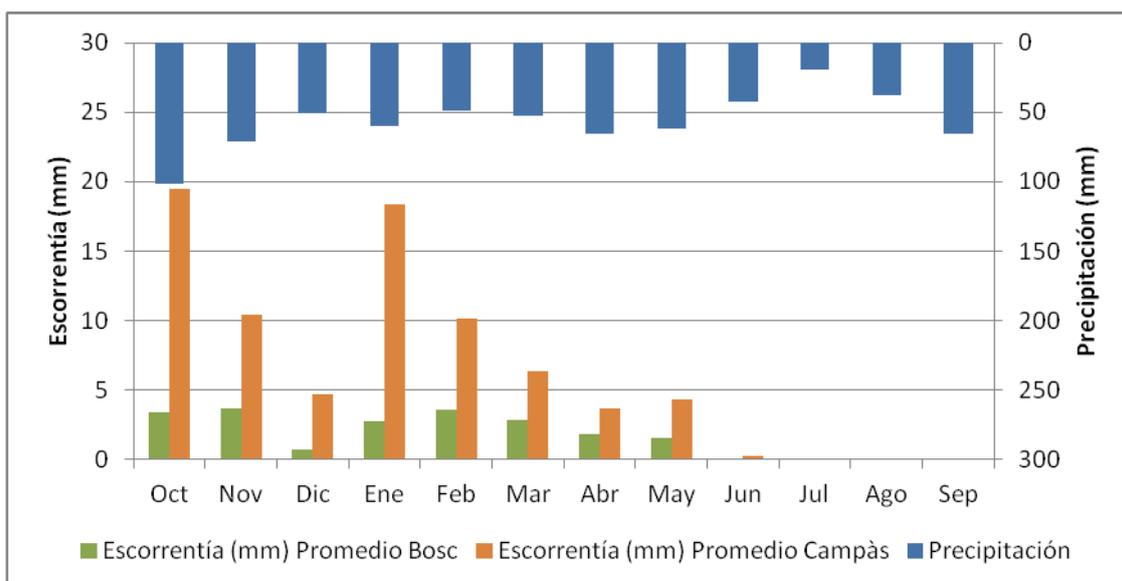


Figura 6. Promedio de precipitación y escorrentía superficial mensual en las dos estaciones.

### 3.2.1. Relación de la escorrentía superficial en las dos estaciones de aforo.

El nivel de correlación de la escorrentía superficial entre Bosc y Campàs es de  $R^2=0,87$  (Figura 7). Se observa que la relación es más alta con valores de escorrentía directa bajos, y son más dispersos en casos extremos, por tanto, se puede decir que en promedio, la escorrentía superficial de Bosc representa el 25% de la escorrentía de Campàs, dada su mayor área de captación.

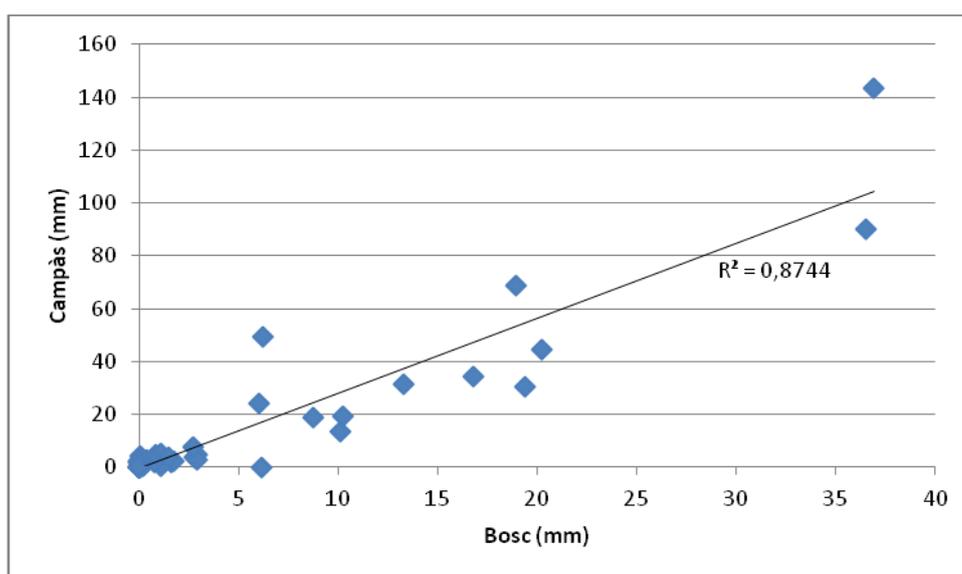


Figura 7. Relación entre la escorrentía total mensual en las dos estaciones durante el periodo 2005-2012.

### 3.2.2. Análisis de la escorrentía mensual en el periodo 1993-2005.

En el primer periodo, la precipitación tiene el mismo patrón que a nivel general, concentrándose las mayores precipitaciones en octubre con 77,8 mm y disminuyendo hasta las precipitaciones concentradas en primavera, siendo abril con 70,4 mm el mayor de la estación. En promedio la escorrentía superficial es mayor en enero para la estación de Campàs con 25,4 mm; y febrero para Bosc con 3 mm. En promedio para este periodo la escorrentía de junio es casi nula y en octubre no se tienen registros, pero podemos deducir por la tendencia de la cuenca que la escorrentía media superficial de Bosc no superó los 10,27 mm que se generaron en Campàs (Figura 8).

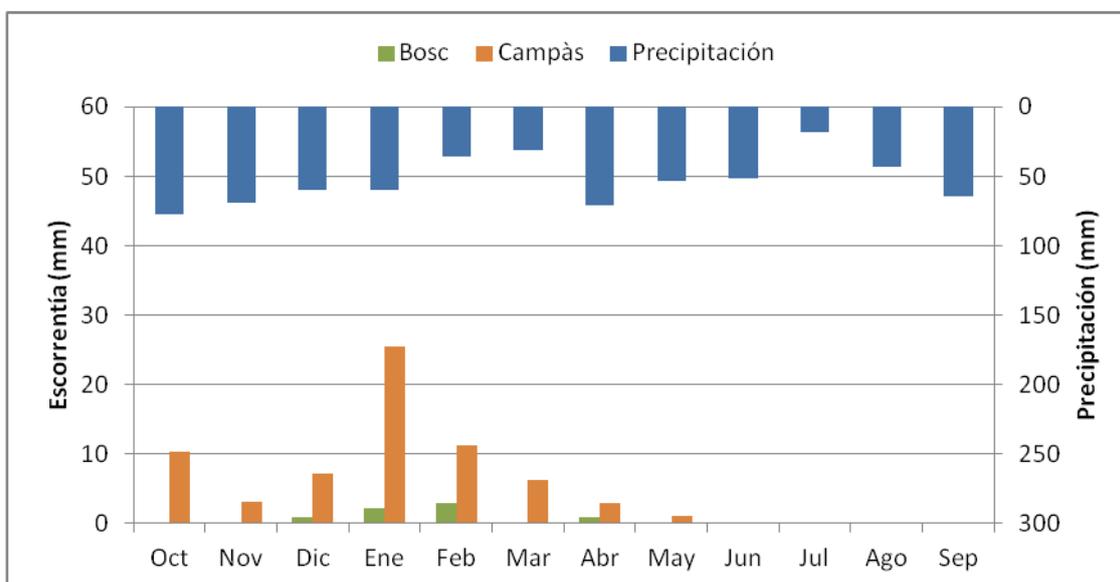


Figura 8. Escorrentía y precipitación media mensual (periodo 1993-2012).

### 3.2.3. Estudio detallado del periodo 1993-2005.

En el año hidrológico 1993/94 en la estación de aforo de Campàs la mayor escorrentía registrada fue en noviembre, mes en que comenzó la escorrentía superficial con 10,5 mm, y su coeficiente de escorrentía registrado fue del 21%, el mes siguiente con una escorrentía de 2,6 mm el coeficiente de escorrentía fue superior con 59%.

Para el año 1994/95 ya se tienen datos de la estación de aforo de Bosc. El mes de octubre, es un año de especial interés de análisis, ya que en dicho año la descarga hídrica comienza con las primeras precipitaciones del mes de octubre (246 mm), siendo un valor considerable junto con lo ocurrido en el año 2005 (250 mm). En el primer caso la escorrentía de Campàs fue de 92,4 mm siendo el valor más alto registrado en el periodo 1993-2005 comparado con los 143,2 mm de la crecida de octubre de 2005, y considerada la mayor del segundo periodo (2005-2012) y de todos

los años analizados en la estación Campàs. Por consiguiente se generaron 51 mm menos en el año 1994/95.

El año 1995/96 la escorrentía duró de diciembre a junio. El mes en el que hubo la mayor precipitación (125 mm), la mayor escorrentía (85 mm), y el coeficiente de escorrentía (68%) fue enero; el mes siguiente, dada las condiciones anteriores de nivel de agua, el coeficiente de escorrentía fue de 56%. Para mayo, debido al alto nivel de escorrentía de base que dejó la crecida del 17 de abril, la escorrentía total del mes fue de 4,3 mm aunque la precipitación total del mayo fuese solo de 4 mm.

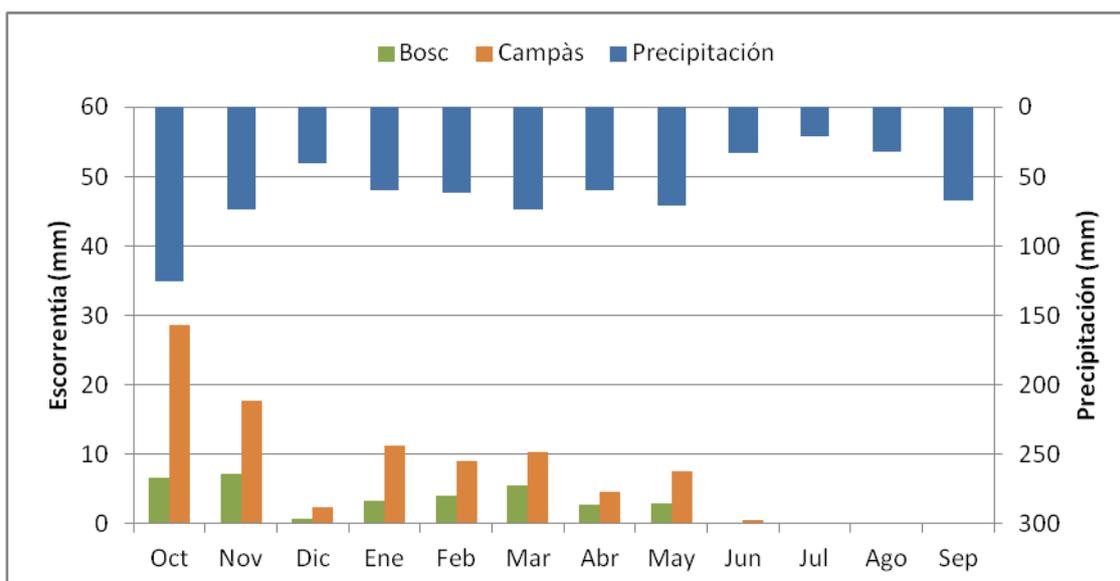
En el siguiente año hidrológico (1996/97), en enero, la escorrentía que se registró en Campàs fue de 32,4 mm derivado de una precipitación de 92 mm, un motivo por el cual el valor es mucho más alto de lo esperado fue que durante los meses anteriores las precipitaciones acumuladas fueron altas.

En 1998/99, la escorrentía en Bosc y Campàs fue de diciembre a marzo, de los cuales en el último mes la escorrentía fue muy poca; la mayor escorrentía se registró en enero siendo para Bosc de 3,7 mm y para Campàs de 29,4 mm. En dicho mes la precipitación fue de 114 mm pero el registro más alto de lluvia fue en diciembre con 143 mm.

El último año registrado en el periodo anterior a las actuaciones de los planes técnicos de gestión forestal es el año 2002/03. En febrero la escorrentía en Bosc fue de 10,26 mm y en Campàs de 25,4 mm, procedentes de una precipitación de 130 mm. En este año hidrológico el coeficiente de escorrentía no superó el 50%.

#### **3.2.4. Análisis de la escorrentía mensual en el periodo 2005-2012.**

Los registros promedio mensual de la escorrentía registrado para el periodo 2005-2012 (Figura 9), muestran que es en octubre donde se genera la escorrentía mayor de Campàs con 28,7 mm, pero no es hasta noviembre que en promedio se genera la mayor escorrentía de Bosc con 7,12 mm, siendo estos dos meses los de mayor escorrentía en el periodo de estudio. Otro aspecto a destacar es que en promedio las precipitaciones de marzo con 73 mm y mayo con 71 mm generan escorrentías diferentes, siendo mayor en el primero respecto al segundo, incluso para Bosc marzo representa la mayor escorrentía del invierno con 5,46 mm. Junio es el mes que tiene los menores registros, seguido por diciembre quien a su vez es el mes con las precipitaciones menores de los meses con escorrentía con 40,5 mm.



**Figura 9. Esorrentia y precipitación media mensual (periodo 1993-2012).**

En el período 2005/06 la esorrentia y coeficiente de esorrentia son totalmente inusuales, y es claramente responsable el evento que tuvo lugar en octubre de 2005, que registró una precipitación de 250 mm en la cuenca en aproximadamente 72 horas. Destacamos que en esta situación, el coeficiente de esorrentia es alto (14% en Bosc y 57% en Campàs), debido a que en este tipo de eventos la intensidad de la lluvia genera rápidamente esorrentia.

El siguiente año hidrológico (2006/07) presenta una tendencia especial, ya que en octubre se inició la esorrentia en toda el área de captación (0,86 en Bosc y 4,7 mm en Campàs) pero no duró todo el otoño. No fue hasta el período de lluvias producidas en invierno, febrero con una precipitación de 102,2 mm, y marzo con 39 mm, que llenaron el acuífero para continuar con flujo permanente que llegó a junio, siendo la cantidad más alta registrada en abril con 10,23 mm en Bosc y 19,36 mm en Campàs, respectivamente.

El año hidrológico 2007/08 fue un año de sequía en Catalunya; incluso durante la primavera el gobierno pensó en la posibilidad de realizar restricciones de agua en Barcelona, debido a la falta de agua en ríos y embalses. En la cuenca del Vernegà no hubo generación de esorrentia hasta abril. En total fueron nueve meses sin agua en la riera de Vernegà. Las precipitaciones del mes de abril (54 mm) y mayo (108,8 mm) generaron esorrentia sólo para tres meses (abril, mayo y junio) y la esorrentia anual fue de sólo 0,2 mm en Bosc y de 3,6 mm en Campàs.

El año 2008-2009 registró pocas lluvias en octubre (49,8 mm) no generando esorrentia superficial en la riera de Vernegà. En diciembre con una precipitación de

137,2 mm se inicia el flujo y se mantiene permanente durante el invierno y la primavera debido a las lluvias que son constantes, pero de baja intensidad.

El año hidrológico 2009/10 es importante por la nevada del 7 y 8 de marzo de 2010. No se tienen registros en todos los años de estudio (1993-2012) de una nevada de tal magnitud. En dicho mes se generó una escorrentía de 19,42 mm en Bosc y de 30,52 mm en Campàs. Sin embargo no fueron los registros más altos del año hidrológico; en mayo la escorrentía de Bosc fue de 20,26 mm y en Campàs de 44,73 mm. Otro aspecto a destacar es la diferencia de coeficiente de escorrentía entre estos dos meses; en marzo el coeficiente de escorrentía (18% en Bosc y 28% en Campàs) fue mayor que en mayo (11% y 26%, respectivamente). Dicho año es muy importante para posteriores análisis de la escorrentía de la cuenca, ya que al acumularse una cantidad enorme de nieve sobre las ramas de los árboles de la zona, muchas se rompieron y cayeron, hecho que en años anteriores no se había presentado con tanta intensidad. (Figura 10).



**Figura 10. Rotura de ramas ocasionada por la nevada de marzo de 2010.**

Durante el 2010/11, se generaron dos crecidas, en octubre y marzo, siendo la última la de mayor intensidad. En octubre la escorrentía fue de 6,2 mm en Bosc y de 49,6 mm en Campàs; en marzo se generó una crecida que duró más de 5 días debido a las precipitaciones no muy intensas, pero si continuas (133 mm), que permitieron una mayor escorrentía siendo en Bosc de 16,8 y en Campàs de 34,56 mm) siendo el coeficiente de escorrentía para Bosc de 13% y Campàs de 26%.

En el año 2011/12, la mayor actividad se inició desde finales de octubre hasta la mitad de noviembre, por tanto, en menos de un mes se generaron las mayores precipitaciones y los registros más altos de escorrentía superficial que permitió que hubiese escorrentía superficial hasta finales del invierno en Bosc y la primavera en la estación Campàs. Noviembre, que es el mes donde se generaron las mayores precipitaciones (309 mm) la escorrentía en Bosc fue de 36,5 mm y en Campàs de 90,2

mm. Al mes siguiente, en diciembre, el coeficiente de escorrentía superó el 100% debido a que mucha de la escorrentía superficial fue generada con las precipitaciones de noviembre.

#### 4. Análisis del caudal.

##### 4.1. Análisis de la frecuencia de caudal en el periodo 2005-2012.

Como sabemos que la mayor parte de la escorrentía superficial sucede en los momentos de crecidas, se ha considerado a nivel de caudal clasificar aquellos valores de caudal base y los mayores registros de crecidas registradas; para ello, se ha generado una media del caudal inicial de una crecida y se ha obtenido que para Bosc sean de 1 l/s y para Campàs de 4 l/s.

Encontramos que en Bosc el 67% del tiempo el caudal es cero, y para Campàs el 54%. Los valores de caudal que están entre cero y valores de 1 l/s en Bosc y 4 l/s en Campàs, que corresponden a los caudales base respectivos, ocurren el 21% en Bosc y el 34% en Campàs. Para el caso de los registros extremos, tenemos que en Bosc los valores que superan 100 l/s representan el 0,2%; y en Campàs valores que superan los 500 l/s son el 0,3% (Figura 11) destacándose los ocurridos durante la crecida de octubre de 2005.

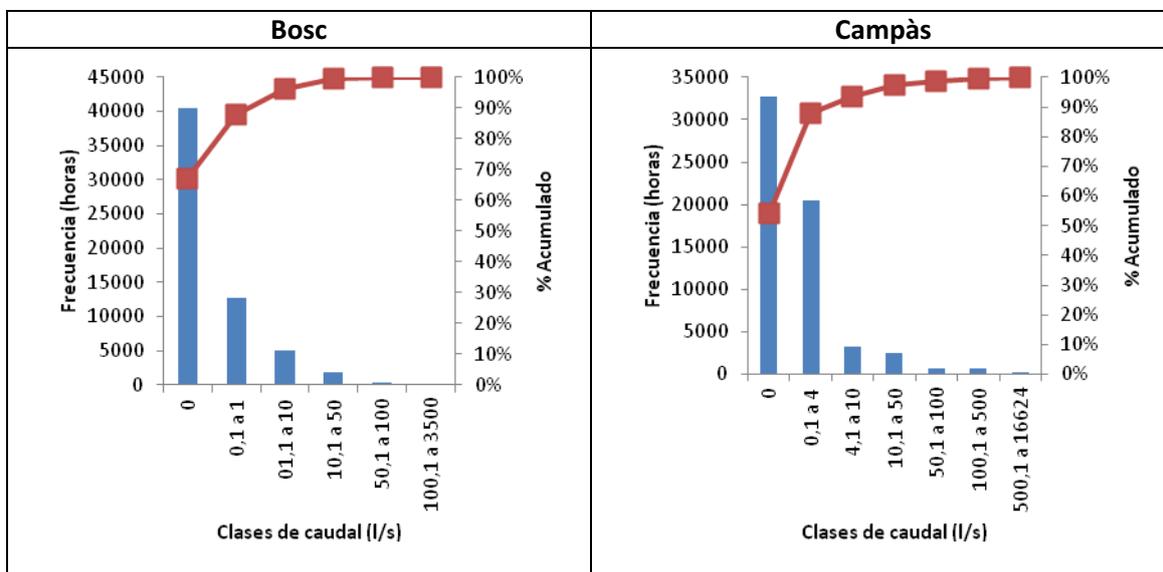


Figura 11. Frecuencia de caudal horario en las dos estaciones (2005-2012).

#### 4.2. Análisis de los periodos de retorno del caudal para la estación de aforo de Campàs en todo el estudio (1993-2012).

Se ha aplicado la fórmula de Weibull (1951) para obtener la probabilidad de que un evento de caudal máximo horario anual se produzca en el periodo 1993-2012. Para ello se han utilizado los valores de Campàs dado que corresponde a toda el área de captación y es la que posee una mayor cantidad de registros (Figura 12). Como resultado tenemos que la probabilidad de que se produzca un caudal máximo de 16 m<sup>3</sup>/s (de la crecida de octubre de 2005) es de 17 años.

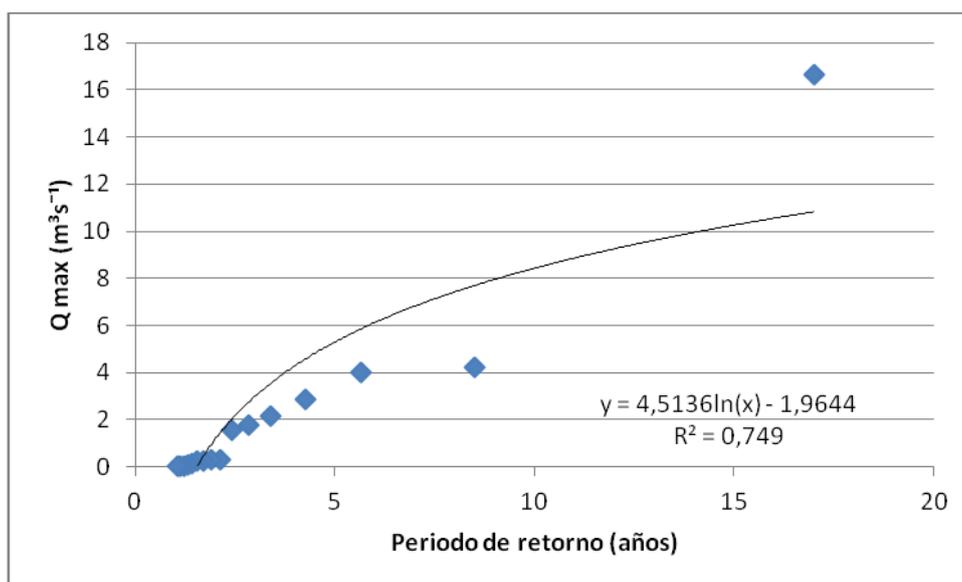


Figura 12. Análisis del periodo de retorno para los caudales máximos horarios durante un año natural en la Riera Vernejà, durante el periodo 1993-2012.

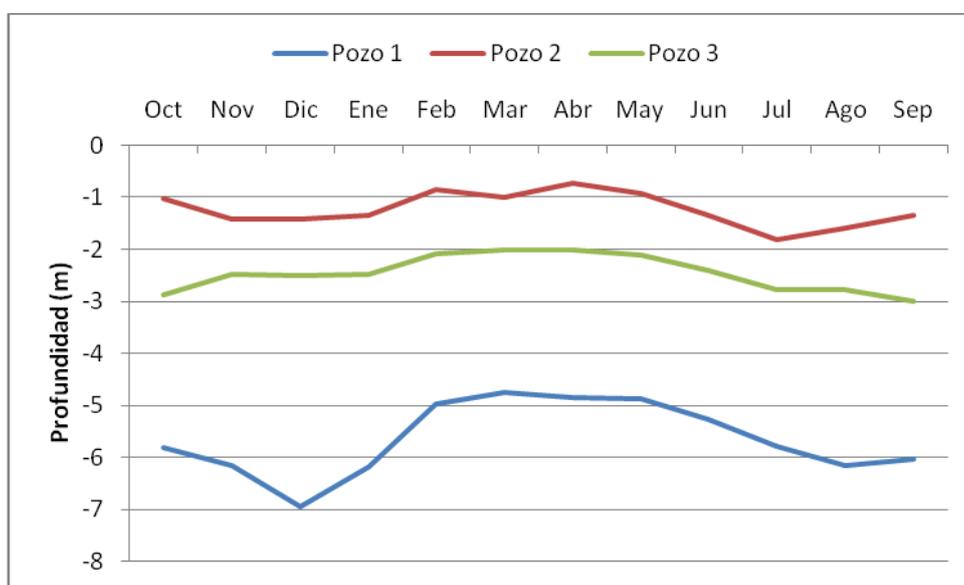
### 5. Análisis del nivel del agua subterránea y humedad de los suelos.

#### 5.1. Dinámica mensual de los tres pozos de medición.

La Figura 13 muestra la variación promedio mensual del nivel de los pozos que nos indican la evolución de la carga de agua en el acuífero. El nivel del agua en el pozo 1 siempre se encuentra a unas profundidades mayores, que la de los otros pozos, debido posiblemente a su ubicación más alta de los tres. El pozo 2 es el que presenta la menor profundidad y el pozo 3, el más bajo por su posición en el terreno presenta niveles superiores al pozo 2. En general, de febrero a mayo en los tres pozos los niveles medios de profundidad del agua son los más elevados, y el pozo 2 y 3 se comportan de manera similar de noviembre a julio. El pozo 1 tiene los registros más profundos en

diciembre con un promedio de -6,94 m.

Un aspecto a destacar es la diferencia de los niveles en octubre y septiembre, para el caso de octubre (entendiendo que es el mes de las mayores precipitaciones), el pozo 3 tiene un registro más bajo en comparación de noviembre, caso contrario de los otros pozos, una razón puede ser que necesita más concentración de precipitaciones para un aumento del nivel, y en el caso de los pozos 1 y 2, en octubre se recargan con mayor facilidad y con la disminución de las precipitaciones de noviembre el nivel desciende. En septiembre tienen lugar precipitaciones de gran intensidad en corto periodo de tiempo, pero debido a la sequía del verano, el pozo 3 no presenta una respuesta importante a estas precipitaciones con respecto a los otros pozos.



**Figura 13. Variación promedio mensual del nivel de los pozos.**

Los registros recogidos durante los años 1998 y 1999 muestran un comportamiento atípico en el mes de julio de 1998 y de julio a agosto de 1999 en la dinámica del nivel de los pozos, se debe a que durante esta época se extrajo agua del pozo 3 para el regadío, disminuyendo el nivel del pozo de forma acusada y no recuperó el nivel hasta diciembre de 1998 (Farguell y Sala, 2002) si comparamos estos registros con el pozo 1 vemos que el descenso de julio en los dos años no es tan marcado.

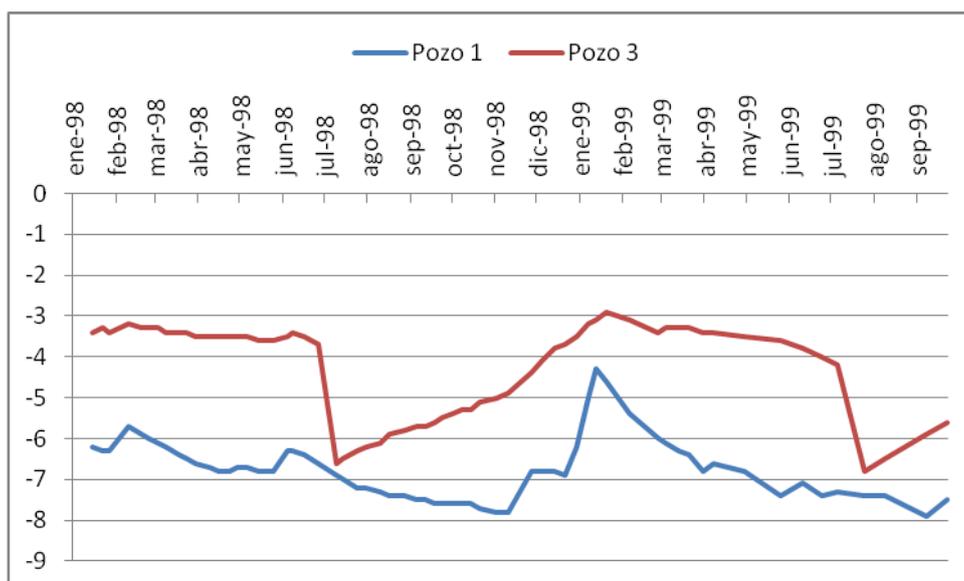


Figura 14. Nivel del pozo 1 y 3 durante los años 1998 y 1999.

### 5.2. Análisis de la activación de la escorrentía superficial y su relación con el nivel del pozo 3.

El nivel del agua subterránea del acuífero influye en el inicio del año hidrológico. La Tabla 5 presenta los registros del pozo 3 antes y después del momento en que empieza la escorrentía superficial en la riera de Vernegà en el año hidrológico. Por consiguiente, se considera que, en promedio, cuando el nivel se encuentra a una profundidad de -2,5 m, la escorrentía superficial comienza, a pesar de ello, se sabe que dicho factor no es determinante, existen otros factores vinculados a la intensidad máxima y la estacionalidad que infieren en la escorrentía, es el caso del año hidrológico 2007/8 donde la escorrentía no se presentó hasta febrero cuando el nivel era de -2,73 m.

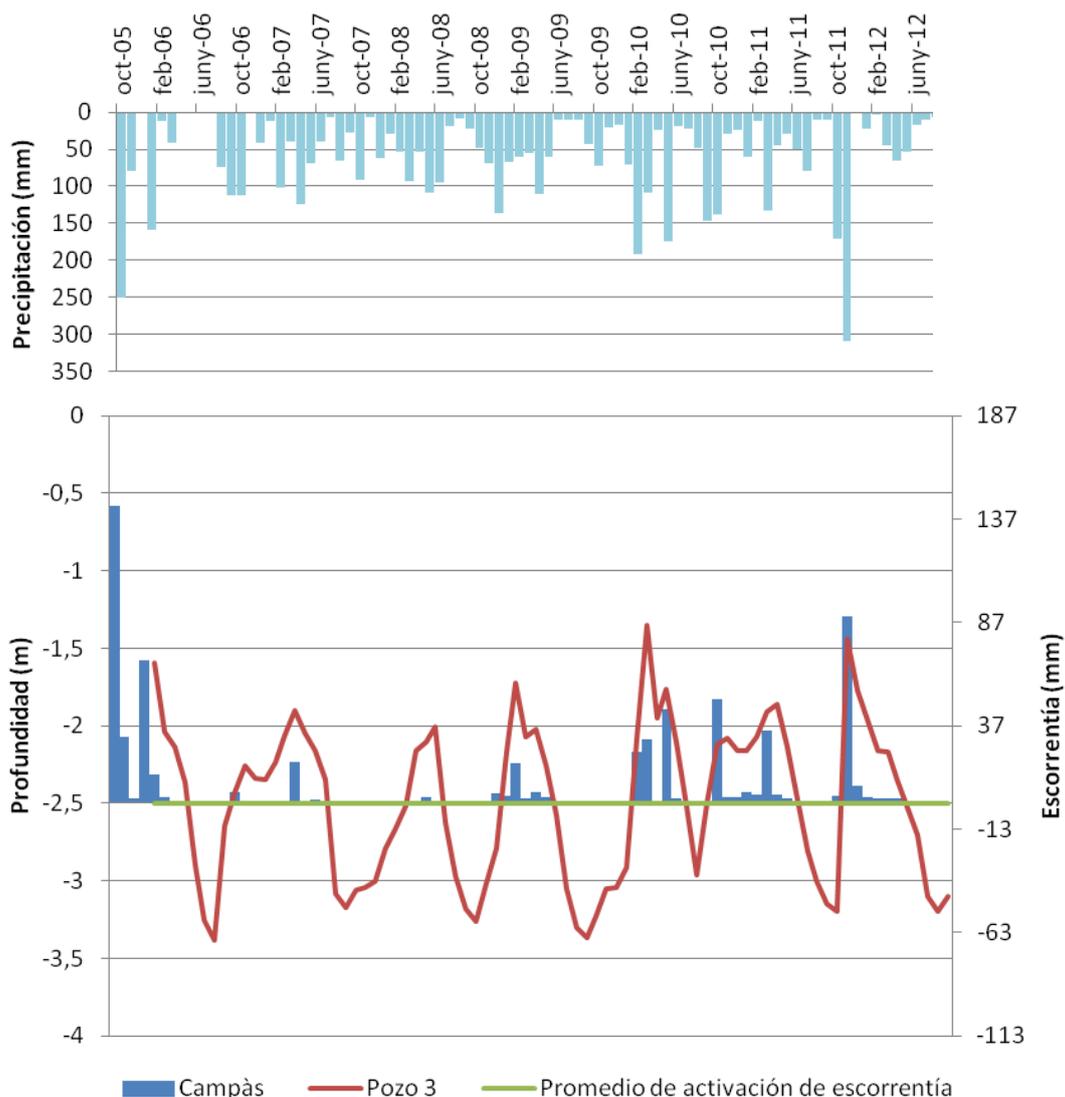
Los casos en que si se cumple este hecho puede observarse el 17 de octubre de 2006, con una profundidad de -2,53 m, o sea a 0,03 m por debajo del promedio, no presenta escorrentía (Tabla 5); otros ejemplos los tenemos el 21 de enero de 2010 a -2,85 m; y octubre 2011 con -3,2 m. El total de precipitaciones en octubre debe ser necesariamente suficiente para recargar el acuífero, si esto no sucede, al igual que en el período 2007/08 es difícil mantener constante el flujo de agua en el canal durante la estación de otoño.

**Tabla 5. Profundidad del pozo 3 antes y después de una crecida.**

Fecha	Profundidad (m)	Fecha de inicio de la crecida
17-10-06	-2,53	18/10/2006
24-10-06	-2,23	
13-02-07	-2,36	17/02/2007
20-02-07	-2,15	
31-01-08	-2,80	04/02/2008
07-02-08	-2,73	
16-12-08	-2,89	26/12/2008
29-12-08	-2,49	
29-01-10	-2,85	08/02/2010
09-02-10	-2,40	
08-10-10	-2,28	12/10/2010
15-10-10	-1,58	
26-10-11	-3,20	27/10/2011
10-11-11	-1,76	
18-10-12	-3,20	31/10/2012
02-11-12	-2,66	
<b>Promedio</b>	<b>-2,51</b>	

En la Figura 15 se muestra el nivel del agua del pozo 3 y la escorrentía superficial de Campàs en función del nivel en que se estima que empieza a generarse escorrentía superficial. Un valor que resalta es el registro de agosto de 2011, y su razón se debe a que el nivel de los pozos fue medido justo después de una precipitación de 10,5 mm otorgando un registro superior a lo que ocurre en la cuenca.

Los meses de diciembre de 2008 y octubre de 2011, tienen una respuesta de escorrentía superficial en Campàs de 4,24 y 2,98 mm respectivamente. En estos meses la profundidad del pozo 3 estaba por debajo de la media calculada.



**Figura 15. Nivel del pozo 3, nivel promedio de activación de la escurrentía, precipitación y escurrentía superficial de Campàs.**

La Figura 16 presenta la relación de la escurrentía total mensual de Campàs y el nivel promedio mensual del pozo 3 en función de las tres estaciones del año, como resultado tenemos que durante el otoño e invierno la correlación entre la profundidad del pozo 3 y la escurrentía mensual son semejantes y bajas con  $R^2=0,40$  y  $R^2=0,42$  respectivamente, sin embargo son las que mejor se ajustan en función de los otros pozos estudiados y en función de las estaciones del año. Su razón se debe a que las precipitaciones más acusadas durante octubre generan una respuesta mayor de la escurrentía directa, posteriormente, durante el invierno, la profundidad del pozo 3 se mantiene entre -3 y -2 m y el valor de la escurrentía va en aumento debido a las precipitaciones promedio que aumentan a finales del invierno. Finalmente durante la primavera la profundidad del pozo 3 aumenta y la escurrentía disminuye hasta cero; dicha estación del año varía según el número de crecidas, haciendo que la correlación

sea la más baja de las tres ( $R^2= 0,15$ ).

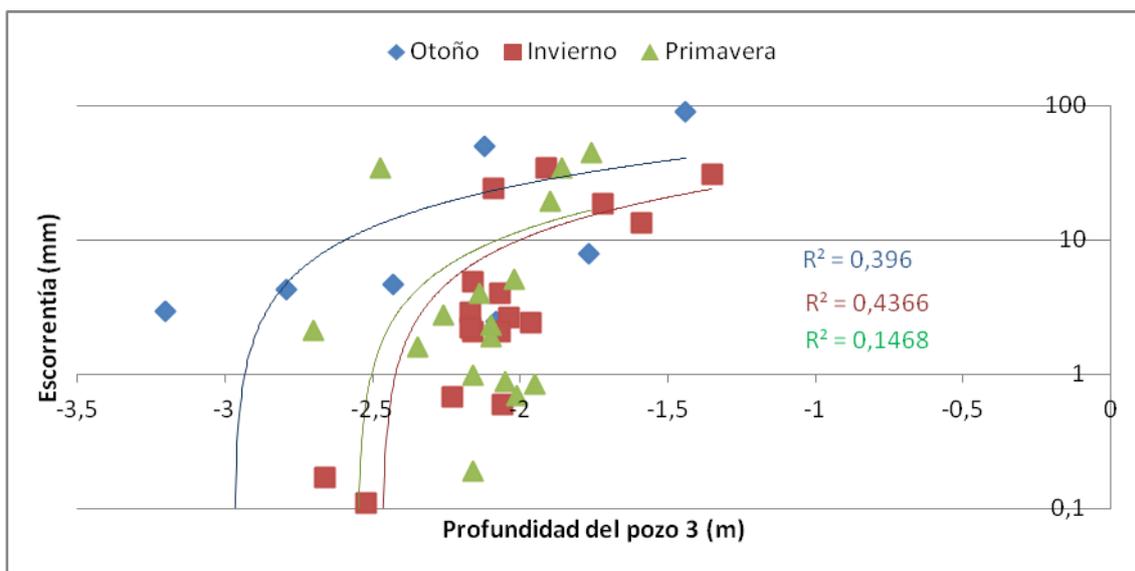


Figura 16. Relación mensual de la escorrentía de Campàs y el nivel del pozo 3 durante el periodo 2005-2012.

### 5.3. Registros de la humedad del suelo en la Cuenca.

La humedad del suelo se registra en los 5 puntos ya señalados en la metodología y se ha realizado un resumen en la Figura 17 del promedio mensual. Hay una fuerte variación durante todo el año, siendo mayor en los registros de otoño, en invierno la humedad se mantiene, con un descenso en enero para luego, en primavera aumentar, teniendo en abril los registros más elevados de agua en el suelo, y posteriormente descendiendo hasta julio que corresponde a los meses de verano.

Los puntos de Campos y de Interceptación en orden de magnitud son los más altos; Cantallops y Capçalera, ubicados en la parte alta y media alta de la cuenca, son quienes registran los valores más bajos de humedad del suelo.

Los puntos de Campos y de Interceptación están muy próximos, pero el primero está ubicado en los campos agrícolas y el segundo en la zona boscosa; se observa una diferencia entre los dos puntos; durante los meses de diciembre a abril en Campos la humedad es más elevada que en Interceptación, pero en agosto es Interceptación el valor más alto de todos los puntos de muestreo.

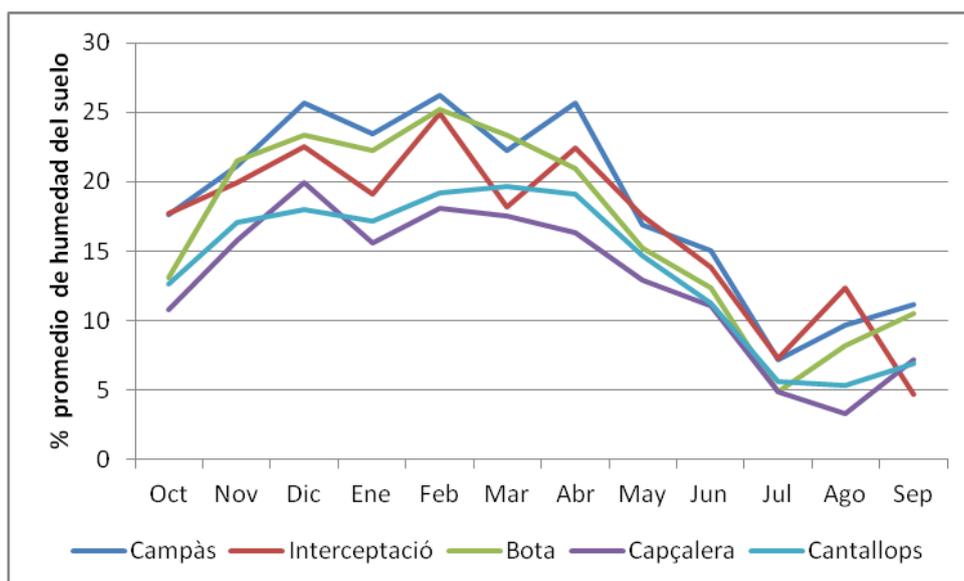


Figura 17. Porcentaje de humedad promedio mensual en 5 puntos diferentes de la cuenca.

### 6. Análisis de las crecidas.

En total se han logrado registrar 44 crecidas, de las cuales 22 corresponden al periodo 1993-2005 y 22 al periodo 2005-2012. En todo el estudio, el mes donde se registran mayores crecidas es febrero, con 9 crecidas, seguido de abril con 7 y noviembre con 6, durante los meses de junio a septiembre no se registraron crecidas (Figura 18), en octubre se registraron 4 crecidas.

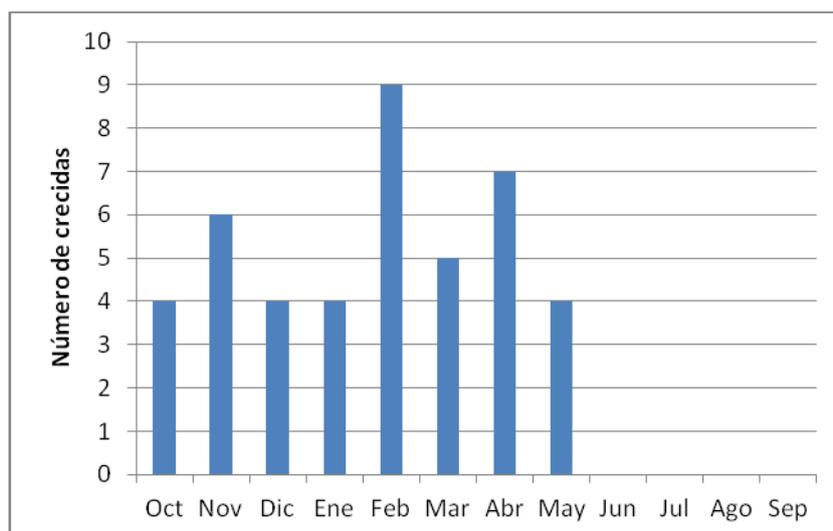


Figura 18. Distribución mensual de las crecidas en todo el estudio (1993-2012).

### 6.1. Análisis general de las crecidas.

En promedio, de las 44 crecidas registradas, es en octubre donde se generan los mayores valores, destacándose tanto los valores de precipitación 134,2 mm e intensidad máxima con 32 mm/h, como de caudal máximo con 918,3 l/s en Bosc y 5283,8 l/s en Campàs (Tabla 6); en relación con la escorrentía y el coeficiente de escorrentía encontramos un hecho particular con la estación de aforo de Bosc, dado que el coeficiente de escorrentía para dicho mes en promedio no es el mayor, registrándose en marzo con un 10,7%.

Las precipitaciones que generaron una crecida van desde 11,4 mm (año 1994; Tabla 8), hasta 247 mm (octubre 2005; Tabla 9) y en la escorrentía directa encontramos que los registros menores son 0,03 mm para Bosc y 0,20 mm para Campàs (abril 2009), hasta los registros mayores de 22,7 mm para Bosc y 133,4 mm para Campàs (octubre 2005). Otras precipitaciones de gran magnitud tuvieron lugar en marzo y noviembre de 2011. Un evento de gran interés es la nevada de marzo de 2010, debido a que no se tiene registro de otra situación similar en esta investigación y es muy poco frecuente en zonas costeras mediterráneas. Los coeficientes de escorrentía presentan una desviación estándar de 6% en Bosc y 18% en Campàs (igual al promedio), siendo el más alto en Bosc con 24% (marzo 2010) y en Campàs con 62% (mayo 2002), y el mínimo de 0,1% en Bosc y 0,7% en Campàs (abril 2009).

**Tabla 6. Valores medios mensuales de las 44 crecidas del estudio.**

Mes	P (mm)	I.max. (mm/h)	Bosc			Campàs		
			Q máx. (l/s)	E. (mm)	C.E. (%)	Q máx. (l/s)	E. (mm)	C.E. (%)
<b>Oct</b>	134,2	32,0	918,3	7,8	4,3	5283,8	45,9	24,3
<b>Nov</b>	64,4	8,2	168,8	6,9	7,4	425,9	14,8	22,5
<b>Dic</b>	62,1	7,3	0,4	1,9	9,1	13,3	1,4	2,5
<b>Ene</b>	73,0	7,5	59,9	6,8	7,9	86,5	17,7	15,3
<b>Feb</b>	70,0	9,6	120,1	4,7	5,6	370,9	16,8	19,3
<b>Mar</b>	51,8	5,6	46,5	6,7	10,7	111,6	11,7	21,1
<b>Abr</b>	43,7	8,7	17,5	1,0	1,9	66,9	7,7	13,2
<b>May</b>	82,5	8,9	33,0	4,6	7,2	270,8	32,2	29,3

P = Precipitación; I.max.: Intensidad máxima; E.: Escorrentía; C.E.: Coeficiente de Escorrentía. Q<sub>o</sub>: Caudal inicial; Q máx.: Caudal máximo.

### 6.2. Análisis entre la precipitación que genera una crecida y la escorrentía directa.

Para el caso del primer periodo la correlación de la precipitación y la escorrentía en la estación Bosc es nula, una razón que puede sugerir este resultado es la poca cantidad de registros de crecida con 7, en comparación con la estación de Campàs, donde la correlación es de  $R^2= 0,58$  (Tabla 7). Para el segundo periodo, debido a que tenemos un mayor número de crecidas registradas, encontramos que la correlación de Bosc es mayor en comparación al primer periodo ( $R^2= 0,49$ ) y la de Campàs también presenta una mejor correlación ( $R^2= 0,71$ ). Este factor vislumbra una vez más, el aumento de la respuesta de la escorrentía en la cuenca después de los planes técnicos de gestión forestal, especialmente en la estación de aforo de Bosc donde la diferencia es mayor en los dos periodos de estudio.

**Tabla 7. Tabla de correlación entre la precipitación de una crecida y su escorrentía directa.**

<b>R<sup>2</sup></b>	<b>No. Datos</b>	<b>1993-2005</b>	<b>No. Datos</b>	<b>2005-2012</b>
<b>Bosc</b>	7	0,00	22	0,49
<b>Campàs</b>	19	0,58	22	0,71

### 6.3. Análisis de las crecidas del periodo 1993-2005.

Para el primer periodo se registraron 22 episodios de crecidas. 19 crecidas se registraron en Campàs y 7 en Bosc de las cuales 4 son el mismo evento (Tabla 8). Según la distribución estacional 7 crecidas se registraron en otoño, 11 en invierno y 4 en primavera.

El registro más grande del periodo corresponde a mayo de 2002: una precipitación de 149,6 mm y una intensidad máxima de 9 mm/h generaron un caudal máximo de 404,8 l/s y 93 mm de escorrentía en Campàs. Para este episodio no se pudo lograr un registro en Bosc. El registro más grande de la estación de Bosc corresponde al 25 febrero de 2003, con un caudal máximo de 5 l/s y una escorrentía de 5,98 mm (26,2 l/s y 15,21 mm respectivamente en Campàs).

Los coeficientes de escorrentía varían desde 0,81% y 11,42% para Bosc y, 1,24% y 62,17% para Campàs. En promedio, los registros son de 4% para Bosc y 17% para Campàs y una escorrentía media de 1,8 mm en Bosc y 13,5 mm en Campàs.

Tabla 8. Resumen general de las crecidas del periodo 1993-2005.

Inicio	Precipitación		Q máx. (l/s)		E-directa (mm)		C. E. (%)	
	Total (mm)	I.máx. (mm/h)	Bosc	Campàs	Bosc	Campàs	Bosc	Campàs
04/11/1993	22,4	3,4		30,3		5,83		26,04
24/11/1993	7,8	3,8		1,6		1,19		15,23
06/01/1994	11,4	2,2		1,0		0,50		4,40
14/02/1994	20,2	4		7,9		1,03		5,10
08/12/1995	83,2	8,8		27,0		1,03		1,24
15/12/1995	27,4	4,4		8,5		1,28		4,67
10/01/1996	60,0	7,4		2,5		2,89		4,82
23/01/1996	148,6	12,8		179,7		67,90		45,69
05/03/1996	46	3,2		5,8		8,11		17,64
15/03/1996	24,8	2,4		6,3		5,96		24,05
17/04/1996	26,0	6		1,4		1,48		5,68
02/01/1997	59,0	7,4		15,3		3,47		5,87
25/11/1997	68,2	13,6	0,8		0,55		0,81	
18/12/1997	20,8	3,6	0,4		1,88		9,06	
02/02/1998	53,4	3,6	0,5		0,18		0,33	
02/12/1998	116,8	12,4		4,4		1,77		1,51
09/04/2002	64,6	15		85,3		35,25		54,57
07/05/2002	149,6	9		402,8		93,01		62,17
19/02/2003	73,4	7,8	3,3	24,0	2,41	7,32	3,28	9,98
25/02/2003	52,4	4,8	5,0	26,2	5,98	15,21	11,42	29,02
28/03/2003	44,2	6,4	1,1	2,1	0,61	0,93	1,38	2,11
08/04/2003	40,0	9,6	2,6	10,7	0,80	2,74	2,00	6,86
<b>Total</b>					<b>12,4</b>	<b>256,9</b>		
<b>Promedio</b>	<b>55,5</b>	<b>6,9</b>	<b>2,0</b>	<b>44,4</b>	<b>1,8</b>	<b>13,5</b>	<b>4,0</b>	<b>17,2</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>39,9</b>	<b>3,9</b>	<b>1,7</b>	<b>96,6</b>	<b>2,0</b>	<b>25,3</b>	<b>4,4</b>	<b>18,7</b>
<b>Coef. Var.</b>	<b>72%</b>	<b>56%</b>	<b>88%</b>	<b>218%</b>	<b>114%</b>	<b>187%</b>	<b>109%</b>	<b>109%</b>

I. máx.: Intensidad máxima; E: Escorrentía; C.E.: Coeficiente de Escorrentía. Q máx.: Caudal máximo.

#### 6.4. Análisis de las crecidas del periodo 2005-2012.

Una vez comenzados los Planes Técnicos de Gestión Forestal y su continuación en el año 2003, es en el 2005 con una precipitación de 247 mm y una intensidad máxima de 21,3 mm/h, el evento que detona el cambio de respuesta de la escorrentía observado en la cuenca.

En resumen para este periodo tenemos que el promedio de la escorrentía directa de todas las crecidas es de 6,1 mm para Bosc y de 21,1 mm para Campàs y los coeficientes de escorrentía de 6,8% en Bosc y de 20,1% en Campàs siendo más altos que el periodo anterior. Se destacan los caudales máximos de 3455,4 l/s en Bosc y de 16623,7 l/s para Campàs que corresponden al episodio de octubre de 2005 (Tabla 9).

El coeficiente de escorrentía es diferente a lo largo de cada año hidrológico, resaltando que en general es mayor en Campàs, encontrándose diferencias en los episodios más grandes como el de octubre de 2005 y febrero de 2006 (15,6% para Bosc y 60,5% en Campàs).

Para la riera de Vernegà, la escorrentía directa de una crecida puede durar más de 100 horas. La crecida más corta duró 14 horas en octubre de 2006 con una intensidad de 48 mm/h, y la crecida más larga corresponde a la nevada de marzo de 2010 que duró 268 horas generada por una precipitación de 50,4 mm. El promedio del tiempo de respuesta entre la intensidad máxima y el caudal máximo para todas las crecidas del periodo 2005-2012 es de 14 horas para Bosc y 21 horas para Campàs.

Los caudales máximos derivados de las intensidades máximas registrados oscilan entre 3455,4 l/s y 1,8 l/s (mayo 2008) para Bosc, y 16623,7 l/s y 7,7 l/s (abril 2009) para Campàs. La relación entre la intensidad máxima de precipitación y los caudales máximos no es muy alta, ya que precipitaciones con volúmenes similares no generan la misma escorrentía. Es el caso de abril 2007 con 50 mm y mayo 2010 con 49 mm, que generaron una escorrentía en Campàs de 0,49 mm y 17,75 mm respectivamente.

Tabla 9. Resumen de las crecidas del periodo 2005-2012.

Inicio	Precipitación		Q máx. (l/s)		E directa (mm)		C.E. (%)	
	Total (mm)	I.máx. (mm/h)	Bosc	Campàs	Bosc	Campàs	Bosc	Campàs
11/10/2005	247,0	21,3	3455,4	16623,7	22,66	133,37	9,2	54,0
27/02/2006	116,9	12,0	753,2	1575,8	18,28	70,77	15,6	60,5
18/10/2006	66,2	47,8	174,9	1178,2	1,09	5,31	1,1	5,7
17/02/2007	64,4	8,4	7,2	15,7	0,35	0,45	0,5	0,7
02/04/2007	50,4	8,0	18,2	35,9	0,20	0,49	0,4	1,0
12/04/2007	62,2	6,8	61,0	316,8	3,66	12,59	5,9	20,2
12/05/2008	16,8	6,6	1,8	17,8	0,08	0,64	0,5	3,8
31/01/2009	86,0	7,6	59,9	233,9	6,82	13,69	7,9	15,9
07/04/2009	29,6	8,0	2,3	10,4	0,03	0,20	0,1	0,7
16/04/2009	32,8	7,6	3,5	7,7	0,34	1,12	1,0	3,4
08/02/2010	130,8	29,7	66,6	550,9	2,13	13,51	1,6	10,3
15/02/2010	48,8	6,5	4,9	396,1	3,22	9,55	6,6	19,6
03/03/2010	44,6	9,9	44,5	254,1	2,58	5,87	5,8	13,2
07/03/2010	50,4	4,5	61,5	108,1	12,26	20,78	24,3	41,2
02/05/2010	114,7	6,6	42,9	270,9	5,77	17,75	5,0	15,5
12/05/2010	49,0	13,4	54,1	391,6	7,88	17,49	16,1	35,7
10/10/2010	125,7	10,8	25,8	4252,9	5,06	43,64	4,0	34,7
12/03/2011	100,6	7,0	78,9	293,2	11,29	28,80	11,2	28,6
27/10/2011	97,8	48,1	113,0	152,7	2,80	2,79	2,9	2,9
04/11/2011	126,1	11,0	215,7	634,4	7,99	20,83	6,3	16,5
15/11/2011	63,4	7,8	122,5	447,2	5,39	14,79	8,5	23,3
19/11/2011	98,6	9,8	336,4	1016,1	13,73	31,14	13,9	31,6
<b>Total</b>	<b>1822,8</b>				<b>133,6</b>	<b>465,6</b>		
<b>Promedio</b>	<b>82,9</b>	<b>13,6</b>	<b>258,0</b>	<b>1308,4</b>	<b>6,1</b>	<b>21,1</b>	<b>6,8</b>	<b>20,0</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>50,2</b>	<b>12,4</b>	<b>732,9</b>	<b>3541,0</b>	<b>6,2</b>	<b>30,1</b>	<b>6,3</b>	<b>17,2</b>
<b>Coef. Var.</b>	<b>61%</b>	<b>91%</b>	<b>284%</b>	<b>271%</b>	<b>102%</b>	<b>142%</b>	<b>94%</b>	<b>86%</b>

I.máx.: Intensidad máxima; E: Escorrentía; CE: Coeficiente de Escorrentía; Q máx.: Caudal máximo.

Las crecidas son las que aportan la mayor cantidad de escorrentía superficial a la cuenca. Si diferenciamos la escorrentía directa de la escorrentía de base generada para el periodo 2005-2012, tenemos que la escorrentía directa representa el 59% de 231,5 mm en la estación de Bosc, y el 69% de 644,1 mm en la estación de aforo de Campàs (Figura 19). Y para la escorrentía generada por el evento de octubre de 2005 (oct-05) y noviembre de 2012 (nov-12), encontramos que en Bosc representan el 9% y 12% y en Campàs el 21% y 10% de la escorrentía directa total respectivamente. Cabe destacar que la escorrentía de base de Campàs es inferior respecto a Bosc y que el evento de octubre representa hasta un 12% más en Campàs de lo que representa en Bosc.

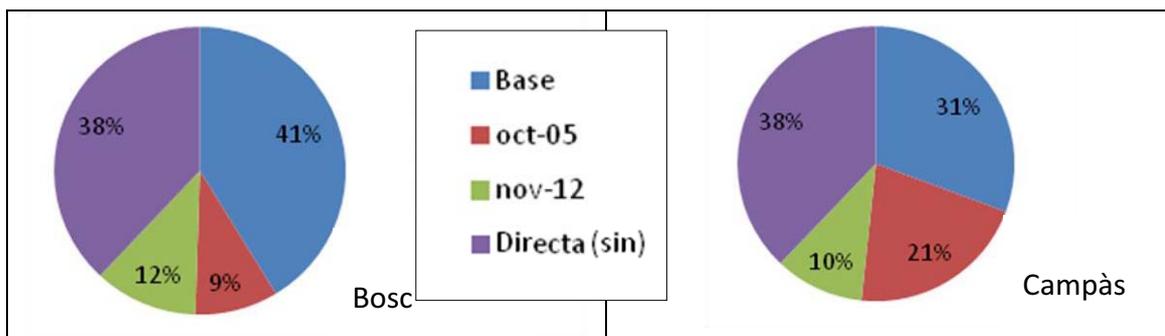


Figura 19. Relación de la escorrentía directa de la escorrentía de base en las dos estaciones (periodo 2005-2012).

### 6.5. Análisis de las crecidas según su tipología.

Las crecidas se han dividido de acuerdo a la existencia de caudal base y el número de picos. Por tanto, existen dos grupos generales de crecidas las cuales se diferenciarán por la presencia o no de escorrentía superficial antes de la precipitación. Dentro de dicho grupo se subdividen en el tipo de crecidas con un solo caudal máximo y el segundo subgrupo con dos intensidades máximas (Figura 20).

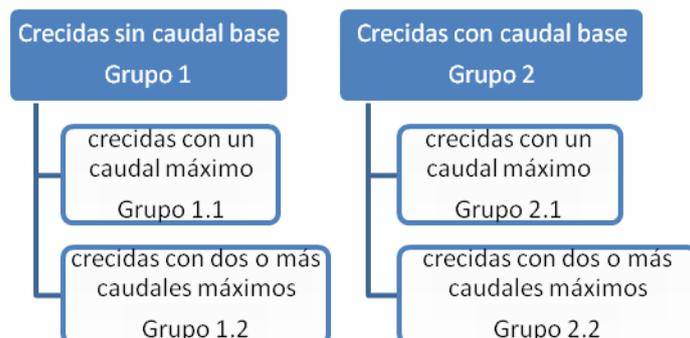


Figura 20. Distribución de las crecidas por grupos.

Se describirán conjuntamente en las dos estaciones las características de las crecidas año tras año; especialmente aquellas que por sus características se han considerado como las más representativas, dado la dinámica de las crecidas y el nivel de detalle. Para ello se han tenido en cuenta los dos periodos de estudio (1993-2005 y 2005-2012).

### 6.5.1. Resumen periodo 1993-2005.

De las 22 crecidas, 2 son del grupo 1.1 (una por cada estación de aforo), 3 al grupo 1.2 (2 a Bosc y 1 a Campàs), 9 al grupo 2,1 (que comparten 3 las dos estaciones), y 8 al grupo 2.2 (compartiendo 1).

Según la distribución por grupo las precipitaciones promedio más altas se registran en el grupo 1.1 con 53,4 mm para Bosc y de 116,8 mm para Campàs (Tabla 10), situación que se esperaba dado que se necesita mayor cantidad de precipitación para que se genere escorrentía. Las intensidades máximas se registran para las crecidas de la estación de Campàs siendo de 12,4 mm/h y corresponden al grupo 1.1.

El valor de caudal base en Campàs es mayor en comparación a Bosc para cada grupo, destacándose el registro del grupo 2.2 en la estación de Campàs que corresponde a 9 l/s. Para el caso de los caudales máximos cumple el mismo patrón siendo el registro del grupo 2.2 de 898,1 l/s en Campàs.

Entre las escorrentías directas y coeficientes de escorrentía para las crecidas con y sin caudal base presenta una importante variabilidad, en Bosc la escorrentía varía de 0,18 mm en el grupo 1.1 hasta 5,98 mm en grupo 2.1; y para la estación de aforo Campàs varía de 1,03 mm en el grupo 1.2 hasta 28,46 mm en el grupo 2.2. Los coeficientes de escorrentía tienen una variación semejante a las escorrentías.

**Tabla 5. Resumen de los registros de crecidas para el periodo 1993-2005.**

	Bosc				Campàs			
	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 1		Grupo 2	
	1.1	1.2	2.1	2.2	1.1	1.2	2.1	2.2
<b>P (mm)</b>	53,4	44,5	52,5	52,4	116,8	83,2	30,8	75,5
<b>I.máx. (mm/h)</b>	3,6	8,6	7,9	4,8	12,4	8,8	5,1	8,0
<b>Q<sub>o</sub> (l/s)</b>	0	0	1,7	5,7	0	0	5,0	9,0
<b>Q máx. (l/s)</b>	4,5	13,4	23,4	226,6	44,2	270,0	95,3	898,1
<b>E (mm)</b>	0,18	1,22	1,27	5,98	1,77	1,03	3,30	28,36
<b>CE (%)</b>	0,3	4,9	2,2	11,4	1,5	1,2	11,0	28,1

P = Precipitación promedio; I.máx.: Intensidad máxima máxima; E: Promedio de escorrentía directa; CE: Coeficiente de Escorrentía promedio. Q<sub>o</sub>: Caudal inicial promedio; Q máx.: Caudal máximo.

### 6.5.2. Resumen periodo 2005-2012.

En el grupo 1.1 se registró 1 crecida; en el grupo 1.2 se registraron 6 crecidas, en el grupo 2.1 fueron 4 y en el grupo 2.2 se registraron 11 crecidas.

Para este periodo, las precipitaciones medias de los grupos son iguales en las dos estaciones dado el mismo número de crecidas registradas. Las precipitaciones del grupo 1.2 corresponden a las mayores de los dos grupos con 123,5 mm. Es interesante ver que para el caso de Campàs en los dos periodos la precipitación media del grupo 2.1 son similares, mostrando que se necesitan pocas precipitaciones para generar este tipo de crecidas, de igual manera muchas corresponden a la época de invierno, o posteriores a crecidas de mayor intensidad. La intensidad máxima de precipitación para el grupo 1.1 fue de 47,8 mm/h, siendo incluso mayor a las precipitaciones totales promedio del grupo 2.1.

En las dos estaciones de aforo los caudales máximos se registran en las crecidas de dos o más picos y sin caudal base, los cuales corresponden a la crecida de 2005. Los caudales máximos más bajos se registran en el grupo 2.1 siendo de 16,2 l/s para Bosc y de 94,1 l/s para Campàs.

Para las escorrentías que se generan en este periodo de estudio en promedio son mayores las generadas en el grupo 2.2 para Bosc con 7,44 mm y en Campàs se generan en el grupo 1.2 con 30,26 mm. Los coeficientes de escorrentía por lo contrario se generan ambas en el grupo 2.2 coincidiendo con el periodo de estudio anterior.

**Tabla 6. Resumen de los registros de crecidas para el periodo 2005-2012.**

	Bosc				Campàs			
	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 1		Grupo 2	
	1.1	1.2	2.1	2.2	1.1	1.2	2.1	2.2
<b>P (mm)</b>	66,2	123,5	30,3	77,1	66,2	123,5	30,3	77,1
<b>I.máx. (mm/h)</b>	47,8	20,3	8,2	8,8	47,8	20,3	8,2	8,8
<b>Q<sub>o</sub> (l/s)</b>	0	0	1,0	1,3	0	0	1,3	7,7
<b>Q máx. (l/s)</b>	78,9	3455,4	16,2	159,7	105,7	16623,7	94,1	789,6
<b>E (mm)</b>	0,73	6,75	0,89	7,44	2,12	30,26	2,24	22,67
<b>CE (%)</b>	1,1	4,5	2,1	9,5	5,7	16,5	2,1	26,4

P = Precipitación promedio; IP: Intensidad máxima máxima; E: Promedio de escorrentía directa; CE: Coeficiente de Escorrentía promedio. Q<sub>o</sub>: Caudal inicial promedio; Q máx.: Caudal máximo.

### 6.5.3. Grupo 1.1. Crecidas sin caudal base previo y un caudal máximo.

En 1998 se registró la crecida del 2 al 6 de diciembre (Figura 21). Con una precipitación de 116,8 mm en 25 horas y una intensidad máxima de 12,4 mm/h generó un caudal máximo de 44,2 l/s, una escorrentía directa de 1,77 mm y un coeficiente de escorrentía de 1,5% en 61 horas. Esta crecida fue la primera crecida del año hidrológico 1998/99 teniendo en cuenta que las precipitaciones anteriores son de 52



La crecida del 25 de noviembre de 1997 solo se registró en la estación de Bosc (Figura 23). Las intensidades máximas fueron de 13,6 y 3,2 mm/h. El primer pico no corresponde al caudal máximo, es una intensidad posterior de 4,6 mm/h ocurrido 19 horas después que genera el primer caudal máximo de 7,7 l/s. El segundo caudal máximo fue de 8,2 l/s y el tiempo entre las dos intensidades máximas fue de 7 horas y entre los dos caudales máximos pasaron 8 horas. Esta crecida está considerada de un solo pico dado el poco tiempo que transcurre entre pico y pico y que el caudal entre ellas no desciende de manera considerable.

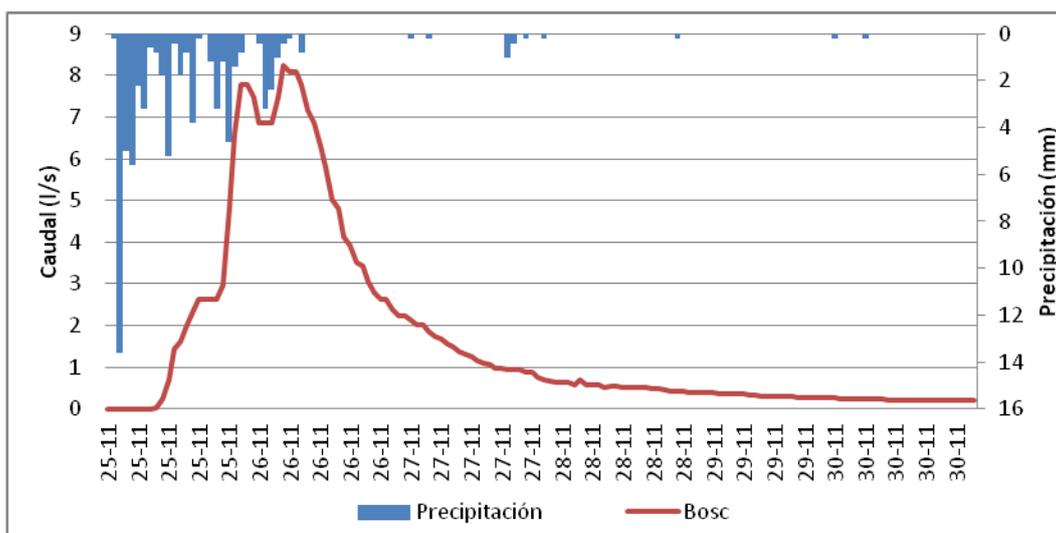


Figura 31. Del 25 al 28 de noviembre de 1997.

#### 6.5.4. Grupo 1.2. Crecidas sin caudal base previo y más de un caudal máximo.

La crecida del 8 de diciembre de 1995 es la primera del año hidrológico 1995/96 (Figura 24). En el total del mes se registraron 135,6 mm de precipitación, anterior a la crecida en el mismo mes ya habían precipitado casi 20 mm en la cuenca. Pero no fue hasta el día 8 donde se acumularon 83 mm en 56 horas. Las intensidades máximas fueron de 5,8 y 8,8 mm/h y los caudales máximos de 14 y 270 l/s. La escorrentía total es relativamente baja (1 mm en 66 horas) y el coeficiente de escorrentía es de 1%.

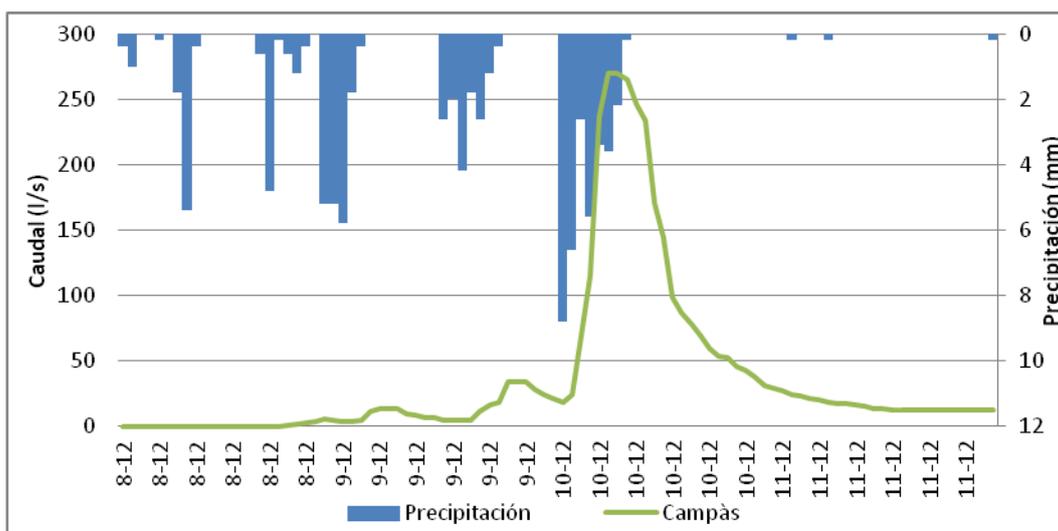


Figura 324. Del 8 al 11 de diciembre de 1995.

La crecida del 18 de diciembre de 1997 es la primera que se registró en la estación de Bosc del grupo 1.2, y la segunda del año hidrológico, ocurriendo 18 días después (Figura 25). La precipitación fue de 21 mm en 72 horas y las intensidades máximas de 3,6 y 1 mm/h. los caudales máximos fueron de 4,4 y 19 l/s. La escorrentía directa fue de 1,88 mm.

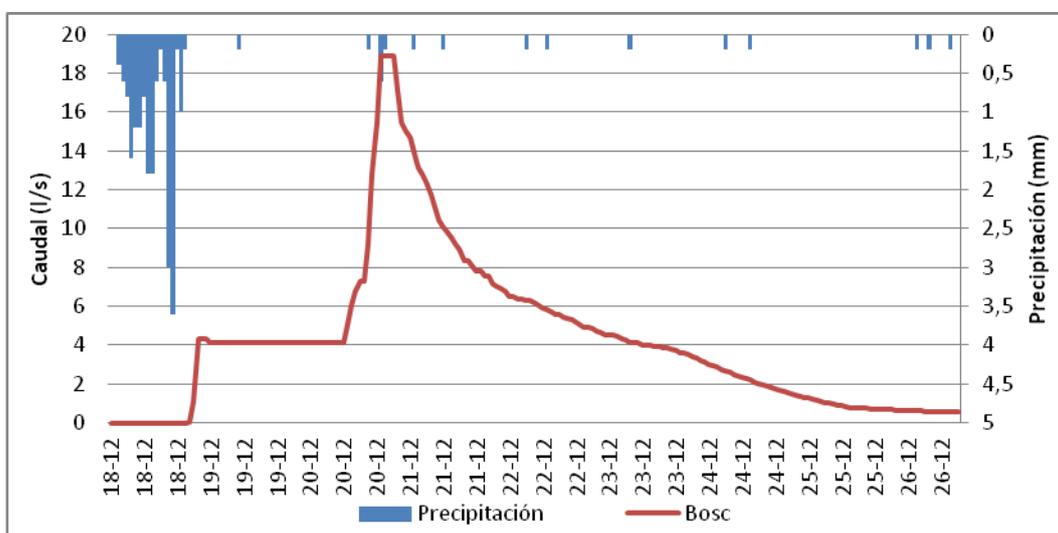


Figura 33. Del 18 al 25 de diciembre de 1997.

La primera crecida del año hidrológico 2005/06 (Figura 26), por sus características, es una de las más importantes de todo el periodo de estudio. La precipitación total acumulada fue de 247 mm, y la intensidad máxima registrada de 21 mm/h, pero se registraron otras 10 intensidades más por encima de los 10 mm/h, estando por encima

del valor medio de las segundas intensidades máximas del periodo de estudio.

Los aspectos a destacar son: la crecida parte de un caudal cero; es la primera crecida del año; la escorrentía directa de Bosc fue de 22,66 mm y el coeficiente de escorrentía de 9,2%; en Campàs la escorrentía directa fue de 133,34 mm y el coeficiente de escorrentía de 54%; el tiempo de escorrentía fue de 120 horas para Bosc y 122 para la estación de aforo Campàs; los caudales máximos registrados en Bosc fueron de 3,45 m<sup>3</sup>/s y 3,24 m<sup>3</sup>/s generado 2 horas después; en Campàs se generaron dos picos iniciales (16,6 y 15,66 m<sup>3</sup>/s) y después se registraron dos picos más de 1,33 y 0,83 m<sup>3</sup>/s. Todos estos registros, sin incluir los coeficientes de escorrentía, son los más altos en todo el periodo de estudio.

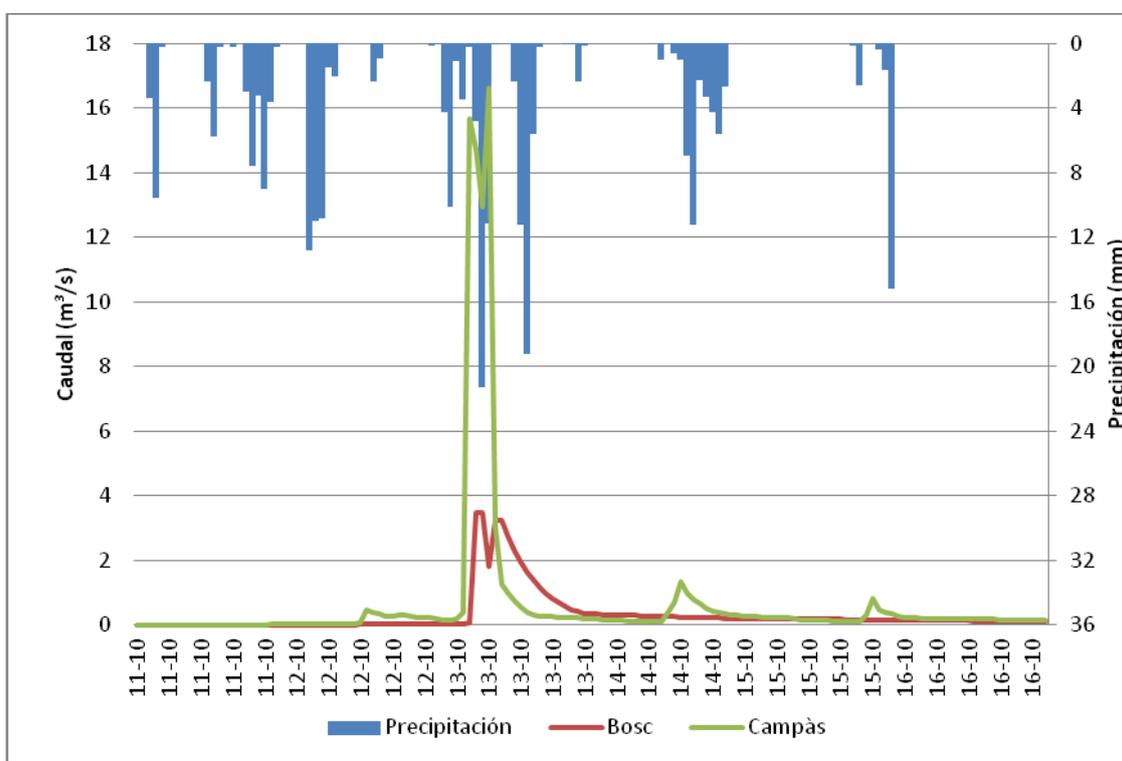


Figura 26. Del 11 al 16 de octubre de 2005.

La crecida del 21 de enero al 5 de febrero de 2009 (Figura 27) es un evento interesante, porque esta crecida parte de un caudal cero en febrero, hecho que no es usual en la cuenca, ya que Campàs mantiene regularmente caudal base durante el invierno, sin embargo es la segunda crecida del año, después de la crecida del 26 de diciembre de 2008. En esta crecida la precipitación total registrada fue de 86 mm en 85 horas. La escorrentía total en Bosc fue de 6,82 mm y 13,69 mm para Campàs, los coeficientes de escorrentía fueron de 8% y 16%, y los tiempos de crecida de 111 y 131 horas respectivamente. Las intensidades de precipitación máximas se registran el 31 de enero y 1 de febrero, con 6,8 mm/h y 7,6 mm/h respectivamente, pero el pico más

alto de 60 l/s en Bosc y 234 l/s en Campàs, se generó con una intensidad de 4,2 mm/h. En la primera crecida el tiempo de respuesta entre las dos estaciones es de menos de una hora, pero para el pico más alto Bosc respondió una hora antes.

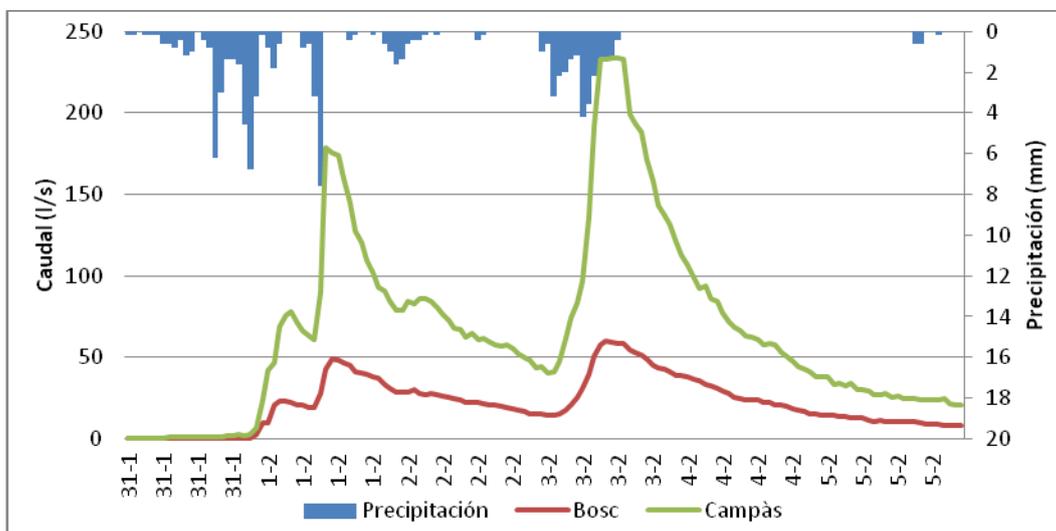


Figura 34. Del 31 de enero al 5 de febrero de 2009.

La primera crecida del año hidrológico 2009/10 fue el 8 de febrero (Figura 28), y de allí su importancia, dado que en este año la escorrentía superficial se inició en febrero, ya que en los meses anteriores no se dieron las condiciones para generarse escorrentía superficial, hecho que no es recurrente en la cuenca, y que muestra la variabilidad del clima mediterráneo. La precipitación total de 130,8 mm y dos intensidades máximas de 29,7 y 9,2 mm/h, la segunda más alta del periodo 2005-2012; generaron los caudales máximos en Bosc de 67 l/s y de 551 l/s en Campàs.

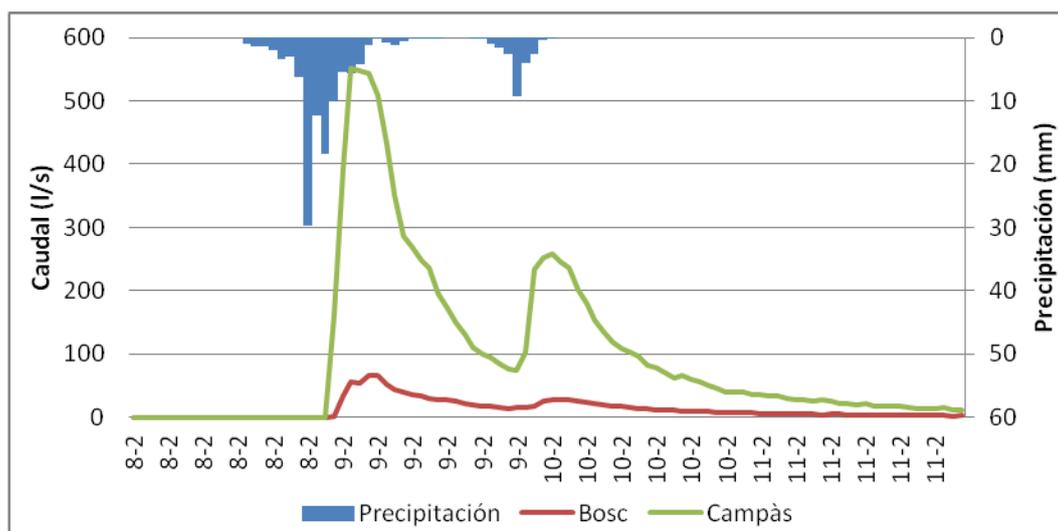


Figura 35. Del 8 al 11 de febrero de 2010.

La crecida del 10 al 15 de octubre de 2010 tiene un aspecto importante y son las intensidades anteriores que se registran al primer pico, ya que a pesar de la primera intensidad de 8,8 mm/h no genera una respuesta en la cuenca. Las intensidades máximas registradas que generaron respuesta en la cuenca fueron de 7,5 mm/h y 10,8 mm/h ante una precipitación total acumulada del 125 mm; la primera generó una respuesta de 0,026 m<sup>3</sup>/s en Bosc y de 0,142 m<sup>3</sup>/s en Campàs, la segunda generó una respuesta de 0,207 m<sup>3</sup>/s y de 4,253 m<sup>3</sup>/s respectivamente.

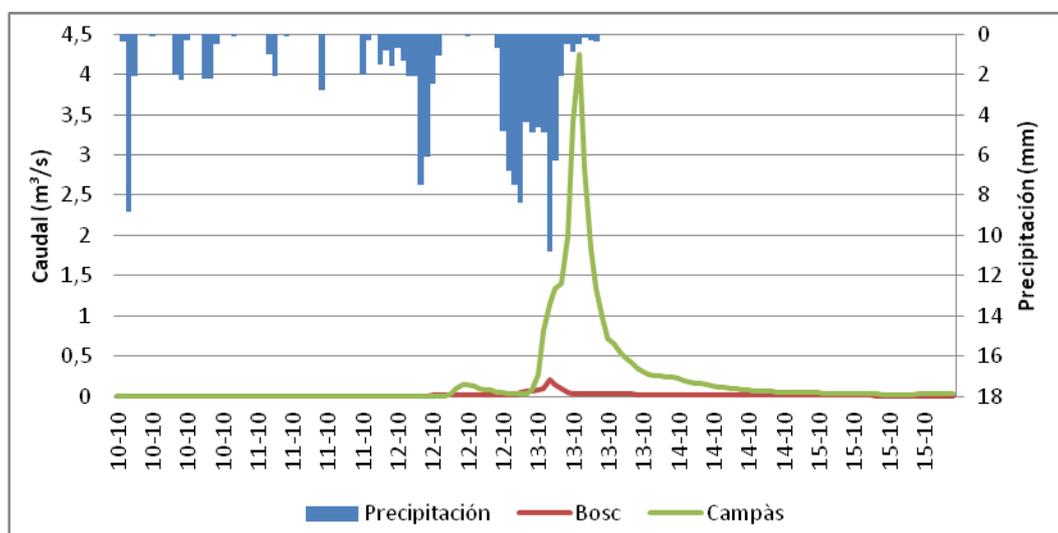
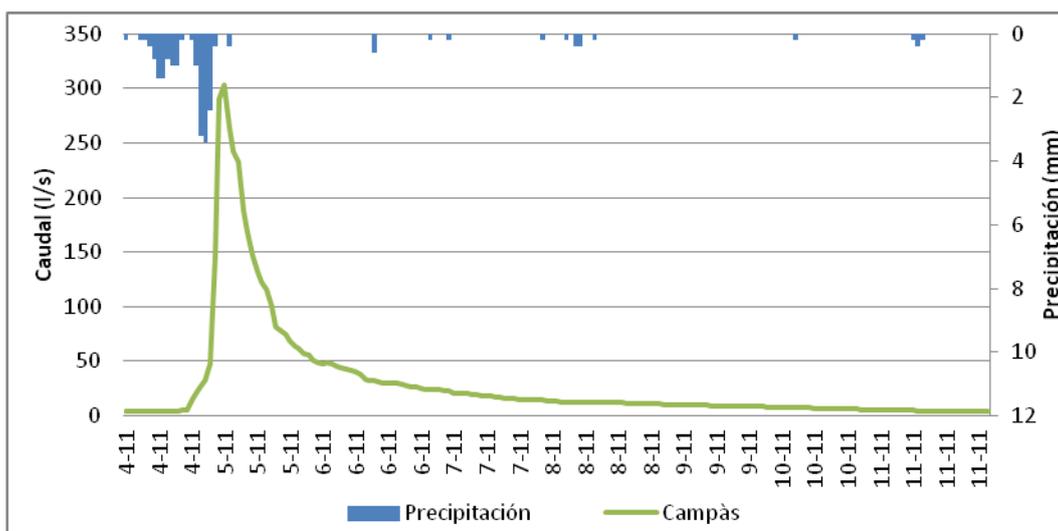


Figura 369. Del 10 al 15 de octubre de 2010.

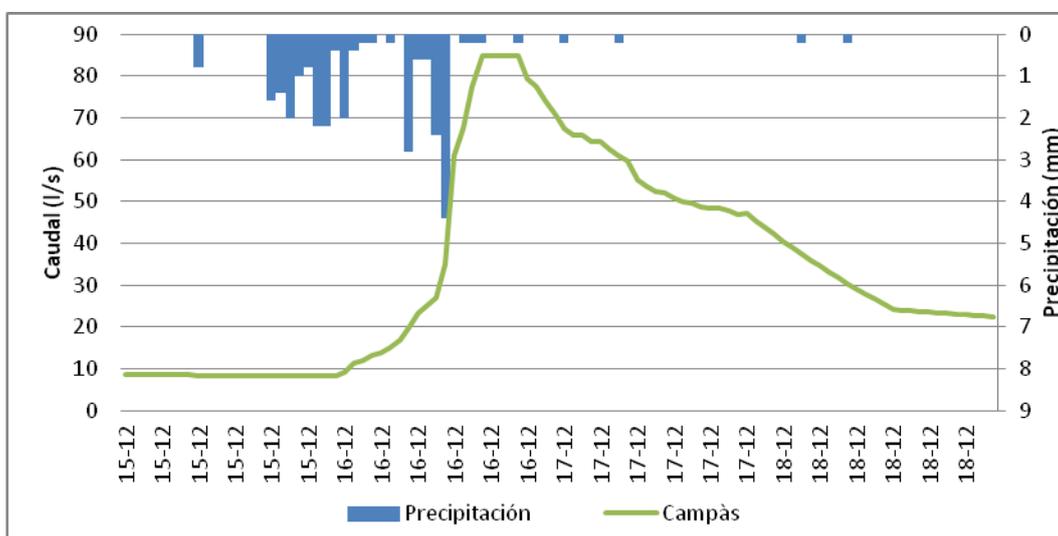
La última crecida del periodo de estudio 2005/12 que parte de un caudal cero, es la crecida del 27 de octubre de 2011 (Figura 30), en esta crecida existen dos momentos de precipitación, la primera con una intensidad de 48,1 mm/h, siendo el más alto de





**Figura 381. Crecida del 4 al 8 de noviembre de 1993.**

La segunda crecida del año hidrológico 1995/96 se registra el 16 de diciembre (Figura 32), 8 días después de la crecida del 8 de diciembre. La precipitación total fue de 27 mm en 32 horas. Su intensidad máxima fue de 4,4 mm/h y generó un caudal máximo de 85 l/s, valor mayor en comparación con la crecida anterior, con un tiempo de respuesta de 4 horas. La escorrentía total fue de 1,3 mm en 58 horas y el coeficiente de escorrentía de 5%.



**Figura 32. Del 15 al 18 de diciembre de 1995.**

La crecida de la Figura 33 es una crecida con dos picos y caudal base, primera en la que se pudo obtener registros en las dos estaciones de aforo. El pico en Bosc fue en menos de una hora respecto a la intensidad máxima de 8 mm/h y en Campàs el tiempo de respuesta fue de 6 horas. La escorrentía directa para Bosc fue de 2,41 mm y para



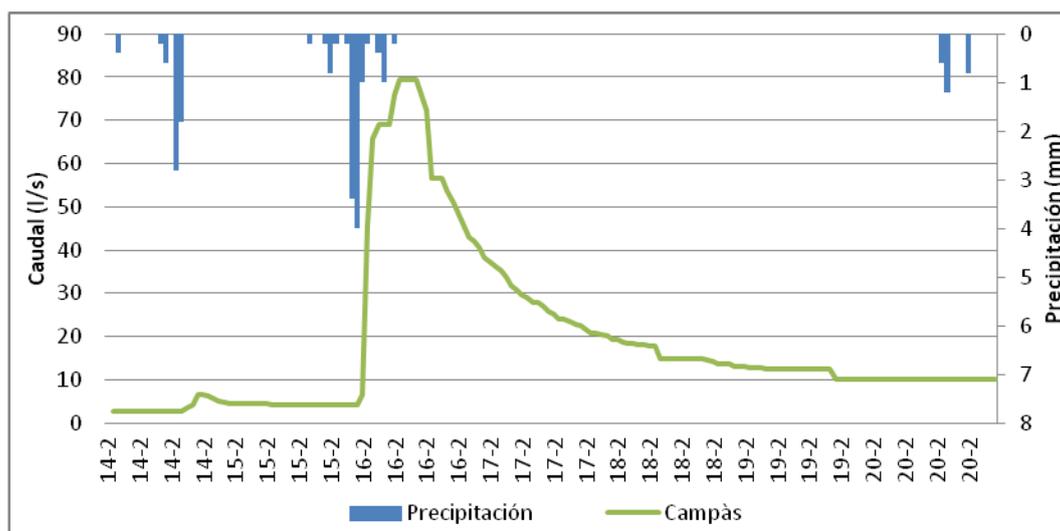


Figura 34. Del 14 al 20 de Febrero de 1994.

En enero del año hidrológico 1995/96 se presentaron dos crecidas importantes (Figura 35). La primera transcurre del 9 al 17 de enero con una precipitación de 60 mm en 41 horas; tiene dos intensidades máximas de 2,8 y 7,4 mm/h; y la segunda del 23 al 31 de enero, tiene dos intensidades máximas de 4,6 y 12,8 mm/h, y una precipitación de 148mm en 158 horas. Los caudales máximos registrados en las crecidas son de 0,013 y 0,025 m<sup>3</sup>/s, para la primera y de 0,076 y 1,797 m<sup>3</sup>/s en la segunda. Un aspecto a destacar de la segunda crecida, es el hecho de que no se ha dividido el primer pico en dos crecidas, ya que vemos que influye directamente en los dos picos posteriores y el coeficiente de escorrentía (46%), valor más alto registrado en el periodo de estudio (1993-2005), también es la razón del tiempo de la precipitación total.

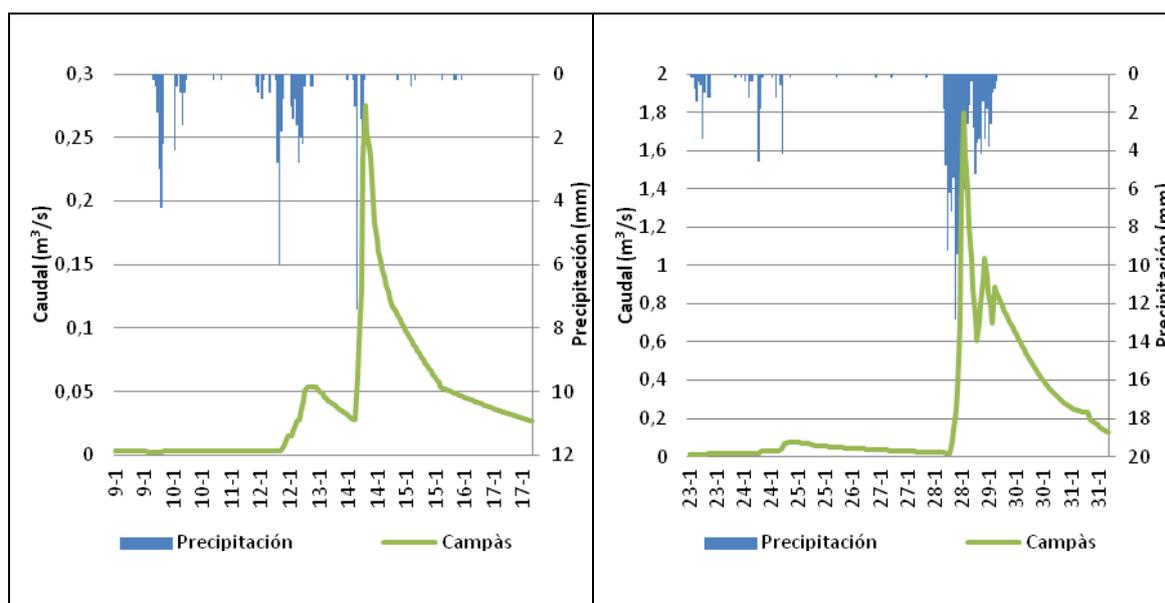
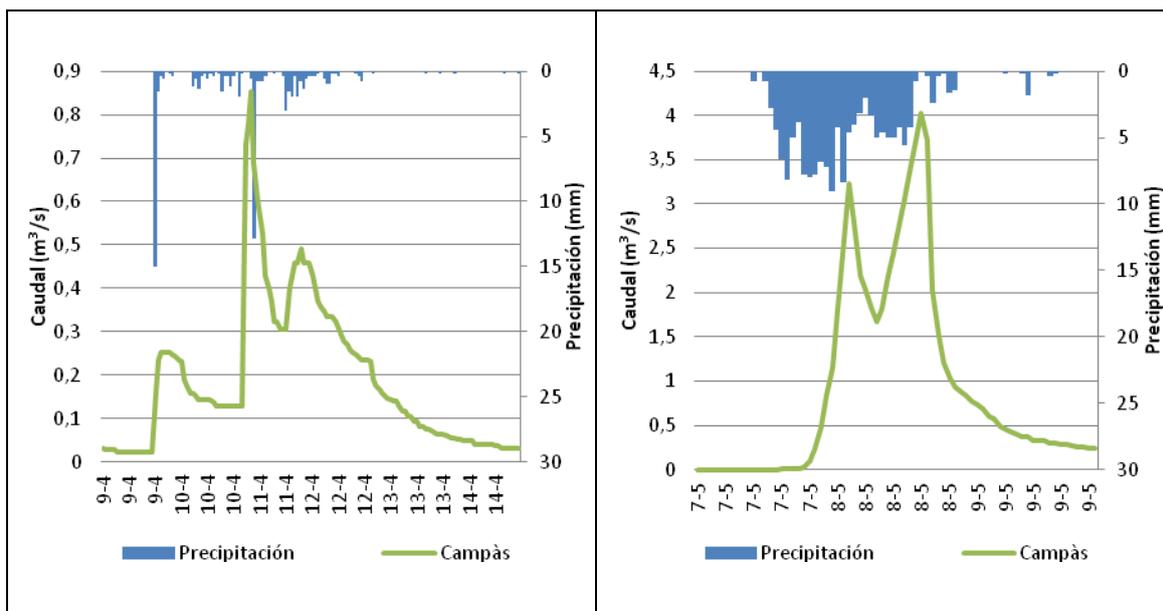


Figura 35. Crecidas del 9 al 16 y del 23 al 31 de enero de 1996.





**Figura 37. Del 9 al 14 de abril y del 7 al 9 de mayo de 2002.**

El primer año hidrológico en el que se tienen completas las dos estaciones en el momento de una crecida fue 2002/03, registrándose cuatro crecidas de las cuales destacaremos la crecida del 25 de febrero al 2 de marzo de 2003 (figura 38).

En esta crecida se produjeron dos intensidades máximas que generaron dos caudales máximos importantes. La primera intensidad de 4,8 mm/h está por debajo del promedio de intensidades para el primer periodo, y generó un caudal máximo de 50 l/s en Bosc y de 262 l/s en Campàs. La segunda intensidad de 2,8 mm/h generó una respuesta de caudal de 38 l/s en Bosc y de 191 m<sup>3</sup>/s en Campàs. Los registros del primer caudal máximo son superiores a los de la crecida del 19 de febrero, a pesar de que la intensidad máxima de precipitación en la anterior crecida fue de 7,8 mm/h y ambas crecidas no parten de un caudal nulo. Esta crecida muestra claramente que intensidades que están por debajo de la media estimada de 6,1 mm/h, solo se originan si los niveles de humedad del suelo en la cuenca son muy altos. Los coeficientes de escorrentía son para Bosc de 5,98 mm y de 15,21 para Campàs.

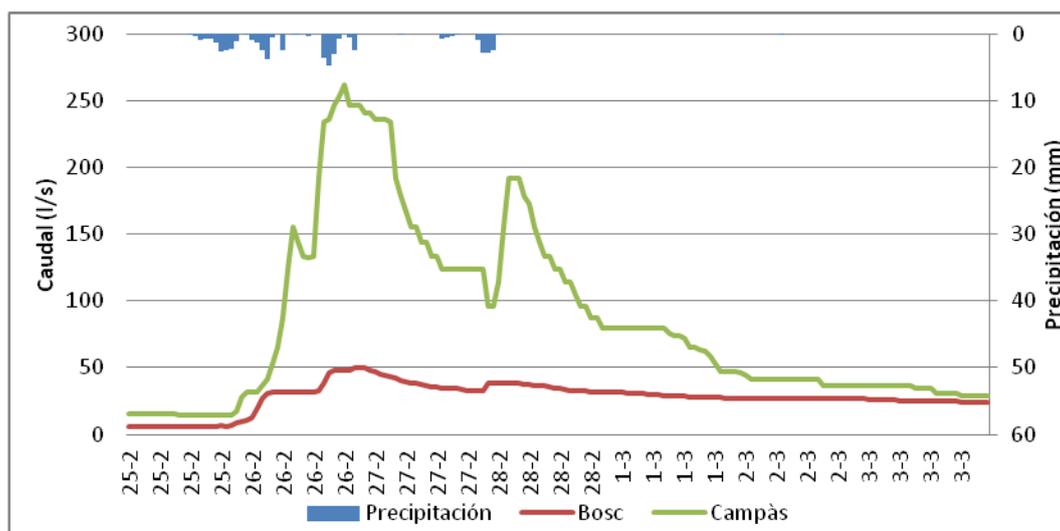


Figura 38. Del 25 al 2 de marzo de 2003.

La crecida del 8 al 11 de abril de 2003 (Figura 39), ocurre 7 días después de la crecida del 28 de marzo al 1 de abril de ese mismo año. Se generó por una precipitación total de 40 mm en 39 horas, con una intensidad máxima de 9,6 mm/h, el caudal máximo registrado en Bosc fue de 26 l/s y en Campàs de 107 l/s. La escorrentía directa en Bosc fue de 0,80 mm y en Campàs de 2,74 mm, con coeficientes de escorrentía de 2% y 7% respectivamente. En esta crecida es interesante ver que el tiempo de respuesta entre la intensidad y caudal máximo en las dos crecidas es bajo (1 hora).

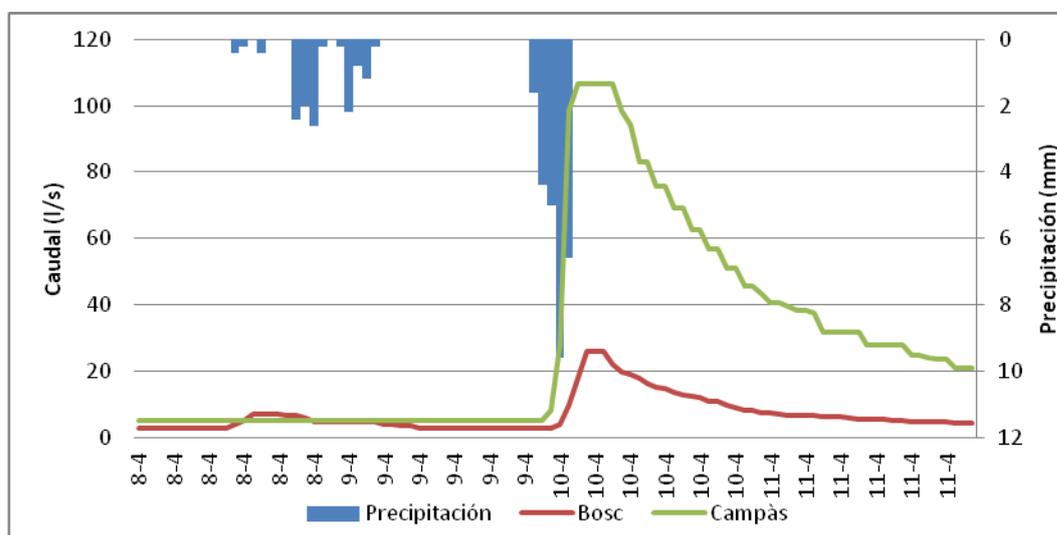


Figura 39. Del 8 al 11 de abril de 2003.

La crecida del 26 de enero al 2 de febrero de 2006 (Figura 40), ocurre con una precipitación de 116 mm en 102 horas, es la segunda del año hidrológico y parte de un caudal base nulo. Las intensidades máximas registradas son de 8 mm/h y 12 mm/h,

por ende, los caudales máximos se presentan en el segundo pico, además, con otras intensidades de precipitación posteriores, la cuenca tiene una respuesta hidrológica inmediata dejando tres picos que se destacan en la Figura 40. El caudal máximo registrado con la primera intensidad fue de 0,103 m<sup>3</sup>/s en Bosc y de 0,473 m<sup>3</sup>/s en Campàs. Con la segunda intensidad el caudal pico en Bosc fue de 0,753 m<sup>3</sup>/s y en Campàs de 1,576 m<sup>3</sup>/s. Un aspecto a destacar de esta crecida es que los coeficientes de escorrentía son superiores comparados con la primera crecida a pesar de su magnitud, situación que determina que el coeficiente de escorrentía no depende de la magnitud del evento, pero si depende de las condiciones de la cuenca dejadas por un evento de alta intensidad anterior. La escorrentía directa en Bosc fue de 18,28 mm y en Campàs de 70,77 mm y los coeficientes de escorrentía de 16% y 61% respectivamente, siendo los valores de coeficiente de escorrentía más altos registrados en todo el periodo 2005-2012.

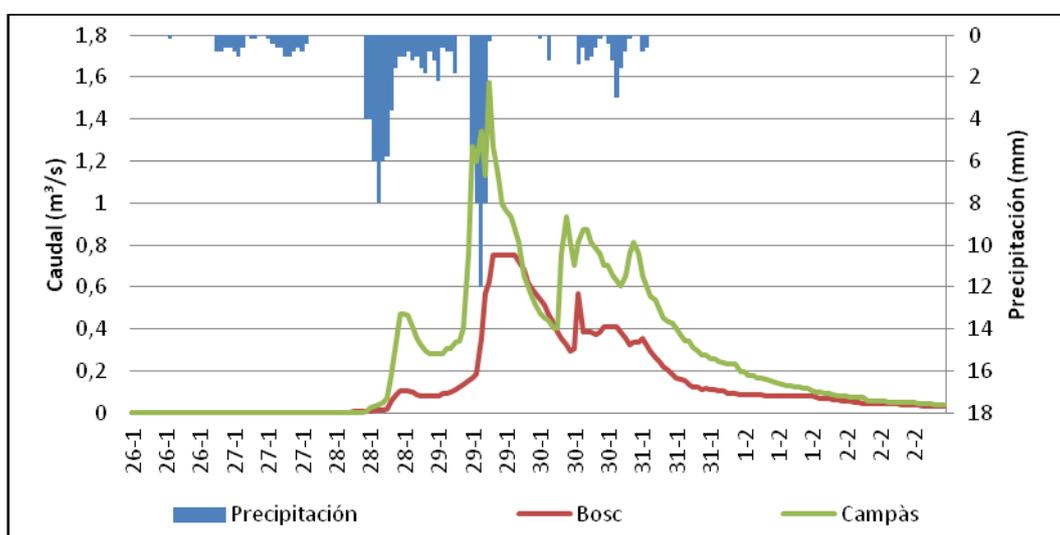


Figura 40. Del 26 de enero al 1 de febrero de 2006.

Las crecidas del 8 al 10 y del 15 al 21 de febrero de 2010, fueron las dos primeras de dicho año hidrológico. La segunda ocurrió 5 días después, con una precipitación de 49 mm y una escorrentía de 3,22 mm en Bosc y 9,55 mm en Campàs (Figura 41), tiene un primer momento de precipitación, del 15 al 17 de 16,4 mm y una intensidad máxima de 1,9 mm/h, generando una respuesta baja en la cuenca (de 5 l/s en Bosc y 19 l/s en Campàs); pero la segunda intensidad máxima de 6,5 mm/h genera una respuesta más alta en las dos estaciones de aforo con respecto al segundo pico de la anterior crecida (34 l/s en Bosc y 296 l/s en Campàs), valores inferiores a la crecida anterior.

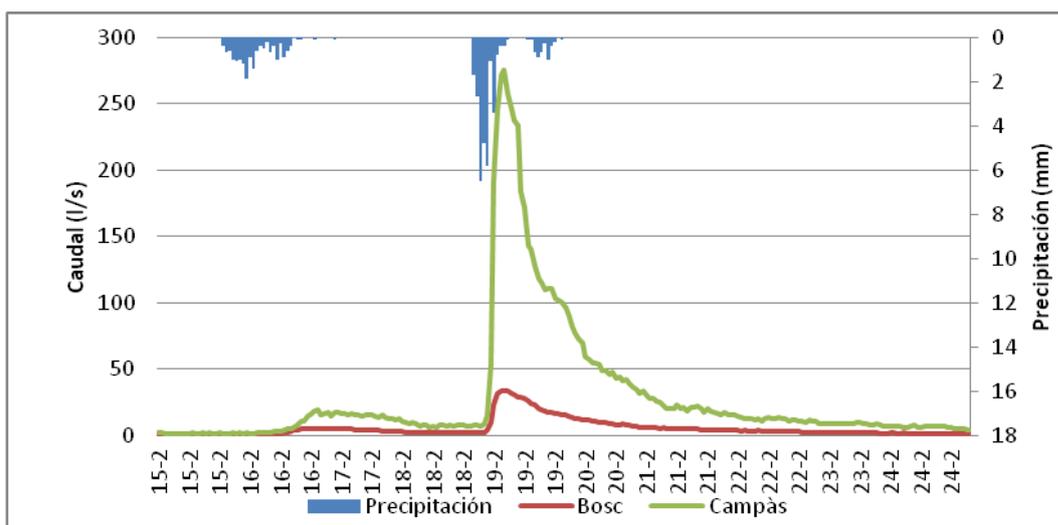
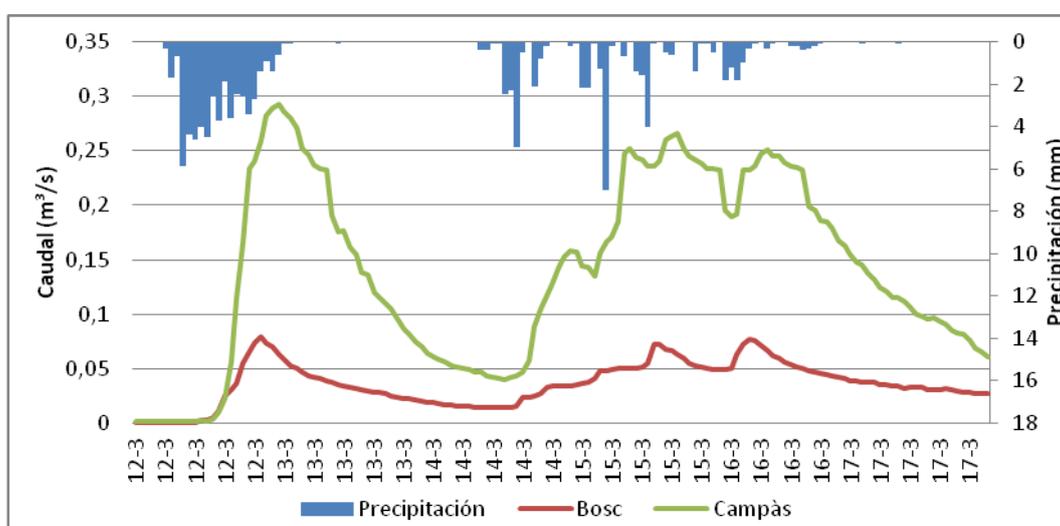


Figura 41. Del 16 al 21 de febrero de 2010.

La segunda y última crecida del año hidrológico 2010/11 tuvo lugar al final del invierno, del 13 al 17 de marzo (Figura 42), la precipitación total acumulada fue de 100,6 mm y tiene dos momentos, el primero con un pico de gran intensidad y el segundo con varios picos. El primer pico de gran intensidad se generó de la intensidad de 5,9 mm/h, siendo el caudal máximo para Bosc de 0,079 y 0,293 m<sup>3</sup>/s para Campàs. Luego vienen una serie de intensidades máximas que generan caudales máximos, siendo la de 7 mm/h la cual genera caudales de 0,073 m<sup>3</sup>/s en Bosc y de 0,266 m<sup>3</sup>/s en Campàs. La escorrentía total de Bosc fue de 11,29 mm y en Campàs de 28,8 mm con coeficientes de escorrentía de 11% en Bosc y 28% en Campàs. Un aspecto a destacar de esta crecida es el tiempo de respuesta entre la intensidad máxima y el caudal máximo del primer pico. Para Bosc fue de 13 horas y en Campàs se dio tres horas después, tiempos de respuesta que son los más altos registrados en todo el periodo 2005-2012.



**Figura 42. Del 10 al 15 de octubre de 2010 y del 12 al 17 de Marzo de 2011.**

Para el año hidrológico 2011/12 vamos a realizar un pequeño resumen de lo que sucedió en las cuatro crecidas que se describirán a continuación: todas las crecidas se generaron del 27 de octubre al 25 de noviembre de 2011, y durante el año hidrológico no se registraron más crecidas; es decir en menos de 25 días se registraron las mayores precipitaciones y escorrentías. El total de precipitación fue de 386 mm y las intensidades fueron desde 5,5 mm/h hasta 48 mm/h.

En un resumen (Tabla 12), podemos observar como las precipitaciones del 4 al 8 y del 19 al 25 de noviembre fueron las más altas y con las mayores respuestas del año hidrológico, la ultima generó los coeficientes de escorrentía más altos, de 14% en Bosc y 31,6% en Campàs.

**Tabla 12. Resumen de las crecidas del 27 de octubre al 25 de noviembre de 2011.**

Crecida	PP	Bosc		Campàs	
		Esc (mm)	CE (%)	Esc (mm)	CE (%)
<b>27 - 29/10</b>	97,8	2,8	2,9	2,8	2,9
<b>4 - 8/11</b>	126,1	8,0	6,3	20,8	16,5
<b>15 - 18/11</b>	63,4	5,4	8,5	14,8	23,3
<b>19 - 25/11</b>	98,6	13,7	13,9	31,1	31,6

Las crecidas del 4 al 11 y del 19 al 25 de noviembre (Figura 43) parten de un caudal base (0,1 l/s en Bosc y de 4 l/s en Campàs para la primera, y de 8 l/s en Bosc y 49 l/s en Campàs), y tienen más de un caudal máximo.

La primera crecida fueron dos intensidades máximas de 11 y 10 mm/h las que generan los caudales máximos siendo el primero de 0,04 m<sup>3</sup>/s en Bosc y de 0,2 m<sup>3</sup>/s en Campàs, la segunda intensidad generó un caudal máximo en Bosc de 0,2 m<sup>3</sup>/s y en Campàs de 0,6 m<sup>3</sup>/s en Campàs.

La segunda crecida tiene dos momentos más intensos, la primera intensidad de 9,8 mm/h genera los caudales máximos de todo el año hidrológico con 0,34 m<sup>3</sup>/s en Bosc y de 1,02 en Campàs; la segunda intensidad de 5,5 mm/h genera un caudal en Bosc de 0,16 m<sup>3</sup>/s y en Campàs de 0,47 m<sup>3</sup>/s.

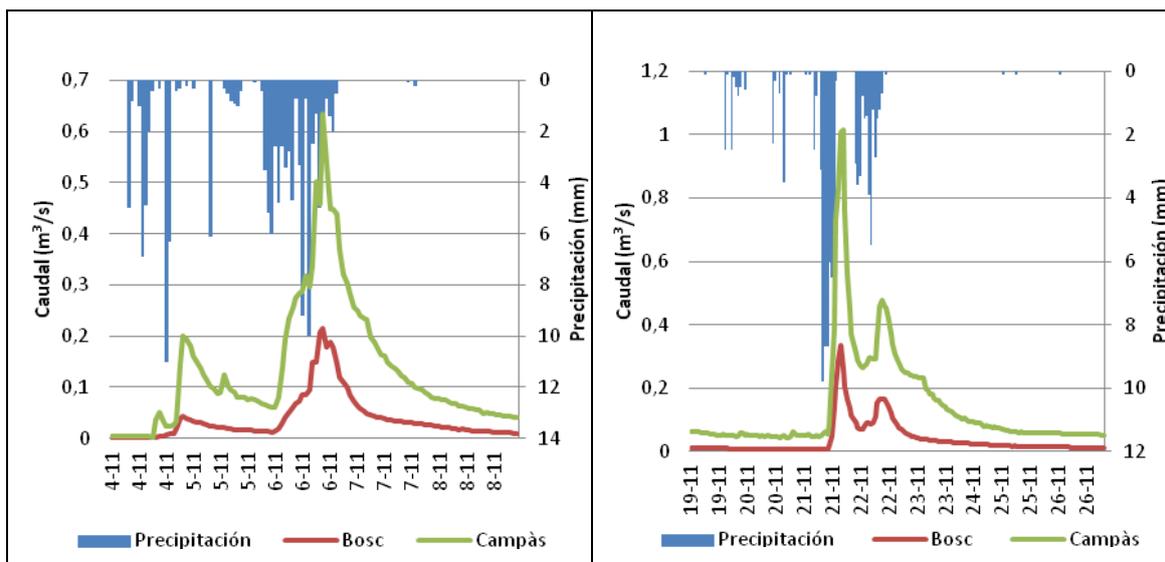


Figura 43. Del 4 al 8 y del 19 al 25 de noviembre de 2011.

### 6.6. La Nevada del 7 y 8 de marzo de 2010.

La nevada del 7 y 8 de marzo de 2010 (Figura 44) es un evento muy importante en la cuenca como ya se ha mencionado; una de las características más importantes que se observa en la crecida son los impulsos de caudal día/noche que se observan en la cuenca, situación típica de cuencas con presencia de nieve, caso que para el ámbito de cuencas costeras mediterráneas es poco habitual.

La precipitación total que registró el pluviómetro fue de 50 mm en 29 horas, teniendo en cuenta que los instrumentos de precipitación no están acondicionados para la medida de nieve. La escorrentía total acumulada en Bosc fue de 12,26 mm y de 20,78 mm en Campàs y con coeficientes de escorrentía de 24% y 41% respectivamente en un tiempo de 268 horas, la crecida más larga de todo el estudio. En la respuesta en Bosc respecto a Campàs durante las primeras 24 horas se nota una gran diferencia, siendo que en Bosc los picos son inferiores respecto a Campàs, esto debido posiblemente a que la nieve acumulada en los campos de cultivos tiene insolación a diferencia de las áreas de bosque. Posteriormente la respuesta de la cuenca es mayor en Campàs respecto a Bosc, y los tiempos de respuesta entre Bosc y Campàs son de 2 horas de diferencia, siendo primero en Bosc. El caudal máximo registrado fue el día 15 de marzo, siendo de 62 l/s en Bosc y de 108 l/s.

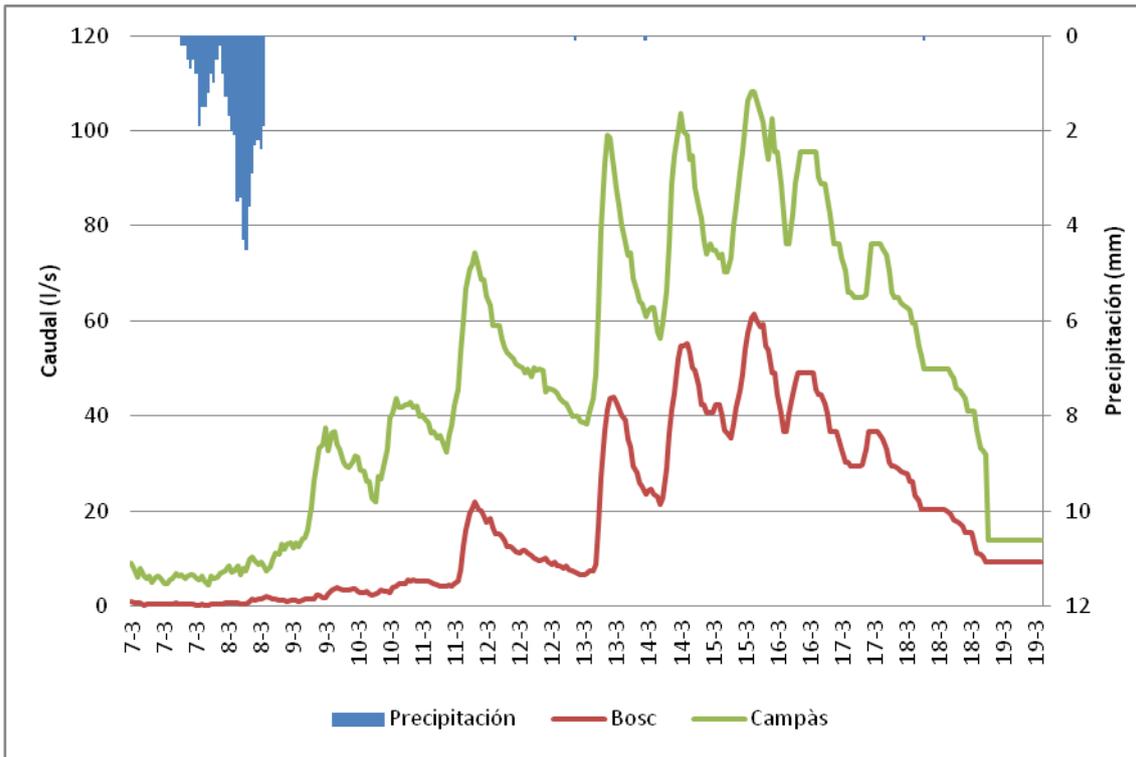
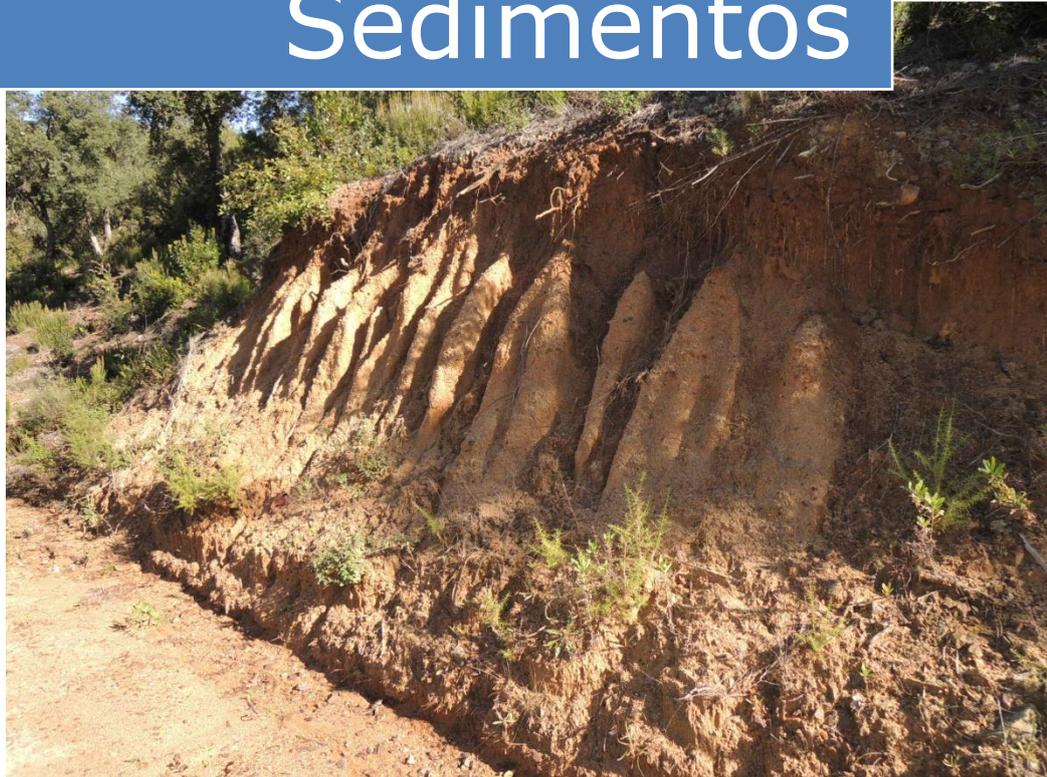


Figura 44. Nevada del 7 al 19 de marzo de 2010

# Capítulo V: Transporte de Sedimentos



Recordemos que los ejemplos aquí expuestos sirven para ver la tendencia de la dinámica de los sedimentos en tanto en suspensión como en disolución de todo el periodo de estudio. Por tanto, se ha podido comprobar con los datos obtenidos durante el periodo de estudio 2005-2012 que la producción de sedimentos tanto en disolución como en suspensión es mayor en Campàs con respecto a Bosc e incluso en un orden de magnitud respecto a la producción anual de sedimentos. Por otro lado, sabemos que son las crecidas las principales responsables de los mayores caudales de la cuenca, y por tanto también es en ellas donde se generan los mayores transportes de sedimentos en suspensión en la cuenca de Vernegà. En verano, debido a la ausencia de escorrentía los registros son nulos.

El número de registros de concentración de sedimentos en suspensión durante el periodo 2005-2012 en la estación de aforo de Bosc fueron 208 y 254 en Campàs; para el caso de los sedimentos en disolución fueron de 187 en Bosc y 212 en Campàs (Tabla 1). En general la mayoría de las concentraciones de sedimentos son mayores en Campàs respecto a Bosc, no obstante, se han encontrado registros mayores en la estación de Bosc para un mismo evento.

### **1. Análisis de la concentración de sedimentos a nivel general en las dos estaciones.**

La Tabla 1 muestra la estadística descriptiva de todos los registros de caudal y la concentración de sedimentos para las dos estaciones. Lo primero que se destaca es la gran diferencia que existe entre los registros máximos y mínimos alcanzados, que representan hasta 6 órdenes de magnitud de diferencia y que se traduce en un alto coeficiente de variación. Esto se debe a la gran diferencia de concentraciones en momentos de caudal base y de crecidas, donde la diferencia de la desviación estándar y los máximos es más notable. Destaca la diferencia que se establece entre el promedio y la mediana de las concentraciones. Los promedios están influenciados por los valores extremos de concentraciones mientras que las medianas muestran las concentraciones que están por debajo del 50% de los datos, y que son hasta un orden de magnitud inferiores a los promedios. Referente a la concentración de sedimentos en disolución, la variabilidad de los registros es menor, siendo en promedio mayor en Campàs, a pesar de que el registro máximo se registrase en la estación de Bosc.

**Tabla 1. Estadística descriptiva de los registros del caudal y la concentración de los sedimentos en suspensión y disolución.**

	Bosc			Campàs		
	Caudal (l/s)	C.S.S. (mg/l)	C.S.D. (mg/l)	Caudal (l/s)	C.S.S. (mg/l)	C.S.D. (mg/l)
<b>Número de datos</b>		208	187		254	212
<b>Promedio</b>	14,3	116,0	112,2	127,2	30,4	140,7
<b>Desv. Est.</b>	21,6	295,6	52,4	247,2	74,7	64,1
<b>Coef. Var. (%)</b>	151,1	254,8	46,7	194,4	245,1	45,6
<b>Mediana</b>	4,5	23,0	90,2	47,8	23,0	116,6
<b>Máximo</b>	78,9	2000,0	360,2	1705,9	1061,0	334,9
<b>Mínimo</b>	0,0	0,2	33,7	0,1	0,8	37,9

C.S.S.: Concentración de sedimentos en suspensión; C.S.D.: Concentración de sedimentos en disolución; Coef. Var.: Coeficiente de variación. Desv. Est.: Desviación estándar.

La Figura 1 y 2 representan las correlaciones de la concentración de sedimentos en suspensión y disolución respecto al caudal para las dos estaciones. En todos los casos los coeficientes de correlación son bajos, especialmente en el caso de las concentraciones de sedimento en suspensión ( $R^2 < 0.20$  en las dos estaciones). Los coeficientes de regresión para las concentraciones de sedimentos disueltos son mayores ( $R^2 = 0.28$  para Bosc y  $R^2 = 0.42$  para Campàs). En el caso de la estación de aforo de Bosc (Figura 1), podemos observar que existen varias concentraciones de sedimentos en suspensión para un mismo caudal, especialmente en los órdenes de magnitud de caudal entre 0,1 a 1 l/s y de 1 a 10 l/s. Es el caso de los registros cercanos a 1 l/s, donde se observa dos grupos de registros acumulados a un mismo caudal. Entre los órdenes de magnitud del caudal de 10 a 100 l/s sabemos que corresponden a momentos de crecidas, pero en este caso dichos registros corresponden a crecidas.

En la misma figura se muestra la correlación de la concentración de los sedimentos en disolución y el caudal, siendo inversamente proporcionales, es decir, a mayor caudal, menor cantidad de concentración de sedimentos en disolución, la concentración varía en los órdenes de magnitud de caudal entre 10 y 100 l/s y 100 l/s y 100 y 1000 l/s. superiores a 50 l/s se debe a los momentos de crecidas, donde no existe tampoco una buena correlación. Dichos resultados igualmente presentan una baja correlación y la mayoría de los registros se acumulan en caudales base. La dispersión de los registros de caudal.

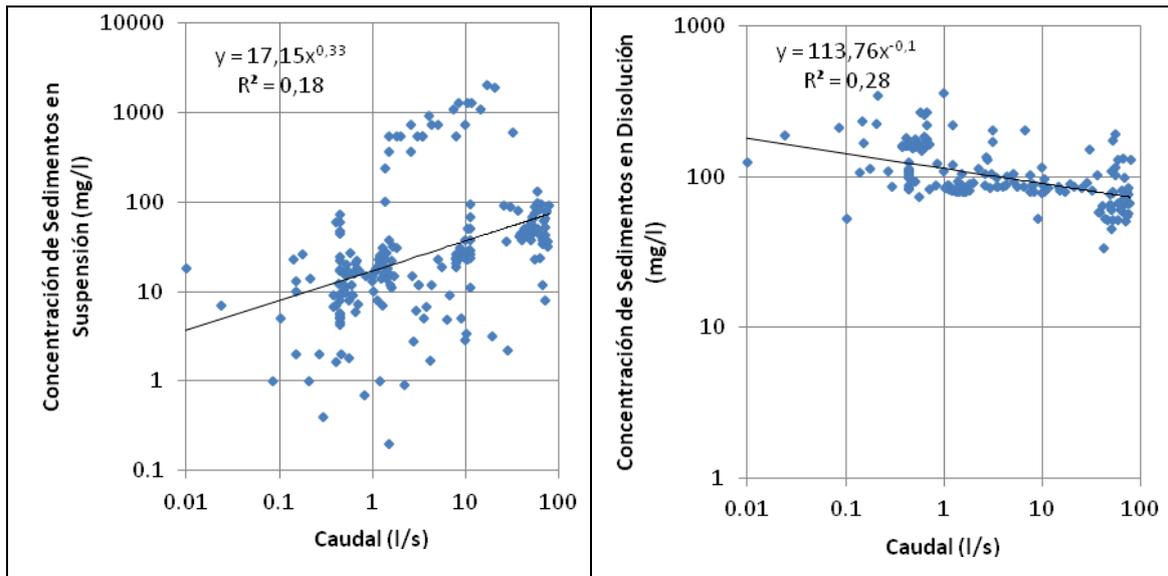


Figura 1. Correlación del caudal y la concentración de sedimentos en la estación de aforo de Bosc durante el periodo 2005-2012.

En la estación de aforo Campàs (Figura 2), al igual que en Bosc, para el caso de la correlación de los sedimentos en suspensión y el caudal, la correlación es muy baja, incluso es más baja en comparación con Bosc ( $R^2= 0,14$ ). La mayoría de los registros que se encuentran en caudales entre 1 l/s y 100 l/s corresponde a periodos de recesión de las crecidas, y existe un gran cúmulo de registros cercanos a 100 l/s que varían su concentración desde 10 mg/l hasta más de 50 mg/l. La concentración de sedimentos en disolución son los que mejor se ajustan a la correlación con el caudal ( $R^2= 0,42$ ) y corroboran una tendencia a la disminución a medida que aumenta el caudal.

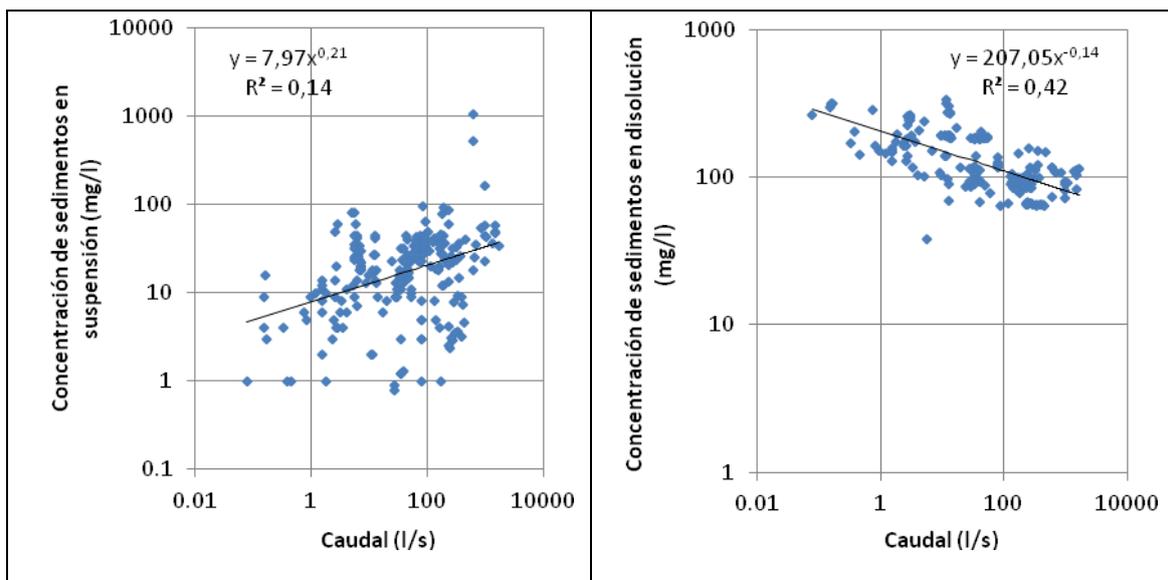
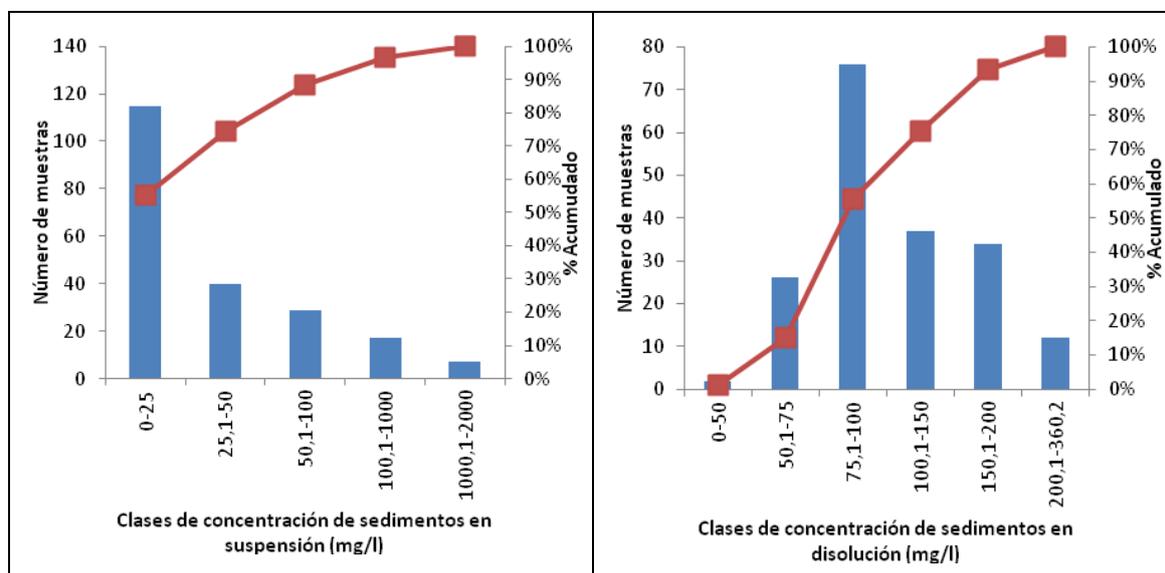


Figura 2. Correlación del caudal y la concentración de sedimentos en la estación de aforo Campàs durante el periodo 2005-2012.

### 1.1. Análisis de la frecuencia de la concentración de sedimentos.

La estación de aforo de Bosc presenta un 53% de registros de sedimento en suspensión por debajo de 25 mg/l, y el 3% de los registros son superiores a 1000 mg/l (Figura 3).

Para el caso de la concentración de los sedimentos en disolución presenta una distribución diferente a los registros de los sedimentos en suspensión. Sólo el 1% de los registros están por debajo de los 50 mg/l, haciendo que el 40% de los registros se encuentren en el rango de clases entre 75 y 100 mg/l. Las concentraciones de sedimentos en disolución que superaron los 200 mg/l no corresponden en su totalidad a momentos de caudal base, como la crecida del 12 y 13 de mayo de 2008 con un registro de 268 mg/l.

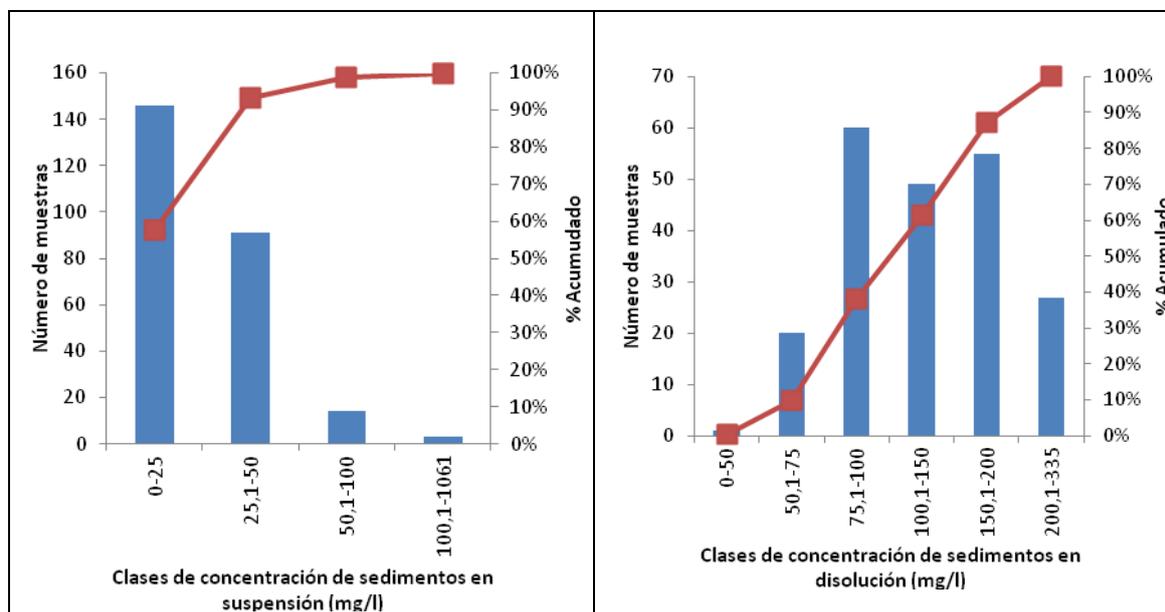


**Figura 3. Histograma de la frecuencia de concentración de sedimentos en suspensión y disolución en la estación de aforo Bosc para el periodo 2005-2012.**

Tanto en Campàs como en Bosc el 57% de los registros de concentración de sedimentos en suspensión corresponde a valores inferiores a 25 mg/l, y en Campàs, solo el 1,18% son superiores a 100 mg/l (Figura 4). En comparación con Bosc el último rango de clases (1000,1-2000) no fue tomado en cuenta ya que para Campàs el registro máximo fue de 1061 mg/l en la crecida de octubre de 2006.

Para el caso de la concentración de sedimentos en disolución en Campàs sucede el mismo efecto que en Bosc, esto es, la mayoría de los registros se encuentran por encima de los 50 mg/l de concentración de sedimentos en disolución, encontrándose solo un caso inferior a 50 mg/l. La mayoría de los registros se acumulan entre los 75 y los 200 mg/l correspondiendo en este grupo de clases al 77,4%. En los registros

superiores se acumulan el 12,7% de los registros siendo el registro mayor de 335 mg/l y corresponde al mismo momento que en la estación de aforo de Bosc (la crecida de mayo 2008).



**Figura 4. Histograma de la frecuencia de concentración de sedimentos en suspensión y disolución en la estación de aforo Campàs para el periodo 2005-2012.**

### 1.2. Análisis de la concentración de sedimentos a nivel de crecidas.

La primera crecida registrada en las dos estaciones en el mismo tiempo fue la crecida de octubre de 2006 (Figura 5 y 6), la precipitación total fue de 66,2 mm y la intensidad máxima de 47,8 mm/h con una respuesta de escorrentía de 1,09 mm en Bosc y de 5,31 mm en Campàs (capítulo IV, apartado 2.11.3.).

La Figura 5 muestra la respuesta hidrológica en Bosc, que pasa de un caudal cero a un máximo de 174,9 l/s en una hora; de igual manera la concentración de sedimentos en suspensión tiene el registro máximo en el momento del máximo caudal con 2000,0 mg/l. La primera muestra recogida fue la del máximo de crecida, no teniendo muestras anteriores al pico de crecida. Para el caso de la concentración de sedimentos en disolución el registro más bajo se recogió tres horas después del pico de los sedimentos en suspensión, con 78,8 mg/l. Esta muestra no es tan diferente del resto de los registros.

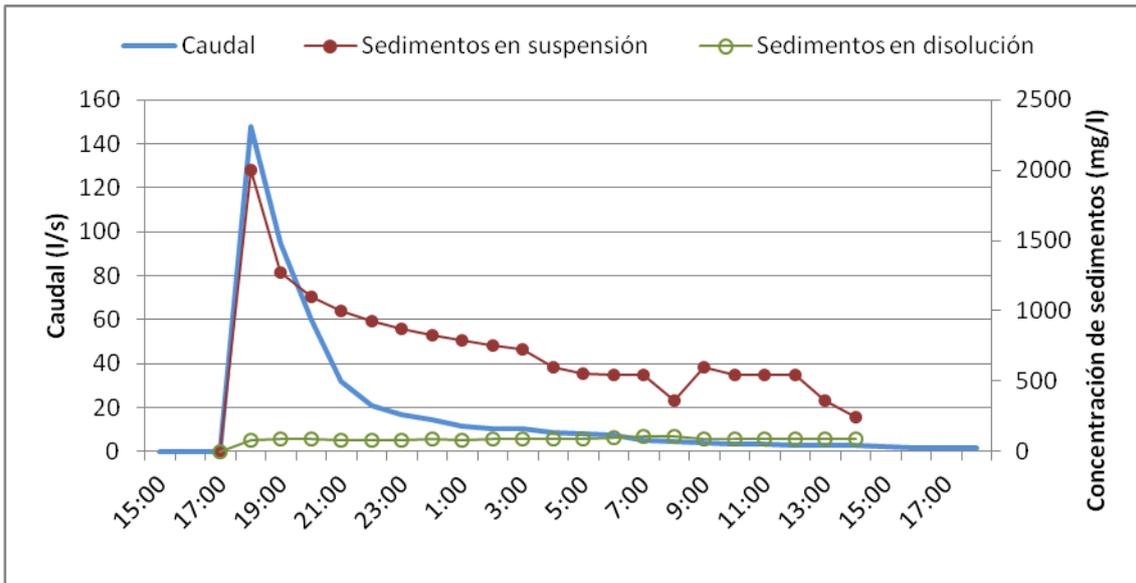


Figura 5. Crecida del 18 al 20 de Octubre de 2006 en la estación de aforo de Bosc.

Para el caso de la crecida en Campàs (Figura 6) el caudal máximo fue de 1178,2 l/s y se recogieron las muestras cada dos horas, coincidiendo el pico de la concentración de sedimentos en suspensión con el pico de la crecida con 1061,0 mg/l. Para el caso de los sedimentos en disolución el menor registro fue de 71,7 mg/l ocurriendo 4 horas después del caudal máximo.

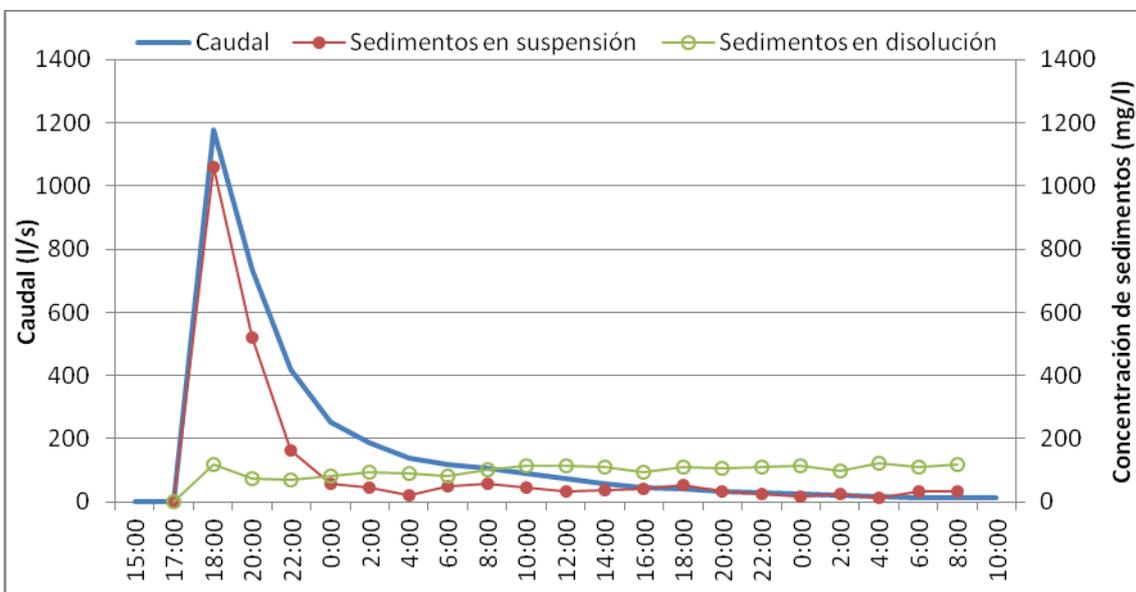
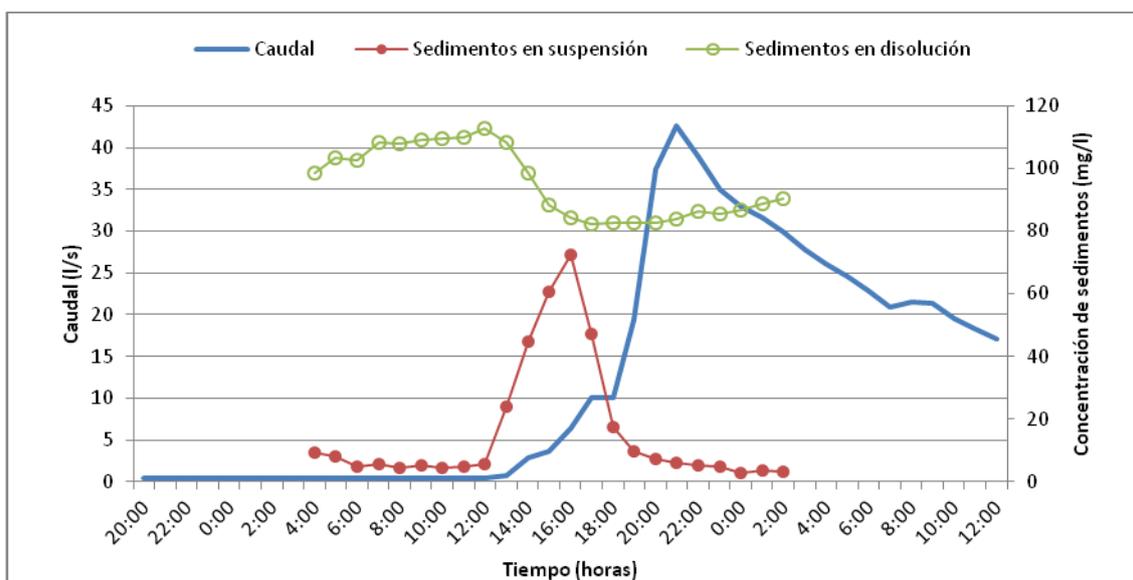


Figura 6. Crecida del 18 al 20 de octubre de 2006 en la estación de aforo de Campàs.

Otra crecida importante registrada en Bosc para el análisis de la dinámica de la concentración de los sedimentos es la crecida del 4 al 8 de noviembre de 2011 (Figura 7), una crecida con caudal base y más de dos picos, el caudal máximo de 42,6 l/s fue el

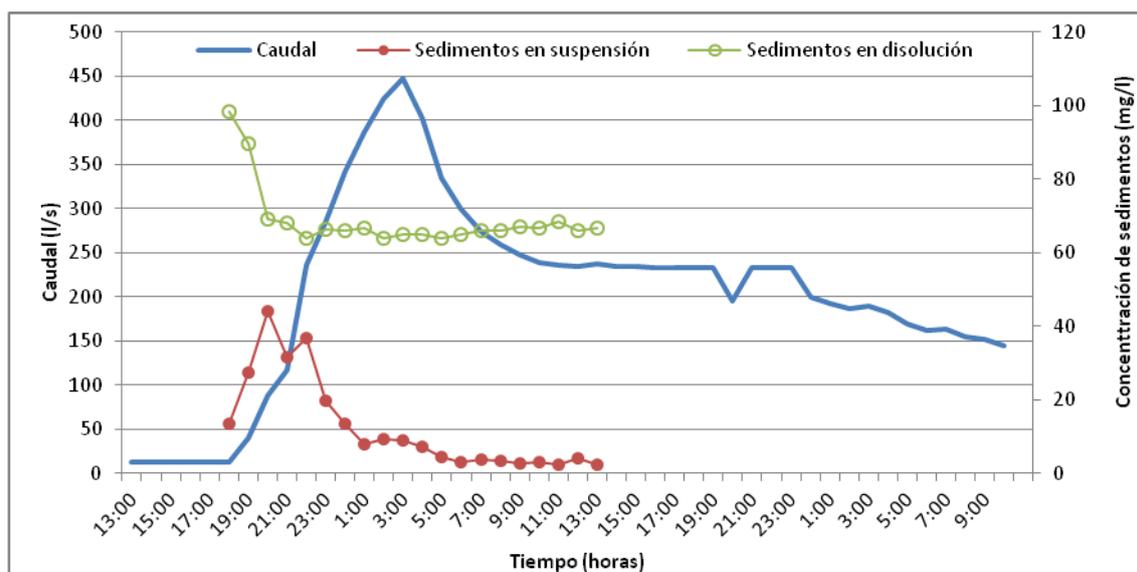
primer pico de la crecida, muy por debajo de los sucesivos (42 l/s y 21 l/s), y ocurrió 5 días después de la primera crecida del año hidrológico (Capítulo 4, página 56), ocasionando un efecto de respuesta en la concentración de sedimentos, y dado el tiempo de respuesta de la cuenca se pudo recoger un total de 12 muestras horarias antes del pico máximo, siendo la concentración de sedimentos máximo de 60,5 mg/l ocurriendo 5 horas antes. La concentración de sedimentos en disolución tienen tres momentos destacables, el primero que asciende hasta que comienza la respuesta de la cuenca, el segundo, descendiendo su concentración a 82,5 mg/l y por último, nuevamente aumentando.

El factor más importante de esta crecida es que la concentración de los sedimentos en disolución es mayor a la concentración de los sedimentos en suspensión. Este efecto es diferente a la crecida anterior, y sucede muy frecuentemente en crecidas posteriores al 2009. Un año después del año de la sequía y 8 años después del inicio de la intervención de los planes técnicos de gestión forestal.



**Figura 7. Crecida del 4 al 8 de noviembre de 2011 en la estación de aforo Bosc.**

Para Campàs la crecida registrada del 15 al 18 de noviembre de 2011, la tercera de las cuatro que tuvieron lugar en un periodo de tiempo inferior a un mes en el año hidrológico de 2011-2012 (Figura 8) pertenece al Grupo 2.1 (crecidas con caudal base y un caudal máximo) y presenta las mismas características de generar el pico de los S.S. de 44 mg/l antes del caudal máximo de 447,2 l/s.



**Figura 8. Crecida del 15 al 17 de noviembre de 2011 en la estación de aforo de Campàs.**

Uno de los aspectos que puede destacarse de las crecidas registradas es que en la mayoría del tiempo, para todos los registros de la concentración de sedimentos que se ha analizado, los sedimentos en disolución superan mayoritariamente a los sedimentos en suspensión, incluso en crecidas como las que aquí se describieron.

### 1.2.1. Análisis de las histéresis de la concentración de sedimentos en suspensión en crecidas.

La crecida del 18 al 20 de octubre de 2006 corresponde a una crecida del Grupo 1.1., con un solo pico y sin caudal base previo (Figuras 5 y 6), la histéresis producida es anti horaria para Bosc y horaria para Campàs (Figura 9). Los valores máximos coinciden con los máximos de los sedimentos en suspensión. Estas crecidas, como lo describimos en el capítulo anterior, corresponden a unas condiciones de la cuenca posteriores al verano y por tanto en un ambiente seco. Estas histéresis tienen una curvatura pequeña, mostrando que el evento ocurrió de forma rápida y que la disponibilidad de sedimentos en suspensión se concentra en el momento del pico de la crecida, de ahí a que se pueda pensar que normalmente la disponibilidad de los sedimentos en suspensión sea baja en la cuenca. Inclusive se muestra que la disponibilidad fue mayor en Bosc, ya que además de tener la concentración mayor, también disminuye de forma paulatina a diferencia de Campàs donde la concentración se encuentra por debajo de los 100 mg/l rápidamente.

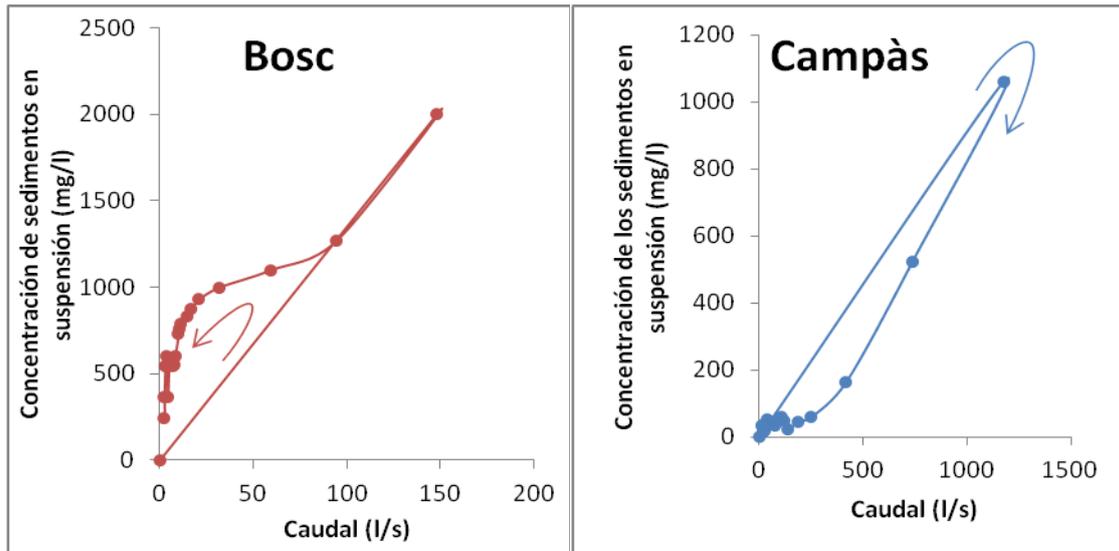


Figura 9. Crecida del 18 y 19 de octubre de 2006 en la estación de aforo de Bosc.

La crecida del 12 y 13 de marzo de 2011 en la estación de aforo de Bosc (Grupo 2.2.) tiene una histéresis positiva (Figura 10), ya que genera el punto de mayor concentración de sedimentos en suspensión (93,0 mg/l) 2 horas antes del caudal máximo (78,9 l/s). Ocurrió después de varios meses sin otros episodios destacables, pero el caudal base previo estaba presente. La precipitación fue de 100 mm acumulados en más de 100 horas, y con una escorrentía total de 11,29 mm y un coeficiente de escorrentía de 11,2%. Tiene mayor número de registros en el momento anterior al pico de la crecida y podemos ver que la histéresis es más abierta. La apertura de la histéresis está muy relacionada con la disponibilidad del sedimento: cuanto más circular sea, más disponibilidad de sedimento. En este caso, parece que todo el que había se agotó rápidamente.

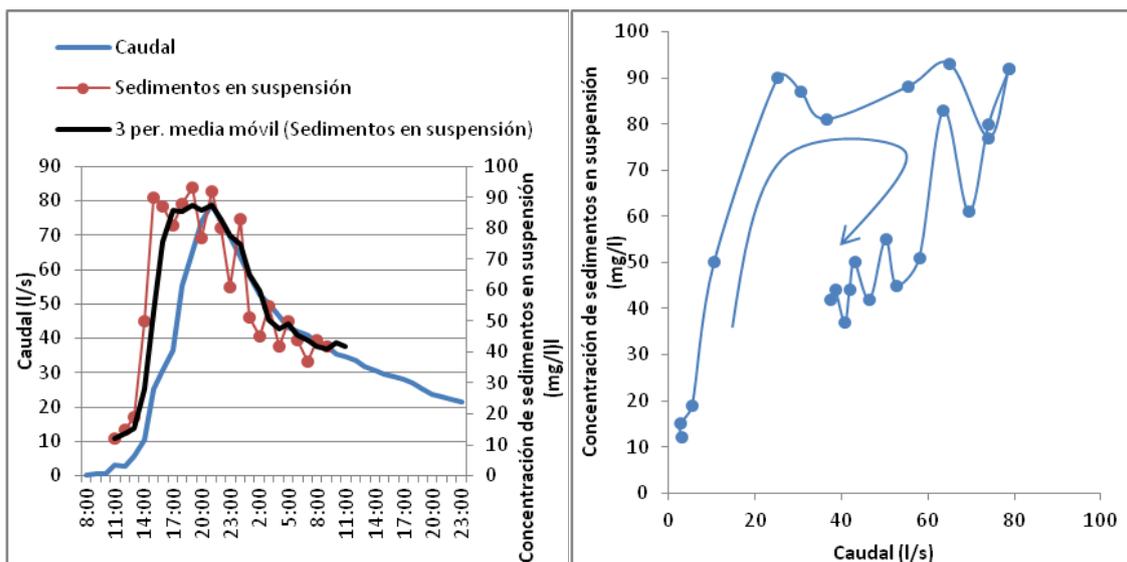


Figura 10. Primer pico de la crecida e histéresis del 12 al 13 de marzo de 2011 en la estación de aforo de Bosc.

En las crecidas del 4 al 8 de noviembre en Bosc y del 15 al 17 de noviembre de 2011 en Campàs (Figura 11), las histéresis son positivas, y el caudal previo base estaba presente para las dos crecidas; además sabemos que el tiempo entre las crecidas son bajos comparados con otro tipo de crecidas aquí señaladas. Para los dos casos en el momento de aumento del caudal la concentración es mayor, y durante el momento de llegar al caudal máximo la concentración de sedimentos en suspensión baja, haciendo que para el caso de Bosc las curvaturas sean muy angostas a diferencia de Campàs.

Para el caso de Bosc el pico de sedimentos de 72,6 mg/l ocurrió 5 horas antes del caudal máximo de 42,6 l/s. En Campàs, el caudal máximo registrado fue el más alto de los tres anteriores, y el coeficiente de escorrentía fue igualmente el mayor con 23,3%, la concentración máxima registrada fue de 44,0 mg/l y ocurrió 8 horas antes del pico de caudal de 447,2 l/s. estas histéresis positivas indican que al inicio de la crecida se moviliza todo el sedimento mientras que el agua tarda más en concentrarse y circular.

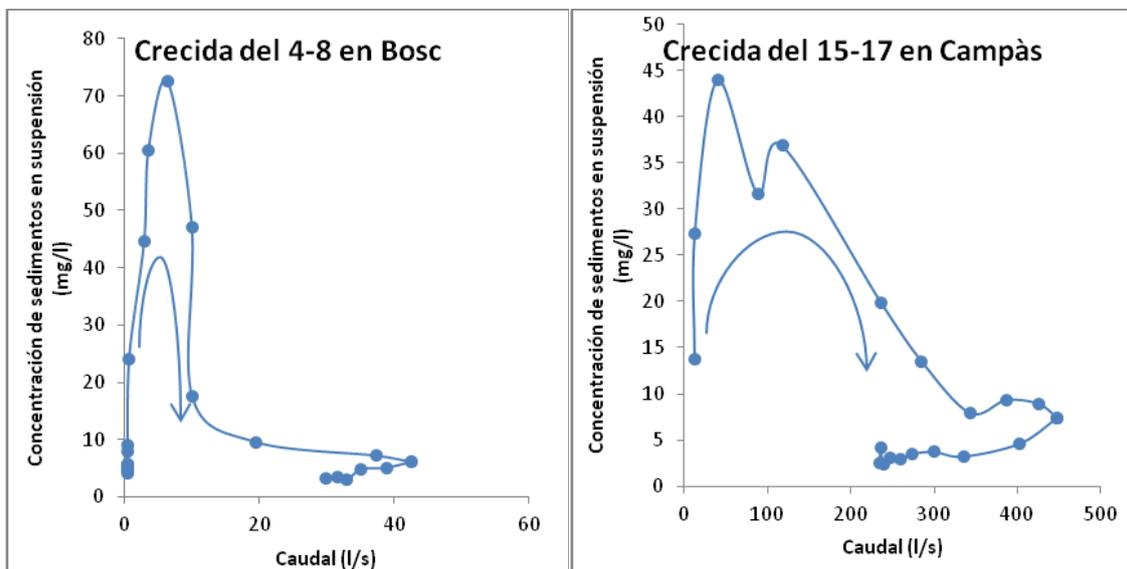


Figura 11. Análisis de la histéresis de la crecida del 4 al 8 de noviembre en Bosc y del 15 al 17 de noviembre de 2011 en Campàs.

## 2. Análisis de la producción de sedimentos

### 2.1. Análisis anual de la producción de sedimentos.

Se presentan en la Tabla 2 los totales de la producción de sedimentos tanto en suspensión como en disolución del periodo de estudio 2005-2012. En promedio para Campàs la producción de sedimentos de 11,4 t/km<sup>2</sup>año es superior a Bosc con 7,1 t/km<sup>2</sup>año. Hay que tener en cuenta que en estos datos influye directamente los

resultados obtenidos de la escorrentía en el capítulo anterior, donde la escorrentía es mayor en Campàs respecto a Bosc. En cuanto a los coeficientes de variación existe una alta variabilidad anual de la producción de sedimentos, especialmente en Campàs, donde la producción de sedimentos en suspensión superó el 100% en el coeficiente de variación con tan solo 7 años de estudio. El coeficiente de variación respecto a la producción total es mayor en Bosc, ya debido a que es mayor la variabilidad anual de la producción de sedimentos en disolución respecto a Bosc. Estas mismas tendencias las encontramos con respecto a la concentración de sedimentos.

En Campàs durante los años iniciales del 2005/6 y 2006/07 la producción de sedimentos en suspensión total es mayor, pero en los años siguientes para las dos estaciones de aforo, y finalmente en el promedio de los 7 años de estudio, la producción de los sedimentos en disolución es mayor. En el año 2006/07 ocurre que para Bosc la producción en suspensión fue menor que en disolución sabiendo que fue el año donde la concentración de sedimentos en suspensión sobrepasó los promedios de todos los registros que se han obtenido en las dos estaciones de aforo. Además este año fue el sucesivo al año hidrológico 2005/06 donde se registraron los mayores registros de caudal y escorrentía en la cuenca.

El registro anual que más se destaca es 2005/06 en Campàs, con 14,6 t/km<sup>2</sup> año. En Bosc el mayor registro tuvo lugar en el año hidrológico 2009/10 con 2,7 t/km<sup>2</sup>año. Es interesante ver que no existe una semejanza en la tendencia de los resultados entre Bosc y Campàs, el año con menor carga de sedimentos es 2007/08 con 0,04 t/km<sup>2</sup>año en Bosc y de 0,87 t/km<sup>2</sup>año en Campàs; este año como lo vimos en el capítulo anterior, fue el que menor escorrentía superficial generó de todo el periodo 2005-2012.

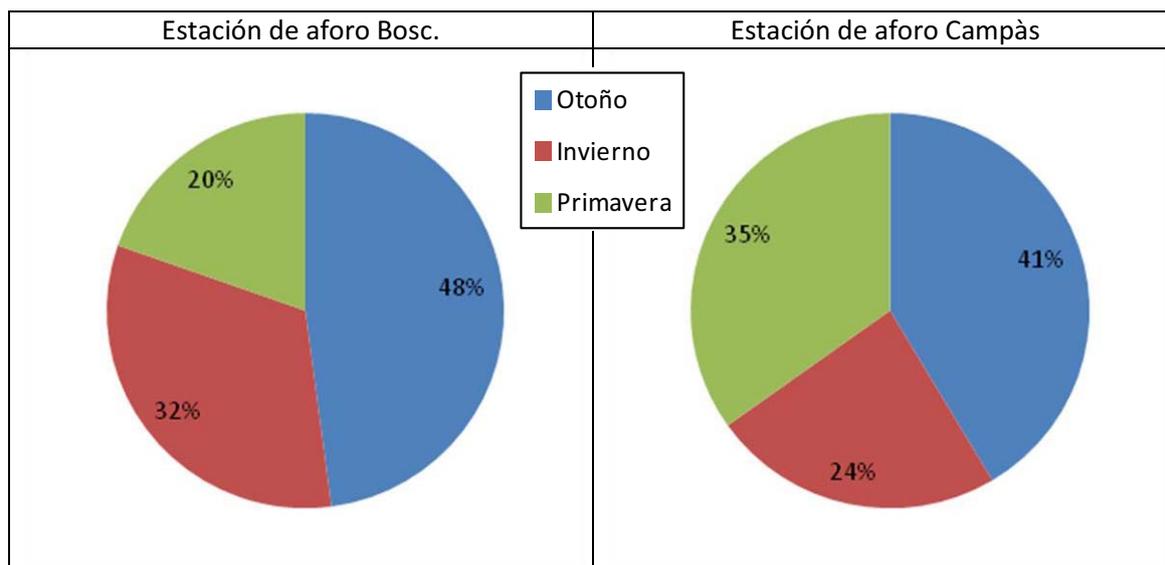
**Tabla 2. Producción de sedimentos en disolución y en suspensión total anuales en el periodo 2005-2012.**

Año Hidrológico	Bosc (t/km <sup>2</sup> año)			Campàs (t/km <sup>2</sup> año)		
	P.S.S.	P.S.D.	Total	P.S.S.	P.S.D.	Total
2005/06	2,9	1,57	4,06	14,60	7,66	22,25
2006/07	0,77	1,36	2,13	7,52	2,80	10,33
2007/08	0,00*	0,04	0,04	0,05	0,82	0,87
2008/09	0,01	0,25	0,27	0,60	5,05	5,65
2009/10	1,72	2,76	4,49	3,66	9,51	13,17
2010/11	1,02	2,48	3,50	2,77	13,55	16,32
2011/12	0,58	2,30	2,87	1,16	10,34	11,50
<b>Promedio</b>	<b>0,94</b>	<b>1,54</b>	<b>2,48</b>	<b>4,34</b>	<b>7,10</b>	<b>11,44</b>
<b>C.V. (%)</b>	<b>96,0</b>	<b>69,7</b>	<b>71,2</b>	<b>119,4</b>	<b>63,0</b>	<b>60,8</b>

P.S.S.: Producción de sedimentos en suspensión anual. P.S.D.: Producción de sedimentos en disolución anual. C.V.: coeficiente de variación. \*Kg: 2 kg/km<sup>2</sup>año.

## 2.2. Análisis estacional de la producción de sedimentos.

En promedio, al igual que las precipitaciones y la escorrentía (capítulo anterior), es en otoño donde se genera la mayor concentración de sedimentos tanto en disolución como en suspensión con un 48% en la estación de Bosc y un 41% en la estación de Campàs (Figura 13). La variación porcentual media más importante se genera en la primavera (Bosc 20% y Campàs 35%), una razón es que en primavera la escorrentía en Campàs suele permanecer por más tiempo en comparación con Bosc.



**Figura 13. Distribución media estacional en las dos estaciones de aforo para la producción de sedimentos.**

La Tabla 3, muestra el promedio de la producción de sedimentos tanto en disolución como en suspensión a escala estacional para las dos estaciones en el periodo 2005-2012, obteniendo como resultado que en promedio de los datos recogidos, la producción de sedimentos en disolución son mayores que en suspensión en las dos estaciones de aforo, y de igual manera son mayores los resultados en Bosc que en Campàs. A pesar de que la primavera es la que aporta menor cantidad de escorrentía superficial los registros de producción de sedimentos en disolución para Campàs son altos, un motivo puede ser que las crecidas de la primavera mayoritariamente se registraron durante el periodo de recesión, y es allí donde la concentración de sedimentos en disolución es mayor.

**Tabla 3. Escorrentía, Producción de sedimentos en suspensión y disolución promedio estacional para el periodo 2005-2012 para Bosc y Campàs.**

	Bosc (t/km <sup>2</sup> )				Campàs (t/km <sup>2</sup> )			
	Escorrentía (mm)	P.S.S.	P.S.D.	Total	Escorrentía (mm)	P.S.S.	P.S.D.	Total
<b>Otoño</b>	4,8	0,15	0,30	0,45	16,2	0,71	0,98	1,7
<b>Invierno</b>	4,3	0,12	0,18	0,30	10,2	0,28	0,69	0,97
<b>Primavera</b>	1,9	0,05	0,13	0,18	4,2	0,45	0,98	1,4

P.S.S.: Producción de sedimentos en suspensión anual. P.S.D.: Producción de sedimentos en disolución anual.

### 2.3. Análisis mensual de la producción de sedimentos en las dos estaciones de aforo durante el periodo 2005-2012.

La figura 13 presenta la producción de sedimentos mensual tanto en suspensión como en disolución y el acumulado durante el periodo 2005-2012 en las dos estaciones de aforo. Se destaca que durante todo el transcurso del año 2010 la producción de sedimentos en suspensión acumulados comienza a ser menor, ocurriendo en la estación de Bosc en el mes de febrero de 2010, y para Campàs durante el inicio del año hidrológico 2010. Este efecto ocurre por la gran cantidad producción de sedimentos en suspensión ocurridos durante el año hidrológico 2005/06, y 2006/07 en Campàs, correspondientes a los años en que se registraron las mayores concentraciones.

Durante el mes de octubre de 2005 fue cuando se registró la crecida con mayor escorrentía superficial causada por una precipitación de 250 mm. En la estación de aforo de Bosc la producción de sedimentos en suspensión fue la mayor con 1,1 t/km<sup>2</sup> mes y la producción de sedimentos en disolución fue de 0,7 t/km<sup>2</sup> mes.

La Producción de Sedimentos en suspensión en Campàs de octubre y noviembre de 2005, y de abril de 2007, fue mayor en comparación con Bosc y el resto de años. Para el caso de octubre de 2005 fue de 4,4 t/km<sup>2</sup> mes, generados a partir de una escorrentía de 143,3 mm, la mayor del periodo de estudio 2005-2012. Para el siguiente mes, en noviembre fue de 8,1 t/km<sup>2</sup> mes, en este mes hay que tener en cuenta que la escorrentía superficial fue inferior a octubre de 2005 con 31,5 mm.

En el año 2006/07 la principal producción de sedimentos fue en suspensión para las dos estaciones, ocurriendo en Bosc en octubre con 0,7 t/km<sup>2</sup> mes, incluso superior a la generada en Campàs con 0,5 t/km<sup>2</sup> mes, derivados de una precipitación 111,5 mm y una escorrentía de 0,8 mm en Bosc y de 4,7 mm en Campàs. Este mes fue donde se recopilaron los mayores registros de concentración de sedimentos en suspensión de todo el estudio. Abril fue el mes más lluvioso de este año (124,4 mm) y con la mayor

escorrentía; la respuesta de producción de sedimentos en suspensión en Campàs fue la más importante del año con 7,0 t/km<sup>2</sup> mes, siendo muy superior a la generada en Bosc, con 0,06 t/km<sup>2</sup> mes. A partir de este año la dinámica de una mayor producción de sedimentos comienza a cambiar dándole un papel importante a la producción de sedimentos en disolución.

El año 2007/08, fue un año con poca escorrentía superficial y por tanto la producción de sedimentos fue muy baja, siendo en total de 0,04 t/km<sup>2</sup> año en Bosc y de 0,87 t/km<sup>2</sup> año en Campàs. En el mes de mayo, se genera una pequeña crecida (del 12 al 13, capítulo 4, ), aportando una mayor producción de sedimentos en disolución con 0,6 t/km<sup>2</sup> mes.

En el siguiente año 2008/09 la producción de sedimentos en disolución en el mes de abril en Bosc fue de 0,2 t/km<sup>2</sup> mes y en febrero en Campàs de 2,2 t/km<sup>2</sup> mes, mes en el que la escorrentía fue mayor en Campàs, generándose 18,78 mm. Este año es importante porque la producción de sedimentos en disolución comienza a acercarse a los registros acumulados de la producción de sedimentos en disolución.

El año hidrológico de 2009/10, fue el año en que se produjo la nevada de marzo de 2010, donde la producción de sedimentos en disolución de Bosc fue de 0,2 t/km<sup>2</sup> mes y de 2,8 t/km<sup>2</sup> mes en Campàs. Para este mes la escorrentía superficial fue de 6 mm en Bosc y de 24,2 mm en Campàs. La escorrentía comenzó en enero de 2010, y a partir de este mes la acumulación de sedimentos en disolución en Bosc fue mayor. Mayo, con la mayor escorrentía superficial en las dos estaciones registró las mayores respuestas en la producción de sedimentos, con 1,0 t/km<sup>2</sup> mes en suspensión y 1,8 t/km<sup>2</sup> mes en disolución en Bosc, y con 2,1 t/km<sup>2</sup> mes de suspensión y 3,5 t/km<sup>2</sup> mes en disolución en Campàs.

En 2010/11 se destaca la diferencia y no correlación con la producción de sedimentos entre Bosc y Campàs, porque en Bosc la producción de sedimentos en suspensión y disolución se dieron mayoritariamente en marzo, pero en Campàs el mes con mayor producción de sedimentos en suspensión 1,9 kg/km<sup>2</sup> fue en marzo igualmente, pero no corresponde al mes con mayor disolución.

En el último año hidrológico de estudio 2011/12, se destacan los registros de producción de sedimentos en disolución de noviembre, ya que para ambas estaciones corresponde a los registros más altos del periodo 2005-2012; La escorrentía del mes en orden de magnitud son los segundos más importantes de todo el periodo de estudio con 36,6 mm en Bosc y de 90,2 mm en Campàs. La producción de sedimentos en disolución de Bosc para noviembre fueron 1,8 t/km<sup>2</sup> mes y de 6,8 t/km<sup>2</sup> mes para Campàs. Para los siguientes meses, dado que no hubo más crecidas, la producción de

sedimentos disminuye paulatinamente hasta el mes de mayo, donde termina la escorrentía superficial del año hidrológico.

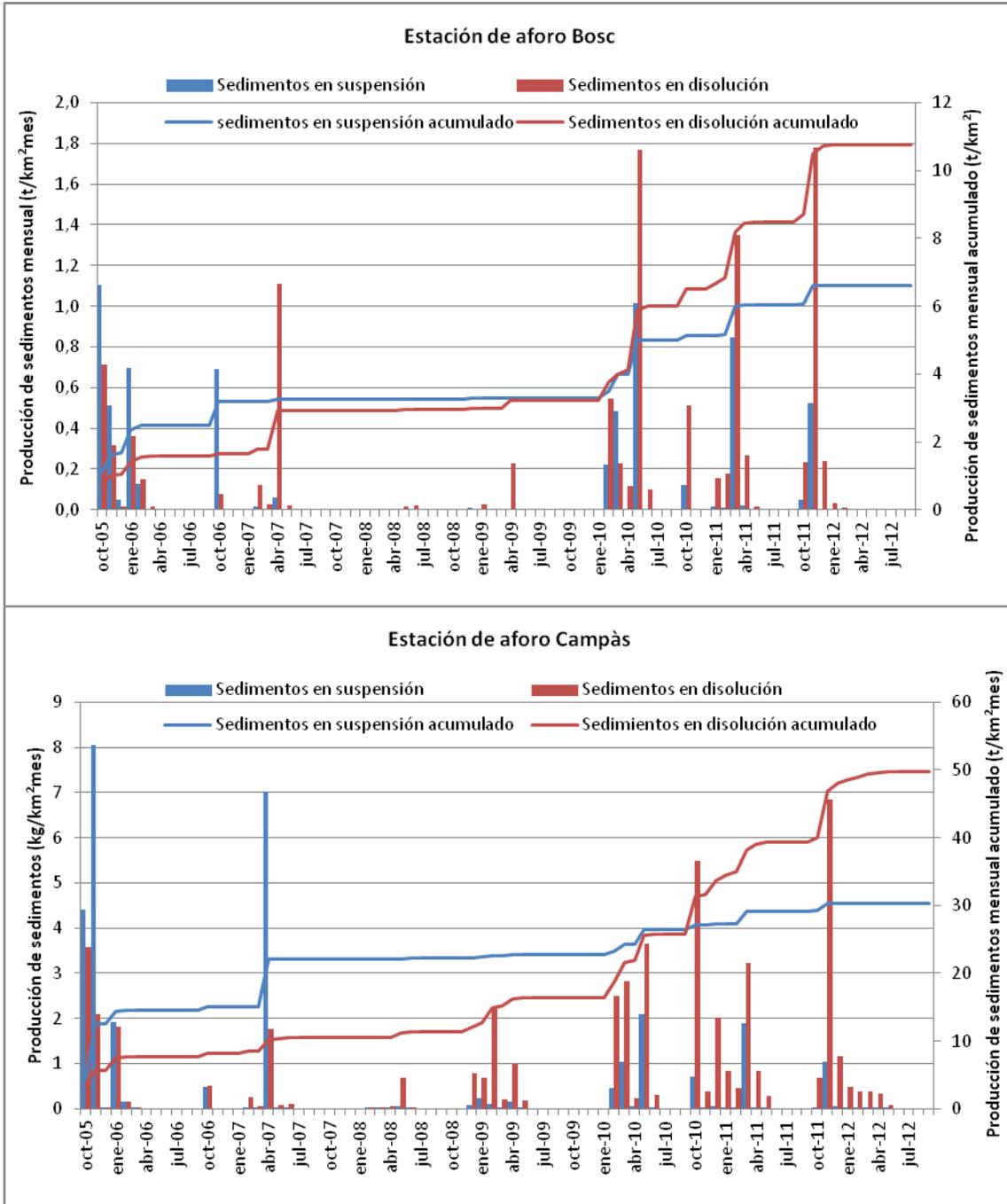


Figura 13. S.S. y S.D. total mensual en Bosc y Campàs en el periodo 2005-2012.

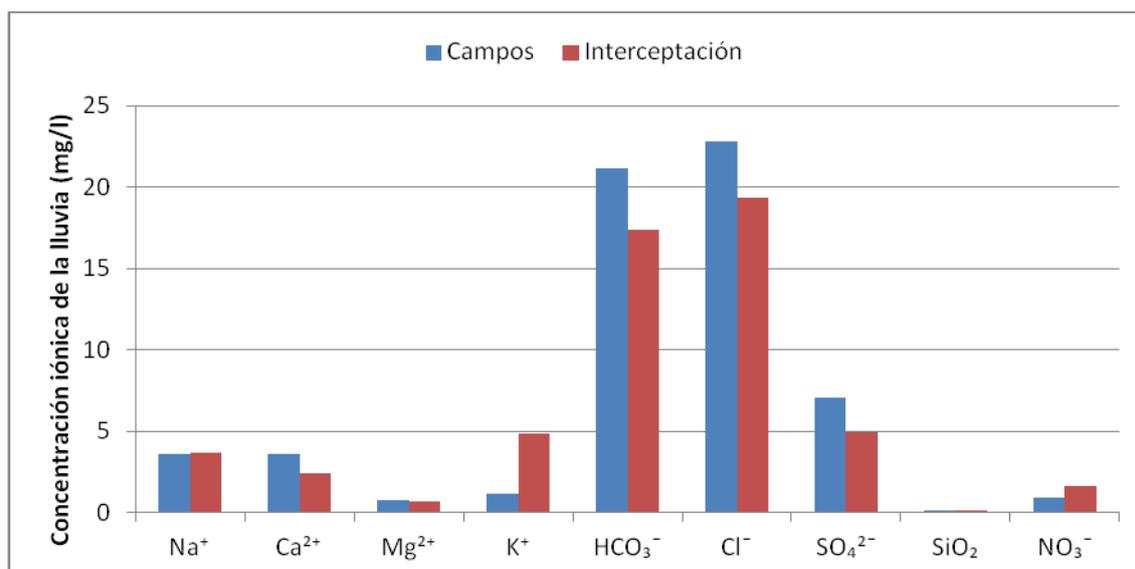
### 3. Análisis Iónico.

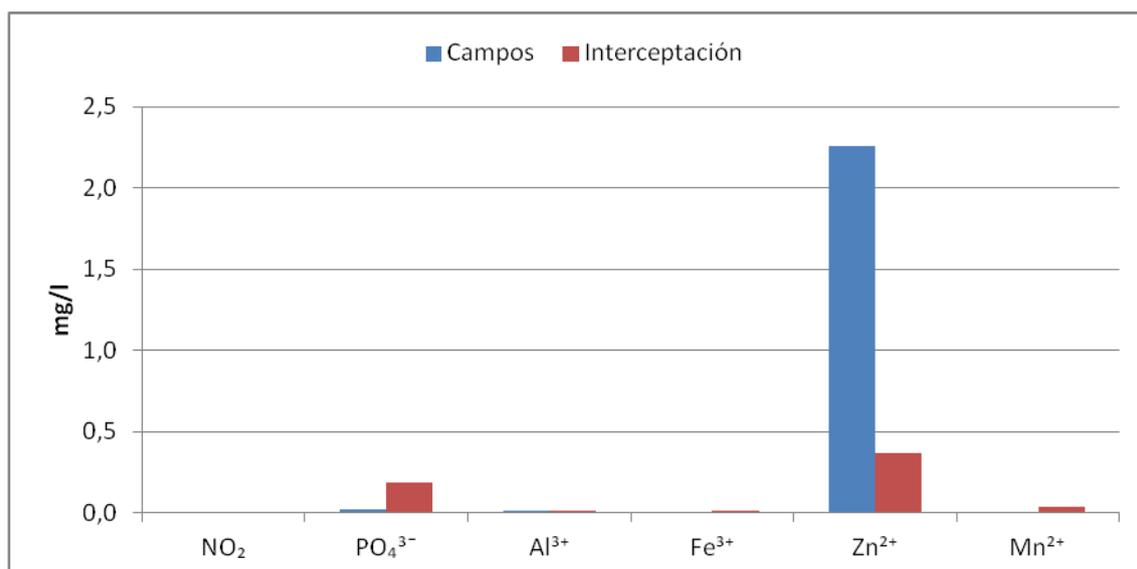
#### 3.1. Análisis iónico de la lluvia.

Los registros acumulados durante el periodo 2006-2009 en los puntos de muestreo de Campos e Interceptación en la cuenca de Vernegà, se observa el papel importante de la composición química de la lluvia por el cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) y los bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ). En promedio, para el punto Campos el  $\text{HCO}_3^-$  fue de 21,1 mg/l con un coeficiente de variación de 71,4%, y el  $\text{Cl}^-$  fue de 22,8 mg/l y un coeficiente de variación de 63,3%. Para el punto Interceptación el  $\text{HCO}_3^-$  fue de 17,4 mg/l y un coeficiente de variación de 86,2 % y para el  $\text{Cl}^-$  fue de 23,6 mg/l y 82,0%. Por tanto en la lluvia en promedio es mayor la concentración del  $\text{Cl}^-$  que los  $\text{HCO}_3^-$ , representando el  $\text{Cl}^-$  en el punto Campos el 35,9% y en Interceptación el 34,8%.

En siguiente orden de magnitud fueron los iones  $\text{SO}_4^{2-}$  >  $\text{Na}^+$  >  $\text{Ca}^{2+}$  >  $\text{K}^+$  >  $\text{NO}_3^-$  >  $\text{Mg}^{2+}$  >  $\text{SiO}_2$ , y en menor escala fueron los iones  $\text{Zn}^{2+}$  >  $\text{PO}_4^{3-}$  >  $\text{Mn}^{2+}$  >  $\text{Al}^{3+}$  >  $\text{Fe}^{3+}$ . El ión que mayor diferencia presenta entre los dos puntos de muestreo fue el ión  $\text{Zn}^{2+}$  donde el punto de Campos presentó un registro de 2,3 mg/l y un coeficiente de variación de 105,1% y para el caso del punto Interceptación fue de 0,3 mg/l y 186,8% de coeficiente de variación.

En orden,  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{Mn}^{2+}$  superan los registros en el punto de Interceptación en comparación con el punto de Campos, de los cuales la mayor diferencia la representa el  $\text{NO}_3^-$  siendo para Campos de 0,91 mg/l y un coeficiente de variación de 124,9% y en Interceptación de 1,60 y un coeficiente de variación de 83,9%.





**Figura 14. Promedio iónico de la lluvia en Campos e interceptación durante los años 2005 y 2009.**

### 3.2. Análisis iónico de la escorrentía superficial.

En promedio, en la exportación de materiales en disolución para las dos áreas de captación destaca, al igual que en la lluvia, la concentración de bicarbonatos y cloruros (Figura 15). La concentración de  $\text{HCO}_3^-$  en Bosc es de 52,6 mg/l y coeficiente de variación de 55,6% y el  $\text{Cl}^-$  con 39,7 mg/l y 51,8%; para Campàs el  $\text{HCO}_3^-$  es de 57,1 mg/l y 60,7% y el  $\text{Cl}^-$  con 33,4 mg/l y 61,2%.

En general, para las dos estaciones de aforo tenemos en orden de magnitud los iones:  $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{SiO}_2 > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NO}_3^-$  y en menor escala otros iones como el  $\text{Al}^{3+} > \text{Fe}^{3+} > \text{PO}_4^{3-} > \text{Zn}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{NO}_2^-$ . Los registros promedio de Bosc que superan a Campàs son los iones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{PO}_4^{3-}$ , siendo la mayor diferencia el  $\text{Cl}^-$  con 39,7 mg/l para Bosc y 33,4 mg/l para Campàs.

En general el  $\text{HCO}_3^-$  en Bosc representa el 38,1% de los sedimentos en disolución y en Campàs representa el 38,5%; para el caso del  $\text{Cl}^-$  representa el 28,8% en Bosc y el 22,6% en Campàs.

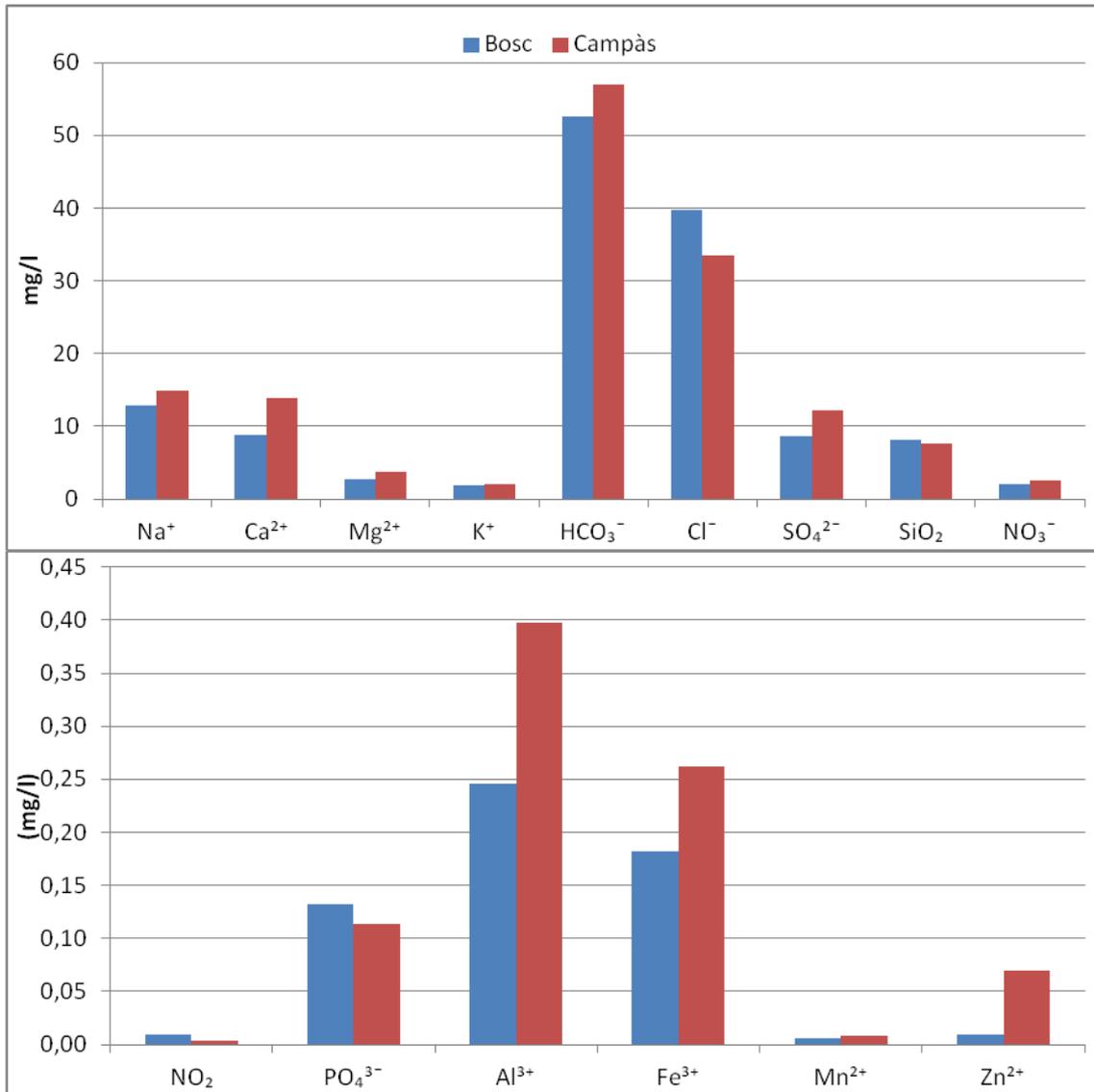


Figura 15. Promedio iónico en las dos estaciones (periodo 2005-2012).

### 3.3. Análisis iónico año a año.

Además de los años hidrológicos obtenidos durante el periodo 2005-2012 se ha adjuntado a las figuras “año a año” en las dos estaciones los registros obtenidos durante el año hidrológico 1993/94 y se analizará su diferencia con respecto al resto de años hidrológicos durante el periodo de estudio donde se han aplicado los planes de gestión forestal. En general durante todos los años obtenidos no existe una tendencia clara de aumento o disminución de la concentración de iones, solo se

observa siempre que los  $\text{HCO}_3^-$  y el  $\text{Cl}^-$  superan al resto de los registros.

### 3.3.1. Análisis iónico en la estación de Bosc.

Al igual que el promedio general, los promedios anuales para Bosc tanto el  $\text{HCO}_3^-$  y el  $\text{Cl}^-$  son los que destacan, seguidos del ión  $\text{Na}^+$  y el  $\text{Ca}^{2+}$  (Figura 16). El ion  $\text{SO}_4^{2-}$  es el que más estable se encuentra, a pesar de que en los últimos dos años es inferior a los anteriores.

El año 1993/94 tiene en particular la diferencia de la concentración de  $\text{HCO}_3^-$  siendo de 53,8 mg/l y  $\text{Cl}^-$  de 24,6 mg/l, el ión  $\text{SiO}_2$  de no ser por el año 2007/08 su concentración habría tenido una tendencia a la disminución, comenzando desde la concentración de 9,5 mg/l para este año. Los iones  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$  son los más bajos con respecto a los siguientes años. El año 2006/07, fue el año posterior a la crecida de octubre de 2005, el material disuelto en la cuenca fue relativamente discreto con respecto a los otros años, siendo lo más destacado el hecho de que el ion  $\text{Al}^{3+}$ , a pesar de su baja concentración con respecto a los otros iones, destaca por estar por encima de casi todos los años menos el año 2011/12.

El año hidrológico 2007/08, es un año especial en los registros especialmente en los iones  $\text{HCO}_3^-$  (78,7 mg/l) y  $\text{PO}_4^{3-}$  (0,2 mg/l) que destacan sobre el resto de años. Los iones  $\text{Cl}^-$  (68,7 mg/l) y  $\text{Na}^+$  (21,8 mg/l) al igual que el año 2008/09 presentan similares concentraciones. 2008/09 presenta los menores registros de  $\text{HCO}_3^-$  con 27,8 mg/l, incluso por debajo del  $\text{Cl}^-$ , con 68,3 mg/l. Para 2009/10 los  $\text{HCO}_3^-$  son relativamente similares al  $\text{Cl}^-$  con 36,6 y 38,5 mg/l.

En el año 2010/11 los iones que disminuyen de manera considerable son el  $\text{Ca}^{2+}$  con 5,8 mg/l y el  $\text{Na}^+$  con 6,2 mg/l. sin embargo a partir de este año el  $\text{HCO}_3^-$  (66,9 mg/l) vuelve a tener mayores concentraciones con respecto al ion  $\text{Cl}^-$ . Para este y el siguiente año hidrológico la concentración del ion  $\text{SO}_4^{2-}$  disminuye, siendo para el año 2010/11 de 3,1 y de 3,9 mg/l en el año 2011/12. En el último año los registros que destacan son los iones de baja magnitud como el  $\text{Al}^{3+}$  con 0,5 mg/l y el  $\text{Fe}^{3+}$  0,3 mg/l.

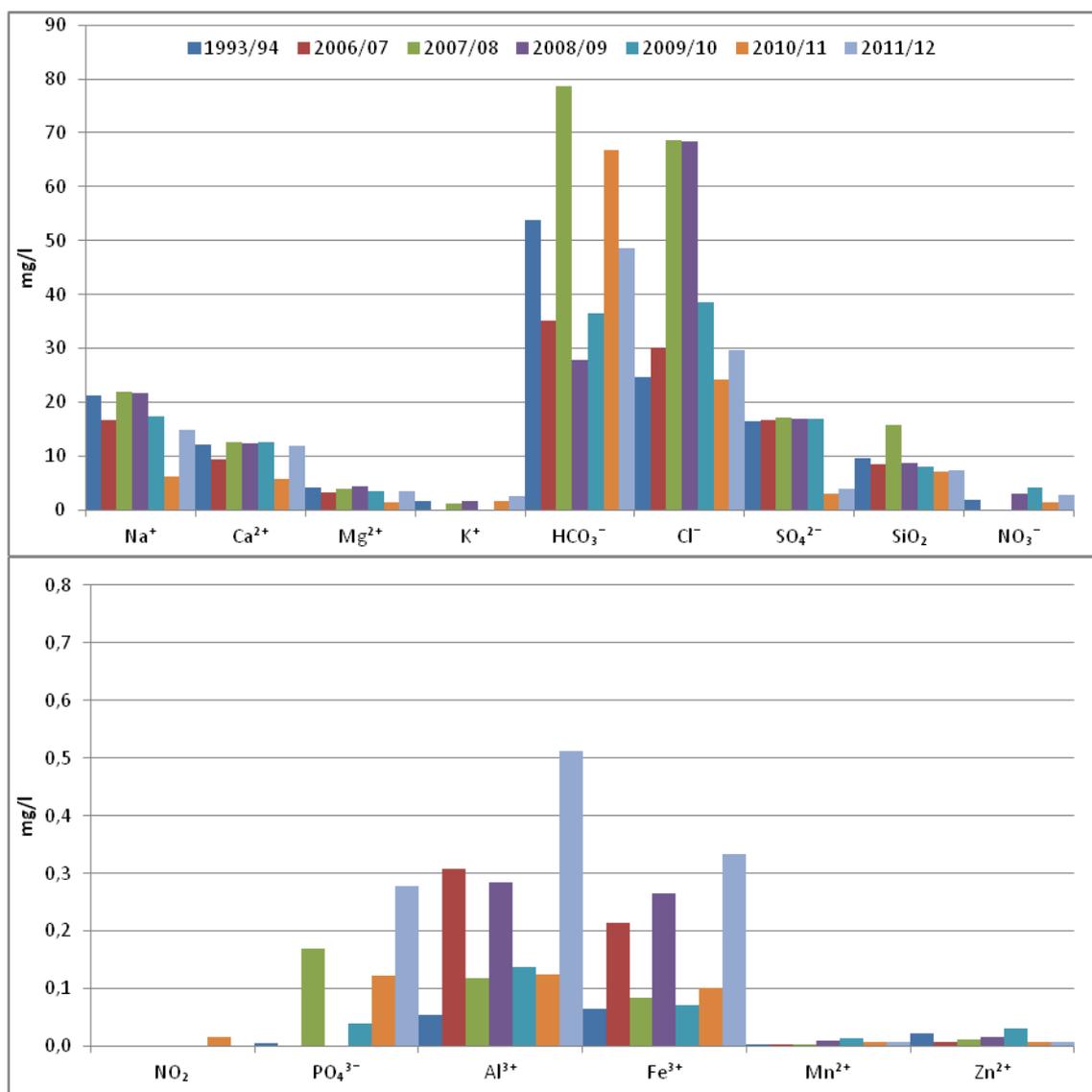


Figura 16. Concentración iónica promedio anual en Bosc.

### 3.3.2. Análisis iónico en la estación de Campàs.

El registro que más destaca de la concentración iónica en la estación de aforo de Campàs (Figura 17), es el  $\text{HCO}_3^-$  en el año 2007/08 con 140,7 mg/l. Dicho año hidrológico, al igual que en la estación de aforo de Bosc, destaca en muchos iones, variando tendencias claras de disminución anual en los registros como se ve en los iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$ , pero para este año, dicha tendencia no es constante. En el año hidrológico 1993/94, los iones en orden de magnitud superiores al resto de registros (independiente del año 2007/08) son:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Esta tendencia en la estación de Bosc no fue tan visible, ya que, especialmente estos últimos tres presentan una tendencia constante. Este año también resalta por el registro importante de los  $\text{NO}_3^-$  con 7,3 mg/l, siendo el registro más alto de todo el periodo de estudio. En dicho

año hay que tener en cuenta que aún se realizaban actividades agrícolas de alta producción sobre la cuenca.

Sin embargo, en el año 2008/09 los registros de  $\text{NO}_3^-$  fueron de 4,8 mg/l, registro que no es menor que en el año 1993/94, pero que es el mayor obtenido dentro del periodo de estudio 2005-2012. Este ión ha variado de manera considerable a través de los años de estudio, incluso en los años 2010/11 y 2011/12 los registros son menores comparados con Bosc. El análisis iónico del  $\text{Cl}^-$  presenta una tendencia al aumento, siendo mayores los años 2007/08 y 2008/09 con 77,8 mg/l y 43,3 mg/l respectivamente. Esta tendencia es diferente a la que se presenta en Bosc donde los registros infieren al aumento de este ión. El año 2007/08 es el único en que el ión  $\text{Cl}^-$  es mayor en Campàs. Para los iones de menor magnitud, son el  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$  los que presentan mayor concentración en los años 2010/11 y repitiéndose para las dos estaciones de aforo el año 2011/12.

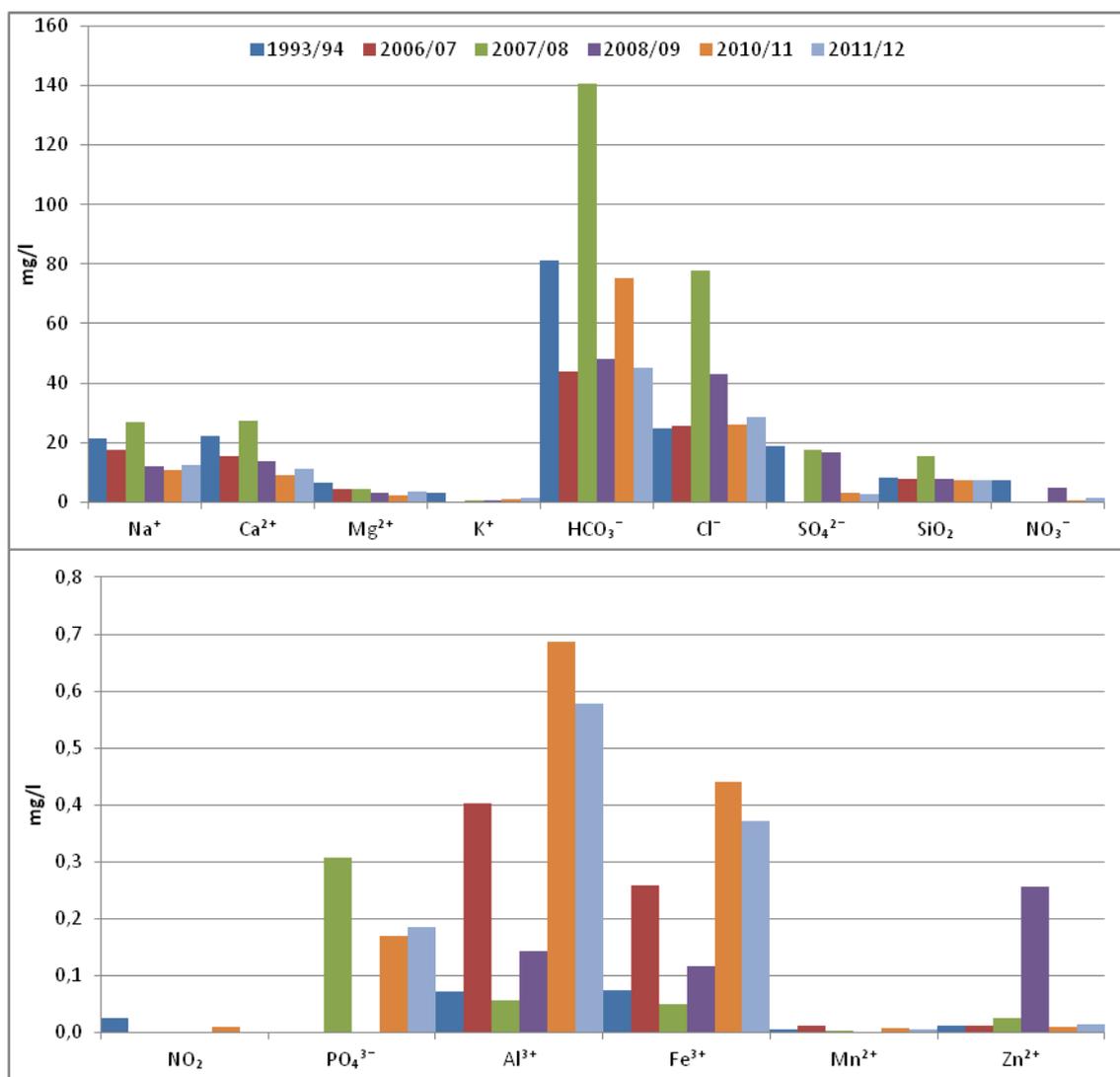


Figura 17. Concentración iónica promedio anual en Campàs.

### 3.4. Análisis iónico de los tres pozos.

La Figura 18, muestra el promedio de los análisis químicos que se han realizado desde el año 2006/07 hasta el 2010/11. El  $\text{HCO}_3^-$  es el ión con más concentración en los tres pozos. En siguiente orden de magnitud son los iones  $\text{Ca}^{2+}$  >  $\text{Cl}^-$  >  $\text{Na}^+$  >  $\text{NO}_3^-$  >  $\text{SO}_4^{2-}$  >  $\text{Mg}^{2+}$  >  $\text{SiO}_2$  >  $\text{K}^+$ . En menor orden de magnitud están  $\text{PO}_4^{3-}$  >  $\text{Al}^{3+}$  >  $\text{NO}_2^-$  >  $\text{Zn}^{2+}$  >  $\text{Fe}^{3+}$  >  $\text{Mg}^{2+}$ .

El valor medio mayor del  $\text{HCO}_3^-$  fue en el pozo 2 con 240,92 mg/l. El ión  $\text{Cl}^-$  muestra un leve aumento a medida que la altura entre los pozos disminuye, siendo el pozo 1 de 52,5 mg/l y el pozo 3 de 53,4 mg/l. Estas tendencias de aumento o disminución son muy evidentes en los iones  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NO}_2^-$ , en los tres casos se presenta una evidente menos concentración del pozo 1 al pozo 3, siendo la diferencia más marcada del  $\text{PO}_4^{3-}$ . El ion  $\text{NO}_3^-$  en el pozo 1 es de 32,2 mg/l y de 2,9 mg/l en el pozo 3. El  $\text{PO}_4^{3-}$

en el pozo 1 fue de 0,9 y de 0,1 mg/l en el pozo 3. La concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  en los pozos 1 y 2 es de 83 mg/l y 86 mg/l respectivamente, y son superiores al pozo 3 con, 45,3 mg/l, incluso a los registros del  $\text{Cl}^-$ , caso que no sucede con el pozo 3.

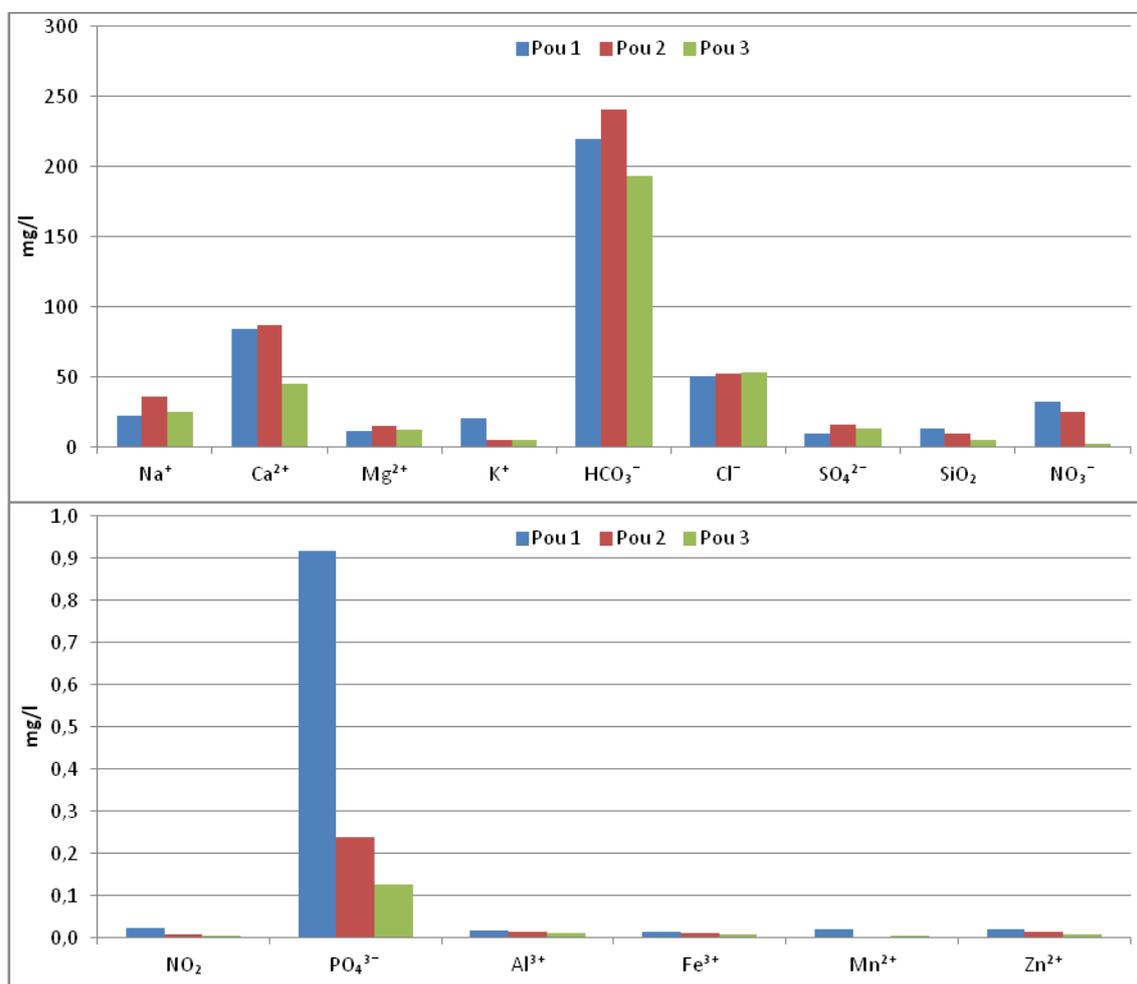


Figura 18. Análisis iónico de los tres pozos en la cuenca de Vernegà.

### 3.4.1. Análisis iónico año a año de los tres pozos.

Dada la importancia del papel que desempeñan los iones  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{HCO}_3^-$ , se analiza año a año su evolución en la cuenca del Vernegà.

Los  $\text{NO}_3^-$  presentan una clara tendencia a la disminución desde el año 2005/06 al 2010/11 y que, de no ser por el año 2007/08 en el pozo 3, la disminución de la concentración habría sido continua. Quien presenta mayor esta diferencia de concentración es el pozo 1 siendo de 50,0 mg/l en el año 2005/06 para finalizar en 4,0 mg/l en el año 2010/11. En el pozo 3, ningún registro medio superó al promedio mínimo del pozo 1, siendo el máximo en el año 2006/07 con 3,6 mg/l, y el registro mínimo promedio fue de 1,1 mg/l, aunque sabemos que para este año, existen

momentos en que la concentración es casi nula.

Para el caso de los  $\text{PO}_4^{3-}$  las concentraciones también presentan una tendencia a la disminución y de no ser por el año 2007/08 dicha tendencia sería aún mayor. Al igual que los  $\text{NO}_3^-$ , el pozo 1 es quien presenta la mayor diferencia, siendo de 1,6 mg/l en el año 2005/06 y finalmente de 0,4 mg/l en el año 2010/11. Para el pozo 3 existe una tendencia constante a mantener una concentración mínima cercana a 0,1 mg/l en todos los años de estudio. El pozo 2 tiene una débil tendencia a la disminución y debido al registro de 2007/08 esta tendencia es menos marcada.

El ion  $\text{Cl}^-$  de no ser por el año 2008/09 su tendencia a la disminución sería marcada, incluso este año hidrológico presenta registros superiores a los registrados en el año 2005/06, sin embargo, al igual de lo que sucedió en la escorrentía superficial en los otros dos iones explicados anteriormente, fue el año 2007/08 el que presentó la mayor diferencia con respecto al resto de años estudiados, sin embargo este ión en particular presenta la irregularidad el siguiente año hidrológico. Otro aspecto que destaca es que en este caso no es el pozo 1 quien presenta los mayores registros, fue el pozo 2 quien presenta tanto los mayores registros como la mayor diferencia, siendo para el año 2005/06 de 61,8 mg/l y para el año 2010/11 de 25,2 mg/l, que es el registro más bajo.

Si para los  $\text{HCO}_3^-$  trazáramos una línea sobre los registros, estos valores presentarían una tendencia hacia el aumento, pero esta tendencia no es clara. Evaluamos estos registros por la importancia de su concentración con respecto al resto de registros, llegando a valores de 287,4 mg/l en el pozo 2 el año 2007/08, registros que al siguiente año hidrológico en el mismo pozo son los menores con 149,5 mg/l. Estos registros hacen pensar que existen otros factores que influyen sobre la cuenca con respecto a su concentración.

Estas diferencias en los tres pozos podemos observarlas también en la variación de la profundidad en todos los años de estudio, como lo vimos en el capítulo anterior, mostrando de que existe una tendencia diferente entre los tres pozos, siendo más cercanos el pozo 2 y 3, dejando en evidencia que en el pozo 1 existen otros factores que interfieren en el nivel del agua subterránea y la calidad de las aguas que alteran su relación con el resto de pozos de seguimiento.

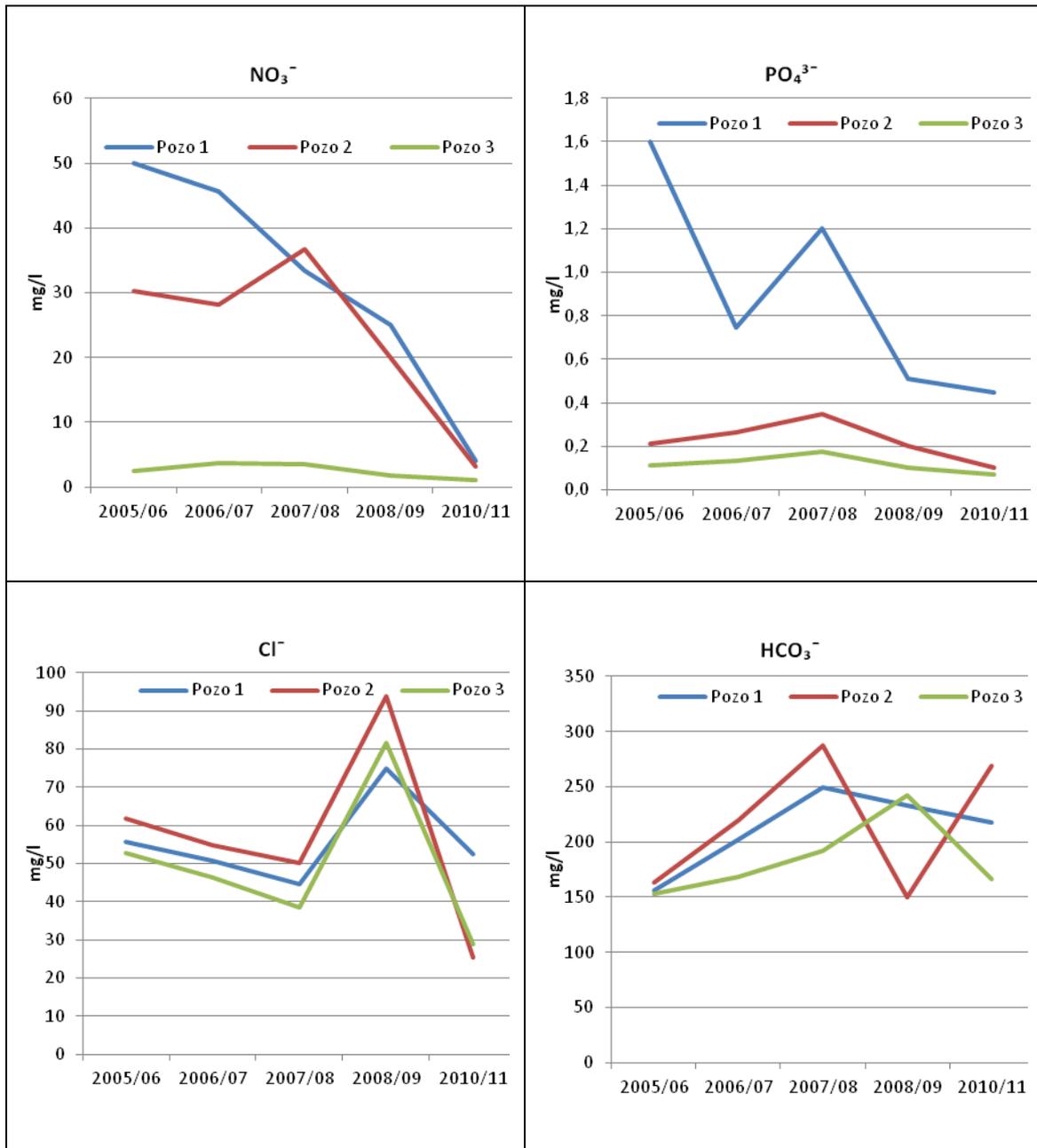


Figura 19. Análisis iónico anual en los tres pozos.

# Capítulo VI: Discusión



Este estudio demuestra la importancia de la continuidad de la recopilación de registros hidrológicos, siendo valioso para cuencas con similitudes en tamaño, clima o usos del suelo similares al área de estudio de la Riera de Vernegà.

### **1. Dinámica hidrología de la cuenca.**

La precipitación media anual de la riera Vernegà es de 688 mm y está dentro de los registros medios del ámbito mediterráneo litoral de Catalunya; donde las precipitaciones promedio anuales oscilan entre los 700 mm (Norte) y los 480 mm (Sur). Presenta una tendencia de un ambiente mediterráneo subhúmedo, siendo el aspecto más destacable la variabilidad de la precipitación interanual, donde ningún año es similar a otro. Por ejemplo, destaca el año hidrológico de 1993/94 con 294 mm fue un año muy seco para todo el mediterráneo catalán (Terradas, 1996). Sin embargo, el año 2007/08, a pesar de que la precipitación en la cuenca fue de 641,7 mm, cercana al promedio, fue un año con un nivel de escorrentía superficial muy reducido, ya que el invierno y primavera fue muy escaso en lluvias, y no fue hasta bien entrado mayo que no empezaron a registrarse valores importantes de precipitación. Tal fue de irregular el año que incluso se propuso abastecer con barcos el déficit hídrico de la ciudad de Barcelona (Agencia Catalana d'Aigua, 2008).

Martínez-Murillo y Ruiz-Sinoga (2006) en un estudio sobre los cambios hidrológicos estacionales en Málaga, encontraron una extrema variabilidad de la precipitación en función de la estación del año, incluso con coeficientes de variación mayores al 100% al igual que en la cuenca de Vernegà.

Como bien hemos visto en el capítulo de resultados, la escorrentía de la riera de Vernegà, al igual que la precipitación, en todos los años es distinta. Incluso, los caudales que corresponden a momentos de crecidas en Bosc y Campàs, sólo se generan en el 19% y 12% del tiempo respectivamente. En Campàs es menor debido a que la escorrentía de base se mantiene durante más tiempo.

La dinámica de la escorrentía superficial está marcada por la precipitación, especialmente durante los eventos extremos, durante los cuales se generan mayores caudales. Sin embargo, no es el único factor que determina la escorrentía superficial, ni justifica que en cada pico de intensidad máxima de precipitación se genere una crecida. Aspectos como el contenido de agua en el suelo y el nivel del agua subterránea, son determinantes en la generación de escorrentía. Además, también está condicionada por las tasas de evapotranspiración, que juegan un papel

importante en cuencas pequeñas mediterráneas (Estrany et al., 2010).

Aquellas precipitaciones que ocurren después del periodo estival seco, no generan respuesta alguna o una respuesta de corta duración. Estas primeras precipitaciones contribuyen a la recarga del contenido de agua en el suelo y del nivel del agua subterránea. Cabe destacar el ejemplo del mes de septiembre del año 2011/12, una acumulación de 110 mm distribuidos durante todo el mes, no generaron escorrentía superficial. Existen un gran número de precipitaciones con respuesta cero en la escorrentía, repitiéndose durante todos los años del estudio, indiferentemente de la época del año. Esta situación es más acusada en verano, donde la respuesta de la escorrentía superficial es nula en los 20 años de estudio.

Las primeras precipitaciones del año hidrológico son fundamentales en la dinámica hidrológica de la cuenca durante los meses posteriores. Estas precipitaciones, especialmente las de octubre y noviembre, tienen mayor riesgo de torrencialidad, como los 250 mm de octubre de 2005. Si las precipitaciones a lo largo del otoño se mantienen, a partir de los meses de invierno se genera un caudal base.

Durante los meses de invierno las precipitaciones son de menor magnitud, pero generan una mayor respuesta de la cuenca, que se traduce en un mayor volumen de escorrentía, independientemente de la cantidad de lluvia. Es decir, a medida que aumenta la humedad del suelo y el nivel de agua subterránea, escorrentía representa una mayor fracción de la precipitación. Resultados similares son descritos por Lana-Renault (2011) en una cuenca experimental del pirineo Aragonés. Por ello, es el invierno la estación en la que mayor escorrentía superficial se genera (Tabla 2, Capítulo IV). Cabe destacar, que durante el final del invierno la profundidad del pozo 3 se alcanza un nivel entre -1,5 y -2,0 m (Figura 13, Capítulo IV), que representa el nivel más alto de las aguas subterráneas del año hidrológico.

Posteriormente, durante los meses de primavera las precipitaciones mantienen el nivel del agua subterránea y de humedad del suelo elevados, y la escorrentía continúa manteniendo el caudal base de enero a mayo; a pesar de que en la primavera la temperatura aumenta.

Las correlaciones entre las precipitaciones y las escorrentías en las dos estaciones de aforo en función a la estacionalidad son bajas (Tabla 4, Capítulo IV), como muestran diversos estudios en cuencas experimentales mediterráneas (Cosandey, 1993; Ceballos y Schnabel, 1998; Lana-Renault et al., 2007; Latron et al., 2008). Sin embargo, se observa una mayor correlación en otoño ( $R^2= 0,60$ ). Latron y Gallart (2008), encontraron en una cuenca mediterránea un nivel máximo de correlación entre la

precipitación y la escorrentía de  $R^2=0,57$ .

Bosc presenta un coeficiente de escorrentía de 9,3% y Campàs de 12,8%. La cuenca de Manula con 9,9% (Loughran et al., 1993) se acerca a los registros del coeficiente de escorrentía en Bosc. Para el caso de Campàs, las cuencas que más se asemejan son, la cuenca de Nacimiento con 14% (Domingo et al., 1994) cubierta de arbustos mediterráneos y pinos forestados; y la cuenca de la Telua con 12,8% (Piñol et al., 1999), que está totalmente cubierta por rebrotes de *Quercus ilex* y biomasa.

La Tabla 1 presenta el promedio anual de la escorrentía y los coeficientes de escorrentía de pequeñas cuencas semejantes en área de captación. Podemos ver que la escorrentía se encuentra entre los 41,9 mm y 311 mm. Ninguna sobrepasa el 35% del coeficiente de escorrentía, y el mínimo de 0,3% se repite en varias cuencas. Estrany et al., (2009), describe un coeficiente de escorrentía de 24,8%, muy superior al calculado en las dos estaciones de aforo, pero igualmente superiores comparándolos con la cuenca de Guadalperón, con 6,9% (Ceballos y Schnabel, 1998).

**Tabla 1. Recopilación de datos de cuencas experimentales.**

Nombre de la Cuenca	País	Área (km <sup>2</sup> )	Años de estudio	Sustrato Suelos	Esc. (mm)	C.E. (%)	Referencia
Nacimiento	ESP.	0.34	1	Micaschist		14,0	Domingo et al., (1994)
TM9 (Mont)	ESP.	0.06	11	Slates and sandstones	311	34,9	Piñol et al., (1999)
L'Avic	ESP.	0.52	8	Slates and sandstones	41	7,4	Piñol et al., (1999)
La Teula	ESP.	0.39	8	Slates and sandstones	58	12,8	Piñol et al., (1999)
Cal Parisa	ESP.	0.36	2	Smectite-rich mudstone		10,2	Llorens (1991)
Geebung C.	AUS.	0.80	5	Granite		3,0	Moore et al., (1986)
Maluna C.	AUS.	1.70	16	Sediments	41,6	9,9	Loughran et al., (1993)
Mitchell G.	AUS.	3,00	13	Clay		3,3	Chiew et al., (1995)
Yagarril 4 L	AUS.	1.26	16	Lateritic		2,3	Stoneman (1993)
Yangdaogou	CHI.	0.20	19	Loess plateau		6,0	Zhu et al., (1997)
Guadalperalón	ESP.	0.35	5	Schists		6,9	Ceballos y Schnabel (1998)
Arnás	ESP.	2.80	7	smectite-rich mudrocks	258	0,3	Lana Renault. (2011)
Latxaga	ESP.	2,07	13	Paralitic Xerorthent	234	0,3	Gimenez et al., (2012)
La Tejería	ESP.	1,69	13	Fluentic Haloxerept	211	0,3	Gimenez et al., (2012)
Can Rebull	ESP.	1,03	3	Sedimentos aluviales del Cuaternario	123	24,8	Estrany et al., (2009)
Vernegà Bosc	ESP.	1.60	7	Sedimentario	66,8	9,3	Pacheco. Tesis doctoral
Vernegà Campàs	ESP.	2.50	7	Sedimentario	92,0	12,8	Pacheco. Tesis doctoral

ESP: España. AUS: Australia. CHI: China. Esc: escorrentía. C.E. coeficiente de escorrentía. TPS: total de producción de sedimentos anual.

Fuente: Ceballos y Schnabel, (1998). Actualizada por el autor.

Los coeficientes de escorrentía a escala de crecidas oscilaron entre desde el 62% en la estación de aforo de Campàs ocurrido en mayo de 2002, hasta el 24% en Bosc durante la nevada de marzo de 2010. los mínimos fueron de 0,1% en abril de 2009 para Bosc y de 0,7 en febrero de 2007 en Campàs. Estas repuestas tan variables también las encontramos en cuencas como la del Isábena, con oscilaciones del coeficientes de escorrentía entre 0,32% y 33% (López-Tarazón, et al., 2010).

Las crecidas representan más del 60% en Bosc y el 70% en Campàs de la escorrentía acumulada durante el periodo (2005-2012). Estas características se encontraron también en cuencas como la Manula, donde la escorrentía de las crecidas representa el 79% del total, pero sólo se produce durante el 0,6% del tiempo (Loughran et al., 1986), mientras que en Bosc y Campàs representa el 19 y 12% respectivamente, y se concentran mayormente durante los meses de octubre y noviembre.

En la cuenca de Vernegà se destaca el año 2011/12, durante el cual, el periodo de lluvias que generaron crecidas se inició a finales de octubre hasta la mitad de noviembre, y en menos de un mes se acumuló el 93% de la escorrentía anual en Bosc y el 84% en Campàs.

El tiempo en promedio de duración de las crecidas fue de 78 horas en Bosc y de 81 horas en Campàs, la mayoría de estas crecidas corresponden a eventos de varios picos, factor que influye en el tiempo de las crecidas. En la riera de Vernegà un aspecto que destacamos es el papel de que desempeñan los suelos, ya que tienen una gran capacidad de infiltración, contribuyendo a que el agua proveniente de las precipitaciones, primero saturará el suelo, después llenará el acuífero, y finalmente llegue a formar parte del caudal. Es más común en cuencas mediterráneas que el tiempo en que tardan las crecidas sea más reducido; en cuencas como la de Guadalperón más del 50% de las crecidas duran un periodo de una hora, e incluso, durante grandes intensidades de tormentas la respuesta de caudal base es inmediata, coincidiendo con el pico de las crecidas (Ceballos y Schnabel, 1998).

Estas coincidencias de pico de crecida e intensidad máxima las encontramos en dos ocasiones en la estación de aforo de Bosc, teniendo como ejemplos las crecidas de febrero de 2003, y en el segundo periodo de estudio la crecida de octubre de 2005. Estas crecidas en general son consecuencia de una gran cantidad de precipitación, provenientes de un periodo anterior lluvioso y con altas intensidades en el momento del pico de la crecida.

El tiempo de respuesta medio entre el pico de la crecida y la intensidad máxima de precipitación para Bosc es de 9 horas para el primer periodo y de 5 horas para el segundo, en Campàs fue de 7 horas y de 6 horas respectivamente. También se

registraron respuestas de crecidas con una hora de tiempo de respuesta más acusadas generalmente en el segundo pico de las crecidas. Es posible que estas diferencias ocurran debido a la intervención de los planes técnicos de gestión forestales, ya que disminuye el volumen de vegetación arbustiva, aumentando así más superficie de cuenca a la precipitación directa.

La nevada de marzo de 2010, encontramos características que no se asemejan a otro tipo de crecidas del estudio, son típicas de zonas de montaña donde la nieve juega un papel importante para cada año hidrológico. Destacamos que durante los primeros picos del evento, en Bosc los picos son inferiores respecto a Campàs, esto debido posiblemente a que la acumulación de la nieve en los campos de cultivo está más expuesta al sol, a diferencia de las áreas de bosque.

### **1.1. Efectos de uso del suelo en la dinámica hidrológica de la cuenca.**

Teniendo en cuenta los dos periodos de estudio (1993-2005 y 2005-2012), la escorrentía anual promedio de Campàs es mayor en un 82% y del 57% en Bosc. Estas diferencias se atribuyen a la intervención de los planes técnicos de gestión forestal, ya que el desbroce de la vegetación, permite una mayor escorrentía sobre el lecho del río. Se ha detectado el aumento de la escorrentía directa en las dos estaciones de aforo durante el segundo periodo de estudio respecto al primero. Este aumento representa un 7% para Bosc y del 20% para Campàs.

En general, se puede decir que en promedio la escorrentía superficial en Bosc representa el 30% de la escorrentía en Campàs, principalmente dada la mayor área de captación, pero también se puede deber a la presencia de mayores caminos, los campos de cultivo, y sus estructuras asociadas (los bordes del campo, zanjas y cárcavas efímeras) pueden aumentar o disminuir la conectividad hidráulica dentro de la cuenca (Fiener et al., 2011).

En el año hidrológico 1994/95 la escorrentía comienza con las primeras precipitaciones del mes de octubre (246 mm), cercano a lo ocurrido en octubre de 2005 (250 mm). El primero la escorrentía de Campàs se calculó en 92,4 mm siendo el valor mayor registrado en el primer periodo. El segundo fue de 143,2 mm, y también considerada la mayor del segundo periodo. Esta diferencia no solo se atribuye a las diferencias hídricas de la cuenca que anteceden a las crecidas, es también en parte debido a la diferencia de cobertura de suelo que tiene la cuenca en los dos momentos.

Finalmente un aspecto que queremos estacar es la crecida en Campàs del 4 al 8 de octubre de 2011; en el primer pico se nota dos impulsos de caudal antes y después del primer caudal máximo, caso que no se observa en Bosc. Su razón se puede atribuir a

las prácticas de recuperación de áreas agrícolas en la parte baja de la cuenca en el 2011, esta afirmación requiere una continuidad en el tiempo para determinar de qué manera influye dicho cambio sobre la respuesta en Campàs.

### **1.2. Fluctuación del nivel del agua subterránea.**

La relación entre la escorrentía y la profundidad de nivel del agua subterránea es baja en las dos estaciones con  $R^2=0,4$  en Bosc y  $R^2=0,4$  y Campàs. Mucho menos si lo comparamos con la precipitación. Dicho comportamiento hidrológico a menudo sucede en cuencas mediterráneas; es el caso de Can Vila, donde también se presentó una baja correlación, en valores de escorrentía bajos (0,1 mm/día), e incluso altos (>10 mm/día), momentos en los que se observaron condiciones de saturación en los suelos (Latron y Gallard, 2008).

En un estudio de Dunne y Leopold (1978), encontraron que el promedio anual de escorrentía base en ríos dominados por crecidas está entre el 3 y 10%. Esto contrasta sin embargo con las observaciones realizadas en las cuencas húmedas. Donde La estabilidad de la escorrentía superficial está influenciada por las dinámicas de los acuíferos. Sklash y Farvolden (1979), al este de Canadá, por ejemplo, concluyeron que el nivel del agua subterránea está muy correlacionada con la escorrentía, al igual que Myrabo (1997), en una pequeña cuenca en noruega.

La escasa respuesta de la cuenca en verano y a principios del otoño está muy relacionada con el bajo nivel de los acuíferos de la cuenca. Así como la alta evapotranspiración en esta época del año (Gallart et al., 1997). La baja correlación entre la escorrentía y el nivel de los pozos, no es el único factor a considerar.

## **2. Influencia de las vertientes en la hidrología y el transporte de sedimento.**

Como ya se comentó en el apartado de introducción de esta Tesis Doctoral, el objetivo principal de la investigación cuando se empezó a trabajar en la cuenca de Vernegà en 1992 era: “conocer el impacto de los usos forestales y agrícolas en la escorrentía y el transporte de sedimento en un medio de montaña mediterránea”. Para ello se construyeron las dos estaciones de aforo “Bosc” y “Campàs”, pues el estudio pretendía conocer esta dinámica a nivel de cuenca.

No mucho más tarde, se empezaron a poner esfuerzos en conocer la dinámica de estos dos usos del suelo a nivel de vertientes. Era imprescindible también conocer cuáles eran las fuentes de escorrentía y sedimento a nivel de vertiente y qué importancia

tenían en el cómputo general.

### 2.1. Áreas agrícolas.

En dos estudios realizados en la cuenca de Vernegà, se instalaron trampas de sedimento, para ver cuál era la aportación de sedimento, comparando la erosión generada en los campos agrícolas y de Bosque con la misma metodología. Los resultados fueron que en la parcela bosque (Figura 1) la erosión media de todo el estudio fue de 0,012 kg/m<sup>2</sup> año (Úbeda, 1998) y en la parcela agrícola la erosión media fue de 0,189 k/m<sup>2</sup> año (Úbeda y Sala, 1997).



**Figura 1. Trampa de sedimento tipo Gerlach para la medida de la erosión en vertientes (bosque y campo agrícola).**

Este total de erosión en la parcela del campo agrícola tuvo tres momentos diferenciados. En el momento de labrado (Figura 2) la erosión fue de 0,16 k/m<sup>2</sup>, en este momento del año, a pesar de que sí hay movimiento de sedimento dentro del mismo campo y por tanto contabilizado por las trampas de sedimento, no necesariamente este sedimento llega a salir del campo agrícola y llega al canal. La propia formación rugosa del labrado, hace que la exportación de sedimento fuera de la parcela sea mínima, esta operación se realiza normalmente entre setiembre y octubre.



**Figura 2. Campo agrícola recién labrado.**

A continuación los campos son sembrados, esto implica un allanamiento del terreno con el objetivo de enterrar las semillas. Esta operación tiene lugar en octubre, y la erosión medida en las trampas de sedimento fue de  $0,38 \text{ kg/m}^2$ . En este periodo no tan solo es mayor el sedimento movilizado y atrapado en las trampas Gerlach, sino que dado el aplanamiento del terreno, parte de este sedimento sí llega al canal de la riera, a veces conducido por un camino forestal (Figura 3).



**Figura 3. Regueros en uno de los campos agrícolas tras el periodo de siembra y una lluvia de otoño.**

El periodo de siembra es el que va a generar más sedimento disponible para ser

transportado a nivel de cuenca.

Ya en la época del aumento de la vegetación, la erosión disminuye, siendo de tan solo 0,028 kg/m<sup>2</sup>. Gran parte del sedimento movilizado se queda en el mismo campo. Aunque en periodos de intensas lluvias de invierno y primavera los regueros aparezcan en esta época (Figura 4).



**Figura 4. Regueros en la parcela agrícola.**

Es también importante señalar que del total erosionado, un 28,50% corresponden a limos y arcillas, fracción susceptible de ser transportada como sedimento en suspensión una vez en la riera.

De manera indirecta también se quiso comprobar que unidad (bosque o cultivo) tenía más probabilidad de generar escorrentía, y se realizaron infiltrometrías en los dos usos

del suelo. Un total de 30 infiltrometrías realizadas en cada uso arrojaron que las tasas de infiltración iniciales eran más elevadas en el bosque 2570 mm/h, que en el campo de cultivo (1200 mm/h). De igual manera también se estudió que agregados eran más resistentes a la disgregación mediante el método de TDI (Ten Drop Impact) y por tanto que unidad era más susceptible de ser erosionada por la resistencia a las gotas de lluvia y el resultado fue que los agregados del bosque eran más resistentes frente al impacto de gota (Úbeda y Sala, 1997).

## **2.2. Áreas forestales y planes técnicos de gestión forestal.**

La primera observación acerca de que la gestión forestal llevada a cabo en la cuenca de Vernegà a principios de la década del 2000 podía haber desencadenado una mayor contribución las áreas forestales al sedimento a nivel de cuenca y por tanto más escorrentía y más transporte de material erosionado, fue a raíz de la extraordinaria crecida de octubre de 2005.

Un hecho que hasta ese momento no se había producido, fue la colmatación de sedimento, en gran medida por arenas, de la estación de aforo de Bosc (Figura 6). Monte et al., (2005) analizan en un estudio en el País de Gales, el aumento de la producción de carga de fondo después de las actividades forestales. En la cuenca de Vernegà, aunque este hecho se ha observado en la forma de acumulación de partículas de arena en la estación de aforo, no se ha calculado todavía (Figura 5). Un ejemplo de la capacidad de arrastre de fondo que pueden generar crecidas en el mediterráneo es la cuenca de la Tordera donde aproximadamente 107.000 toneladas (83% como carga de fondo y 17% en suspensión) de sedimento fueron exportadas hasta el mar Mediterráneo, sobre todo durante las inundaciones (Rovira, et al., 2005).



**Figura 5. La estación de Bosc totalmente colmatada por sedimento.**

Vamos a analizar primeramente la bibliografía y los estudios realizados en la propia cuenca o en el macizo de les Gavarres y que podrían darnos información acerca de ese posible aumento de agua y sedimento tras las gestión forestal realizada por los PTGMF.

A nivel general, el promedio anual de los sedimentos obtenidos en cuenca en contraste con los establecidos por Sala y Farguell (2002) en el período 1993-1997 fue de  $0,1 \text{ t/km}^2$  año en Bosc, en el período 2005-2012 fue de  $2,48 \text{ t/km}^2$  año. En Campàs que fue de  $0,7 \text{ t/km}^2$  año en 1993-1997 y  $11,4 \text{ t/km}^2$  año en el segundo periodo. Estas diferencias pueden atribuirse al manejo forestal, además de la ocurrencia de eventos extremos como el de octubre de 2005. Parece que este tipo de prácticas contribuyen a un aumento de la movilización de sedimentos. Este hecho también ha sido reportado por Croke et al., (2001), quienes afirman que el máximo transporte de sedimentos pasa cuando los eventos de alta intensidad de precipitación se producen después del aclareo. Stott et al., (2001) encontraron que las obras causadas por la maquinaria remueve las capas superiores de la capa superficial del suelo, aumentando la disponibilidad de partículas finas. Esta situación ocurrió en octubre de 2005, justo después de haberse llevado a cabo las prácticas de manejo forestal, y puede ser la razón de las grandes diferencias entre los rendimientos de los sedimentos en los dos períodos comparados. Esta misma razón se puede atribuir a los efectos de la concentración de sedimentos encontrados en octubre de 2006, justo después de la

actuación sobre el mismo lecho del río en el área de captación de Campàs (Figura 6).



**Figura 6. Actuaciones sobre el lecho del río en octubre 2006.**

Hasta ese entonces se había comprobado, con trampas de sedimento tipo Gerlach, que las laderas de bosque denso contribuían de manera discreta al total de la escorrentía y sedimento transportado a nivel de cuenca, obteniendo resultados de 13,10 l/m<sup>2</sup> año de promedio (Úbeda y Sala, 2001) y una erosión de 0,012 kg/m<sup>2</sup> año (Úbeda, 1998).

Las concentraciones de sedimentos en suspensión en el agua de escorrentía de las parcelas de uso forestal fue de 150 mg/l, mientras que en la estación de aforo de Bosc, el promedio es de 116 mg/l y de 30,4 mg/l en Campàs. Parece que la concentración disminuye una vez en el lecho del río.

A nivel de la concentración de sedimentos en disolución del agua de escorrentía de las laderas de uso forestal tenían un promedio de 117,31 mg/l, valores muy semejantes a la concentración promedio de disueltos en la estación de aforo de Bosc y un tanto inferiores a las concentraciones promedio en la estación de aforo de Campàs (140,7 mg/l).

De estos disueltos, el ión mayoritario en el agua de escorrentía del bosque es el HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> con 43,96 mg/l, muy semejante a las concentraciones de disueltos en el agua en la estación de aforo de Bosc (52,59 mg/l) y Campàs (57,05 mg/l). Le siguen el Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Mg<sup>2+</sup> con 4,75 mg/l. En las dos estaciones de aforo, las concentraciones en orden de magnitud después del HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> fueron: Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>,

$\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{K}^+$ .

Para comprobar las fuentes de sedimento se instalaron parcelas en áreas gestionadas por el Plan Técnico de Gestión y Mejora Forestal. Se optó por las trampas tipo “siltfence” (Figura 7 a y b). Estas trampas se localizaron en lugares donde se podía controlar mediante topografía el área de captación y también en vertientes que acababan en el mismo margen de la riera, pudiendo constatar que el sedimento llegaba al cauce. El método no permite cuantificar la escorrentía.





**Figura 7. a. Instalación de una trampa “siltfence” en un área de alcornocques gestionada mediante el PTMGF. b. Sedimento atrapado en la trampa (20/2/2007).**

Las tasas de erosión a nivel de vertiente se pudieron llevar a cabo durante dos años 2007 y 2008 (GRAM. datos sin publicar). En 2007 la erosión generada fue de  $0,079 \text{ kg/m}^2$  y en 2008 de  $1,027 \text{ kg/m}^2$ . Del total del sedimento un 12,80% correspondía a materia orgánica y el resto era mineral. Hay que destacar que de la fracción mineral 31,5% de promedio era limo y arcilla, tamaño que puede ser transportado como sedimento en suspensión. Los valores son mayores que los encontrados en el área de bosque sin gestionar por lo que sí parece que la gestión forestal producía también a nivel de vertiente más sedimento.

En otro estudio llevado a cabo en el macizo de les Gavarres, también utilizando trampas de sedimento tipo Gerlach (Sala y Rubio, 2000) cuyo objetivo era saber que sustrato (granito o esquisto) generaba más escorrentía y erosión, se concluyó, que los datos de escorrentía con un  $0,9 \text{ l/m}^2$  año y erosión en ambos sustratos  $0,006$  y  $0,005 \text{ kg/m}^2$  año de promedio respectivamente era muy bajos y que por tanto no se podía determinar que el sustrato fuese un factor determinante en la generación de escorrentía o erosión.

Para poder comprobar que diferencia había en la generación de escorrentía entre las unidades de bosque gestionado y el bosque sin gestionar un total de 30 simulaciones de lluvia fueron realizadas en parcelas: de bosque denso, de bosque gestionado de alcornocques y de bosque gestionado de pinos (además de otra parcela de camino

forestal de la que se hablará más adelante). Aún aplicando intensidades muy elevadas de 55 mm/h no se generó agua de escorrentía durante las simulaciones de lluvia realizadas en el bosque denso, la capacidad de infiltración del suelo forestal es muy grande, ya que es un suelo muy arenosos y con una alta permeabilidad.

En cambio los suelos forestales de la zona que se había gestionado registraban una generación de escorrentía cuando las precipitaciones son muy intensas (como las que se reproducen con las simulaciones), parte de esta escorrentía puede llevar a movimiento de partículas vertiente abajo. Aunque la superficie del suelo del bosque gestionado este desprovisto de vegetación, tenemos que señalar que el suelo mineral, susceptible de ser erosionado sí que se encuentra protegido. Existen restos de la poda, y luego hay una gran cantidad de materia orgánica fresca (hojas y ramas) y una gran cantidad de materia orgánica en descomposición (humus) que amortigua el golpe de las gotas de lluvia en el caso de precipitación intensa y favorece también a la capacidad de infiltración del suelo, evitando generaciones de escorrentía aceleradas (Figura 8).



**Figura 8. Simulación de lluvia en la parcela de bosque gestionado de pinos.**

Los resultados (GRAM. Datos sin publicar) constatan que en el bosque denso tras las 30 simulaciones no se produjo ni escorrentía ni por tanto erosión. En el bosque gestionado de pinos la escorrentía promedio de las 30 simulaciones fue de 3,80 l/m<sup>2</sup> y de 2,29 l/m<sup>2</sup> en el bosque gestionado de alcornoques. En lo referente al promedio de erosión, la cantidad de material movilizado en la parcela gestionada de pinos fue de 0,60 g/m<sup>2</sup> y de 0,14 g/m<sup>2</sup> en la parcela de alcornoques.

No hay mucha información en la bibliografía especializada en torno a cambios

hidrológicos y de aumento de la erosión en vertientes y a nivel de cuenca debido a manejos forestales. Es muy amplia en torno a manejos forestales después de incendios forestales para evitar la erosión acelerada; y también bibliografía relacionada con el manejo forestal para la repoblación de áreas degradadas. Pero no acerca de los cambios por manejo forestal.

Parece lógico pensar que si hay menos masa arbustiva y por tanto menos cobertura habrá menos interceptación de la lluvia por la vegetación y más agua llegará al suelo y parte podrá ser escorrentía superficial, también que si hay más escorrentía el sedimento sea movilizado más fácilmente. Aun así vamos a ver que dicen algunos investigadores que han trabajado el mismo tema y si sus conclusiones coinciden o no con nuestra investigación.

Zimmermann et al., (2012) en un estudio en Panamá calcula el sedimento en suspensión en las vertientes de bosques que no han tenido ningún tipo de gestión forestal. Calculan unas tasas de erosión de 0,01 t/ha año para un año poco lluvioso y de 0,02 t/ha año para un año más lluvioso. Estos datos reflejan una muy baja erosión. En la cuenca de Vernegà recordemos que se calcularon tasas en las vertientes de 0,12 t/ha año, un orden de magnitud mayor (Úbeda 1998).

De los trabajos existentes, los que obtienen resultados muy semejantes a los encontrados en nuestra investigación en torno al aumento de sedimento en suspensión y de carga de fondo tras manejos forestales son los de Croke et al., (2001), en el que los autores concluyen que la máxima producción de sedimentos en una cuenca de Escocia coincide con el período inmediatamente después del aclareo del bosque. En nuestro caso, podría haber ocurrido si después de los trabajos de desbroce del bosque hubiese habido un evento de lluvia capaz de arrastrar el sedimento movilizado por las tareas de aclarado. Creemos que tiene que haber un detonante importante, como fue el caso de la extraordinaria precipitación de octubre 2005 para que el sistema se ponga en movimiento.

Ahondando en este tema es muy interesante el trabajo de Sidle et al., (2006) realizado en varios escenarios del sudeste asiático. Los autores afirman rotundamente que después de trabajos de gestión forestal hay siempre un aumento de la hidrología superficial a nivel de vertiente y posteriormente en el canal y un aumento también del aumento de sedimento movilizado. La razón es que según los autores ciertos trabajos de desbroce pueden modificar la conductividad hidráulica del suelo además de romper los agregados más superficiales.

Pero lo más interesante del artículo de Sidle et al (2006) es que los autores afirman que solo con estudios a largo término se pueden relacionar trabajos de gestión forestal

con grandes movilizaciones de material e incluso deslizamientos. Para ello hace falta un evento detonador que puede tener lugar mucho tiempo después de los trabajos forestales. La acumulación de agua en el suelo, y la desprotección de las capas más superficiales debido a la menor cantidad de raíces pueden provocar estos deslizamientos. El artículo relata un hecho muy similar al que creemos ocurrió en la cuenca de Vernegà. Los trabajos que provocaron la gran cantidad de sedimento durante la crecida de octubre de 2005 tuvieron lugar a partir del 2003, pero hasta ese momento no ocurrió un detonante lo suficientemente grande para movilizar, ya no solo sedimento, sino parte de la vegetación gestionada (Figura 9).



**Figura 9. Trabajos de limpieza en la estación de aforo de Bosc después de la crecida de octubre 2005.**

Este factor vislumbra una vez más, el aumento de la respuesta de la escorrentía en la cuenca después de los planes técnicos de gestión forestal, especialmente en la estación de Bosc donde la diferencia es tan marcado en los dos periodos.

Las razones que los investigadores señalan como responsables del aumento de la disponibilidad de sedimentos es el de la maquinaria utilizada para desarrollar los trabajos de desbroce. La maquinaria, formada por maquinas que no solo cortan sino que arrastran las raíces de la vegetación, eliminan las capas superiores del suelo aumentando la disponibilidad de partículas finas que son fáciles de ser lavadas

pendiente abajo (Stott et al., 2001).

En esta línea de trabajo también Hartanto et al., (2002) encontraron que hay factores que los gestores deben conocer para no provocar un incremento en la escorrentía superficial y tasas de erosión elevadas. El estudio realizado a escala de parcela en Indonesia concluye que mantener la densidad aparente del suelo y una capa de hojarasca es básico para que no se produzcan alteraciones. Mantener la rugosidad de la superficie del suelo, según los autores es vital, ya que en caso de erosión las partículas verán dificultad en su movimiento vertiente abajo.

Sobre el tema de la maquinaria utilizada es muy interesante el trabajo de Ehigiator y Anyata (2011). Los autores encuentran erosión después de los manejos forestales utilizando maquinaria pesada, hasta 13,8 t/ha/año, y también cuantifican erosión con la gestión realizada manualmente sin máquinas de arrastre, aunque esta es mucho menor (2,5 t/ha/año). El artículo tiene dos datos más importantes de señalar, el primero que encontraron erosión causada por la construcción de taludes, cuyo objetivo primordial era evitar la erosión en terrazas, y también como señalaban otros autores que la erosión producida por manejo forestal en bosques, en este caso tropicales puede notarse incluso 18 años después de los trabajos de manejo forestal.

El mismo autor señala la directa relación que existe entre la erosión y el grado y la forma de la pendiente. Tanto Croke et al., (2001) como Stott et al., (2001) en investigaciones realizadas en Escocia y Gales señalan que las vertientes convexas y de mayor grado de pendiente son las que experimentan más erosión. La misma reflexión está documentada por O'Farrel et al., (2007). Este tipo de vertientes también se encuentran en la cuenca de Vernegà, se puede comprobar en la figura 2a, como en una de las zonas donde se realizaron trabajos de desbroce de madroños y brezos, el grado de pendiente es muy elevado y la vertiente es convexa. De hecho en la cuenca de Vernegà el 43,6% de la superficie es convexa, el 40,6% es cóncava y sólo el 15,8% es llana. Claro está que las zonas más llanas de la cuenca corresponden a las zonas agrícolas.

A nivel de cauce, en la bibliografía encontramos datos tanto en relación a sedimento en suspensión como a carga de fondo. Jolicoeur et al., (2006) concluyeron que las mayores concentraciones de sedimentos en suspensión fueron medidos en los pequeños afluentes que drenan desde las vertientes más pronunciadas durante la extracción de madera, con un máximo de concentración de sedimentos en suspensión de 404 mg/l. Otros estudios realizados por Stott (1997) en Escocia y Monte et al., (2005) en Gales encontraron relaciones de las actividades forestales tales como la extracción de madera y el aumento de la carga de fondo en el lecho del cauce principal

de la cuenca.

Hay investigadores que ya han detectado que los manejos forestales producen más cantidad de escorrentía en las vertientes y también erosión, y lo han detectado a escala de parcela y también de cuenca (Jamshidi et al., 2013). Estos autores señalan que el agua de escorrentía puede llevar disueltos que pueden incluso perjudicar a la calidad del agua.

Neary et al., (2009) también investigaron las relaciones entre la importancia que tiene el suelo en la cantidad y calidad del agua. El estudio, realizado en varias cuencas de los Estados Unidos, concluye que siempre un manejo forestal cambia la hidrología de una zona, no solo a nivel de cantidad de agua sino también a nivel de su calidad. Neary et al., (2009), señalan que todas las capas del suelo, desde la hojarasca hasta las capas más profundas son el mejor filtro para que las aguas sean de una calidad aceptable. Los manejos forestales pueden dañar estas capas y romper estos filtros, haciendo que la purificación del agua sea menos efectiva.

La calidad del suelo ya hemos visto que es crucial para varios autores y determinante para soportar manejos forestales y más si estos son repetitivos. Este es un aspecto importante, ¿cada cuánto tiempo puede desarrollarse un manejo forestal sin dañar al suelo?. McDonald et al., (2001) vieron como la calidad del suelo se veía alterada negativamente en repetitivos manejos forestales que tenían lugar en Jamaica. También hacían mención, como ya hemos señalado, la importancia que tienen las pendientes pronunciadas. El manejo puede ser causante del deterioro orgánico y químico del suelo, pues hay más lavado y consecuentemente los cambios en la hidrología serán más evidentes, no solo a nivel físico, más sedimento, sino también a nivel químico. En la cuenca de Vernegà los trabajos de gestión forestal se están desarrollando a medida que la vegetación crece, o sea que el indicador básico es la altura de la vegetación y no se tiene en cuenta en qué estado está el suelo para poder soportar un manejo, a veces agresivo con la superficie del suelo. Quizás, sería interesante introducir el factor “calidad del suelo” a las diferentes variables que ya se han mencionado como importantes, como por ejemplo el grado de pendiente.

Jamshidi et al., (2013) desarrollan en bosques de eucalipto australianos un modelo, basado en la USLE en el cual minimizan los efectos negativos de la gestión forestal proponiendo diferentes tipos de manejo dependiendo de variables tales como el clima y la pendiente. Los autores concluyen diciendo que la intensidad de la precipitación que puede tener lugar tras los trabajos forestales es determinante para que los valores de erosión aumenten.

Bathurst et al., (2010) también desarrollan modelos de predicción de aumento de la

erosión en laderas forestales de Ecuador. Los autores creen que es un punto clave la cantidad de agua que el suelo forestal puede almacenar. El modelo SHETRAN determina que lugares tienen un alto riesgo de provocar deslizamientos determinados por la densidad de la vegetación, la pendiente y por la capacidad de campo del suelo.

En Japón, Wakiyama et al., (2012) destacan la importancia del mantenimiento de la materia orgánica de las primeras capas del suelo para no tener pérdidas de suelo importantes. Conociendo que existe erosión después de manejos forestales han realizado investigaciones para comprobar los puntos críticos mediante trazadores y concluyendo que el uso de trazadores evidencia puntos críticos de erosión en vertientes forestales donde el contenido de materia orgánica es bajo.

### **3.3. Contribución de los caminos forestales.**

Realmente creemos que son los caminos forestales de la cuenca los que participan de mayor manera a la generación de escorrentía, a la concentración del agua proveniente de otros usos y también en parte a la generación de sedimento susceptible de llegar al lecho fluvial y ser transportado.

Para poder demostrar este hecho se han realizado diferentes estudios en la cuenca durante estos años que demuestren el importante papel de los caminos en la hidrología y en la generación y transporte de sedimento.

En un estudio realizado mediante un colector de gran dimensión instalado al final de un camino forestal en 1994 y 1995 (Úbeda et al., 1998) la erosión producida fue de 1,97 kg/m<sup>2</sup> año. Estos datos son superiores a los resultados obtenidos en otras unidades como el bosque denso (0,012 kg/m<sup>2</sup> año), bosque gestionado (1,027 kg/m<sup>2</sup>), o en los campos de cultivo en el momento de siembra (0,38 kg/m<sup>2</sup>). Aunque también es cierto que al ser metodologías empleadas distintas los datos no son del todo comparables.

En este estudio (Úbeda et al., 1998) las concentraciones de sedimento en suspensión en el agua de escorrentía del camino forestal tienen un promedio de 1420 mg/l. A nivel de cuenca en la estación de aforo de Bosc, el máximo registrado fue de 2000 mg/l y un mínimo de 0,2 mg/l, con un promedio de 116 mg/l. En la estación de Campàs el máximo fue de 1061 mg/l y el mínimo de 0,8 mg/l, con un promedio de 30,4 mg/l. Parece ser, entonces, que la concentración de sedimento es mayor en las aguas provenientes de los caminos forestales y bajan la concentración una vez se juntan con las aguas de la riera.

Para los disueltos, el agua de escorrentía del camino forestal tiene un promedio de

4200 mg/l. En Bosc el promedio es de 112,2 mg/l y en Campàs 140,7 mg/l. Claramente hay una disolución de los elementos disueltos una vez el agua de escorrentía del camino forestal llega a la riera. El ión mayoritario, como pasaba también en el agua de escorrentía del uso forestal, es el  $\text{HCO}_3^-$  con 50,84 mg/l de promedio y a diferencia de lo que ocurre tanto en el agua de escorrentía del bosque y en el agua en las estaciones de aforo de Bosc y Campàs, no es el  $\text{Cl}^-$ , sino el  $\text{Ca}^{2+}$  seguido del  $\text{Na}^+$ , y del  $\text{SO}_4^{2-}$ , los más abundantes.

Para poder hacer una comparación entre los diferentes usos se realizaron simulaciones de lluvia como ya se ha comentado anteriormente. El promedio de 30 simulaciones realizadas en caminos forestales (Figura 10) de la cuenca arrojaron una generación de escorrentía de 16,28 l/m<sup>2</sup>, bastante superior a los datos del bosque gestionado (pinos: 3,80 l/m<sup>2</sup> y alcornoques: 2,29 l/m<sup>2</sup>). Y lo mismo en lo referente a la generación de erosión con 6,35 g/m<sup>2</sup> en el camino, superior a los 0,60 g/m<sup>2</sup> y de 0,14 g/m<sup>2</sup> de las dos parcelas gestionadas (GRAM. Datos sin publicar).



**Figura 10. Simulación de lluvia en un camino forestal.**

En otro estudio realizado en la cuenca entre los años 2006-2008 en una trampa de sedimentos de gran capacidad de un camino forestal el total erosionado fue de 4,68 kg/m<sup>2</sup> año (Cohen et al., 2009). Un dato importante es que existía una muy buena correlación ( $R^2 = 0,87$ ) entre la intensidad de precipitación y la generación de sedimento en cada evento. Otro dato importante es que en este estudio de 2009, del total de material erosionado un 21,1% era sedimento fino (limos y arcillas) susceptibles

de ser transportadas como sedimento en suspensión una vez llegasen a la riera de Vernegà, en el estudio de Úbeda (1998) el valor era de 24,40%, valor muy similar.

Un hecho bastante difícil de cuantificar y que sin duda es una fuente de sedimento importante en la cuenca son los márgenes de las vertientes en su límite con los caminos forestales (Figura 11).



**Figura 11. Márgenes de los caminos erosionados por las diferentes precipitaciones.**

En la Figura 11 puede observarse este fenómeno, e incluso en la segunda fotografía (derecha), como el agua de escorrentía del camino funciona como transportadora del sedimento que va siendo erosionado evento tras evento.

Como se ha comentado en el capítulo de área de estudio, hay una densa red de caminos en la cuenca de Vernegà. Son de diferente tipo, por los que se puede circular en automóvil, los que conectan las áreas agrícolas y los senderos. El cálculo es que hay una densidad mayor de caminos en el área forestal que en el área agrícola, eso supone un 51% de uso camino forestal y un 49% de uso camino agrícola.

Para Scharrón y McDonald (2007) son las pistas forestales, es decir los caminos que pueden ser transitados en autos los que generan más sedimentos. Estos caminos en les Gavarres son de vital importancia para llegar a zonas urbanizadas. El propietario de la finca “Els Metges” comentaba que el dinero invertido en arreglar el camino que llega a su finca es lo que le suponía más coste económico, dependía de las precipitaciones que la pista quedaba más o menos maltrecha. Croke et al., (1999), en un estudio con lluvia simulada en el sureste de Australia demuestran que para esa zona los caminos y pistas suponen el uso que más sedimento exporta y Scharrón y McDonald (2007) calculan unas tasas de hasta 580 t/ha año en un camino forestal con un 21% de pendiente, muy por encima de los 19,7 t/ha año calculadas en Vernegà.

Un estudio interesante es el de Sidle et al (2006), habla sobre el papel crucial que tienen los senderos en la hidrología de la cuenca, no solo porque son una fuente de sedimento, sino porque concentran mucha de la precipitación, generan una gran cantidad de escorrentía y lo más importante son los que conectan diferentes usos del suelo llegando a generar una red de canales que consideran deberían tenerse en consideración en la redacción de cualquier plan de gestión forestal. Esto es justo lo que ocurre en la cuenca de Vernegà, donde los caminos son una fuente de sedimento además de actuar como canales de conexión entre diferentes áreas de la cuenca (Figura 12 a y b).





**Figura 12. a. Estudio sobre la jerarquización de los caminos forestales en la cuenca de Vernegà. b. En la fotografía puede observarse como se ve la roca madre desnuda lo que facilita que el agua de escorrentía circule con mucha facilidad en estos caminos forestales.**

Fu et al., (2009) aplican diferentes modelos para prever la erosión basados entre otros en la USLE (Universal Soil Loss Equation). El estudio diferencia 7 categorías de caminos, dependiendo de su uso, de su área, y de su superficie dependiendo de si está compactada o no.

Además el estudio hace una revisión a otros trabajos y vamos a utilizar este resumen de diferentes estudios, realizados, la mayor parte en Australia, para comparar sus resultados con los encontrados en los estudios realizados en la cuenca de Vernegà (Tabla 2).

La unidad establecida es  $g/m^2/mm/año$ . Siendo los gramos erosionados de sedimento, por el área y los mm de precipitación anuales.

**Tabla 2. Comparación de los datos obtenidos en trabajos realizados en la cuenca de**

## Vernegà con los estudios resumidos en Fu et al., (2009).

Lugar	Superficie	Uso	Precipitación anual (mm)	Pendiente %	Tasa de erosión (g/m <sup>2</sup> /mm/año)	Referencia
Victoria (Australia)	Sin compactar	1319 autos/año	723	4	2,7	Sheridan and Noske (2007)
Victoria (Australia)	Sin compactar	558 autos/año	892	12	1,4	Sheridan and Noske (2007)
Victoria (Australia)	Sin compactar	415 autos/año	1161	11	2,3	Sheridan and Noske (2007)
Victoria (Australia)	Compactada Gravas	3369 autos/año	855	4	0,6	Sheridan and Noske (2007)
U.S. Virgin Islands	Sin compactar	Uso muy alto	1150	9	4,6	MacDonald et al. (2001)
U.S. Virgin Islands	Sin compactar	Uso medio	1150	4	0,2	MacDonald et al. (2001)
U.S. Virgin Islands	Sin compactar	Uso bajo	1150	14	2,1	MacDonald et al. (2001)
Malasia	Sin compactar	Uso alto	2654	-	10,3	Sidle et al (2004)
Vernegà	Sin compactar	Uso nulo	591,3	2	3,33	Úbeda et al., (1998)

Podemos ver por los datos que la pendiente es determinante para tener más o menos erosión. En el estudio de MacDonald (2001) con un uso medio y un 4% de pendiente cuantifican 0,2 g, mientras con la misma precipitación un uso bajo, pero con un 14% de pendiente la erosión aumenta a 2,1 g.

Parece ser que la superficie del camino también es determinante, aunque puede ocurrir que en superficies muy compactadas aun siendo la erosión muy baja, la concentración de escorrentía aguas abajo puede ser un problema.

Otro tema interesante es la medida del sedimento erosionado en los caminos. Akay et al., (2007) en un estudio en Turquía describen como la erosión de los caminos puede afectar a la vida acuática de los ríos. La erosión de finos puede provocar unas tasas de sedimento en suspensión superiores a 25mg/l, lo que supone un peligro para especies vegetales y animales. Este tipo de sedimento fino, en algunos lugares puede ser transportado por el viento, en forma de erosión eólica. Consideramos que en la cuenca de Vernegà nunca se ha llegado a estos niveles de concentración de finos.

La gestión forestal también incluye los caminos forestales. Wear et al., (2012), sabiendo de la importancia de los caminos forestales en la generación y más en la conexión de sedimento de los caminos al canal de los ríos han aplicado con bastante éxito medidas correctoras en caminos forestales de Estados Unidos que cruzan un río. Estos caminos que cruzan perpendicularmente ríos o torrentes evacuan directamente todo el sedimento directamente al cauce. Para evitarlo aplican tres técnicas. La

primera es acolchada con paja, en los metros más cercanos al contacto del río con el cauce. El segundo es la presencia de ramas y troncos en las mismas áreas, y la tercera es acolchado de paja e instalación de siltfences. Todas las medidas son efectivas, aunque los autores hablan del gran coste económico que supone. También relatan que a veces la instalación de los siltfence provoca más sedimento apto para ser transportado que el beneficio que puede aportar.

En la cuenca de Vernegà también hay caminos de este tipo (Figura 13), que cruzan la riera. Evidentemente todo el sedimento es directamente transportado hasta el cauce para su movilización ya a nivel de canal.



**Figura 13.** Imagen de un camino cruzando la riera de Vernegà.

### **3. Dinámica del transporte de sedimentos.**

#### **3.1. Concentración de sedimentos en suspensión.**

En el segundo periodo de estudio se obtiene que la concentración de sedimentos en suspensión promedio en Bosc es mayor que en Campàs. Situación que se debe al alto coeficiente de variación que presenta (254,8%). Esta alta dispersión de la concentración de sedimentos en suspensión, tanto en momentos de crecidas como en momentos de caudal base, es muy importante en la cuenca. Ya que sólo los registros más altos se registran en momentos de crecidas. El evento que hemos registrado con la mayor concentración de sedimentos en suspensión fue la crecida de octubre de

2006, donde los registros para el caso de Bosc superaron los 2 g/l y para Campàs de 1 g/l.

Estos fuertes cambios también los encontramos en otras cuencas como la de Arnás (Seeger et al., 2004), donde el promedio de la concentración de sedimentos varía de 34,9 hasta 2288,6 mg/l, con picos desde 86 hasta 4780,7 mg/l. Otro ejemplo lo encontramos en una pequeña cuenca aragonesa del Pirineo de 0,45km<sup>2</sup> (Regües et al., 2009), donde cerca del 50% de las concentraciones de sedimentos en suspensión en crecidas no alcanzan los 100 mg/l y solo el 2,5% supera los 1000mg/l.

Según Estrany et al., (2009) en la cuenca mediterránea de Na Borges (Mallorca), la concentración de sedimentos en suspensión fue baja cuando el caudal base era alto; sus registros medios fueron de 17,3 mg/l con un máximo de 2,270 mg/l. Los fuertes cambios de la escorrentía base a nivel estacional provocan diferentes grados de transporte, causando una elevada dispersión en la concentración de sedimentos en suspensión, y su relación con el caudal, indicando que otros factores controlan el transporte de sedimento. Una de las razones que se atribuye, entre otras cosas, es al agotamiento del sedimento en suspensión disponible en el canal o a las diferencias en la disponibilidad de sedimento al principio y al final de las crecidas (Walling y Webb, 1982; Steegen et al., 2000 y Hudson, 2003).

Hay que tener en cuenta que existen muchas dificultades en la toma y análisis de las muestras que influyen directamente sobre la evaluación del nivel de erosión. El transporte de material fino en suspensión es el principal mecanismo de transferencia de material en partículas en corrientes en todo el mundo (Webb et al., 1995 ).

### **3.1.1. Histéresis entre la concentración de sedimentos en suspensión y las crecidas.**

Las histéresis que se lograron registrar en la cuenca constatan que durante las crecidas el pico de la concentración de sedimentos en suspensión, en general no coinciden con el pico de caudal, solo sucedió en la crecida del 18 y 19 de octubre de 2006. La diferencia de algunas características de las histéresis se deben no solamente a su comportamiento, el resultado también puede estar influenciado por la metodología utilizada. Esta crecida del 2006 es antihoraria en Bosc y horaria para Campàs (Figura 9, Capítulo V). Una de las posibles razones que podemos encontrar es que el muestreador automático tiene un intervalo de recolección de las muestras diferente.

En las histéresis provenientes de condiciones secas, como es la primera crecida del año hidrológico 2006/07, es habitual que la concentración de sedimentos en suspensión máximo se registran en el periodo de disminución de la crecida, tal es el caso de la

cuenca de Ca L'Isard, donde Soler et al., (2008) constatan que las histéresis negativas suelen ser características del periodo seco, y al igual que esta crecida, corresponde a intensidades de precipitación alta. Lo mismo sucede con crecidas en la cuenca de Arnás, donde Lana-Renault (2011), presenta histéresis negativas en periodos secos. Un ejemplo de la crecida de Arnás, muestra que en promedio son mayores las negativas con 2900 mg/l que las crecidas con histéresis positivas con 1900 mg/l.

Un aspecto que puede responder al porqué la crecida de octubre de 2006 registró concentraciones de sedimentos en suspensión altas, es la crecida de octubre de 2005. Dada su magnitud, generó mucho material disponible, permitiendo una mayor capacidad de arrastre hídrico.

Las histéresis positivas, son más frecuentes en cuencas pequeñas (Heidel, 1956; Emmet, 1970). Es el caso de la crecida de marzo de 2010, donde hay una diferencia de 2 horas. Las crecidas donde la carga es mayor antes del caudal máximo se interpreta de diferentes maneras, una razón es la existencia de fuentes de sedimento próximas al punto de muestreo (Klein, 1984. Steegen et al., 2000), o debido a que estas crecidas ocurren en condiciones húmedas de la cuenca (Soler, et al., 2008; Zabaleta, et al., 2007), otras interpretaciones consideran que es debido a un agotamiento del sedimento (Arnborg et al., 1967. Wood, 1977). En la cuenca de Vernegà, creemos que es el agotamiento del material disponible sobre la cuenca.

Un ejemplo lo encontramos en la crecida del 15 al 18 de noviembre, que muestra que al provenir de un tiempo de respuesta corto entre crecidas, presentan un pico horario positivo en la histéresis, pero aún más importante, concentraciones de sedimentos en suspensión inferiores en los picos sucesivos. Estos resultados son asociados, además del agotamiento del material disponible, al aumento del caudal base (Lorente, et al., 2000).

### **3.2. Concentración de sedimentos en disolución.**

En promedio, la concentración de sedimentos en disolución es de 112,2 mg/l en Bosc y de 140,7 mg/l, en Campàs. Estos registros presentan una menor variabilidad con respecto a la concentración de sedimentos en suspensión. Los resultados muestran la importancia de la concentración de los sedimentos en disolución. Más del 70% de los registros se acumulan entre los 75 y 100mg/l para Bosc, y de 75 y 200mg/l para Campàs. Estos valores destacan en comparación con la concentración de sedimentos en suspensión para las dos estaciones de aforo, más del 57% de los registros son inferiores a 25 mg/l. Esta gran diferencia de casi el triple, se encuentra en la cuenca de Cal Parisa en el Pirineo oriental (Llorens et al., 1997), la cuenca, y así lo afirman los autores, es claramente dominada por la concentración de sedimentos en disolución,

que llega a ser cuatro veces mayor que la concentración de sedimentos en suspensión. Situación típica de áreas forestales estables que han sido afectadas por actividades humanas (Gregory and Walling, 1973; Slaymaker, 1988).

En la crecida de noviembre de 2011, se observa que tanto el pico de la concentración de sedimentos en suspensión como en disolución, no coinciden con el pico de la crecida. Creemos que para el caso de la concentración de sedimentos en suspensión, existe una baja disponibilidad de sedimentos en la cuenca; y para el caso de los sedimentos en disolución, es debido al efecto de dilución en el agua; asociada generalmente al aporte de agua de lluvia y/o de la escorrentía de la crecida (Gregory and Walling, 1973; Slaymaker, 1988). Este hecho, hace esperar que los menores registros de la concentración de sedimentos en disolución se encuentren en momentos de crecida, especialmente muy cercanos a los registros de caudal pico. En el caso de Bosc, sucede en la crecida de marzo de 2011, después del primer pico y anterior al segundo pico; para el caso de Campàs sucede en momentos de caudal base.

### 3.3. Producción de sedimentos.

Durante el periodo 2005-2012 la producción de sedimentos total anual es mayor en Campàs con respecto a Bosc y presenta una variabilidad importante (Tabla 2, Capítulo V), con coeficientes de variación de 71,2% en Bosc y de 60,8% en Campàs. La respuesta sedimentaria también fue muy variable en la cuenca de Isábena, con cargas de sedimentos de inundación que varían entre 0,06 y 121 t/km<sup>2</sup>año (López Tarazón et al., 2010).

El aspecto que más se ha destacado de la producción de sedimentos en el Capítulo V, es el cambio de mayor producción de sedimentos en suspensión a los sedimentos en disolución ocurrido a partir del año 2010. Dicho cambio se puede atribuir a que en los dos primeros años de estudio (2005/06 y 2006/07), fueron años posteriores a una gran crecida; y en los años sucesivos, impulsados por el año de menor escorrentía superficial 2007/08, la producción de sedimentos en disolución es más cercana a lo que usualmente ocurre en la cuenca.

Una mayor cantidad de producción de sedimentos en disolución, sucede principalmente en ríos donde predominan las aportaciones de aguas subterráneas (Sear et al., 1999), provocados por estas aportaciones libre de sedimento, permitiendo la dilución de los sedimentos en suspensión generados por las crecidas (Estrany y Garcia, 2012).

Sin embargo, el predominio de las aguas subterráneas en los ríos mediterráneos se caracteriza por la alternancia estacional de los caudales influentes e efluentes, con

consecuencias directas en el régimen de transporte de sedimentos (Estrany et al., 2009). Por ello lo que creemos que sucede en la cuenca, es debido a la baja concentración de sedimentos en suspensión.

Otro ejemplo de las bajas cargas de sedimentos lo encontramos cuencas como la Tordera que fue de 50 t/km<sup>2</sup>año (Rovira y Batalla, 2006), esta cuenca es mayor en área que la riera de Vernegà, pero sus registros fueron más bajos que los 100 a 200 t/m<sup>2</sup>año descritos por Walling y Webb (1983, 1996).

Para cuencas mediterráneas de la península ibérica, se han registrado cargas entre los 200 a 4000 t/km<sup>2</sup>año, siendo el este caso obtenido por Lvovich et al., (1991) para ríos del norte y sur de la región mediterránea. Este hecho puede asociarse a importantes factores. El primero, la existencia de una extensiva cobertura forestal, que ocupa la mayoría del área de captación total, como lo describiremos más adelante. Dieckmann et al., (1989) encontró que un incremento del 30% de la cobertura vegetal puede causar el 90% de la reducción de carga de sedimentos.

En cuencas mayoritariamente forestales, puede llegar a generar menor carga de sedimentos que pequeñas áreas agrícolas, y un inadecuado manejo forestal puede dar lugar a pérdidas de suelo aún superiores a las registradas en terrenos totalmente cultivados (Gimenez, et al., 2012). Las prácticas forestales aplicadas a la cuenca sugieren que generan un efecto directo sobre la carga de sedimentos cuando el tiempo entre las actuaciones y las crecidas es bajo, caso de octubre de 2005. En la cuenca de Manula (Loughran et al., 1992) se estima que al menos el 93% de la producción de sedimentos se deriva de los viñedos y el 7% restante de los bosques y las tierras de pastoreo.

#### **4. Calidad de las aguas.**

De acuerdo con la Orden Ministerial MAM/3207/2006 sobre directrices y legislación en materia de calidad del agua se establecen las concentraciones máximas admisibles para consumo humano y para las redes de aguas fluviales. Se ha analizado los promedios de los puntos de muestreo con el fin de evaluar la calidad de las aguas dentro de la cuenca (Tabla 3).

En general ningún valor sobrepasa los niveles máximo admisibles, solo para el caso del ion Al<sup>3+</sup> duplicó en promedio el nivel máximo, para la estación de Campàs; las razones pueden llegar a ser diversas, pero sabemos que su coeficiente de variación es de 125,8% variando de concentraciones máximas de 3,8 mg/l en la crecida de marzo de 2011 hasta registros 0 que se repiten en muchas ocasiones en caudales base.

Haciendo énfasis a estos registros máximos también encontramos otros ejemplos donde puntualmente los iones presentaron concentraciones superiores a los máximos admisibles. Es el caso de  $\text{Ca}^{2+}$  en el pozo 3, ya que la concentración máxima permitida es de 100 mg/l pero en una muestra de octubre de 2011 su concentración fue de 174,2 mg/l, fecha en que se produjo la primera crecida del año hidrológico. Otro caso fue el del  $\text{K}^+$  donde la concentración máxima permitida es de 12 mg/l y en el pozo 1 en octubre de 2008 la concentración máxima alcanzada fue de 35,4 mg/l.

Para el caso de la lluvia a pesar de que no está dispuesta en la Tabla 3, solo en un caso es elevado la concentración respecto al máximo admisible, es el caso del  $\text{Zn}^{2+}$  del punto campos, donde la concentración admisible es de 5 mg/l y el registro de diciembre de 2009 alcanzó una concentración de 6,9 mg/l, pero en promedio este registro es inferior al admisible (2,3 mg/l), al igual que todos los registro iónicos con los que se cuenta para los dos puntos de muestreo de la lluvia. En general según los niveles de control del agua a nivel europeo, la calidad de las aguas se encuentran por debajo de límites máximos permitidos, a pesar de ello, se destaca que los mayores cambios que se han generado corresponden a iones que están involucrados con el uso de abonos, sabiéndose que la disminución de la aportación de ciertos iones no solo están afectados por la precipitación, sino también por las aguas subterráneas de la cuenca. Ya que en estas aguas es más difícil encontrar una alta variabilidad de los resultados.

**Tabla 3. Concentraciones máximas admisibles y promedios iónicos de los puntos de muestreo en la riera Vernegà durante el periodo 2005-2012.**

Iones	Concentración máxima admisible (mg/l)		Concentración promedio puntos de muestreo (mg/l)				
	Consumo Humano	Aguas Fluviales	Bosc	Campàs	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3
$\text{Na}^+$	50-150	50-150	12,86	14,86	22,48	35,66	25,58
$\text{Ca}^{2+}$	*100	*100	8,89	13,88	83,98	86,64	45,33
$\text{Mg}^{2+}$	50	50	2,71	3,76	11,89	15,14	12,18
$\text{K}^+$	12	12	1,85	2,07	20,32	4,75	4,74
$\text{HCO}_3^-$			52,59	57,05	219,61	240,92	193,76
$\text{Cl}^-$	200	400	39,70	33,40	50,76	52,51	53,54
$\text{SO}_4^{2-}$	200	250	8,67	12,14	9,78	16,45	13,46
$\text{SiO}_2$	10-25	10-25	8,15	7,54	13,07	9,99	5,58
$\text{NO}_3^-$	50	100	2,07	2,53	32,18	25,45	2,88
$\text{NO}_2^-$	0,1	0,1	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01
$\text{PO}_4^{3-}$			0,13	0,11	0,92	0,24	0,13
$\text{Al}^{3+}$	0,2	0,2	0,25	0,40	0,02	0,01	0,01
$\text{Fe}^{3+}$	0,2	0,2	0,18	0,26	0,01	0,01	0,01
$\text{Mn}^{2+}$	0,1	0,05	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00
$\text{Zn}^{2+}$	5	5	0,01	0,07	0,02	0,01	0,01

En una cuenca forestal de los Estados Unidos se encontró que tanto el pH, como  $Mg^{2+}$ , y el  $Ca^{2+}$ , la suma de cationes básicos del Si y Al total, sugieren que las diferencias en la concentración de estos solutos entre los puntos de muestreo fueron moderadas por los niveles de descarga. (Piatek et al., 2009). En nuestra cuenca estos iones también presentaron unas concentraciones moderadas y sus variaciones no fueron tan marcadas a nivel anual.

Son entonces los niveles de Nitrógeno los que han ido disminuyendo, especialmente para la estación de Campàs. Según Giménez et al., (2012), la descarga anual de nitratos por escorrentía en la Tejería y Latxaga, cuencas mayoritariamente agrícolas con aplicación de fertilizantes, significa una pérdida del 22% y 10% del nitrógeno respectivamente, debido al abonado. En los fosfatos tienen un comportamiento similar.

Otro aspecto muy importante que creemos que también interviene sobre los procesos hidroquímicos en cuencas más secas mediterráneas influenciadas por la variación estacional al igual que lo describen en la cuenca de Pradas son: (1) la reanudación del flujo después de la sequía del verano, que vuelca a los solutos acumulados durante el período seco, y (2) los cambios estacionales en química de las aguas subterráneas que resultan de la interacción de tiempo de residencia del agua, la temperatura y CO<sub>2</sub>: presión parcial. (Piñol, et al., 1992).

En cuenca mediterránea de Cerdeña, según (Cidu y Biddau, 2007), se ha encontrado que la composición global química de las aguas no cambió considerablemente, tanto en invierno como en verano, pero la salinidad y la concentración de los iones mayoritarios aumentó en verano. El hecho de que estos elementos se disuelven principalmente durante los períodos de bajo flujo parece estar relacionado con la intensidad de los procesos de interacción agua-suelo, cuando la aportación de agua de lluvia a los ríos es baja, es decir en condiciones de bajo flujo.

Como resultado de todos los análisis obtenidos del transporte de sedimentos en disolución sobre el agua se ha realizado un resumen de la concentración promedio. Encontrándose que la concentración media de la lluvia fue de 59,9 mg/l, en Bosc de 2 mg/l y en Campàs de 140,7 mg/l. Si comparamos esta diferencia con la obtenida en el estudio "Calidad de las aguas de las rieras de Arbúcies, Ridaura y Vernegà" realizado para el año 1995 en la cuenca de Vernegà, encontramos que la concentración promedio de la lluvia fue de 27,8 mg/l, y la concentración de Campàs de 99,71 mg/l, este estudio muestra una gran diferencia sobre la concentración de sedimentos disueltos en la lluvia, y para el caso de Campàs también ha variado de forma considerable. Hay que tener en cuenta que en este periodo se han aumentado las actividades de los planes técnicos de gestión forestal incluyendo la actuación realizada

sobre el área agrícola abandonada.

- Medición del pH y la conductividad eléctrica.

Adicionalmente en las dos estaciones de aforo se midió el pH y la conductividad de las aguas durante el periodo 2006-2012 (Figuras 14 y 15). El pH en las dos estaciones de aforo no presenta una gran variabilidad anual, aún comparándolo con los registros que se han medido en el año 1993/94. Sólo en el caso de la estación de aforo de Bosc (Figura 14), para el año 2006/07 supera el máximo los 9.

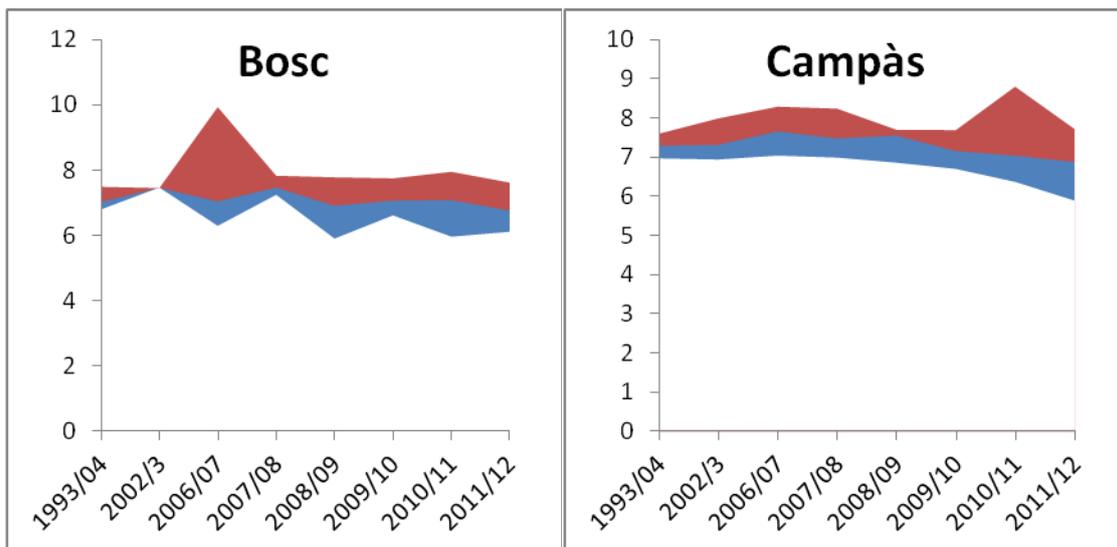


Figura 14. Promedio, máximo y mínimo anual del pH en las dos estaciones de aforo.

Para el caso de la conductividad en las dos estaciones de aforo (Figura 15) tiene una variación marcada, ya que depende de la cantidad de solutos disueltos en el agua. Para el caso de Bosc, el años que tiene una diferencia más alta entre el promedio y el máximo es el año 2010/11; igual que en la estación de aforo de Campàs.

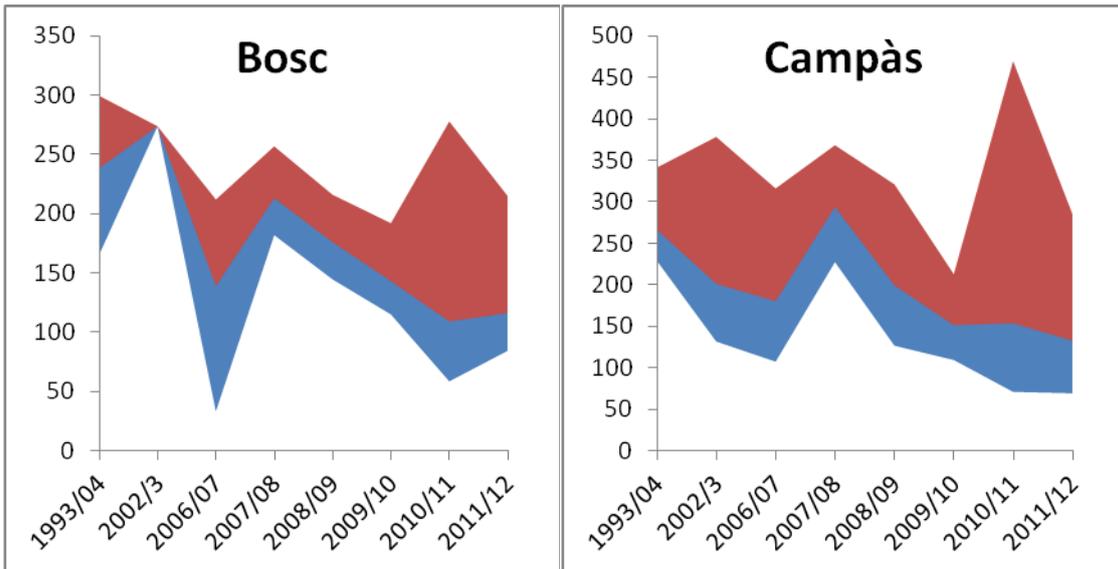


Figura 15. Promedio, máximo y mínimo anual de la Conductividad eléctrica en las dos estaciones de aforo.



# Capítulo VII: Conclusiones



## CONCLUSIONES.

En el macizo de les Gavarres el área forestal ha aumentado un 18% desde el año 1957 hasta el año 2007. Este hecho es general en muchas montañas medias mediterráneas. Se atribuye esta variación al abandono de zonas agrícolas. La cuenca de la riera de Vernegà como zona de estudio es representativa como una zona agrícola y forestal de todo el ámbito de les Gavarres.

Aun así, en la cuenca de Vernegà, como en otras áreas de les Gavarres, desde principios de la década de los años 2000 se ha recuperado el manejo forestal con la implantación de Planes Técnicos de Gestión y Mejora Forestal. Estos manejos han propiciado, dentro de la cuenca, una recuperación del aprovechamiento forestal y desbroce del matorral. Incluso se ha producido el proceso inverso: la recuperación de zonas agrícolas abandonadas.

De acuerdo con la distribución estacional de las lluvias en el período 1983-2012, la mayor cantidad de precipitación ocurre durante los meses de otoño (octubre con 105 mm y noviembre con 66 mm), mientras que los meses de verano son escasas o nulas.

Al igual que ocurre con las precipitaciones, la variabilidad temporal de la escorrentía de la cuenca es muy acusada. Esto implica que la relación entre la precipitación y la escorrentía es variable, en función de la época del año, de la magnitud y la frecuencia de los episodios de lluvia. Esta relación es mayor durante los meses de otoño ( $R^2=0,60$ ), y disminuye a lo largo del año, siendo mínima en los meses de primavera ( $R^2=0,30$ ).

El agua subterránea juega un papel fundamental en la generación de la escorrentía superficial de la cuenca. Sin embargo presenta una baja correlación cuando se contrasta con la escorrentía total mensual. Esto es debido al efecto que producen las precipitaciones de elevada intensidad, que producen valores de escorrentía elevados, aunque el nivel del agua subterránea se mantenga bajo. Se ha estimado que si el nivel del pozo 3 oscila en torno a -2,0 y -2,5 m, se mantiene un flujo de escorrentía de base constante durante los meses de invierno. Aún así, el 70% de la escorrentía procede de los episodios de crecidas.

En promedio, la escorrentía anual de Bosc representa un 25% que la escorrentía de Campàs, dada la mayor área de captación, pero sobre todo la presencia de campos de cultivo. Con lo que hay una diferencia en el volumen de escorrentía y en función de la cobertura del suelo. Además, en Campàs el 46% del tiempo hay escorrentía, mientras

que en Bosc solo es del 33%. Por tanto, no solo hay mayor volumen de escorrentía, sino que también permanece durante más tiempo.

A partir de los trabajos de manejo forestal, se ha detectado un aumento de la escorrentía media de un orden de magnitud superior en Bosc (982%) y del 278% en Campàs. En promedio la escorrentía superficial en la estación de aforo de Bosc en el primer periodo (1993-2005) fue de 6,8 mm y de 66,8 mm para el segundo periodo (2005-2012); en Campàs fue de 33,1 mm y de 92,0 mm, respectivamente. Este cambio tan importante en la escorrentía, sobre todo en Bosc, muestra seguramente la sensibilidad de la cuenca a los cambios en la cobertura forestal.

La respuesta más importante de la cuenca fue octubre de 2005 con una precipitación mensual de 250 mm, generando una respuesta en Bosc de 36,9 mm y de 143,25 en Campàs, fue el detonante para que se empezaran a mover una gran cantidad de sedimentos de diferente tamaño, que durante mucho tiempo fueron susceptibles de ser movilizados en posteriores eventos. Creemos que los trabajos de gestión forestal previos junto con esta gran crecida, hicieron aumentar la carga de sedimentos tanto en suspensión como en disolución.

En el segundo periodo de estudio, la concentración de sedimentos en disolución a partir de la mediana es mayor que la concentración de los sedimentos en suspensión en las dos estaciones de aforo, siendo la primera mayor en Campàs.

La producción de sedimentos en disolución es más grande que en suspensión. Con un promedio en suspensión de 1,54 t/km<sup>2</sup>año en Bosc y 7,10 t/km<sup>2</sup>año en Campàs y 2,48 t/km<sup>2</sup>año y 11,44 t/km<sup>2</sup>año en disolución respectivamente.

La calidad de las aguas de la riera de Vernegà, tanto en los registros en Bosc como en Campàs, expresados en los siguientes parámetros: conductividad eléctrica, pH, iones mayoritarios y minoritarios, no sobrepasan los niveles máximos que podrían determinar una contaminación según la legislación vigente.

Para las aguas del acuífero de la cuenca, a través de los muestreos de los tres pozos, sí que se han obtenido durante largos periodos de tiempo niveles altos en fosfatos y nitratos, debido a que se detuvo la aplicación de abonos nitrogenados en los campos de cultivo de Mas Bassets en 2007.



# Capítulo VIII: Bibliografía



Agència Catalana d'Aigua, (2008): Evolució i estat actual de la sequera, 24 d'abril de 2008. Generalitat de Catalunya, *Departament de Medi Ambient i Habitatge*.

Akay, A, Erdas, O, Reis, M, Yuksel, A. (2008): Estimating sediment yield from a forest road network by using a sediment prediction model and GIS techniques. *Building and Environmen*, 43; 687-695.

Alexandrov, Y., Laronne, J.B., Reid, I., (2003): Suspended sediment transport in flash floods of the semiarid northern Negev, Israel. *IAHS Publication*, 278; 346–352.

Arnáez, J., Lasanta, T., Ruiz-Flaño, P., Ortigosa L. (2007): Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards. *Soil and Tillage Research*, 93; 324–334.

Arnborg, L., Walker, H.J., Peippo, J. (1967): Suspended load in the colville river, Alsaka. *Geografiska Annaler*, 49A (2-4); 131-144.

Batalla, R. (1993): Contribució del transport de sorres en el balanç de sediment d'una conca granítica mediterrània. *Tesis inédita, Universitat de Barcelona*, 198.

Batalla, R.J., Sala, M., (1994): Temporal variability of suspended sediment transport in a Mediterranean sandy gravel-bed river. *IAHS Publication*, 224; 299–305.

Batalla, R.J., Sala, M., Werritty, A., (1995): Sediment budget focused on solid material transport in a subhumid Mediterranean drainage basin. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 29 (2); 249–264.

Balash, J. (1998). Resposta hidrològica i sedimentària d'una petita conca de muntanya analitzades a diferent escala temporal. *Tesis inédita, Universitat de Barcelona*. 376.

Bathurst, C. Bovolo, I, Cisneros, F. (2010): Modelling the effect of forest cover on shallow landslides at the river basin scale. *Ecological Engineering*, 36; 317-327.

Beguiría, S., López-Moreno, JI., Lorente, A., Seeger, M., García-Ruiz, JM. (2003): Assessing the effect of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *A Journal of the Human Environment*, 32 (4); 283-286.

Burt, T.; Walling, D. (1984): Catchment experiments in fluvial geomorphology. *Geo Books, Norwich*. 593.

Ceballos, A. (1997): Balance de agua de una cuenca hidrográfica bajo explotación de dehesa en extremadura. *Tesis inédita, Universidad de Extremadura*; 207.

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.

Cernusca, A., Tappeiner, U., Bahn, M., Bayfield, N., Chemini, C., Fillat, F., Graber, W., Rosset, M., Siegwolf, R., Tenhunen, J. (1996): ECOMONT Ecological effects of land use changes on European *Terrestrial mountain ecosystems*. *Pirineos*; 145-172.

Chiew, F.H.S., Whettonb, P.H., McMahon, T.A., Pittockb, A.B. (1995): Use of seasonal streamflow forecasts in water resources management. *Journal of Hydrology*, 270; 135–144.

Chow, V. (1994): Hidrología Aplicada. *McGrawHill Interamericana, S.A. Colombia*; 584.

Cidu, R., Biddau, R., (2007): Transport of trace elements under different seasonal conditions: Effects on the quality of river water in a Mediterranean area Original Research Article. *Applied Geochemistry*, 22 (12); 2777-2794.

Clotet, N., (1984): La dinàmica geomorfològica actual responsable del subministrament de cabal sòlids en una conca muntanyosa: la conca de la baells (Alt Llobregat). *Tesis inédita, Universitat de Barcelona*; 310.

Clotet, N., Gallart, F. (1986): Sediment yield in a mountainous basin under high Mediterranean climate. *Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. Bd. 60*; 205-216.

Clotet-Perarnau, N.; Gallart, F., Balasch, C. (1988): Medium-term erosion rates in a small scarcely vegetated catchments in the Pyrenees. In Harvey, A. and Sala, M (eds.): *Geomorphic Processes in environments with strong seasonal contrasts. II: Geomorphic Systems. Catena Supplement*, 13; 37-47.

Cohen, M., Asperó, F., Fouralt, V., Gana, A., Mering, C., Outeiro, L., Palibrik, M., Poletto, A., Raymond, R., Rey, F, Úbeda, X. (2009): Érosion hydrique et paysages dans les montagnes méditerranéennes. *Ingénieries. Spécial*; 122-135.

Conacher, A., Sala, M. (1998). Land degradation in mediterranean environments of the world. *Ed. John Wiley & Sons*.

Consorti de les Gavarres. (2007, 01 01): Gavarres.cat. Retrieved 01 03, 2012, from Cavarres.cat: <http://www.gavarres.cat/Details.aspx?t=Creacio>

Cosandey, C., (1993): Forêt et écoulements: rôle de la forêt sur la formation des crues et le bilan d'écoulement annuel. Impact d'une coupe forestière. Rapport sectoriel de recherche du Programme CEE "suivi des conséquences d'une coupe forestière sur les phénomènes hydrologiques, hydrochimiques et d'érosion solide dans un bassin-versant de Lozère"; 81.

Croke J, Hairsine P, Fogarty P. (1999): Sediment transport, redistribution and storage on logged forest hillslopes in south-eastern Australia. *Hydrological Processes*, 13; 2705-2720.

Croke J, Hairsine P, Fogarty P. (2001): Soil recovery from track construction and harvesting changes in surface infiltration, erosion and delivery rates with time. *Forest Ecology and Management*, 143; 3–12.

Debussche, M.; Lepart, J.; Dervieux, A. (1999): Mediterranean landscape changes: evidence from old postcards. *Global Ecology and Biogeography*, 8; 3-15.

Dieckmann, H., Motzer, J., Seuffert, O., Harres, H.P. (1989): Vegetation vs. erosion. The example of the Pixinamanna Catchment in southern Sardinia. *Geoöko*, 2; 11-24.

Domingo, F., Puigdefabregas, J., Moro, M.J., Bellot J. (1994): Role of vegetation cover in the biogeochemical balances of a small afforested catchment in southeastern Spain. *Journal of Hydrology*, 159: 275-289

Dunne, T. Leopold, L. B. (1978): Water in environmental planning. *Freeman, San Francisco*; 818.

Emmet. W.W. (1970): The hydraulics of overland flow on hillslopes. US Geological Survey Professional Paper, 662-A, Washington; 65.

Ehigiator, O. A, Anyata, B. U. (2011): Effects of land clearing techniques and tillage systems on runoff and soil erosion in a tropical rain forest in Nigeria. *Journal of Environmental Management*. 92; 2875-2880.

Estrany, J., (2009): Hydrology and sediment transport in the agricultural na Borges river basin (Mallorca, Balearic Islands). *Tesis inédita, Universitat de les Illes Balears*; 250.

Estrany, J., Garcia, C. (2012): Dinàmica de l'acumulació temporal de sediment fi al llit del torrent de Na Borjes (Mallorca). *Territoris. Universitat de les Illes Balears*, 8; 63-82.

Estrany, J., Garcia, C., Martínez-Carreras, N., Walling, Desmond E. (2012): A suspended sediment budget for the agricultural Can Revull catchment (Mallorca, Spain). *Zeitschrift*

*für Geomorphologie, Supplementbände*. 56, (3); 169 – 193.

Espelta, J. (2006): Poden conviure el bosc i el foc? Nous avenços de la recerca en ecologia del foc L'ensenyament de la biologia en l'ESO i el batxillerat. *Treballs de la SCB*, 57; 53-59.

Farguell, J. Sala, M. (2002): Magnitud y frecuencia de procesos hidromorfológicos en pequeñas cuencas mediterráneas: Riera de Vernegà, Macizo de Les Gavarres (Girona). *Aportaciones a la geomorfología de España en el inicio del tercer milenio*; 37-43.

Farguell, J. (2004): Suspended sediment dynamics and yield in the mediteranean anoia river basin under different land uses. *Tesis inédita, Universitat de Barcelona*. 217.

Fiener, P., Auerswald, K., Van Oost, K. (2011): Spatio-temporal patterns in land use and management affecting surface runoff response of agricultural catchments—A review. *Earth-Science Reviews*, 106; 92–104.

Fournier F. (1960): Climat et erosion. *Preses Universitaires de France: Paris*.

Fu, B, Lachlan, T.H, Newham, Ramos-Scharrón, C. E. (2010): A review of surface erosion and sediment delivery models for unsealed roads. *Environmental Modelling & Software*, 25; 1-14.

Gallart, F., Llorens, P., Latron. J. (1994): Studying the role of old agricultural terraces on runoff generation in a small Mediterranean mountainous basin. *Journal of Hydrology*. 159, (1–4); 291–303.

Gallart, F., Latron, J., Llorens, P., Rabadá, D. (1997): Hydrological functioning of Mediterranean mountain basins in Vallcebre, Catalonia: Some challenges for hydrological modeling. *Hidrological processes*, 11; 1263-1272.

Gallart, F., Llorens, P. (2003): Catchment management under environmental change impact of land cover change on water resources. *International Water Resources Association*, 28 (3); 334-340.

García-Ruiz, J.M., Lasanta, T., Ruiz Flaño, P. (1995): Changes in runoff erosion as a consequence of land-use changes in the Central Spanish Pyrenees. *Physics and Chemistry of the Earth*, 20 (3-4); 301.

García-Ruiz, J.; 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; 245-260.

Gimenez, R., Casalí, J., Díez, J. (2012): Evaluación de la producción de sedimentos y calidad de las aguas en cuencas agrarias de navarra. *Cuadernos de investigación geográfica*, 38 (1); 7-25.

Graf, W.H. (1988): Fluvial Processes in Dryland Rivers. *Springer-Verlag, Berlin*.

Gregory, K. H., Walling, D. E. (1973): Drainage Catchment Form and Processes. *Edward Arnold*, London; 458.

Guido, M., Pussi, P. (1993): Natural afforestation and landscape changes in the Eastern Prealps of Italy. *Revue de Géographie Alpine*, 81; 95–102.

Hartanto, H, Ravi Prabhu, R, Widayat, A. S. E, Asdak, C. (2003): Factors affecting runoff and soil erosion: plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management. *Forest Ecology and Management*, 180; 361-374.

Heidel, S.G. (1956): The progressive lag of sediment concentration with flood waves. *Transactions of the American Geophysical Union*, 37 (1); 56-66.

Hewlett, J.D., Hibbert, A.R. (1967): Factores que influyen en la respuesta de las pequeñas cuencas a la precipitación en zonas húmedas. NOSOTROS Sopper, HW Llull (Eds.), *Hidrología Forestal*, Oxford, Pergamon; 275-290.

Horowitz, A.J. (2003): An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. *Hydrological Processes*, 17; 3387–3409.

Hoyle J, Brooks A, Brierley G, Fryirs K, Lander J. (2008): Spatial variability in the timing, nature and extent of channel response to typical human disturbance along the Upper Hunter River, New South Wales, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33; 868–889.

Hudson, P. (2003): Event sequence and sediment exhaustion in the lower Panuco Basin, Mexico Original Research Article. *Catena*, 52 (1); 57-76.

Inbar, M. (1992): Rates of fluvial erosion in basins with a Mediterranean type climate. *Catena*, 19; 393–409.

IPCC (2007): Climate Change Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and

III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core writing team, Pachauri, P.K. and Reisinger, A.). *IPCC, Geneva*.

Jamshidi, R, Dragovich, D, Webb, A. (2013): Estimating catchment-scale annual soil loss in managed native eucalypt forests, Australia. *Forest Ecology and Management*, 304; 20-32.

Jansson M. (1962): Land Erosion by Water in Different Climates, UNGI Rapport, 57. *Department of Physical Geography, University of Uppsala*.

Jolicoeur S, Caissie D, Frenette I, Hardie P, Bouchard M. (2006): Suspended sediment concentration in relation to forestry operations in Catamaran Brook and its tributaries (Canada). *River Research and Application*, 23 (2); 141–154.

Klein, M. (1984): Anticlockwise hysteresis in suspended sediment concentration during individual storms. *Catena*, 11; 251-257.

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.

Lana-Renault, N. (2011): El efecto de los cambios de cubierta vegetal en la respuesta hidrológica y sedimentológica de áreas de montaña: la cuenca experimental de Arnás, Pirineo central. Publicaciones del consejo de protección de la naturaleza de Aragón. Serie: Investigación; 189.

Lasanta-Martínez, T. García-Ruiz, J. Pérez-Rontomé, C. Sancho-Marcén, C. (2000): Runoff and sediment yield in a semiarid environment: the effect of land management after farmland abandonment. *Catena*, 38; 265-278.

Lasanta-Martínez, T., Vicente-Serrano, S., Cuadrat-Prats J.M. (2005): Mountain Mediterranean landscape evolution caused by the abandonment of traditional primary activities: a study of the Spanish Central Pyrenees. *Applied Geography*, 25; 47–65.

Latron, J., Gallart, F. (2007): Seasonal dynamics of runoff-contributing areas in a small mediterranean research catchment (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Journal of Hydrology*, 335 (1–2); 194–206.

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; 775–787.

Latron, J., Gallart, F. (2008): Runoff generation processes in a small Mediterranean research catchment (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Journal of Hydrology*, 358 (3–4); 206–220.

Lindim, C., Pinho, J.L., and Vieira, J.M.P., (2011): Analysis of spatial and temporal patterns in a large reservoir using water quality and hydrodynamic modelling. *Ecological Modelling*, 222; 2485–2494.

Llorens, P. (1991): Resposta hidrològica i dinàmica de sediments en una petita conca pertorbada de muntanya mediterrània. *Tesis, Facultat de Geografia i Història, Universitat de Barcelona*; 276.

Llorens, P., Poch, R., Latron, J., Gallart, F. (1997): Rainfall interception by a Pinus Sylvestris forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area. I. Monitoring desing and results down to the event scale. *Journal of Hydrology*, 199:331-345.

López-Moreno, J.I., Beguería, S., García-Ruiz, J.M. (2006): Trends on high flows in the Central Spanish Pyrenees: response to climatic factors or to land-use change?. *International Journal of Hydrological Sciences*, 51 (6); 1039-1050.

López-tarazon, JA., Batalla, RJ., Vericat D., Balasch, JC. (2010): Rainfall, runoff and sediment transport relations in a mesoscale mountainous catchment: The River Isábena (Ebro basin). *Catena*, 82 (1); 23-34.

Lorente, A., Martí, C., Beguería, S., Arnáez, J., García-Ruiz, J.M. (2000): La exportación de sediment en suspension en una Cuenca de campos abandonados, Pirineo Central. *Cuaternario y Geomorfología*, 14 (1-2); 21-34.

Loughran, R.J., McFarlane, D.J., Campbell, B.L. and Shepherd, R. (1993): The distribution of caesium-137 in rangeland soils at three sites in Western Australia. *Rangeland Journal*, 15 (1); 24-38.

Loughran, R.J., Campbell, B.L., Elliott, G.L. (1986): Sediment dynamics in a partially cultivated catchment in new south wales, Australia. *Journal of Hydrology*, 83; 285-297.

Lvovich, M.I., Karasik, G.Y., Bratseva, N.L., Medvedeva, G.P., Maleshko, A.V. (1991). Contemporary intensity of the world land intercontinentl erosion. *Moscow: USSR Academy of Sciences*.

MacDonald, M. A, Healey, J. R, Stevens, P. A. (2002): The effects of secondary forest clearance and subsequënt land-use on erosion losses and soil properties in the Blue

- Mountains of Jamaica. Agriculture. *Ecosystems and Environment*, 92; 1-19.
- Marques, M.J., Bienes, R., Pérez-Rodríguez, R., Jiménez, L. (2008): Soil degradation in Central Spain due to sheet water erosion by low-intensity rainfall events. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33; 414–423.
- Martín, J. (1999): Espacios y Sociedades. Fundamentos de climatología analítica. *Síntesis. España*.
- Martínez-Murillo, J., Ruiz-Sinoga, J.D. (2006): Variaciones estacionales en la generación de escorrentía y emisión de sedimentos en una ladera de los Montes de Málaga (provincia de Málaga). *Baética: Estudios de arte, geografía e historia*, 28; 435-466.
- Matamoros, I., Novella, A. (2011): implementación de una infraestructura geomática en una microcuenca instrumentada en el Gavarres. Tesis inédita: Universitat politècnica de Catalunya. 81.
- Matamoros, I., Novella, A., Pros, F., Gracia, C., Pacheco, E., Úbeda, X. (2012): Estudio de un perfil de erosión mediante aplicaciones topográficas. *Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología*, Santander.
- Mazzoleni, S., Pasquale, D., Mulligan, M., Martano, P., Rego, F. (2004): Recent Dynamics of the Mediterranean Vegetation and Landscape. *John Wiley and Sons*; 306.
- McDonald, L. H., Sampson, R. W., Anderson, D. M. (2001): Runoff and road erosion at the plot and road segment scales, St John, US Virgin Islands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26 (3); 251-272.
- Milly, P.; Dunne, K.; Vecchia, A. (2005): Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438 (17); 347-350.
- MIMAM (2000): Libro Blanco del Agua en España. *Ministerio de Medio Ambiente, Madrid*; 637.
- Monte, R.; Nearing, M.; Vining, R.; Southworth, J.; Pfeifer, R. (2005): Climate change impacts on soil erosion in Midwest United States with changes in crop management. *Catena*, 61 (2-3); 165-184.
- Moore, I.D., Mackay, S.M., Wallbrink, P.J., Burch, G.J., O'Loughlin, E.M. (1986): Hydrologic characteristics and modelling of a small forested catchment in southeastern New South Wales. Pre-logging condition. *Journal of Hydrology*, 83; 307-335.

Munsell Notation. (1975): Soil Color Chart. Baltimore, U.S. *Department of Agriculture Handbook*; 18.

Myrabo, S.; (1997): Temporal and spatial scale of response area and groundwater variation in Till. *Hydrological Processes*, 11 (14); 1861–1880.

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; 601–616.

Neary, D. G., Ice, G. G., Jackson, R. (2009): Linkages between forest soils and water quality and quantity. *Forest Ecology and Management*, 258; 2269-2281.

Nebot, E., Baqués, R. (2004): Inventari de claps Forestals singulars de les Gavarres. Terradebosc SL. *Diputació de Girona*; 78.

O’Farrell CR, Heimsath AM, Kaste JM. (2007): Quantifying hillslope erosion rates and processes for a coastal California landscape over varying timescales. *Earth Surface Processes and Landform*, 32; 544–560.

Ortigosa, L., García-Ruiz, J.M., Gil, E. (1990): Land reclamation by reforestation in the Central Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 10 (3); 281–288.

Outeiro, L.; Úbeda, X.; Farguell, J. (2010): The impact of agriculture on solute and suspended sediment load on a Mediterranean catchment after intense rainstorms. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 (5); 549-560.

Palang, H.; Helmfrid, S.; Antrop, M.; Alumäe, H. (2005): Rural landscapes: past processes and future strategies. *Landscape and Urban Planning*, 70; 3-8.

Parry, M.; Parry, C.; Livermore, M. (2000): Valoración de los efectos potenciales del Cambio Climático en Europa (Informe ACACIA de, la Comisión Europea, resumen y conclusiones). *Universidad de Castilla-La Mancha e Iberdrola, Toledo*; 29.

Pernas, J., Sala, M., Rovira, A., (1995): Estudi de la Qualitat d’Aigües de la Riera d’Arbúcies, del Ridaura i de la Verneda. *Universitat de Barcelona*; 114.

Piatek, K. B., Christopher, S. F., Mitchell M. J. (2009): Spatial and temporal dynamics of stream chemistry in a forested watershed. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13; 423–439.

Piñol, J., Ávila, A., Rodá, F. (1992): The seasonal variation of streamwater chemistry in

- three forested Mediterranean catchments. *Journal of Hydrology*, 140. 119-141.
- Piñol, J., Àvila, A., Escarré, A. (1999): Water Balance in Catchments. Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests. *Ecological Studies*, 137; 273-282.
- PNUMA (2000): Perspectivas del Medio Ambiente Mundial. *Ediciones Mundi-Prensa, Madrid*; 397.
- Rabadà, D. (1995): Dinàmica hidrològica d'una petita conca pirenaica de camps abandonats amb pinedes e expansió (Alt Berguedà, Barcelona). *Tesis inédita, Universitat de Barcelona*; 322.
- Rabbinge, R., Van Diepen, C.A. (2000): Changes in agriculture and land use in Europe. *European Journal of Agronomy*, 13; 85-100.
- Ramos, M.C., Martínez-Casasnovas, J.A. (2007): Soil loss and soil water content affected by land leveling in Penedès vineyards, NE Spain. *Catena*, 71; 210–217.
- Regüés, D., Gallart, F., (2004): Seasonal patterns of runoff and erosion responses to simulated rainfall in a badland area in Mediterranean mountain conditions (Vallcebre, south-eastern Pyrenees). *Earth Surface Processes and Landforms*, 29; 755–767.
- Regües, D., Nadal-Romero, E., Latron, J., Martí-Bono, C. (2009): Producción y transporte de sedimentos en cárcavas desarrolladas en la depresión interior altoaragonesa (Cuenca de Aragón, Pirineo central). *Cuadernos de investigación de Geografía*, 35 (2); 263-287.
- Ribas, A., Palom. Saurí, D., Pujol. (2002): Cambis socialambientals a l'Alt Empordà (1950-2000). *Universitat de Girona. Girona*.
- Rounsevell, M.D.A.; Reginster, I.; Araújo, M.B.; Carter, T.R.; Dedoncker, N.; Ewert, F.; House, J.I.; Kankaanpää, S.; Leemans, R.; Metzger, M.J.; Schmit, C.; Tuck, G. (2006): A coherent set of land use change scenarios for Europe. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 11; 57-68.
- Rovira, A., Batalla, R.J., Sala, M., (2005): Fluvial sediment budget of a Mediterranean river: the lower Tordera (Catalan Coastal Ranges, NE Spain). *Catena*, 60; 19–42.
- Rovira, A., Batalla, R. (2006): Temporal distribution of suspended sediment transport in a Mediterranean basin: The Lower Tordera (NE SPAIN). *Geomorphology*, 79, (1–2); 58–71.

Sala, M., (1977): La vegetació de les Gavarres: Un estudi geogràfic. *Volum de la XX assemblea intercomarcal d'estudiosos. Sant Feliu de guíxols*; 294.

Sala, M., Pernas, J., Úbeda, X., Batalla, R. (1994): Studying downstream influence of land use changes on runoff, solutes and sediment transport in a hilly Mediterranean coastal area. *Conference on assessment of Hydrological temporal variability and changes. European network of experimental and representative basins (ERB)*; 179-187.

Sala M., Rubio, C. (2000): Estudi i mesura de l'escolament i l'erosió en parcel·les experimentals al Massís de les Gavarres. *Butlletí de la Institució Catalana d'Història Natural*, 68; 135-148.

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

Sala, M. (2003): Floods triggered by natural conditions and by human activities in a Mediterranean coastal environment. *Geogr. Ann.*, 85 A (3-4): 301-312.

Saurí, D., Ribas, A. (1993): La gestió del risc d'inundació a la ciutat de Girona. *Revista de Girona*, 160; 88-93.

Shaw, E. (1984): Hydrology in Practice. *Van Nostrand Reinhold*, England; 596.

Scharrón, C.E, Mc Donald, L. H. (2007): Measurement and prediction of natural and anthropogenic sediment sources, St. John, U.S. Virgin Islands. *Catena*, 71; 250-266.

Scott, T. (1997): Forestry effects on bedload yields in mountain streams. *Applied Geography*, 17 (1); 55-78.

Sear, D.A., Armitage, P.D., Dawson, F.H., (1999): Groundwater dominated rivers. *Hydrological Processes*, 13; 255-276.

Seeger, M., Errea, M.P., Beguería, S., Arnáez, J., Martí, C., García-Ruiz, J.M. 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; 299-311.

Scharrón, C., MacDonald, L. (2007): Measurement and prediction of natural and anthropogenic sediment sources, St. John, U.S. Virgin Islands. *Catena*, 71 (2); 250-266.

Sheridan, G. J, Noske, P. J. (2007): A quantitative study of sediment delivery and

stream pollution from different forest road types. *Hydrological Processes*, 21 (3); 387-398.

Sidle, R. C, Sasaki, S, Otsuki, M, Noguchi, S, Nik, A. R. (2004): Sediment pathways in a tropical forest: effects of logging roads and skid trails. *Hydrological Processes*, 18 (4); 703-720.

Sidle, R, Ziegler, A. D, Negishi, J. N, Nik, A. R, Siew, R, Turkelboom, F. (2006): Erosion processes in steep terrain—Truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia. *Forest Ecology and Management*, 224; 199–225.

Sklash, M. Farvolden, R.N. (1979): The role of groundwater in storm runoff. *Journal of Hydrology*, 43; 45–65.

Slaymaker, O., (1988): ‘Slope erosion and mass movement in relation to weathering and geochemical cycles’, in Lerman, A. and Meybeck, M. (Eds), *Physical and Chemical Weathering in Geochemical Cycles*, Kluver; 225–246.

Soler. M., Latron, J., Gallart, F. (2008): Relationship between suspended sediment concentration and discharge in two small research basins in a mountainous Mediterranean area Vallcebre, Eastern Pyrenees. *Geomorfology*, 98; 143-152.

Stegen, A., Govers, G., Nachtergaele, J., Takken, I., Beuselinck, L., Poesen, J. (2000): Sediment export by water from an agricultural catchment in the loam belt of central Belgium. *Geomorphology*, 33 (1-2); 25-36.

Stoneman, G.L. (1993): Hydrological response to thinning a small jarrah (*Eucalyptus marginata*) forest catchment. *Journal Hydrology.*, 150; 393–407.

Stott, T. (1997): A comparison of stream bank erosion processes on forested and moorland streams in the Balquhiddy catchments, Central Scotland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22; 383–399.

Stott, T., Leeks G, Marks S, Sawyer A. (2001): Environmentally sensitive plot-scale timber harvesting: impacts on suspended sediment, bedload and bank erosion dynamics. *Journal of Environmental Management*, 63; 3–25.

Taillefumier, F., Piégay, H. (2003): Contemporary land use changes in prealpine Mediterranean mountains: a multivariate GIS-based approach applied to two municipalities in the Southern French Prealps. *Catena*, 51 (3–4); 267–296.

Terradas, J. (2001): Ecología de la vegetación. y de la ecofisiología de las plantas a la

dinámica de las comunidades y paisajes. *Ediciones Omega*; 703.

Úbeda, X. (1994): Caracterizació del sòl i quantificació del transport de sediment en un bosc mediterrani (Les Gavarres, Massís Litoral Gatalà). *Notes de Geografia Física*, 23; 31-38.

Úbeda, X.; Sala, M. (1997): Spatial and temporal variation in the soil characteristics of an agricultural field and their relation to erosion. *Méditerranée*, (12); 41-44.

Úbeda, X. (1998): Efectes de les diferents intensitats de foc, durant els incendis forestals, en els paràmetres físico-químics del sòl i en l'increment de l'escolament i de l'erosió. *Tesis, Universitat de Barcelona*.

Úbeda, X.; Sala, M. (1998): Variations in runoff and erosion in three areas with different fire intensities. *Geo-ökö-Dynamik*, XIX (3-4); 179-188.

Úbeda, X, Reina, L, Sala, M. (1998): Cuantificación de la erosión en un camino forestal de un bosque típico mediterráneo de *Quercus suber*. Norba. *Revista de Geografía. Departamento de Geografía, Univ. de Cáceres*; 185-196.

Úbeda, X.; Sala, M. (2001): Chemical concentrations in overland flow from different forested areas in a Mediterranean Environment: burned forest at different fire intensity and unpaved road. *Zeitschrift für Geomorphologie*. Vol. 45 (2); 225-238.

Úbeda, X., Farguell, J., Cortés, A., Outeiro, L. (2012): Guia de la sortida de treball de camp a una conca experimental. *Textos docentes. Universitat de Barcelona*; 47.

UNESCO. (2010). Cambio Climático y Recursos Hídricos, *UNESCO*, 242.

Van Lanen, H.A.J., Clausen, B., Kasperek, L. (1993): Interaction between the flows and hydrogeology, in Gustard, A. Flow regimes from international experimental and network data (FRIEND), *Institute of Hydrology, Wallingford, UK*, 1; 210.

Van Wonderen, J. Wynes, A. (1995): The validity of methods used for modeling of river-aquifer interaction, in Youger, P. L. modeling river-aquifer interactions, *British Hydrological Society Occasional*, 6; 117-128.77.

Wakiyama, Y., Onda, Y., Mizugaki, Y., Asai, S., Hiramatsu, H., (2010): Soil erosion rates on forested mountain hillslopes estimated using <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pbex. *Geoderma*, 159: 39-52.

Walling DE, Webb BW. (1986): Solute Processes, Trudgill ST (ed.). *John Wiley*:

*Chichester*; 251–327.

Walling DE. (1990): Linking the field to the river: sediment delivery from agricultural land. In *Soil Erosion on Agricultural Land*, Boardman J, Foster IDL, Dearing JA (eds). John Wiley: Chichester; 129–152.

Wear, L, Aust, W. M, Bolding, M. C, Strahm, B. D, Dolloff, C. A. (2013): Effectiveness of best management practices for sediment reduction at operational forest stream crossings. *Forest Ecology and Management*, 289; 551-561.

Webb, B. Foster, I., Burnell, A. (1995): Hydrology, water quality and sediment behavior. *Sediment and Water Quality in River Catchments*, John Wiley and Sons Ltd. *Chichester*; 1-30.

Weibull, W. (1951): A statistical distribution function of wide applicability, *J. Appl. Mech.-Trans. ASME* 18 (3); 293–297.

Williams, G.P. (1989): Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology*, 111; 89–106.

Wood, P.A. (1977): Controls of variation in suspended sediment concentration in the river Rother, west Sussex, England. *Sedimentology*, 24; 437-445.

Woodruff, J.F., Hewlett, J.D. (1970): Predicting and mapping the average hydrologic response for the Eastern United States. *Water Resources Research*, 6 (5); 1312–1326.

Yair, A., Enzel. Y. (1987): The relationships between annual rainfall and sediment yield in arid and semi-arid areas. The case of the Northern Negev. *Catena Supplement*, 10; 121–135.

Zabaleta, A., Martínez, M., Uriarte, J.A., Antigüedad, I. (2007): Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country. *Catena*, 71 (1); 179-190.

Zimmermann, A, Francke, T, Elsenbeer, H. (2012): Forests and erosion: Insights from a study of suspended-sediment dynamics in an overland flow-prone rainforest catchment. *Journal of Hydrology*. 428–429:170-181.

Zhu, T.X., Cai, Q.G., Zeng, B.Q. Runoff generation on a semi-arid agricultural catchment: field and experimental studies. *Journal of Hydrology*, 196; 99–118.