



**ACTUALIZACIÓN DE LA TASA DE SEDIMENTOS
EXPORTADOS DE LAS CUENCAS DEL TERRITORIO
HISTÓRICO DE GIPUZKOA.**

**GIPUZKOAKO LURRALDE HISTORIKOKO ARROETATIK
ESPORTATUTAKO SEDIMENTU TASAREN EGUNERATZEA.**

Año hidrológico 2017-2021 urte hidrologikoak

Diciembre 2023ko Abendua

Trabajo presentado por los miembros del Grupo de Investigación Consolidado Procesos Hidro-Ambientales (IT1678-22, Gobierno Vasco) (Dpto. de Geodinámica, UPV-EHU).

Hidro-Ingurumeneko Prozesuak Ikerketa Talde Kontsolidatuko (IT1678-22, Eusko Jaurlaritzza) kideek aurkeztutako lana (Geologia Saila, UPV-EHU)



**Hidro
Geo
ingurumena**



INDICE

Equipo de trabajo

1. Introducción	1
1.1. Objetivos del estudio	3
2. Metodología	3
3. Análisis de datos disponibles	4
3.1. Análisis de la continuidad y validez de las series (2017-2022)	4
3.2. Relaciones entre las mediciones de campo (2017-2022)	6
3.3. Relaciones entre las mediciones de CSS de campo y las de CSS de laboratorio.....	10
4. Resultados	14
4.1. Estimación de la masa de sedimento en suspensión exportada (2017-2022).....	15
4.2. Comparación inter-anual de las tasas de exportación de sedimentos en suspensión	16
4.3. Distribución de la Precipitación, el Caudal y la exportación de SS a lo largo del año	21
5. Conclusiones	41
Bibliografía	43

Equipo de trabajo

En el equipo de trabajo han participado miembros del Grupo de Investigación Consolidado de Procesos HidroAmbientales (IT1678-22, Gobierno Vasco). La responsabilidad de los trabajos la han asumido directamente Iñaki Antigüedad, Profesor Catedrático del de la UPV/EHU, licenciado en Geología y doctor en Hidrogeología y Ane Zabaleta, investigadora del Departamento de Geología de la UPV/EHU, licenciada en Geología y doctora en Hidrología, aunque han tenido el apoyo del resto de miembros del Grupo en las cuestiones que así lo han requerido.

1. Introducción

El conocimiento de la exportación de sedimentos de las cuencas hidrográficas aporta información imprescindible para la gestión de dichas cuencas. Esta información se vuelve especialmente valiosa en aquellas cuencas en las que se estén realizando cambios que afecten a la generación y transporte de sedimentos, ya sean, obras que requieran movimientos de tierras, trabajos forestales que supongan una mayor erosión y transporte de sedimentos o eliminación de obstáculos en los ríos que hayan realizado la función de trampas de sedimentos durante años, entre otros.

En este sentido, el Grupo Procesos HidroAmbientales de la UPV/EHU (Grupo de Investigación Consolidado del Sistema Universitario Vasco, IT1678-22) y teniendo en cuenta el interés de la Dirección de Obras Hidráulicas de la Diputación Foral de Gipuzkoa, ha realizado varios trabajos de seguimiento de la cantidad de sedimentos exportados desde cuencas de Gipuzkoa. En el período 2001-2006 estos trabajos se centraron en el control de la exportación de sedimentos de pequeñas cuencas de cabecera de embalses del Territorio Histórico. Se realizó así el seguimiento de las cuencas de Aixola (en la cuenca del Deba), Barrendiola (cuenca alta del Urola) y Añarbe (en al Urumea).



Figura 1.1: Localización de las estaciones analizadas en el presente informe.

Más adelante, a partir del año 2006-2007 el control se extendió al conjunto de las grandes cuencas del Territorio. Se inició así el seguimiento de las cuencas del Deba, Urola, Oria, Urumea y Oiartzun, a partir del control de los sedimentos en suspensión que pasan por sus estaciones de aforo de salida (Altzola, Aizarnazabal, Lasarte, Ereñozu y Oiartzun). El objetivo, en este último caso, era cuantificar la tasa de

sedimentos anualmente exportados al mar, su evolución temporal, y profundizar en el conocimiento de los factores que condicionan tal exportación. En este sentido, entre 2014 y 2017 se profundizó en la construcción de un modelo conceptual de la exportación de sedimentos en suspensión de las cuencas de Gipuzkoa, que explicara la variabilidad espacial y temporal de la misma. Así, se realizó un análisis de las variables ambientales que condicionan la variabilidad espacial de la exportación de sedimentos y el estudio de la dinámica temporal de los sedimentos en suspensión relacionada con la conectividad de los sedimentos en cada cuenca.

Además, a principios del 2008-2009 se comenzó a controlar la estación de Amundarain (en la cuenca del Oria) por el interés que estaba tomando para diferentes agentes de Gipuzkoa como futura cuenca de investigación y de divulgación hidrológica-medioambiental (fig. I.1.1, tabla I.1.1). Desde 2013, también se realiza el seguimiento de la exportación de sedimentos en suspensión desde la cuenca del Leizaran (en la cuenca del Oria) en el contexto de los proyectos GURATRANS (HAZI, 2015) e IREKIBAI (DFG, 2017), que pretenden la permeabilización del río Leizaran, entre otros objetivos y que ha contado con sus propios informes específicos (HAZI, 2015; DFG, 2017).

En el presente informe se actualizarán los aportes de sólidos en suspensión exportados desde las cuencas terrestres del Territorio Histórico de Gipuzkoa hacia el mar. Para ello, se analizarán datos del periodo correspondiente a los años hidrológicos entre el 2017-2018 y el 2021-2022 obtenidos en las estaciones de aforo de Altzola, Aizarnazabal, Lasarte, Ereñozu y Oiartzun. Además, se incluye el análisis para ese mismo periodo cuencas de menor tamaño como Amundarain, Leizaran, Añarbe y San Prudencio. Como se ha comentado anteriormente la cuenca de Amundarain tiene un especial interés para diferentes agentes de Gipuzkoa como cuenca de investigación y de divulgación hidrológica-medioambiental y en la cuenca del Leizaran se ha venido realizando un seguimiento de los sedimentos exportados en relación a los trabajos de permeabilización del río. Este informe pretende, por tanto, alargar en el tiempo los análisis anteriormente realizados. Por otro lado, la cuenca de Añarbe ha sido objeto de cambios en los últimos años con el vaciado de la presa de Enobieta y la estación de San Prudencio fue objeto de seguimiento (en lo que a sedimentos se refiere) durante el año hidrológico 2015-2016 por lo que, teniendo en cuenta el interés que esta cuenca puede tener en el proyecto MERLIN en el que participa la DFG, se analizarán también los datos existentes en esta estación.

Tabla 1.1: Superficie (km²) de la cuenca hasta su desembocadura, longitud, precipitación media anual y caudal medio anual de las cuencas principales analizadas. (Fuente de los datos: DFG, <http://www.gipuzkoahidraulikoak.eus>).

Río	Superficie (km ²)	Longitud (km)	Pluviometría media (mm/año)	Escorrentia-media anual (m ³ /s)
Deba	533.8	62.4	1384	12.56
Urola	337.5	63.5	1329	10.87
Oria	882.5	82.7	1547	29.79
Urumea	279	59.4	2500	13.63
Oiartzun	85.3	16.6	2333	3.71

1.1. Objetivos del estudio

El objetivo fundamental de la presente propuesta es actualizar los datos de exportación de sedimentos de las cuencas principales del Territorio Histórico de Gipuzkoa entre 2017 y 2022 utilizando, para ello, los datos recogidos de forma automática en las estaciones de aforo de Altzola (Bajo Deba), Aizarnazabal (Bajo Urola), Lasarte (Oria), Ereñozu (Urumea) y Oiartzun (Oiartzun). Esta actualización se realizará para ampliar en el tiempo la información referente a:

- Cuantificación de sedimentos exportados de cada cuenca.
- Comparación de los datos con los obtenidos en años anteriores.
- Aproximación a la cantidad de sedimentos en suspensión exportados hacia el mar a través de los principales ríos del Territorio Histórico de Gipuzkoa.

Además, por su interés específico debido a los trabajos de demolición de presas en el marco de otros proyectos, se valorará la posibilidad de cuantificar para ese mismo periodo la exportación de sedimentos de las cuencas de Añarbe (estación de aforos de Añarbe), Alto Deba (estación de aforos de San Prudencio) y Leitzaran (estación de aforos de Leitzaran). Y se tratará de ampliar esa misma información para la cuenca del Amundarain (estación de aforos de Amundarain) debido a su interés como cuenca de investigación y divulgación.

La cuantificación de la exportación de sedimentos en suspensión de las cuencas de se realizará hasta el fin del año hidrológico 2021-22, es decir, hasta septiembre del 2022. Para ello, la metodología a aplicar se basará en la misma utilizada en los estudios citados anteriormente, así como en los datos de laboratorio y las relaciones estadísticas obtenidos en dichos estudios.

2. Metodología

Como salida de las cuencas se han establecido las siguientes estaciones de aforo de la red hidrometeorológica de la DFG (fig. 1.1): Por un lado, Altzola en el río Deba, Aizarnazabal en el Urola, Lasarte en el Oria, Ereñozu en el Urumea y Oiartzun en el Oiartzun, siendo estas cinco las situadas más próximas a la desembocaduras de las cuencas. Por otro, Amundarain y Leitzaran en la cuenca del Oria, Añarbe en la del Urumea y San Prudentzio en la del Deba.

En las estaciones de aforo el control continuo de caudales está garantizado. Además, se cuenta con dispositivos de control que registran en continuo la turbidez y la concentración de sedimentos en suspensión, siendo ambas variables imprescindibles para el objetivo perseguido: la cuantificación de la exportación de sedimentos. En las citadas estaciones, la turbidez, al igual que la mayoría de los parámetros físico-químicos, se mide en un tanque ubicado dentro de la caseta de la estación al cual se bombea el agua del río (fig. 2.1). Sin embargo, la sonda que mide la concentración de sedimentos en suspensión se encuentra dentro del río, en uno de los muros laterales del vertedero de la estación. El principio de medida de estos dos parámetros, turbidez y concentración de sedimentos en suspensión, se basa en un mismo proceso combinado de absorción de infrarrojos/luz difusa; por lo tanto, la concentración de sedimentos en suspensión es estimada mediante un efecto óptico. Además, la DFG instaló durante los periodos anteriores de seguimiento tomamuestras automáticos (fig. 2.1) en todas esas estaciones con el fin de recoger muestras de agua que se utilizaron para calibrar, con datos reales, los datos ópticos obtenidos mediante las sondas.

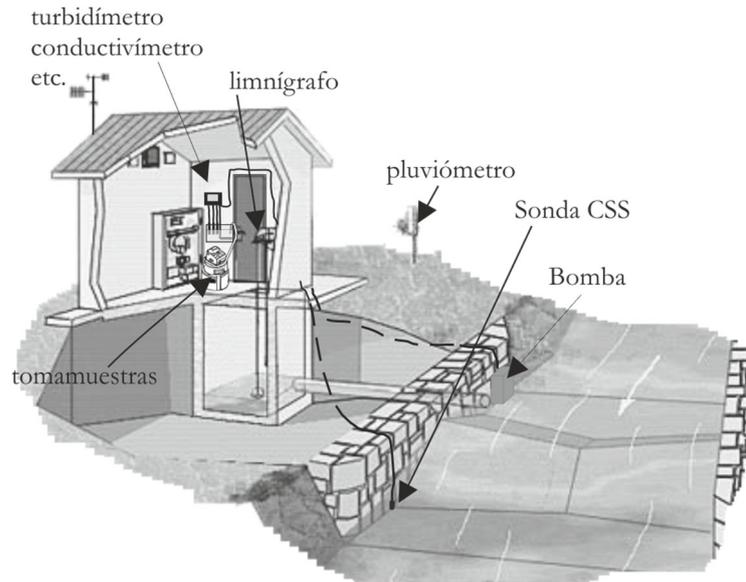


Figura 2.1: Esquema de la instalación de las estaciones de aforo.

La precipitación (mm), el caudal (m^3/s), la turbidez (NTU) y la concentración de sedimentos en suspensión (CSS, mg/l), junto con otras variables de calidad de las aguas (la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) entre ellas), se están midiendo en continuo, cada diez minutos, en esas estaciones de aforo. La turbidez y la CSS se miden mediante turbidímetros de retrodispersión de infrarrojos Solitax (de Dr. Lange) que miden hasta un máximo de 500 NTU de turbidez y 5000 mg/l de CSS respectivamente. Como se ha comentado anteriormente la turbidez se mide en un agua bombeada, dentro de la caseta de la estación de aforos, y la concentración en el propio cauce.

Los métodos ópticos se pueden utilizar para estimar el flujo de sedimentos en suspensión (Gippel, 1989; Brasington y Richards, 2000), porque si la relación entre la medida óptica (sea turbidez o CSS) y la concentración real de sedimentos en suspensión (CSS, mg/l) se calibra de manera frecuente se pueden derivar series reales continuas de CSS a partir de las derivadas del método óptico (Lewis, 1996). En este sentido, en anteriores informes se trató de establecer relaciones estadísticamente significativas entre los datos registrados por las sondas y las medidas de laboratorio. Por lo tanto, en el presente informe se utilizarán las relaciones anteriormente establecidas para realizar los cálculos de exportación de sedimentos.

3. Análisis de datos disponibles

3.1. Análisis de la continuidad y validez de las series (2017-2022)

Las series analizadas en este documento parten de los datos proporcionados por la propia Diputación Foral de Gipuzkoa. Se trata de datos registrados entre 2017 y 2022 en 9 estaciones de aforo (Figura 1). De todas ellas se tienen datos de precipitación, caudal y turbidez. Excepto en la estación de Añarbe, en el resto también existen datos de concentración de sedimentos en suspensión y de conductividad eléctrica. Y en algunas de las estaciones se cuenta también otros datos de calidad del agua. Los datos objeto de este informe son los de precipitación, caudal, turbidez y concentración de sedimentos en suspensión.

	Altzola				Aizarnazabal				Lasarte				Ereñozu				Oiartzun				S Prudentzio				Amundarain				Leitzaran				Añarbe					
	P	Q	T	CSS	P	Q	T	CSS	P	Q	T	CSS	P	Q	T	CSS	P	Q	T	CSS	P	Q	T	CSS	P	Q	T	CSS	P	Q	T	CSS	P	Q	T	CSS		
2017-2018	10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	95	90	100	100	99	99	100	100	100	100	100	100	93	93	100	100	100	100	100	100	100	100	0					
	11	100	100	100	100	100	100	100	100	100	96	99	100	100	94	74	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0						
	12	100	100	90	90	100	100	84	88	100	100	91	91	100	100	98	98	100	100	100	100	100	100	99	43	100	100	99	99	100	100	100	0					
	1	100	100	95	100	100	100	100	95	100	100	100	99	100	100	89	93	100	100	95	100	100	100	100	98	11	100	100	100	100	100	98	98	100	0			
	2	100	100	93	99	100	100	100	73	100	100	97	100	100	100	96	96	100	100	100	99	100	100	99	71	62	100	100	100	100	100	97	97	100	0			
	3	100	100	100	83	100	100	100	95	100	100	99	99	100	100	82	86	100	100	98	94	100	100	91	0	100	100	100	100	100	100	100	100	0				
	4	100	100	99	100	100	100	94	77	100	100	93	100	100	100	84	89	100	100	95	41	100	100	81	38	100	100	98	100	100	100	99	94	100	0			
	5	100	100	99	100	100	100	94	100	100	100	99	99	100	100	99	99	100	100	100	95	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0			
	6	100	100	99	100	100	100	100	84	100	100	100	99	100	100	96	96	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0			
	7	100	100	100	100	100	100	100	83	100	100	92	95	100	100	44	100	100	100	100	100	100	100	100	97	100	100	100	99	100	100	100	100	100	0			
8	100	100	97	71	100	100	100	85	100	100	98	98	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	76	100	100	54	100	100	78				
9	100	100	100	98	100	100	100	99	100	100	92	98	100	100	100	100	100	100	100	85	100	100	98	100	100	100	100	100	97	100	100	55	45	100	94			
2018-2019	10	100	100	96	96	100	100	100	100	100	95	94	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	53	68	100	100			
	11	100	100	100	100	100	100	99	100	100	92	100	100	100	93	87	100	100	97	97	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97	90	100	91			
	12	100	100	100	100	100	100	97	99	100	100	85	96	100	100	100	95	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	92	100	100	95				
	1	100	100	100	100	100	100	94	100	100	100	99	100	100	100	100	87	100	100	100	100	100	100	100	96	100	100	100	100	100	97	100	100	90				
	2	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	98	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98	100	100	100	100	100	100	48	87	95	100			
	3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	77	100	100	100	99	100	99	99	92	100	99			
	4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	80	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99			
	5	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	75	98	100	100	81	97	100	100	99	100	100	100	99	100	100	100	100	95	100	100	95	99	100	100			
	6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	95	100	100	86	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	98	100	100			
	7	100	100	100	100	100	100	100	92	100	100	97	93	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98	99	100	100	100	100	100	100	97	95	100	100	89		
8	100	100	99	99	100	100	99	99	100	100	94	85	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	100	94	91	100	100	100			
9	100	100	89	89	100	100	100	100	100	100	99	94	100	100	91	90	100	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100			
2019-2020	10	100	100	92	63	100	100	99	99	100	100	99	92	100	100	100	98	100	100	97	97	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	77	100	100	87			
	11	100	100	98	81	100	100	94	100	98	100	86	95	100	100	92	89	100	100	97	99	100	100	98	99	100	100	100	100	100	100	89	96	100	99			
	12	100	100	94	94	100	100	95	100	100	100	99	100	100	100	93	98	100	100	100	100	100	100	100	84	99	100	100	100	100	99	73	100	100	96			
	1	100	100	99	99	100	100	87	100	100	100	96	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	0	5	100	100	100	100	99	100	100	100			
	2	100	100	99	89	100	100	100	100	100	100	99	99	100	100	99	84	100	100	100	100	100	100	100	60	61	100	100	100	97	100	100	82	100	100	100		
	3	100	100	89	97	100	100	96	100	100	100	95	99	100	100	96	90	100	100	99	100	100	100	100	99	100	100	100	100	95	100	100	99	98	100	99		
	4	100	100	99	99	100	100	99	100	100	100	98	100	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	98	100	100	100	100	100	97	100	100	91	95	100	100	
	5	100	100	98	99	100	100	98	100	100	100	99	100	100	100	91	98	100	100	93	99	100	100	96	100	100	100	100	100	99	100	100	99	94	100	100	91	
	6	100	100	99	99	100	100	100	99	100	100	97	100	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	99	99	100	100	100	100	100	100	99	100	100	92	100	100	99
	7	100	100	84	84	100	100	98	99	100	100	99	99	100	100	100	96	100	100	100	99	100	100	100	99	99	100	100	100	100	100	100	97	100	100	81		
8	100	100	96	96	100	100	96	96	100	100	98	99	100	100	95	100	100	100	98	95	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97	96	100	100	87			
9	100	100	99	100	100	100	98	97	100	100	100	97	99	100	100	98	99	100	100	99	100	100	100	93	99	100	100	100	100	96	95	100	100	93	98	100	100	
2020-2021	10	100	100	99	100	100	100	99	100	98	100	94	96	100	100	1	1	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	97	96	100	100	91	60	100	100	97
	11	100	100	99	100	100	100	99	99	100	100	98	98	100	100	15	15	100	100	100	100	100	100	98	100	100	98	98	100	100	100	76	100	100	82			
	12	100	100	95	99	100	100	99	99	100	100	89	99	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	99	88	100	100	96	97	100	100	95	94	100	100	100		
	1	100	100	99	100	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	95	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
	2	100	100	99	99	100	100	99	100	100	100	99	99	100	100	98	96	100	100	100	99	100	100	95	58	100	100	98	86	100	100	100	100	96	100	96	100	
	3	100	100	95	100	100	100	95	100	100	100	99	94	100	100	97	98	100	100	98	94	100	100	99	0	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
	4	100	100	78	79	100	100	99	100	100	100	99	99	100	100	100	100	100	100	95	41	100	100	99	0	100	100	100	99	100	100	100	88	100	100	99	100	
	5	100																																				

aforo para cada uno de los meses analizados entre octubre de 2017 y septiembre de 2022 (Figura 3.1). En todos los casos se han eliminado los datos correspondientes al límite superior de medida de la sonda de turbidez, es decir los datos superiores a 490 NTU, ya que, tal y como se ha comprobado al compararlos con los datos de CSS, no reflejan la medida real de turbidez que en muchas ocasiones superaría el dato registrado.

3.2. Relaciones entre las mediciones de campo (2017-2022)

Con el fin de completar, en la medida de lo posible, las series de concentración de sedimentos en suspensión obtenidas se han realizado regresiones entre los dos tipos de medidas tomadas directamente en el campo mediante las sondas Solitax® para cada uno de los cinco años analizados. Las regresiones entre la turbidez (T) y la CSS dan coeficientes de correlación de Pearson muy altos para todas las estaciones de aforo, dejando en evidencia la muy buena relación entre estos parámetros medidos en campo. Lo lógico es que las relaciones sean buenas, ya que el principio de medición es el mismo y también el tipo de sonda utilizada.

Para todas las estaciones existen puntos que se alejan de la regresión general. Como ya se advirtió en informes anteriores (DFG, 2008, DFG, 2009, DFG, 2010 y posteriores) la existencia de datos que se alejan de la nube de puntos general puede deberse a dos situaciones. Por un lado, en los casos en los que se observan mediciones de CSS muy altas y medidas de turbidez muy bajas, las diferencias pueden estar relacionadas con la diferente ubicación de las sondas (afección puntual por hojas, o similar, en el río). En este caso los datos de CSS han sido eliminados. Por otro, existen nubes de puntos consecutivos en la serie temporal ubicados por encima de la recta de regresión y que en un primer análisis muy somero se ha observado que pertenecen a unas mismas crecidas. Este tipo de diferencias en las relaciones entre la turbidez y la CSS se puede atribuir a diferencias en las características físicas de los sedimentos relacionadas con cambios puntuales en las fuentes de los mismos (obras cerca del cauce, tormentas localizadas que remuevan el sedimento de zonas concretas...). Este tipo de cambios ya fue observado en fases anteriores para la cuenca de Aixola (Zabaleta *et al.*, 2006). En este caso los datos no se han eliminado y sí que se han tomado en cuenta a la hora de realizar las regresiones.

ALTZOLA,

$$2017-2018: \quad CSS = 1.81 * T \quad (R^2 = 0.88) \quad (\text{ecuación I.4.1})$$

$$2018-2019: \quad CSS = 1.87 * T \quad (R^2 = 0.83) \quad (\text{ecuación I.4.2})$$

$$2019-2020: \quad CSS = 1.73 * T \quad (R^2 = 0.91) \quad (\text{ecuación I.4.3})$$

$$2020-2021: \quad CSS = 1.44 * T \quad (R^2 = 0.87) \quad (\text{ecuación I.4.4})$$

$$2021-2022: \quad CSS = 1.83 * T \quad (R^2 = 0.85) \quad (\text{ecuación I.4.5})$$

AIZARNAZABAL,

$$2017-2018: \quad CSS = 1.46 * T \quad (R^2 = 0.89) \quad (\text{ecuación I.4.6})$$

$$2018-2019: \quad CSS = 1.55 * T \quad (R^2 = 0.92) \quad (\text{ecuación I.4.7})$$

$$2019-2020: \quad CSS = 1.50 * T \quad (R^2 = 0.93) \quad (\text{ecuación I.4.8})$$

2020-2021:	$CSS = 1.72 * T$	$(R^2 = 0.92)$	(ecuación I.4.9)
2021-2022:	$CSS = 1.93 * T$	$(R^2 = 0.89)$	(ecuación I.4.10)

LASARTE,

2017-2018:	$CSS = 1.50 * T$	$(R^2 = 0.86)$	(ecuación I.4.11)
2018-2019:	$CSS = 1.33 * T$	$(R^2 = 0.93)$	(ecuación I.4.12)
2019-2020:	$CSS = 1.43 * T$	$(R^2 = 0.93)$	(ecuación I.4.13)
2020-2021:	$CSS = 1.59 * T$	$(R^2 = 0.96)$	(ecuación I.4.14)
2021-2022:	$CSS = 1.73 * T$	$(R^2 = 0.98)$	(ecuación I.4.15)

EREÑOZU,

2017-2018:	$CSS = 1.31 * T$	$(R^2 = 0.96)$	(ecuación I.4.16)
2018-2019:	$CSS = 1.41 * T$	$(R^2 = 0.90)$	(ecuación I.4.17)
2019-2020:	$CSS = 1.45 * T$	$(R^2 = 0.97)$	(ecuación I.4.18)
2020-2021:	$CSS = 1.19 * T$	$(R^2 = 0.78)$	(ecuación I.4.19)
2021-2022:	$CSS = 1.20 * T$	$(R^2 = 0.79)$	(ecuación I.4.20)

OIARTZUN,

2017-2018:	$CSS = 1.32 * T$	$(R^2 = 0.95)$	(ecuación I.4.21)
2018-2019:	$CSS = 1.08 * T$	$(R^2 = 0.91)$	(ecuación I.4.22)
2019-2020:	$CSS = 1.09 * T$	$(R^2 = 0.98)$	(ecuación I.4.23)
2020-2021:	$CSS = 1.32 * T$	$(R^2 = 0.95)$	(ecuación I.4.24)
2021-2022:	$CSS = 1.30 * T$	$(R^2 = 0.87)$	(ecuación I.4.25)

SAN PRUDENTZIO,

2017-2018:	$CSS = 1.44 * T$	$(R^2 = 0.91)$	(ecuación I.4.26)
2018-2019:	$CSS = 1.35 * T$	$(R^2 = 0.96)$	(ecuación I.4.27)
2019-2020:	$CSS = 1.51 * T$	$(R^2 = 0.97)$	(ecuación I.4.28)
2020-2021:	$CSS = 1.39 * T$	$(R^2 = 0.97)$	(ecuación I.4.29)
2021-2022*:	$CSS = 1.42 * T$	$(R^2 = 0.95)$	(ecuación I.4.30)

(*Al no haber datos de CSS para el 2021-2022 se han utilizado todos los datos de entre 2017 y 2021 para esta ecuación)

AMUNDARAIN,

2017-2018:	$CSS = 1.63 * T$	$(R^2 = 0.89)$	(ecuación I.4.31)
2018-2019:	$CSS = 1.57 * T$	$(R^2 = 0.94)$	(ecuación I.4.32)
2019-2020:	$CSS = 1.63 * T$	$(R^2 = 0.93)$	(ecuación I.4.33)
2020-2021:	$CSS = 1.75 * T$	$(R^2 = 0.94)$	(ecuación I.4.34)
2021-2022:	$CSS = 1.62 * T$	$(R^2 = 0.95)$	(ecuación I.4.35)

LEITZARAN,

2017-2018:	$CSS = 1.46 * T$	$(R^2 = 0.88)$	(ecuación I.4.36)
2018-2019:	$CSS = 1.42 * T$	$(R^2 = 0.90)$	(ecuación I.4.37)
2019-2020:	$CSS = 1.62 * T$	$(R^2 = 0.94)$	(ecuación I.4.38)
2020-2021:	$CSS = 1.31 * T$	$(R^2 = 0.94)$	(ecuación I.4.39)
2021-2022:	$CSS = 1.40 * T$	$(R^2 = 0.92)$	(ecuación I.4.40)

En la estación de Añarbe no existen datos de CSS por lo que no ha sido posible establecer este tipo de relación ni utilizarla para rellenar las series de CSS.

En todos los casos, las relaciones turbidez-CSS se describen adecuadamente con un modelo lineal, lo que puede significar que, en general y salvo crecidas puntuales, las propiedades físicas de las partículas en suspensión son, en cada cuenca, más o menos constantes (Foster *et al.*, 1992; Gippel, 1995). Todas estas relaciones han sido utilizadas para rellenar las lagunas de datos CSS de campo siempre que fuese posible. De este modo, ha sido posible disminuir el número de lagunas que se observan en la figura 3.1. En la siguiente figura (fig. 3.2) se muestra el porcentaje de datos nulos existentes (a escala mensual) en las series de CSS de cada estación de aforos una vez realizadas las correcciones posibles. En general no existe un porcentaje de lagunas significativo en las series analizadas, sin embargo, en la estación de Altzola existe un porcentaje de datos inexistentes mayor al 20% para el mes de abril de 2021. En Ereñozu falta casi la totalidad de datos del mes de octubre y noviembre de 2020 y la mitad de los datos de septiembre y diciembre de 2021. También se observan amplias lagunas de datos en San Prudentzio, con solamente un 5% y un 61 % de datos válidos en enero y febrero de 2020, respectivamente y datos faltantes entre un 100% y un 28% entre diciembre de 2021 y marzo de 2022. En Leitzaran, la falta de datos solamente es llamativa entre septiembre y octubre de 2018, con más de 25% de datos faltantes. Por último, en Añarbe, no existen datos hasta agosto de 2018, por lo que el año 2017-2018 queda prácticamente invalidado y el número de datos entre septiembre y noviembre de 2020 tampoco supera el 75%.

Es necesaria la consideración de los datos mostrados en esta tabla de cara a poder realizar una valoración más realista de los cálculos que se muestran en el apartado 4.

	Altzola	Aizarnazabal	Lasarte	Ereñozu	Oiartzun	San Prudentzio	Amundarain	Leitzarain	Añarbe
2017-2018	10	100	100	99	100	93	100	100	0
	11	100	100	100	100	100	100	100	0
	12	90	97	91	98	100	99	100	0
	1	100	100	100	93	100	98	98	0
	2	99	100	100	97	100	100	97	0
	3	100	100	99	98	98	91	100	0
	4	100	99	100	99	96	81	100	0
	5	100	100	100	100	100	100	100	0
	6	100	100	100	96	100	100	100	0
7	100	100	95	100	100	100	100	0	
8	97	100	98	100	100	100	100	78	
9	100	100	100	100	100	100	55	94	
2018-2019	10	96	100	100	100	100	100	72	100
	11	100	100	100	96	97	100	100	91
	12	100	100	96	100	100	100	100	95
	1	100	100	100	100	100	100	92	90
	2	100	100	99	100	100	100	89	100
	3	100	100	100	100	100	100	100	99
	4	100	100	99	100	100	100	100	99
	5	100	100	100	100	100	100	100	100
	6	100	100	100	100	100	100	100	100
7	100	100	97	100	100	97	97	89	
8	99	100	94	100	100	100	94	100	
9	89	100	100	91	100	100	100	100	
2019-2020	10	92	100	100	100	98	100	100	87
	11	100	100	97	96	100	99	99	99
	12	95	100	100	100	100	100	100	96
	1	100	100	100	100	100	5	100	100
	2	100	100	100	100	100	61	100	100
	3	100	100	100	96	100	100	100	99
	4	100	100	100	100	100	100	100	100
	5	100	100	100	98	100	100	100	91
	6	100	100	100	100	100	100	100	99
7	85	99	100	100	100	100	100	81	
8	97	96	100	100	98	100	100	87	
9	100	98	100	99	100	100	97	100	
2020-2021	10	100	100	97	1	100	100	99	97
	11	100	100	98	15	100	100	98	82
	12	99	100	99	100	100	100	100	100
	1	100	100	100	100	100	100	100	100
	2	99	100	100	100	100	96	100	96
	3	100	100	100	100	98	99	100	100
	4	79	100	100	100	96	99	100	99
	5	100	100	100	100	100	99	100	100
	6	100	100	100	100	100	98	100	100
7	99	100	100	100	100	96	96	100	
8	100	100	100	97	100	99	100	100	
9	99	100	100	49	100	99	100	69	
2021-2022	10	98	100	100	100	99	100	100	75
	11	100	100	100	89	100	93	97	70
	12	100	100	96	53	100	65	82	88
	1	100	100	100	90	100	27	100	100
	2	100	100	99	99	100	0	100	100
	3	100	100	95	100	100	72	100	89
	4	100	100	100	100	100	98	100	83
	5	100	100	100	100	98	97	98	96
	6	100	100	100	100	100	99	100	99
7	99	100	100	100	100	99	100	100	
8	100	97	100	96	100	99	99	100	
9	100	100	100	99	100	98	100	100	

Figura 3.2: Porcentaje de datos válidos de concentración de sedimentos en suspensión (CSS) (turbidez (T) en el caso de la estación de aforos de Añarbe) para cada una de las estaciones de aforo analizadas durante cada uno de los meses del periodo 2017-2022 tras la aplicación de las ecuaciones 4.1 a 4.40 para rellenar las lagunas existentes.

3.3. Relaciones entre las mediciones de CSS de campo y las de CSS de laboratorio

Con los datos obtenidos en el laboratorio a partir de las muestras recogidas durante los eventos de crecida ocurridos entre 2006 y 2017 en cada una de las estaciones de aforo y con los valores correspondientes de CSS registrados en el campo se ajustaron en un estudio anterior (DFG, 2017) modelos aditivos generalizados (GAM) (Hastie y Tibshirani, 1990; Wood, 2006) con el fin de obtener un registro continuo y calibrado de la CSS. En este informe se hará uso de esas relaciones pre-establecidas.

El método de ajuste utilizado para las series de campo y laboratorio no requiere de ningún tipo de asunción previa de linealidad entre el predictor (en este caso la CSS medida en campo, denominada CSSF en los gráficos) y la variable respuesta (en este caso la CSS medida en laboratorio, denominada CSSL en los gráficos), con lo cual es posible modelar de forma más apropiada la relación entre las dos variables. Para ello se utilizan una serie de funciones de suavizado, que en este caso se han estimado mediante el método P-spline (Eilers y Marx, 1996), que es la técnica de estimación más recomendada en la literatura (Rice y Wu, 2001). Con el fin de satisfacer la normalidad de los residuales, la variable respuesta ha sido transformada a su logaritmo en aquellas series de datos que así lo han requerido, como ha sido el caso del Deba y el Oria. También en este caso, se han eliminado los datos correspondientes al límite superior de la sonda de turbidez. Dichas regresiones, con sus intervalos de confianza del 95%, se pueden observar en las figuras 3.3 a 3.11.

Para la estación de Altzola (Deba), las muestras recogidas entre noviembre de 2011 y febrero de 2012 mostraron una regresión muy diferente a las calculadas hasta ese momento y a partir del mismo. Esos cambios se atribuyeron a su vez, a cambios en el tipo de sedimento que fue transportado por el agua hasta la estación de aforos, que podrían estar relacionados con las diferentes obras en las redes de transporte que se han venido realizando en la parte alta de la cuenca, aunque ya se venían realizando con anterioridad, y quizás también, con el transporte de una gran cantidad de materia orgánica acumulada en el lecho del río, durante las importantes crecidas del principio del año hidrológico 2011-2012. Esos cambios, no se mantuvieron en el tiempo, es por ello que estas muestras no se incluyen en la regresión que se utilizará para calibrar los datos entre 2017 y 2022.

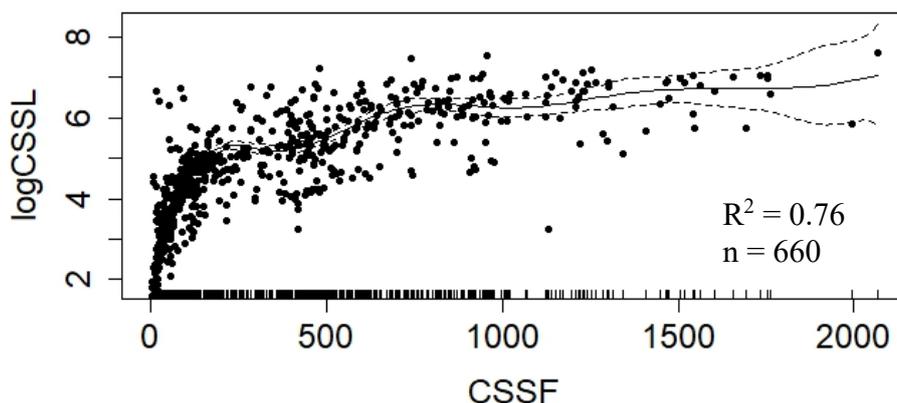


Figura 3.3: Modelo ajustado entre las medidas de campo (CSS campo (CSSF)) y de laboratorio (CSSL) correspondientes a la estación de aforos de Altzola para los años 2006-2017. Datos entre 2006 y 2017 a excepción de aquellos entre noviembre de 2011 y febrero de 2012. Se incluyen los intervalos de confianza del 95%. Ha sido necesaria la transformación de la CSS de laboratorio a su logaritmo para asegurar la normalidad de los residuales.

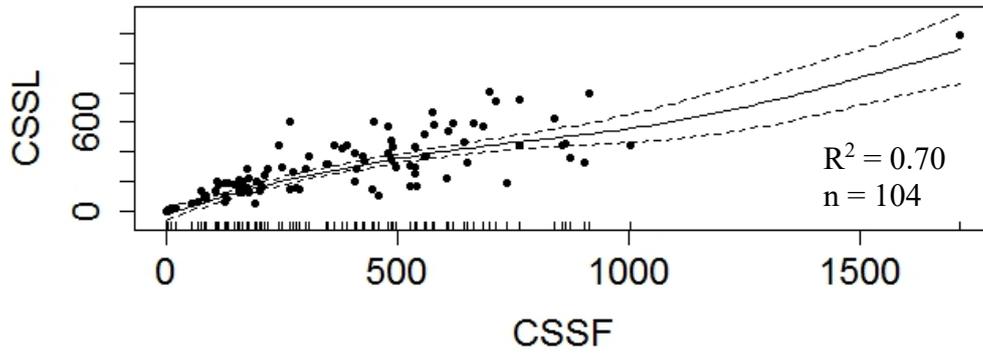
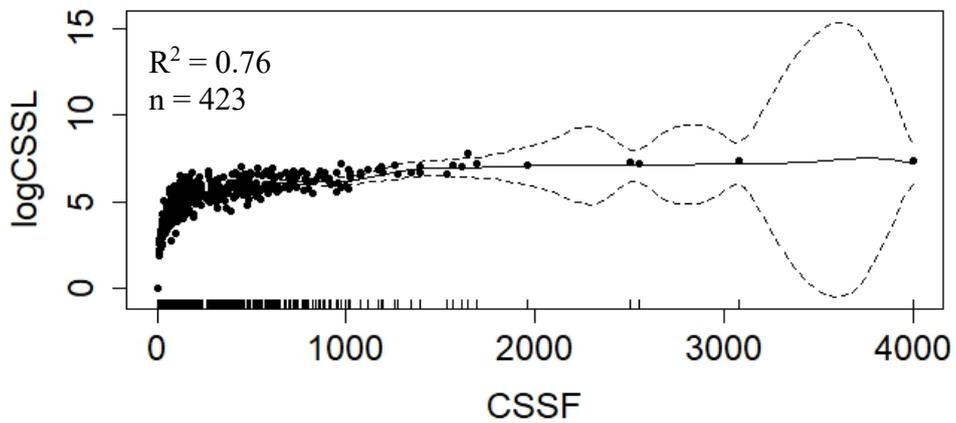


Figura 3.4: Modelo ajustado entre las medidas de campo (CSS campo (CSSF)) y de laboratorio (CSSL) correspondientes a la estación de aforos de Aizarnazabal para los años 2006-2017. Se incluye el intervalo de confianza del 95%.



3.5: Modelo ajustado entre las medidas de campo (CSS campo (CSSF)) y de laboratorio (CSSL) correspondientes a la estación de aforos de Lasarte para los años 2006-2017. Se incluye el intervalo de confianza del 95%. Ha sido necesaria la transformación de la CSS de laboratorio a su logaritmo para asegurar la normalidad de los residuales.

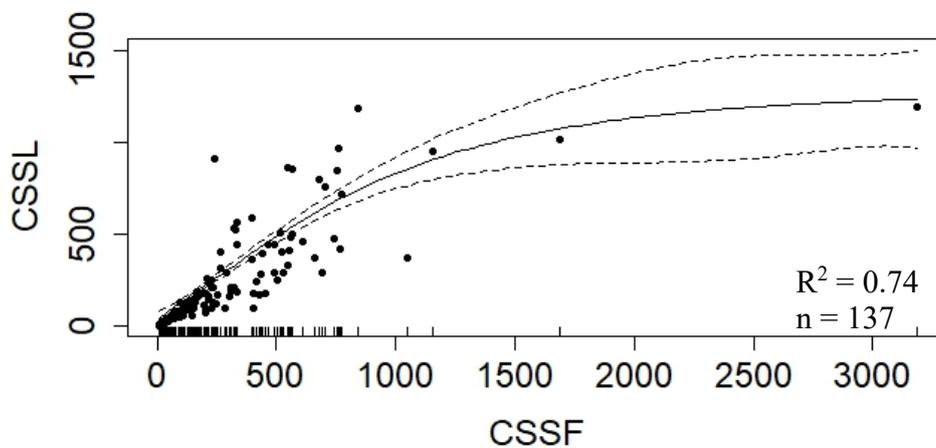


Figura 3.6: Modelo ajustado entre las medidas de campo (CSS campo (CSSF)) y de laboratorio (CSSL) correspondientes a la estación de aforos de Ereñozu para los años 2006-2017. Se incluye el intervalo de confianza del 95%.

La estación de Lasarte cuenta con un gran número de muestras recogidas, sin embargo, existen pocos datos en el rango más alto de las concentraciones (fig. 3.5). Además, como en la mayoría de estaciones se observa una gran dispersión de los puntos. La variabilidad del tipo y la fuente de sedimento en cuencas de un relativo gran tamaño como las analizadas en este informe junto con la incertidumbre propia de la medición de la cantidad de sedimentos en suspensión presente en las aguas, provocan esta dispersión de los datos.

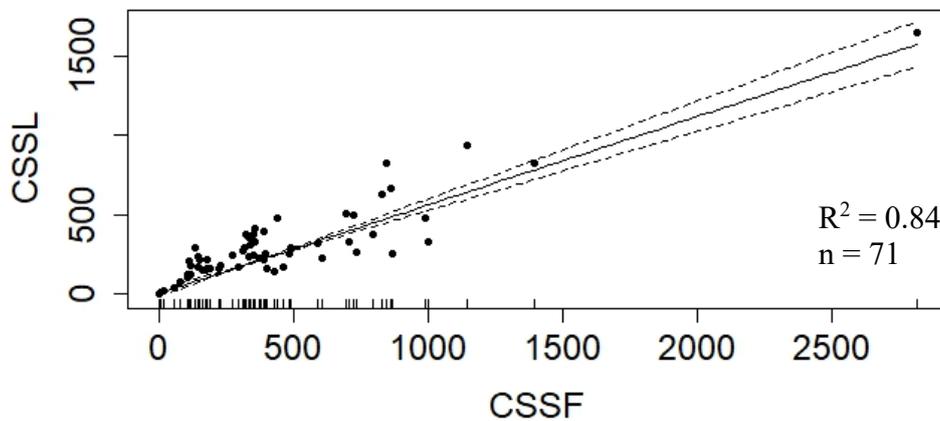


Figura 3.7: Modelo ajustado entre las medidas de campo (CSS campo (CSSF)) y de laboratorio (CSSL) correspondientes a la estación de aforos de Oiartzun para los años 2006-2017. Se incluye el intervalo de confianza del 95%.

Para la estación de aforos de Oiartzun (fig. 3.7) aunque es una de las estaciones con menos puntos en las regresiones (debido a los numerosos problemas acaecidos en los años anteriores), los datos existentes están bastante equitativamente distribuidos hasta los 1500 mg/l; a partir de esa concentración existe un solo dato.

En el caso de Amundarain, al igual que en el Oiartzun, los datos existentes están bastante equitativamente distribuidos en los diferentes rangos de concentración y los coeficientes de correlación calculados para las relaciones son aceptables (fig. 3.8).

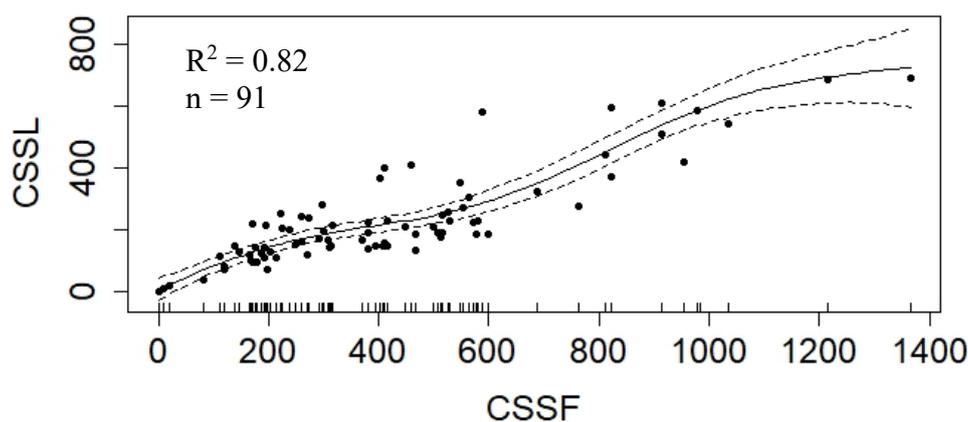


Figura 3.8: Modelo ajustado entre las medidas de campo (CSS campo (CSSF)) y de laboratorio (CSSL) correspondientes a la estación de aforos de Amundarain para los años 2006-2017. Se incluye el intervalo de confianza del 95%.

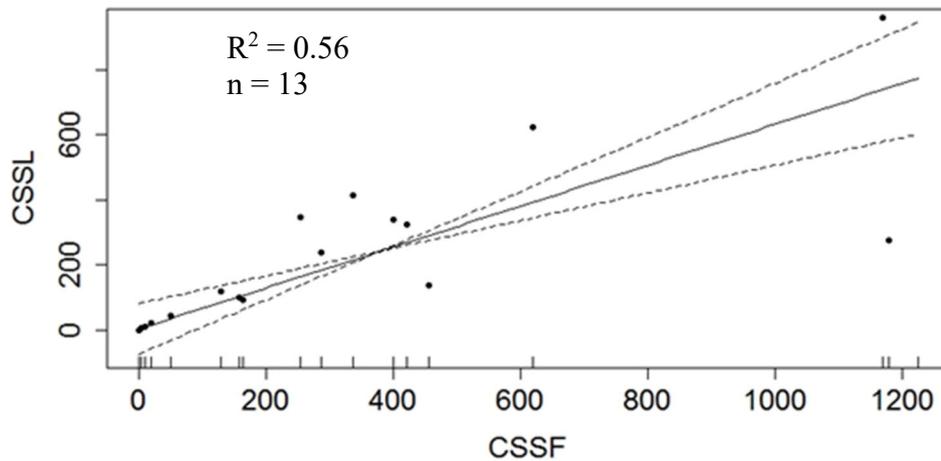


Figura 3.9: Modelo ajustado entre las medidas de campo (CSS campo (CSSF)) y de laboratorio (CSSL) correspondientes a la estación de aforos de Leizaran para para el periodo septiembre 2014-julio 2015. Se incluye el intervalo de confianza del 95%.

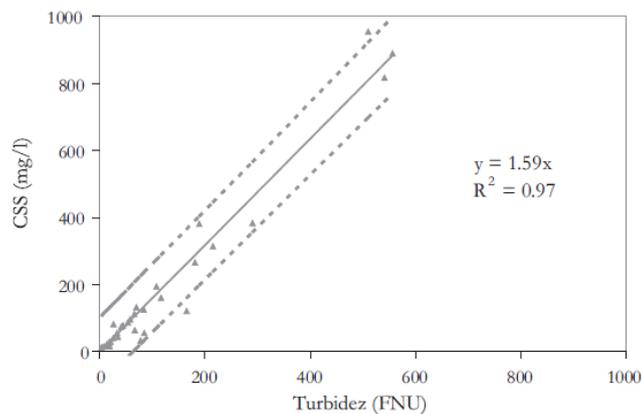


Figura 3.10: Regresión entre las medidas de campo de la Turbidez y de la CSS de laboratorio (CSS) correspondientes a la estación de aforos de Añarbe para el intervalo entre octubre de 2003 y octubre de 2005. Se incluye el intervalo de confianza del 95%.

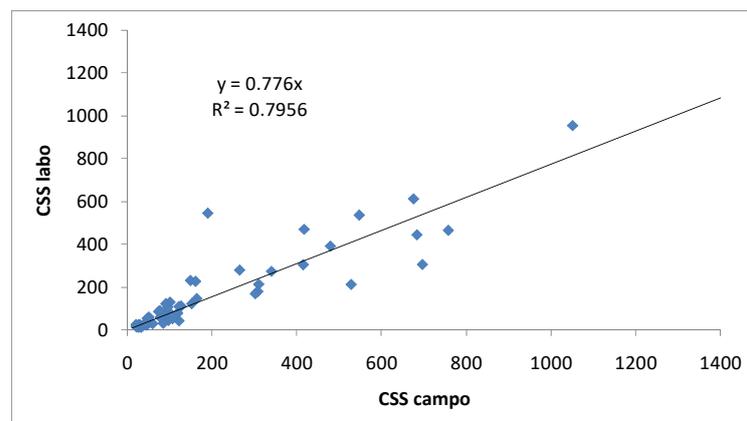


Figura 3.11: Regresión entre las medidas de campo (CSS campo) y de laboratorio (CSS labo) correspondientes a la estación de aforos de San Prudentio para el intervalo entre enero y septiembre de 2016.

4. Resultados

Una vez que se han establecido los modelos de ajuste entre la CSS de campo y la de laboratorio y sus intervalos de confianza del 95% (CSSL_inf, para el intervalo inferior y CSSL_sup para el superior), se ha calculado la carga de SS mensual y anual (en toneladas) utilizando las mediciones diezminutales de CSSF. Para cada medición diezminutal, la estimación de la CSS (la calibrada) se realizó basándose en el modelo GAM ajustado y su intervalo de confianza (CSSL_inf, CSSL_sup) (fig. 4.1).

En el caso de Altzola ha sido necesario forzar la parte alta de la curva de calibración con datos de campo, ya que, los datos obtenidos en campo durante el año 2017-2018 (hasta 4970 mg/l) superan en gran medida los datos incluidos en la curva de calibración, cuyo máximo es de 2067 mg/l. Así, a los datos mayores de 2067 mg/l, para los cuales no existen referencias de laboratorio, se les ha asignado el dato obtenido en campo para poder alargar la curva de calibración hasta los 5000 mg/l.

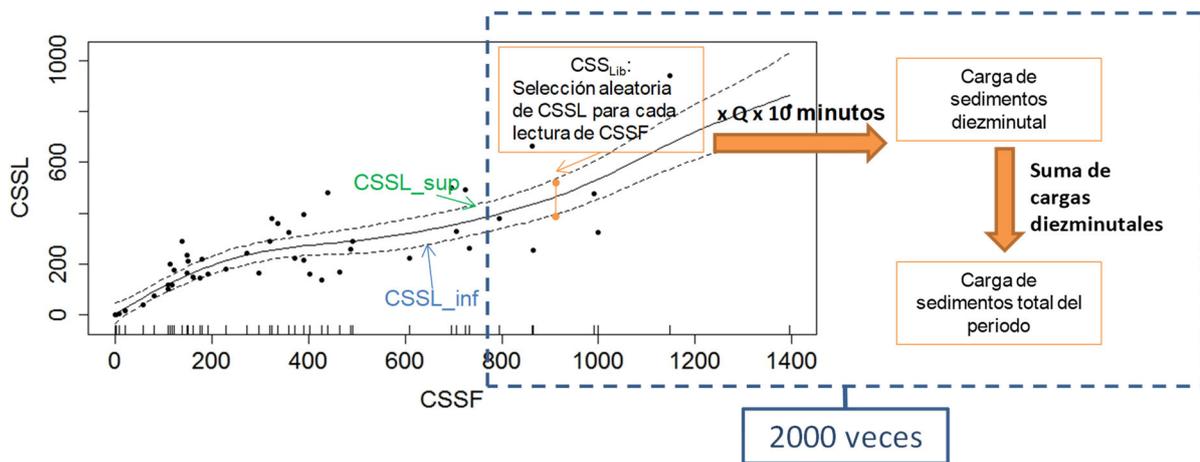


Figura 4.1: Diagrama explicativo de la metodología utilizada en el cálculo de la exportación de sedimentos en suspensión de las cuencas estudiadas en el presente informe.

Con el objetivo de permitir la propagación de la incertidumbre asociada a esa relación CSSF-CSSL (dada por el intervalo de confianza) a los resultados obtenidos, la carga de sedimento para cada intervalo de tiempo se ha determinado a partir de los datos correspondientes de campo (CSSF) teniendo en cuenta el intervalo de confianza del 95% del modelo GAM ajustado (fig. 4.1). Para ello, para cada CSSF se ha seleccionado aleatoriamente una CSSL del intervalo de confianza del 95% del modelo GAM, se ha transformado de logaritmo a real (para los casos necesarios, Altzola y Lasarte) y se ha multiplicado por el caudal correspondiente. Este proceso se ha realizado para cada intervalo diezminutal en el periodo de tiempo seleccionado (mes, año hidrológico) y se ha repetido 2000 veces (con 2000 elecciones aleatorias de la CSSL para cada lectura de CSSF dentro del intervalo de confianza del modelo) para cada estación de aforos. Para dicho fin, se ha utilizado la siguiente ecuación (eq. 4.1),

$$SS_b = \sum_{i=1}^n \widehat{CSS}_{Lib} * Q_i * tiempo \text{ (eq. 4.1)}$$

donde CSS_{Lib} es la concentración de sedimentos en suspensión seleccionada aleatoriamente en el intervalo (CSS_{inf} - CSS_{sup}), Q es el caudal instantáneo, tiempo es el intervalo diezminutal en el que se registran datos y SS_b es la carga de sedimentos estimada para el intervalo de tiempo seleccionado (mes, año) en cada una de las réplicas entre 1 y 2000. Este procedimiento permite derivar parámetros estadísticos básicos (media, desviación estándar) para las estimaciones de exportación de SS, basándose en la

distribución de las 2000 réplicas y en la consideración de los intervalos de confianza inherentes a los modelos de calibración de la CSS en la estimación de la carga total.

En el caso de Añarbe y San Prudentzio la metodología utilizada es algo diferente. Las regresiones entre los datos de campo y de laboratorio definidas para estas estaciones de aforo son relaciones lineales. En estos dos casos, para estimar la masa de sedimento exportada se ha utilizado el registro continuo de la CSS calibrado a partir de esas regresiones (figs. 3.10 y 3.11) y multiplicando directamente el dato calibrado por el correspondiente dato del hidrograma (l/s) en el mismo momento. Teniendo en cuenta el tiempo ha sido posible estimar la cantidad de sedimento que ha pasado por cada una de estas dos estaciones de aforos cada diez minutos.

4.1. Estimación de la masa de sedimento en suspensión exportada (2017-2022)

Para estimar la masa total de sedimento exportada por cada una de las cuencas estudiadas, se ha utilizado la metodología propuesta al inicio de este apartado. Teniendo en cuenta las grandes cuencas del territorio y la masa específica (t/km^2) de sedimento exportado durante el periodo analizado, se pueden agrupar las cuencas en tres grupos, de mayor a menor exportación de sedimentos en suspensión (tabla 4.1): la cuenca del Oiartzun, con $129 t/km^2$, las de Oria, Urola y Deba, con 84 , 75 y $67 t/km^2$, respectivamente, y la del Urumea con $24 t/km^2$ exportados. En cuanto a las cuencas de menor tamaño, las que han exportado una mayor cantidad de sedimentos en suspensión han sido las del Leizaran y Alto Deba, con 73 y $71 t/km^2$, respectivamente, seguidas de Añarbe (sin datos para el 2017-2018) y Amundarain con 50 y $45 t/km^2$, respectivamente.

Tabla 4.1: Precipitación total (P , mm), escorrentía (Q , mm), masa total de SS exportada (t) con su desviación estándar (d.s.), y masa específica de SS exportada (t/km^2) con su desviación estándar (d.s.), en las estaciones de Altzola, Aizarnazabal, Lasarte, Ereñozu y Oiartzun, con el total calculado para el Territorio histórico de Gipuzkoa y para las subcuencas de Amundarain, Leizaran, Añarbe y San Prudentzio durante el periodo 2017-2022.

	Estación	P (mm)	Q (mm)	Area (km^2)	t	d.s.	t/km^2	d.s.
2017-2022	Altzola	1507	775	464.25	30996	348	67	0.75
	Aizarnazabal	1513	887	269.77	20181	65.0	75	0.24
	Lasarte	1619	953	796.5	66988	7363	84	9.24
	Ereñozu	2237	1447	218.42	5246	44.1	24	0.20
	Oiartzun	2150	1498	56.6	7307	13.6	129	0.24
	Gipuzkoa	1666	974	1805.54	130717	3297	72	1.83
	Amundarain	1577	1066	23.44	1055	5	45	0.21
	Leizaran	2038	1484	110.01	8084	34	73	0.31
	Añarbe	2519	1764	47.69	2367	-	50	-
	San Prudentzio	1372	677	121.78	8608	-	71	-

En general, las desviaciones estándar asociadas a las estimaciones de exportación de sedimentos realizadas son muy bajas. Por lo tanto, en principio, estos resultados tendrían una incertidumbre, asociada a la curva de calibración, muy baja. Otra cuestión es la incertidumbre asociada a la falta de datos durante algunos periodos (fig. 3.2).

Teniendo en cuenta los datos de la tabla 4.1, durante el periodo 2017-2022, se exportaron anualmente 130717 ± 3297 toneladas de sedimentos en suspensión desde las cinco cuencas principales de Gipuzkoa (Deba, Urola, Oria, Urumea y Oiartzun). Un 51 % de estos sedimentos se exportaron desde la cuenca del Oria y un 23 % desde la del Deba; por lo tanto, alrededor del 75 % de estos sedimentos se exportaron desde las cuencas del Deba y el Oria, a través de las estaciones de aforos de Altzola y Lasarte. Para el conjunto del Territorio Histórico la masa específica exportada resultante es de $72 t/km^2$ (tabla 4.1), con una desviación estándar de 1.83.

4.2. Comparación inter-anual de las tasas de exportación de sedimentos en suspensión

Los años en los que se ha exportado una mayor cantidad de sedimentos han sido el 2017-2018 y el 2021-2022, con 94 y 122 t/km², respectivamente. La exportación de sedimentos durante el 2021-2022 ha sido espacialmente muy homogénea. De hecho, a excepción de la cuenca del Ereñozu, donde se han exportado tan solo 16 t/km², en el resto de cuencas la exportación específica se sitúa entre las 134 t/km² del Urola y las 144 t/km² del Oiartzun. Sin embargo, en el caso del año 2017-2018, la exportación de sedimentos se ha dado de una forma más desigual espacialmente, con valores mayores para Oiartzun, 154 t/km², medios para Aizarnazabal y Lasarte, 103 y 113 t/km², y más bajos para Ereñozu, 48 t/km².

En lo que se refiere a las cuencas de cabecera el patrón temporal se repite hasta cierto punto. Así, los años 2017-2018 y 2021-2022 son los años en los que se ha exportado una mayor cantidad de sedimento en Amundarain, Leitzaran y Añarbe (en este caso solo el 2021-2022 ya que no existen datos para el 2017-2018), sin embargo, en el caso de San Prudentzio son los tres primeros años del periodo analizados los que registran mayores exportaciones, de entre 77 y 98 t/km², siendo el 2019-2020 el año hidrológico en el que más sedimentos se han exportado.

Si se comparan los datos de exportación de sedimentos en suspensión obtenidos para las grandes cuencas de Gipuzkoa para los cinco años analizados en este documento con los obtenidos para los años anteriores (figs. 4.1 a 4.5), se observan unas primeras particularidades, sobre todo en la estación de Oiartzun (fig. 4.5). En esta estación la exportación de sedimentos en suspensión entre 2017-2018 y 2021-2022 es, en general, superior a la media, y se observa, para estos cinco años un aumento de la exportación que no viene de la mano de un aumento en la precipitación y en la escorrentía. 2017-2018 es el único año de los cinco analizados en el que la precipitación y la escorrentía se sitúan significativamente por encima de la media, por lo que, a falta del posterior análisis intra-anual, la mayor exportación de ese año en concreto podría estar relacionada con esos parámetros. Sin embargo, eso no se repite durante el 2020-2021 y el 2021-2022, para los que la precipitación y la escorrentía anuales están muy cerca de la media, y sin embargo, ha habido una exportación de sedimentos en suspensión un 50% mayor a la media de 94 t/km².

En el informe del año 2014 (DFG, 2014) se concluía que la variabilidad espacial de la exportación de sedimentos en suspensión en Gipuzkoa está determinada por la disponibilidad de sedimentos, en la cual influyen, sobre todo, los usos del suelo y particularmente la vegetación (plantaciones exóticas vs. bosque nativo) y el espesor del regolito. A este razonamiento se ha atribuido hasta el 2015-2016, el hecho de que las cuencas del Oiartzun y Urumea, con una menor proporción de plantaciones de exóticos, hayan sido aquellas que han mostrado una menor disponibilidad y menor exportación de sedimentos en suspensión.

Sin embargo, a partir del 2016-2017 la exportación de sedimentos, ha seguido una tendencia espacial diferente a la de años anteriores, siendo Oiartzun una de las cuencas que más sedimento ha exportado por km². En la figura 4.6 se muestra el número de días con caudales medios diarios específicos (en l/s·km²) que superan un umbral establecido (100, 300, 500 l/s·km²) para cada año hidrológico desde el 2006-2007 en cada una de las cuencas. En estos gráficos se observa que el año 2017-2018 ha sido uno de los años en los que mayor número de días se han superado el umbral de 100 l/s·km². Otros años, como el 2012-2013 o el 2008-2009 muestran también un número caudales altos mayor y la exportación de sedimentos también ha sido, en general, mayor a la media, con una incidencia espacial desigual sobre todo en el 2008-2009.

Tabla 4.2: Precipitación total (P, mm), escorrentía (Q, mm), masa total de SS exportada (t) con su desviación estándar (d.s.), y masa específica de SS exportada (t/km²) con su desviación estándar (d.s.), en las estaciones de Altzola, Aizarnazabal, Lasarte, Ereñozu y Oiartzun, con el total calculado para el Territorio histórico de Gipuzkoa y para las subcuencas de Amundarain, Leitzaran, Añarbe y San Prudentzio durante los años hidrológicos 2017-2018 a 2021-2022.

	Estación	P (mm)	Q (mm)	Area (km ²)	t	d.s.	t/km ²	d.s.	
<u>2017-2018</u>	Altzola	1815	1108	464.25	31916	136	69	0.29	<u>2017-2018</u>
	Aizarnazabal	1872	1278	269.77	27874	74.5	103	0.28	
	Lasarte	2016	1442	796.50	89896	16444	113	20.6	
	Ereñozu	2741	2057	218.42	10658	59.88	48.8	0.27	
	Oiartzun	2565	2000	56.60	8821	14.2	156	0.25	
	Gipuzkoa	2048	1424	1805.54	169165	7354	94	4.1	
	Amundarain	1919	1582	23.44	1389	6.37	59.2	0.27	
	Leitzaran	2580	2173	110.01	10143	46.0	92.2	0.42	
	Añarbe	3083	2469	47.69	-	-	-	-	
San Prudentzio	1821	1016	121.78	9468	-	77.7	-		
<u>2018-2019</u>	Altzola	1316	514	464.25	22756	137	49.0	0.29	<u>2018-2019</u>
	Aizarnazabal	1263	618	269.77	12101	36.5	44.9	0.14	
	Lasarte	1440	715	796.50	54763	474	68.8	0.59	
	Ereñozu	2024	1136	218.42	6257	43.3	28.6	0.20	
	Oiartzun	1886	1093	56.60	5319	12.4	94.0	0.22	
	Gipuzkoa	1466	712	1805.54	101196	222	56.0	0.12	
	Amundarain	1397	834	23.44	761	3.95	32.4	0.17	
	Leitzaran	1854	1167	110.01	6229	24.6	56.6	0.22	
	Añarbe	2234	1430	47.69	1311	-	27.5	-	
San Prudentzio	1107	540	121.78	10453	-	85.8	-		
<u>2019-2020</u>	Altzola	1489	657	464.25	21694	226	46.7	0.49	<u>2019-2020</u>
	Aizarnazabal	1468	724	269.77	12969	39.8	48.1	0.15	
	Lasarte	1572	778	796.50	48635	354	61.1	0.44	
	Ereñozu	2215	1251	218.42	4949	41.1	22.7	0.19	
	Oiartzun	2136	1477	56.60	5405	10.9	95.5	0.19	
	Gipuzkoa	1631	818	1805.54	93652	190	51.9	0.10	
	Amundarain	1555	893	23.44	912	4.31	38.9	0.18	
	Leitzaran	2019	1318	110.01	8706	28.9	79.1	0.26	
	Añarbe	2456	1656	47.69	1006	-	21.1	-	
San Prudentzio	1107	540	121.78	11961	-	98.2	-		
<u>2020-2021</u>	Altzola	1389	712	464.25	15997	40.4	34.5	0.09	<u>2020-2021</u>
	Aizarnazabal	1413	806	269.77	11833	43.1	43.9	0.16	
	Lasarte	1473	791	796.50	32201	94.0	40.4	0.12	
	Ereñozu	1974	1245	218.42	844	37.7	3.86	0.17	
	Oiartzun	1984	1412	56.60	8821	14.2	156	0.25	
	Gipuzkoa	1519	847	1805.54	69695	52.8	38.6	0.03	
	Amundarain	1464	919	23.44	847	4.03	36.1	0.17	
	Leitzaran	1801	1208	110.01	5001	25.1	45.5	0.23	
	Añarbe	2198	1481	47.69	721	-	15.1	-	
San Prudentzio	1508	614	121.78	5703	-	47	-		
<u>2021-2022</u>	Altzola	1526	882	464.25	62616	717	135	1.54	<u>2021-2022</u>
	Aizarnazabal	1548	1008	269.77	36128	104	134	0.39	
	Lasarte	1592	1040	796.50	109445	531	137	0.67	
	Ereñozu	2232	1546	218.42	3520	33.9	16.1	0.16	
	Oiartzun	2177	1507	56.60	8170	16.0	144	0.28	
	Gipuzkoa	1664	1070	1805.54	219878	402	122	0.22	
	Amundarain	1550	1102	23.44	1367	5.94	58.3	0.25	
	Leitzaran	1938	1555	110.01	10344	40.7	94.0	0.37	
	Añarbe	2623	1786	47.69	6430	-	135	-	
San Prudentzio	1318	673	121.78	5457	-	45	-		

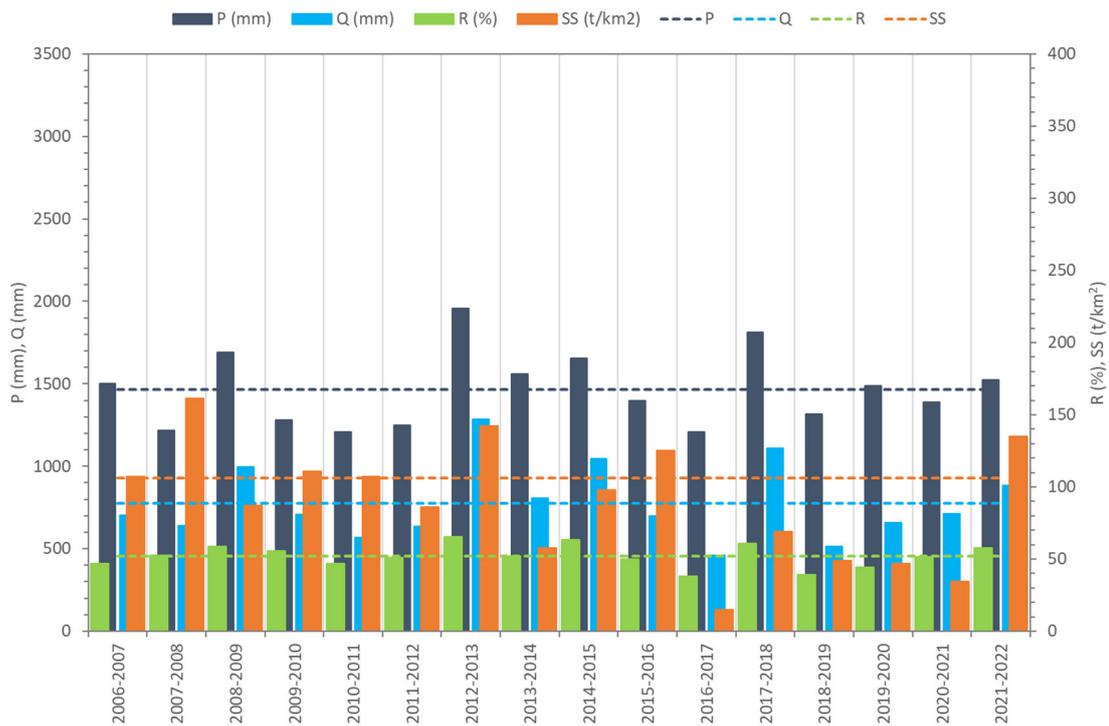


Figura 4.1: Precipitación (P ; mm), escorrentía (Q ; mm), coeficiente de escorrentía (R ; %) y masa específica de SS exportada (SS ; t/km²) en las estación de Altzola durante los años hidrológicos 2006-2007 a 2021-2022. Las columnas indican los datos anuales y las líneas discontinuas las medias del periodo 2006-2022.

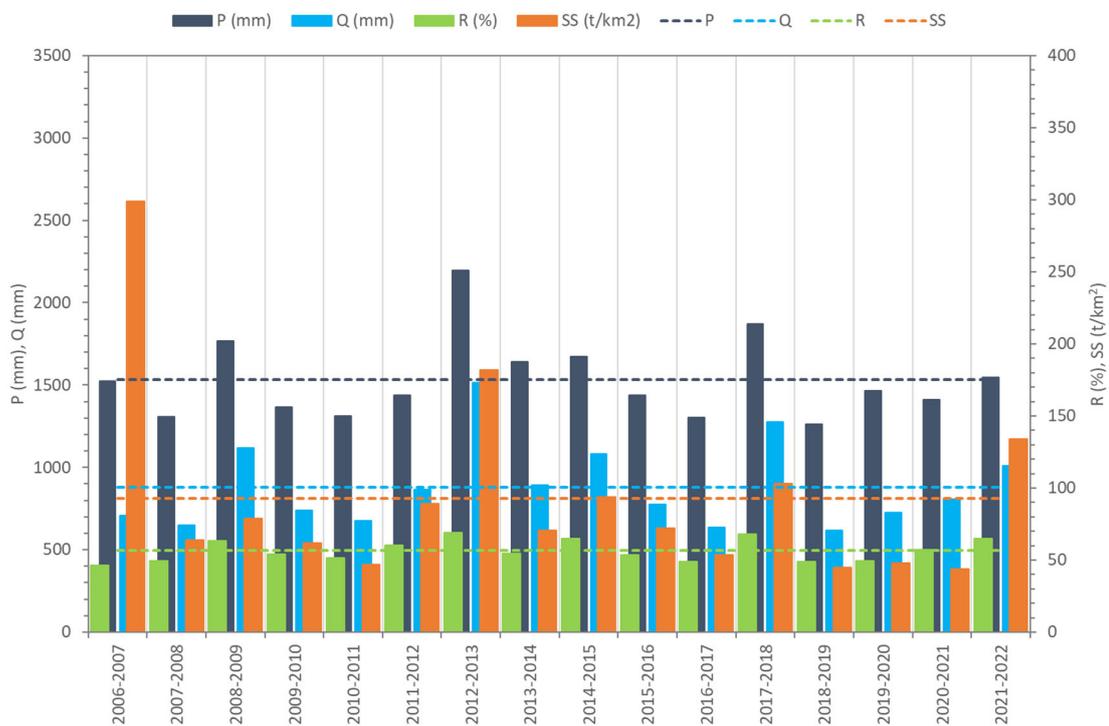


Figura 4.2: Precipitación (P ; mm), escorrentía (Q ; mm), coeficiente de escorrentía (R ; %) y masa específica de SS exportada (SS ; t/km²) en las estación de Aizarnazabal durante los años hidrológicos 2006-2007 a 2021-2022. Las columnas indican los datos anuales y las líneas discontinuas las medias del periodo 2006-2022.

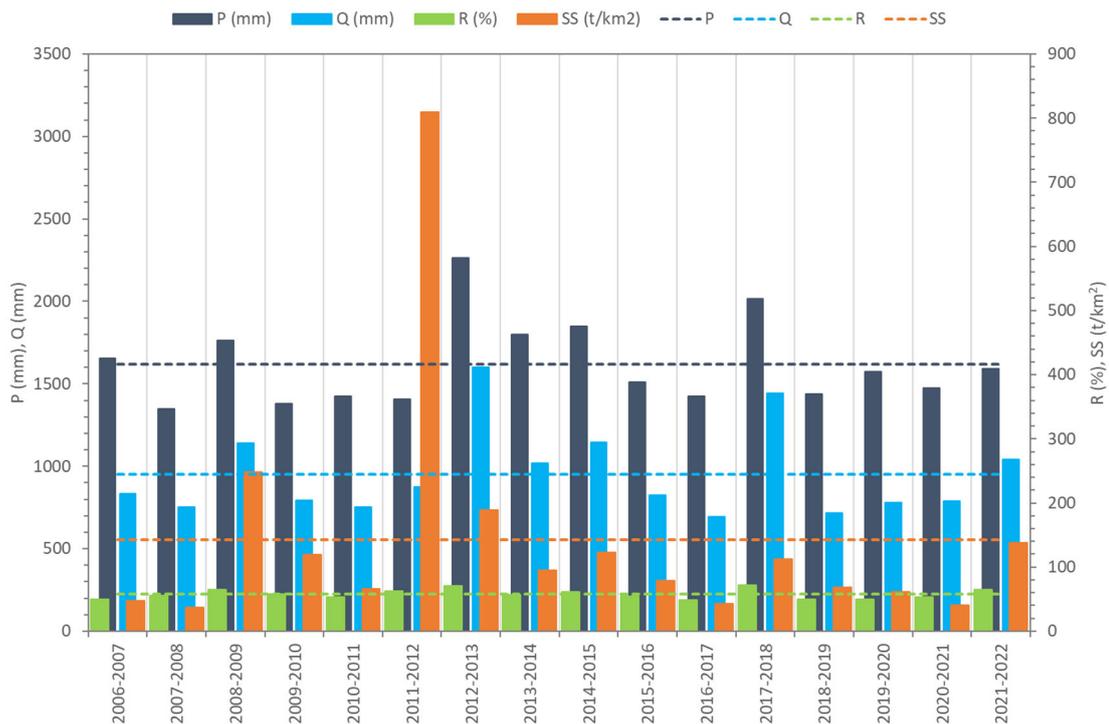


Figura 4.3: Precipitación (P ; mm), escorrentía (Q ; mm), coeficiente de escorrentía (R ; %) y masa específica de SS exportada (SS ; t/km²) en las estación de Lasarte durante los años hidrológicos 2006-2007 a 2021-2022. Las columnas indican los datos anuales y las líneas discontinuas las medias del periodo 2006-2022.

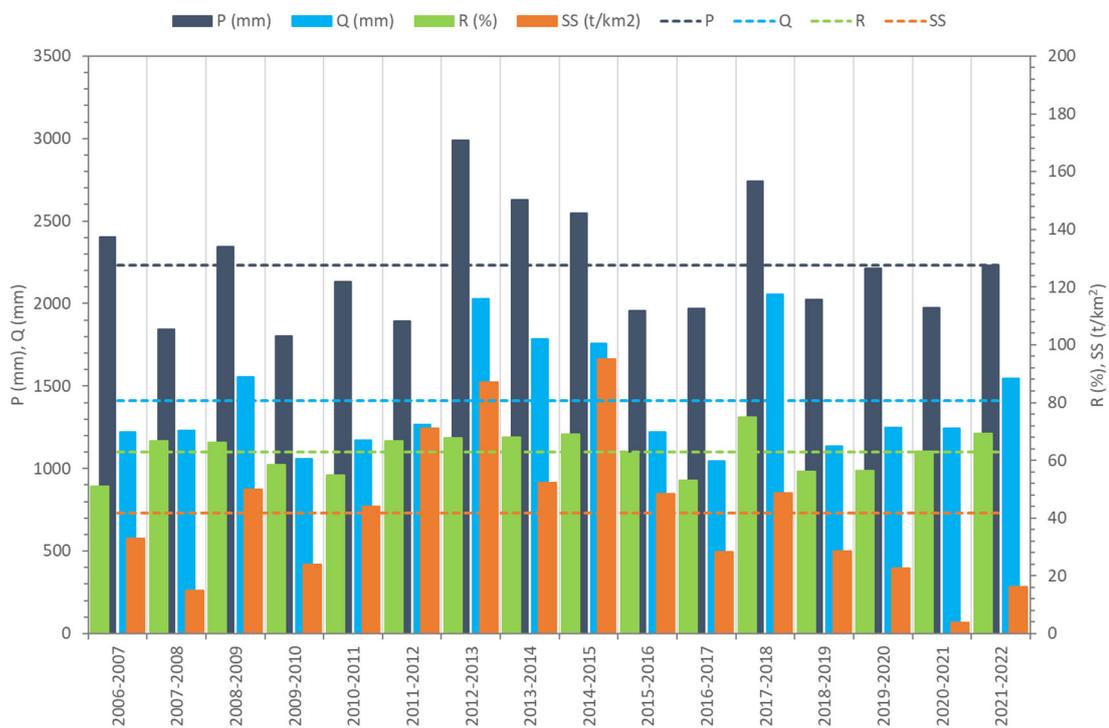


Figura 4.4: Precipitación (P ; mm), escorrentía (Q ; mm), coeficiente de escorrentía (R ; %) y masa específica de SS exportada (SS ; t/km²) en las estación de Ereñozu durante los años hidrológicos 2006-2007 a 2021-2022. Las columnas indican los datos anuales y las líneas discontinuas las medias del periodo 2006-2022.

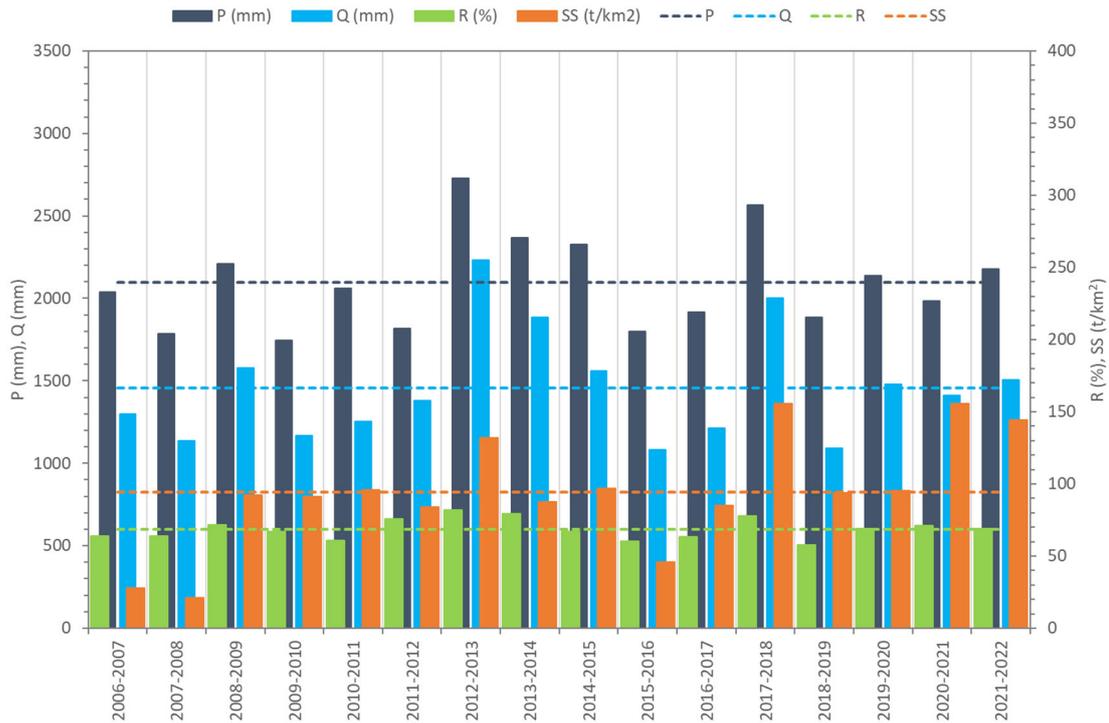


Figura 4.5: Precipitación (P; mm), escorrentía (Q; mm), coeficiente de escorrentía (R; %) y masa específica de SS exportada (SS; t/km²) en las estación de Oartzun durante los años hidrológicos 2006-2007 a 2021-2022. Las columnas indican los datos anuales y las líneas discontinuas las medias del periodo 2006-2022.



Figura 4.6: Número de días con caudales medios diarios específicos (en l/s-km²) que superan un umbral establecido (100, 300, 500 l/s-km²) para cada año hidrológico entre el 2006-2007 y el 2021-2022 en cada una de las cuencas.

Si bien el número de días con caudales medios diarios específicos que superan un umbral de $100 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$ es mayor a lo habitual para el 2017-2018, para los umbrales de 300 y $500 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$ la situación es espacialmente desigual. Solamente las estaciones de Ereñozu y Oiartzun destacan ligeramente por el número de días con caudales medios por encima de los $300 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$. En cuanto a los días con caudales medios por encima de los $500 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$. Son las estaciones de Lasarte y Oiartzun, con 2 y 3 días respectivamente, los que destacan para el 2017-2018. Así, la alta exportación de sedimentos durante el 2017-2018, podría estar parcialmente relacionada con el mayor número de días con caudales altos, especialmente con caudales superiores a $100 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$.

El año 2021-2022 es otro de los que destaca por el número de días en los que se ha superado un umbral establecido de caudal medio diario. En este caso, aunque los días con caudales superiores a $100 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$ no son especialmente numerosos, sí lo son aquellos que han superado los 300 y, sobre todo, los $500 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$. Esto podría explicar la mayor exportación de sedimentos durante el 2021-2022 aun siendo un año medio en cuanto a cantidad de precipitaciones se refiere.

Destaca además el caso de Oiartzun donde, durante los últimos cinco años la exportación de sedimentos ha aumentado con respecto al periodo anterior. Se observa, que, la presencia de días con caudales medios diarios por encima de $500 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$ también ha aumentado en el mismo periodo, lo cual puede explicar el aumento de exportación de sedimentos.

4.3. Distribución de la Precipitación, el Caudal y la exportación de SS a lo largo del año

En las figuras 4.7 a 4.33 se muestra la distribución porcentual mensual de las precipitaciones, los caudales y la exportación de sedimentos en suspensión (estimado a partir de la mediana de las exportaciones calculadas para cada mes), el porcentaje diario acumulado de la escorrentía y de la exportación de sedimentos en suspensión (determinado a partir de la CSS ajustada al modelo) y la distribución de los caudales medios diarios de cada mes ordenados de mayor a menor, todo ello referido al periodo entre 2016-2017 y 2021-2022, para las estaciones de aforo analizadas.

En Altzola (fig. 4.7), los meses más lluviosos han sido enero y noviembre de 2019, diciembre de 2020 y noviembre de 2021, con precipitaciones que, en todos los casos suponen más del 20% del total anual. En la mayoría de casos estos meses coinciden con los de mayor escorrentía y exportación de sedimentos, sin embargo, en el 2017-2018 meses más lluviosos y de mayor escorrentía son los de diciembre, enero y febrero, y el mes con una mayor exportación de sedimentos, de en torno al 35% anual, es el mes de abril. En 2021-2022 el mes con mayor escorrentía es el de diciembre, que, además coincide con el de mayor porcentaje de exportación de sedimentos. Los meses de mayor exportación, son, en general, los meses en los que se registran mayores caudales diarios (fig. 4.8).

Además, en la figura 4.9 se observa que es el mes de diciembre de 2021 el que supone un mayor porcentaje de exportación de sedimentos en suspensión en los cinco años analizados, ya que, se observa un aumento muy destacable de sedimentos en la curva de acumulados. Así, en el caso de Altzola, el 50% de los sedimentos se han exportado en 1% del tiempo, el 75% de los sedimentos en el 3% del tiempo y el 90% de los sedimentos en el 7% del tiempo, mientras que, en el caso de la escorrentía ha hecho falta el 8%, 25% y 50% del tiempo para generar el 50%, 75% y 90% de la misma. Se observa en la figura 4.9 que la mayor parte del tiempo los periodos en los que aumenta la exportación de sedimentos coinciden con aumentos en la curva de escorrentía.

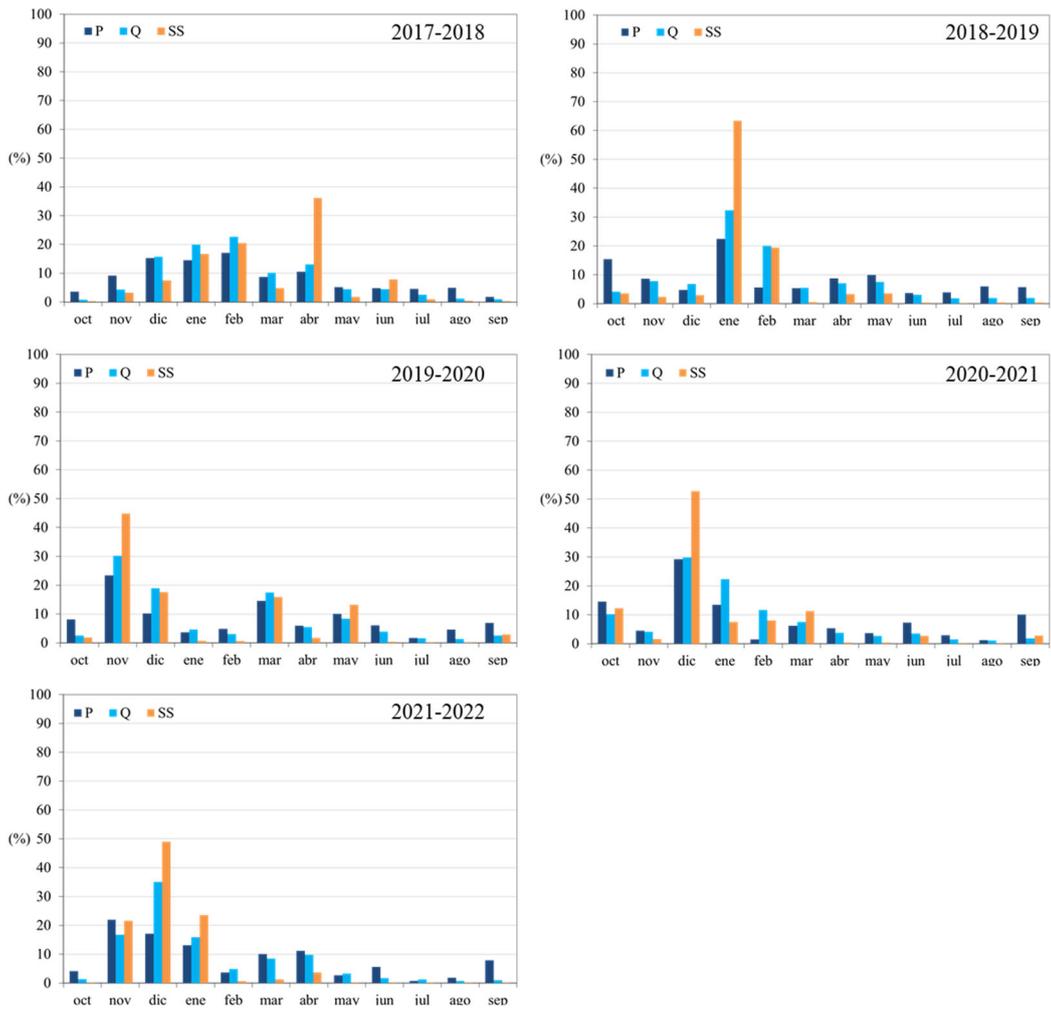


Figura 4.7: Distribución porcentual mensual de la precipitación (P), la escorrentía (Q) y la exportación de sedimentos en suspensión para la estación de aforos de Altzola para los años hidrológicos entre 2017-2018 y 2021-2022.

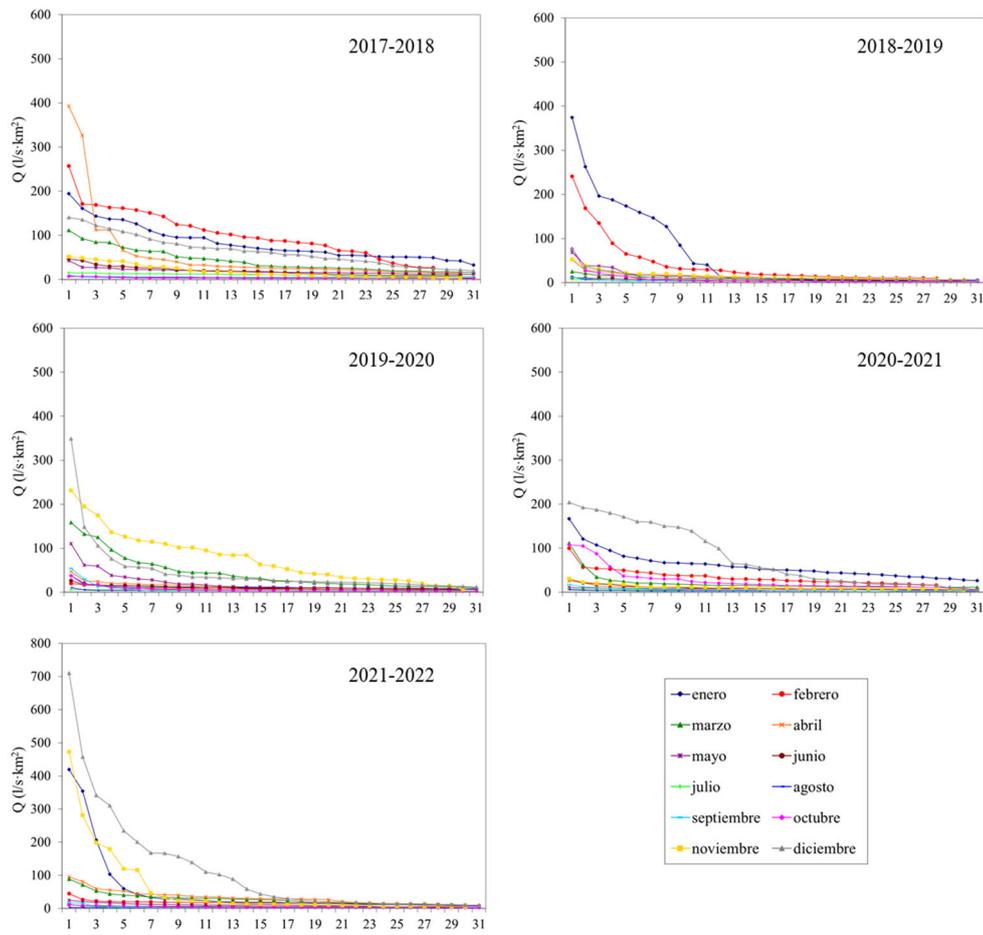


Figura 4.8: Distribución de los caudales diarios medios de cada mes (ordenados de mayor a menor) para la estación de aforos de Altzola para cada año hidrológico entre 2017-2018 y 2021-2022.

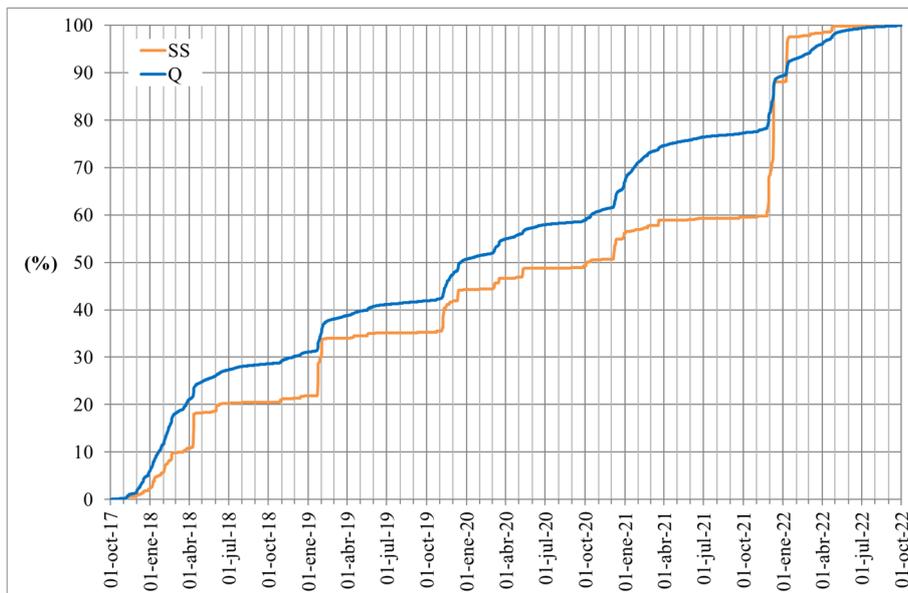


Figura 4.9: Porcentaje diario acumulado de escorrentía y exportación de sedimentos en suspensión para la estación de aforos de Altzola entre octubre de 2017 y septiembre de 2022.

En Aizarnazabal (fig. 4.10), la distribución mensual de la precipitación, la escorrentía y la exportación de sedimentos en suspensión durante el periodo analizado es muy parecida a la de Altzola. En este caso, al igual que en Altzola los meses más lluviosos son los de otoño invierno, entre noviembre y febrero, los meses con mayor escorrentía son los diciembre, enero y febrero, y el mes con una mayor exportación de sedimentos, de en torno al 35% anual, es el mes de abril. Esta mayor exportación en abril está directamente relacionada con los caudales medios diarios de este mes, ya que, se registran días con caudales superiores a los 400 l/s·km² (fig. 4.11).

Además, en la figura 4.12 se observa una relación muy parecida a la de Altzola entre el aumento de sedimentos y el de la escorrentía. El mayor aumento de la exportación de sedimentos se da entre noviembre y diciembre de 2021, con un aumento de aproximadamente un 25% en aproximadamente 20 días. Así, en el caso de Aizarnazabal, teniendo en cuenta el periodo 2017-2022, el 50% de los sedimentos se han exportado en el 1% del tiempo, el 75% de los sedimentos en el 5% del tiempo y el 90% de los sedimentos en el 20% del tiempo, mientras que, en el caso de la escorrentía ha hecho falta el 10%, 29% y 58% del tiempo para generar el 50%, 75% y 90% de la misma.

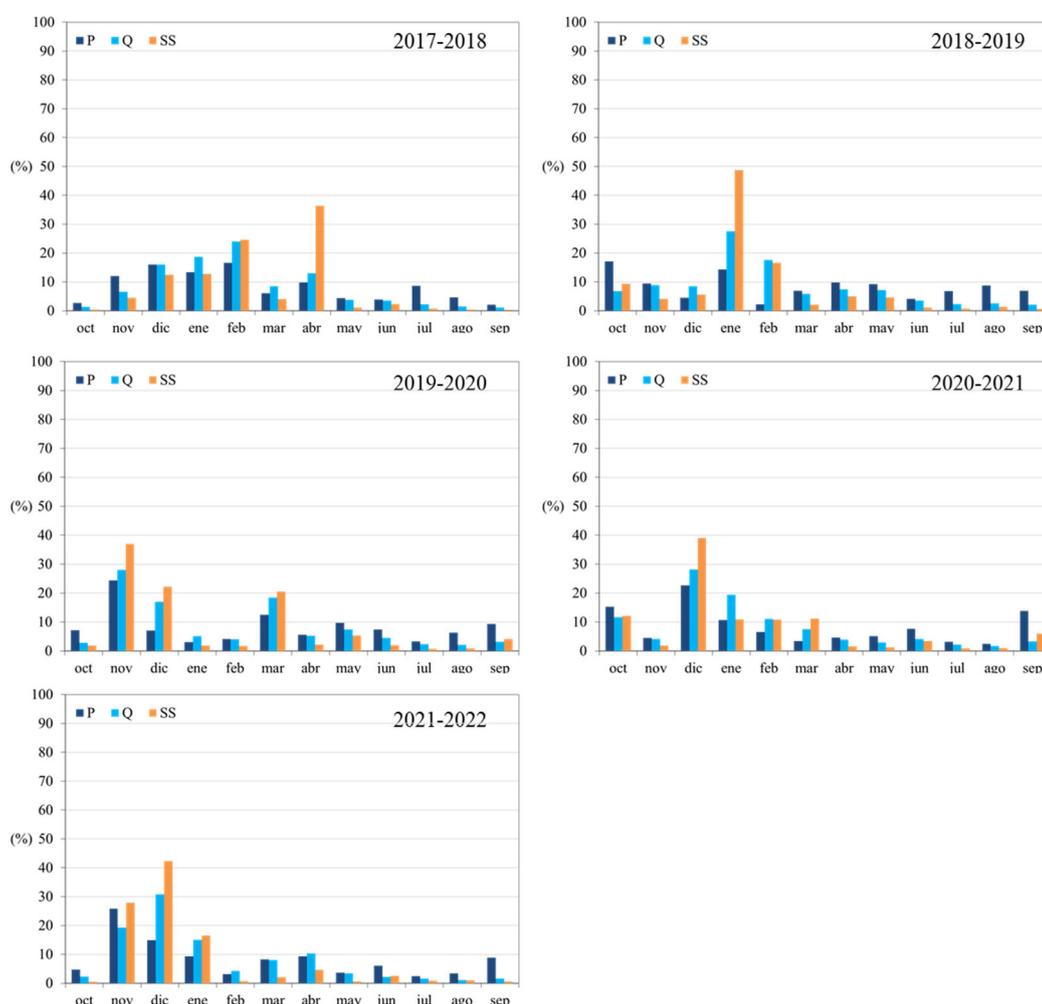


Figura 4.10: Distribución porcentual mensual de la precipitación (P), la escorrentía (Q) y la exportación de sedimentos en suspensión para la estación de aforos de Aizarnazabal para los años hidrológicos entre 2017-2018 y 2021-2022.

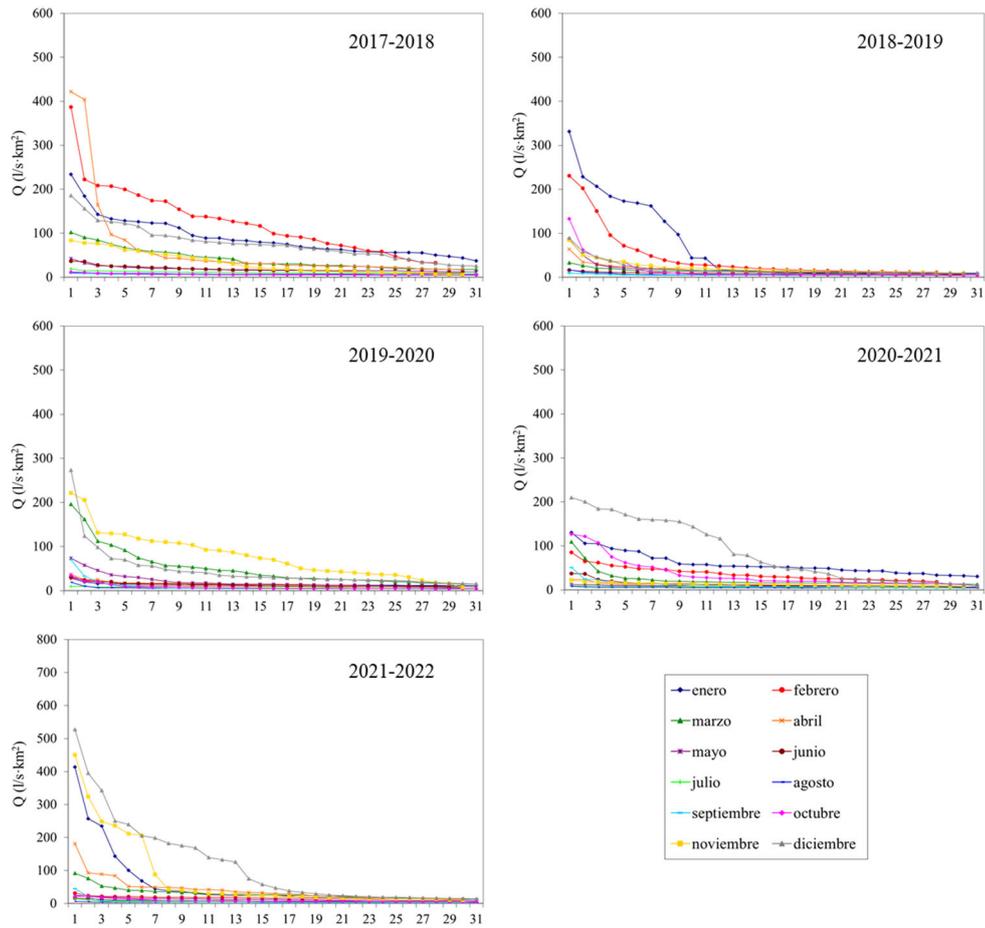


Figura 4.11: Distribución de los caudales diarios medios de cada mes (ordenados de mayor a menor) para la estación de aforos de Aizarnazabal para cada año hidrológico entre 2017-2018 y 2021-2022.

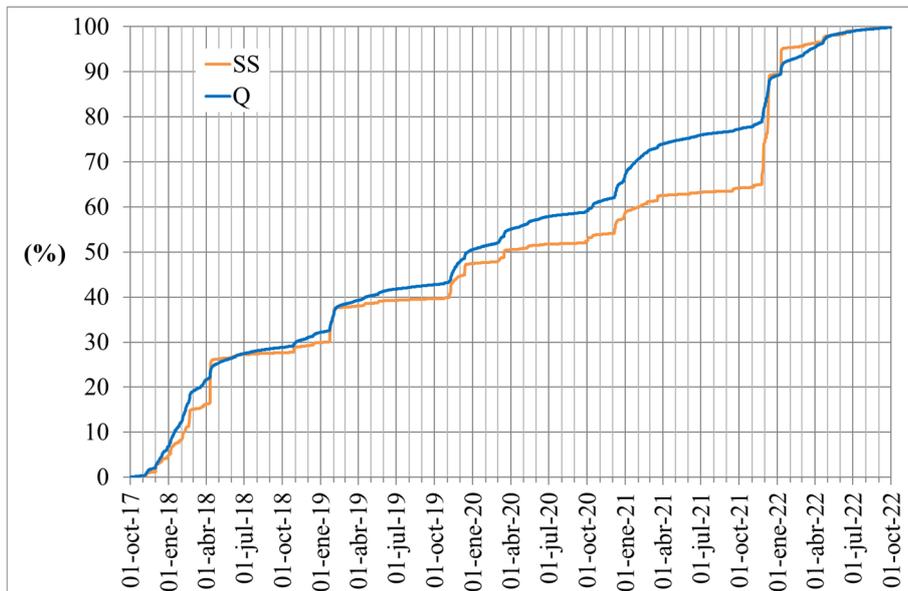


Figura 4.12: Porcentaje diario acumulado de escorrentía y exportación de sedimentos en suspensión para la estación de aforos de Aizarnazabal entre octubre de 2017 y septiembre de 2022.

La figura 4.13 muestra una distribución de la precipitación, la escorrentía y la exportación de sedimentos en suspensión similar a la de Aizarnazabal para la estación de aforos de Lasarte. Los periodos más lluviosos se encuentran entre noviembre de 2017 y febrero de 2018, enero y noviembre de 2019, diciembre de 2020 y noviembre de 2021, con precipitaciones más repartidas para el año 2017-2018 (que no superan en ningún caso el 20% del total anual) y algo más concentradas durante los meses mencionados (con porcentajes que superan el 20% anual) para el resto de años hidrológicos. En la mayoría de casos estos meses coinciden con los de mayor escorrentía y exportación de sedimentos, sin embargo, en el 2017-2018 el mes con mayor escorrentía es el de diciembre, y el mes con mayor exportación de sedimentos, de más del 30%, es el de abril. Esta mayor exportación en abril está directamente relacionada con los caudales medios diarios de este mes, ya que, se registran días con caudales superiores a los 500 l/s·km² (fig. 4.14).

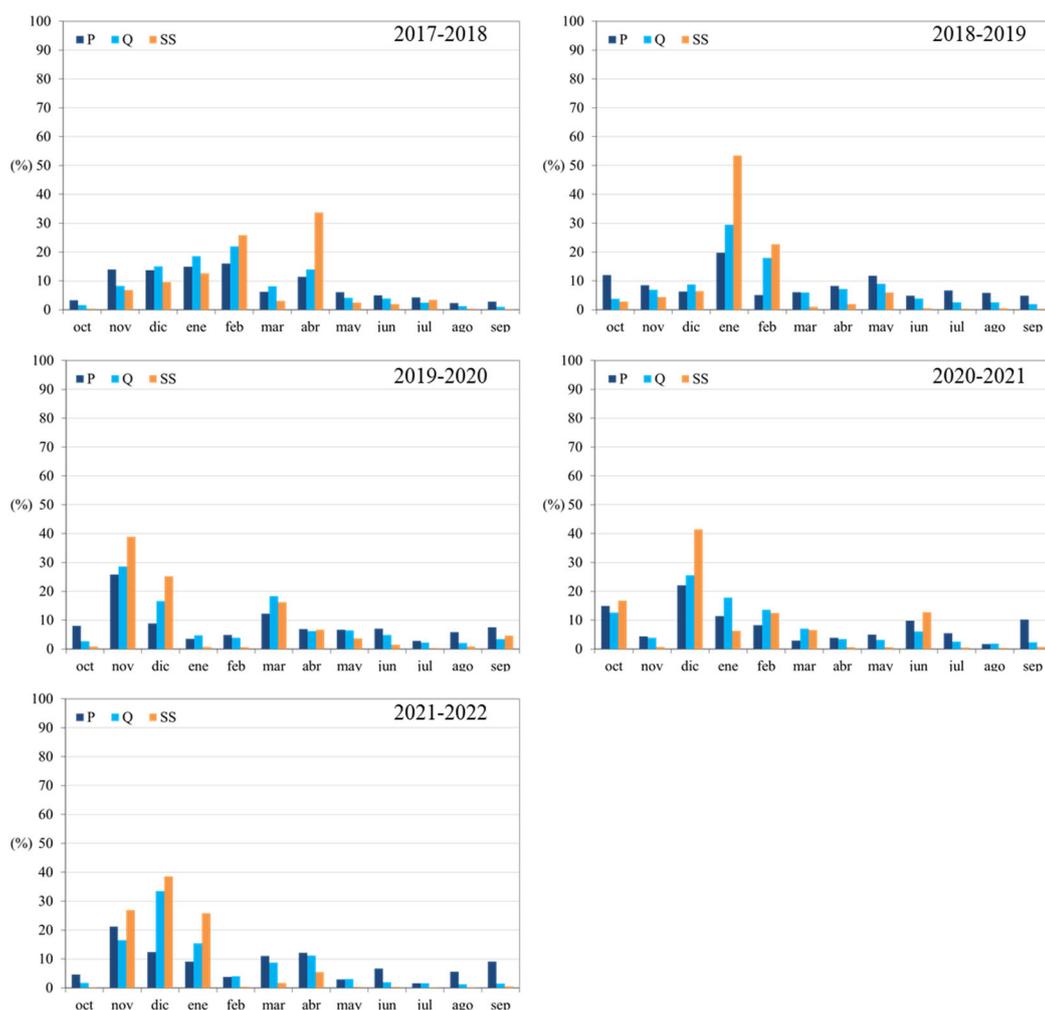


Figura 4.13: Distribución porcentual mensual de la precipitación (P), la escorrentía (Q) y la exportación de sedimentos en suspensión para la estación de aforos de Lasarte para los años hidrológicos entre 2017-2018 y 2021-2022.

También destacan por sus altos porcentajes de exportación de sedimentos los meses de enero de 2019, con más del 50% del sedimento anual exportado y caudales medios diarios que superan los 500 l/s·km² (fig. 4.14), y noviembre de 2019 y diciembre de 2020, con en torno al 40% de sedimento exportado durante cada uno de estos meses y caudales medios diarios que no llegan a los 300 l/s·km². Durante el 2021-2022 se han registrado caudales medios diarios muy altos (de entre 450 y 700 l/s·km²) para los

meses de noviembre, diciembre y enero, periodo durante el cual se han exportado casi el 90% de los sedimentos en suspensión.

En la figura 4.15, en la que se refleja la escorrentía y la exportación de sedimentos del periodo entre 2017-2018 y 2021-2022, destacan dos momentos con pulsos importantes de exportación de sedimentos, uno de ellos en abril de 2018 y el otro en enero de 2019. Así, en el caso de Lasarte, teniendo en cuenta el periodo 2017-2022, el 50% de los sedimentos se han exportado en 23 días (el 1% del tiempo), el 75% de los sedimentos en 76 días (el 4% del tiempo) y el 90% de los sedimentos en 212 días (el 20% del tiempo, mientras que, en el caso de la escorrentía ha hecho falta el 12%, 30% y 59% del tiempo para generar el 50%, 75% y 90% de la misma.

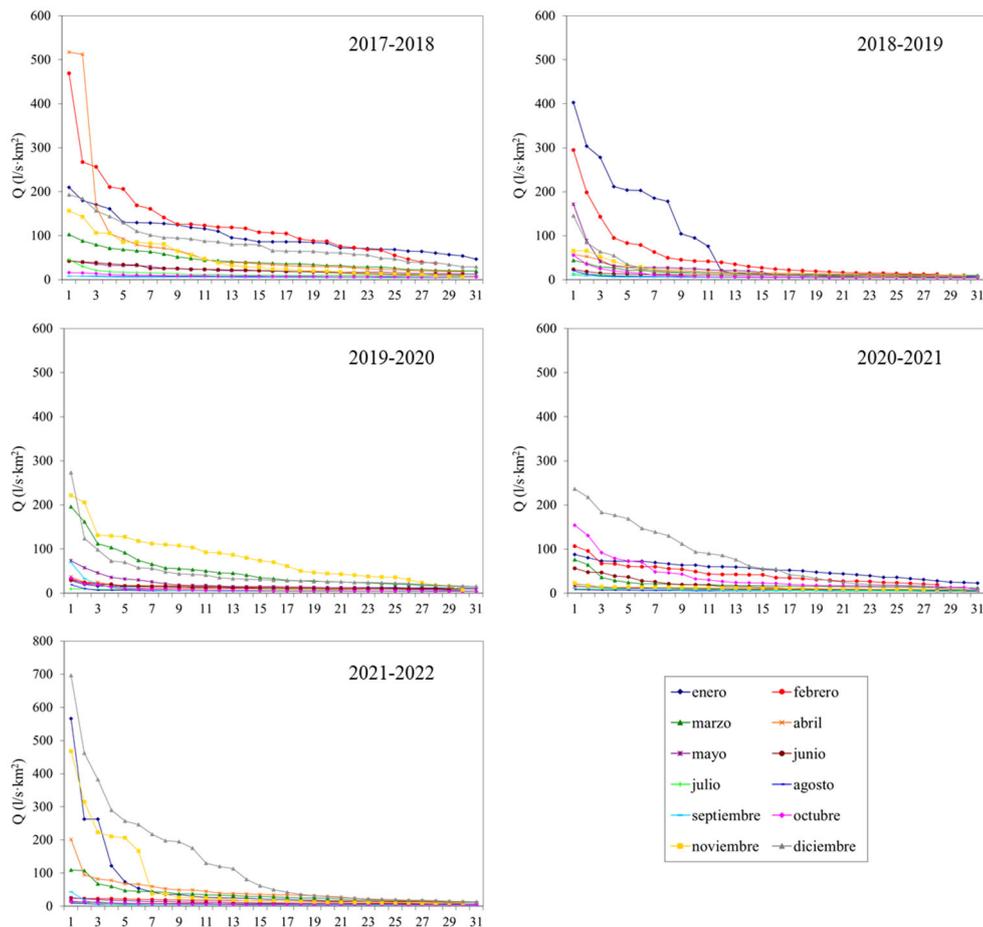


Figura 4.14: Distribución de los caudales diarios medios de cada mes (ordenados de mayor a menor) para la estación de aforos de Lasarte para cada año hidrológico entre 2017-2018 y 2021-2022.

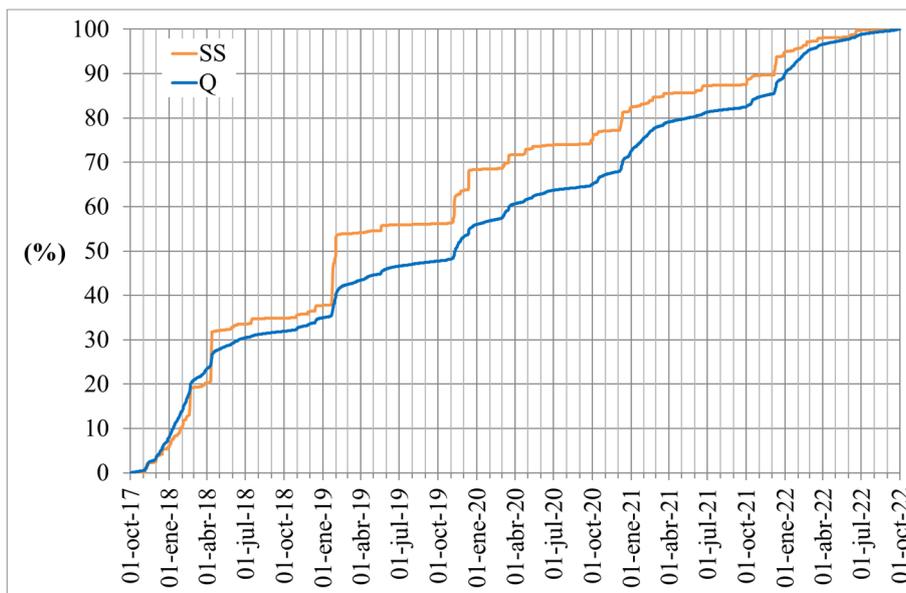


Figura 4.15: Porcentaje diario acumulado de escorrentía y exportación de sedimentos en suspensión para la estación de aforos de Lasarte entre octubre de 2017 y septiembre de 2022.

La figura 4.16 muestra la distribución de la precipitación, la escorrentía y la exportación de sedimentos en suspensión para la estación de aforos de Ereñozu. Los periodos más lluviosos, al igual que en el caso de Lasarte, se sitúan entre noviembre de 2017 y febrero de 2018, enero y noviembre de 2019, diciembre de 2020 y noviembre-diciembre de 2021. En la mayoría de casos estos meses coinciden con los de mayor escorrentía y exportación de sedimentos, sin embargo, en el 2017-2018 el mes con mayor escorrentía es el de diciembre, y el mes con mayor exportación de sedimentos, rozando el 40%, es el de abril. Esta mayor exportación en abril está directamente relacionada, como en casos anteriores, con los caudales medios diarios de este mes, ya que, se registran días con caudales superiores a los 400 l/s·km² (fig. 4.17).

Otro de los meses en los que se reporta una significativa exportación de sedimentos es febrero, con casi un 30% del total anual, y, para el que también se han registrado caudales medios diarios superiores a los 400 l/s·km². En ambos casos, febrero y abril de 2018, en el gráfico de acumulados (fig. 4.18) se observan pulsos significativos de exportación de sedimentos. Durante el 2018-2019, los meses con mayor exportación de sedimentos son enero y mayo, ambos con más de un 30% del sedimento anual exportado. En ambos casos se registraron caudales medios diarios superiores a los 300 l/s·km² y se observan pulsos de exportación significativos en el gráfico de acumulados. En febrero de 2019 también se registraron caudales medios diarios similares a los de enero y mayo, sin embargo, la exportación de sedimentos fue mucho menor, probablemente debido a la falta de sedimento accesible en el cauce, ya que, habría sido exportado durante las crecidas previas.

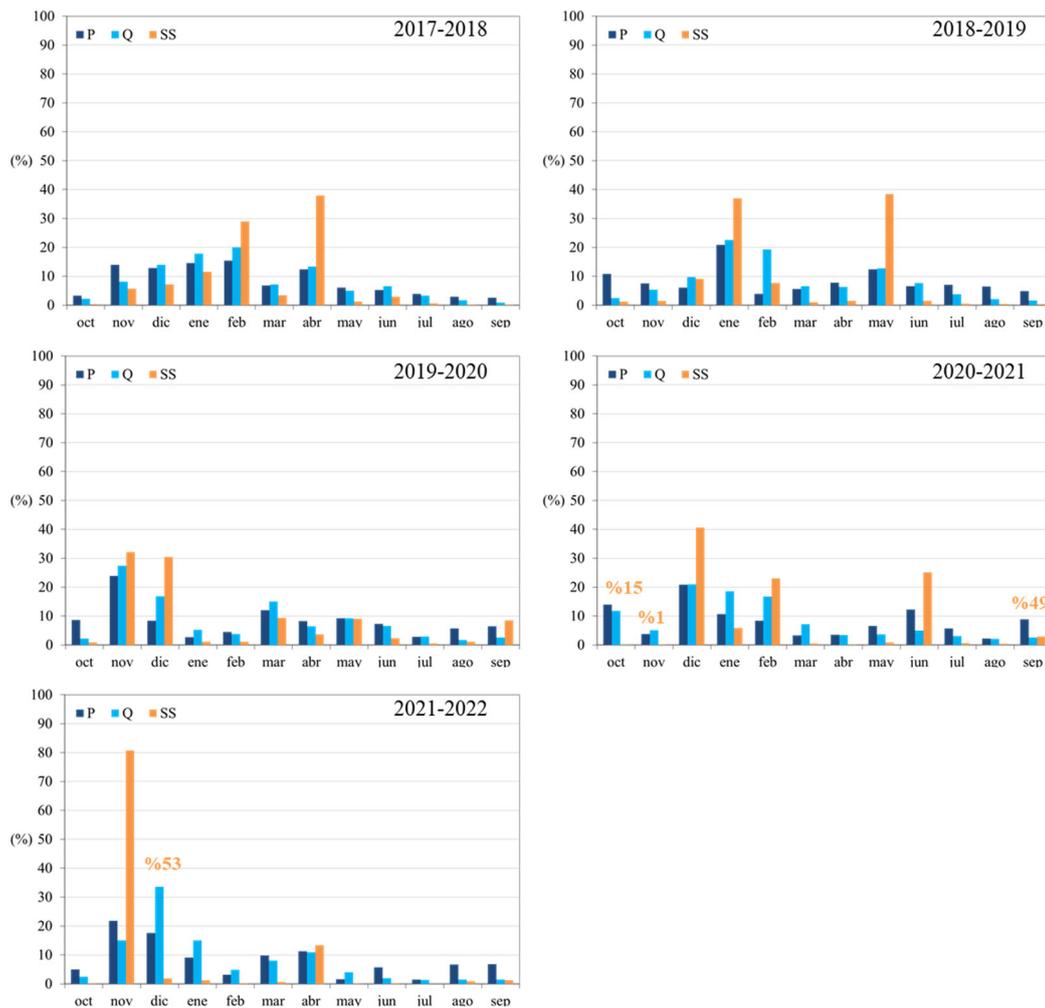


Figura 4.16: Distribución porcentual mensual de la precipitación (P), la escorrentía (Q) y la exportación de sedimentos en suspensión para la estación de aforos de Ereñozu para los años hidrológicos entre 2017-2018 y 2021-2022. Los porcentajes en color naranja indican el número de datos válidos utilizados para el cálculo de la exportación de sedimentos en suspensión mensual en el caso en el que el número de datos faltantes sea superior al 25%.

La distribución en Ereñozu de las precipitaciones, el caudal y los sedimentos en suspensión para el año 2019-2020 es muy parecida a la de las estaciones comentadas hasta el momento. Para el 2020-2021 y el 2021-2022 los gráficos no reflejan la distribución real de la exportación de sedimentos, ya que hay varios meses en los que se han perdido un número importante de datos (fig. 4.16). En el caso del 2020-2021, los datos faltantes no afectan a los meses con mayores caudales medios diarios, y la distribución general obtenida es similar a la de Lasarte. Sin embargo, para el 2021-2022 falta casi la mitad de los datos de diciembre, mes en el que se registran los mayores caudales medios diarios de todo el periodo analizado (superiores a los $800 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$), por lo que, tanto la distribución real de la exportación como su cómputo total anual podrían variar considerablemente.

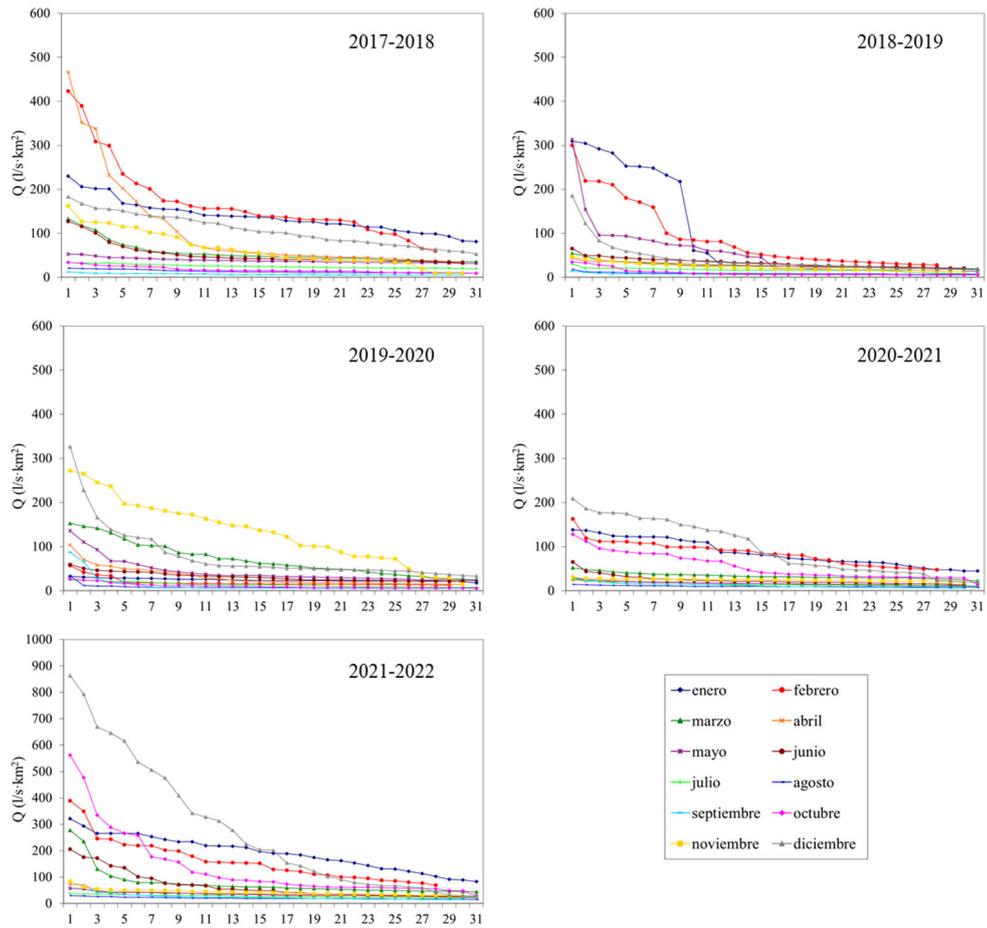


Figura 4.17: Distribución de los caudales diarios medios de cada mes (ordenados de mayor a menor) para la estación de aforos de Ereñozu para cada año hidrológico entre 2017-2018 y 2021-2022.

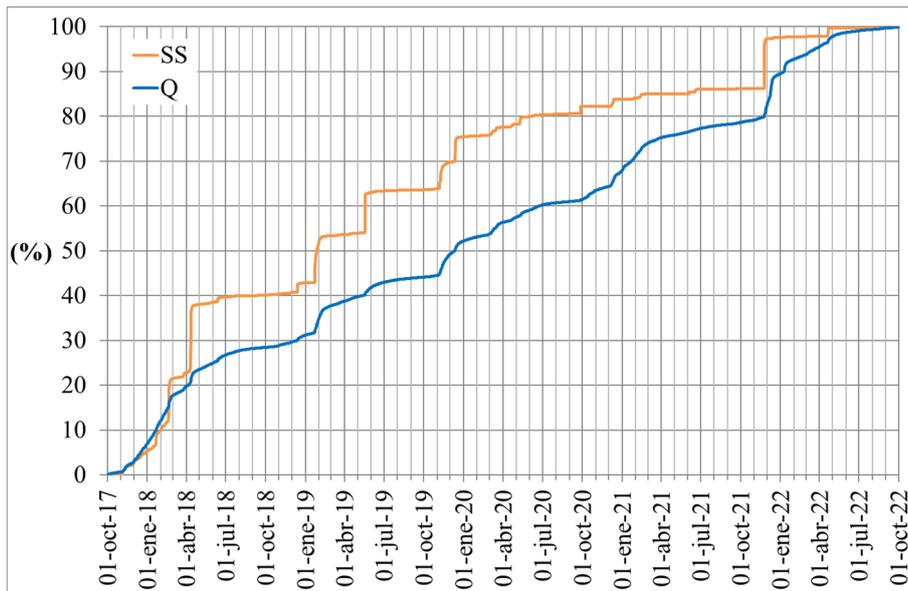


Figura 4.18: Porcentaje diario acumulado de escorrentía y exportación de sedimentos en suspensión para la estación de aforos de Ereñozu entre octubre de 2017 y septiembre de 2022.

La distribución de la precipitación, la escorrentía y la exportación de sedimentos en Oiartzun es similar a la comentada hasta el momento, sobre todo, para los años 2017-2018, 2019-2020 y 2021-2022 (fig. 4.19). Lo más destacado para la estación de aforos de Oiartzun es la mayor cantidad de días con caudales medios diarios altos y que estos caudales altos se registren durante varios meses cada año (fig. 4.20). Además, en el gráfico de acumulados no se observan pulsos tan significativos como en los anteriores casos, de modo que la exportación de sedimentos se da de forma más repartida y continuada en el tiempo (fig. 4.21) lo cual ya se venía observando para el año 2016-2017 (DFG, 2017).

En Oiartzun, teniendo en cuenta el periodo 2017-2022, el 50% de los sedimentos se han exportado en 82 días (el 4.5% del tiempo), el 75% de los sedimentos en 364 días (el 20% del tiempo) y el 90% de los sedimentos en 874 días (el 48% del tiempo, mientras que, en el caso de la escorrentía ha hecho falta el 14%, 34% y 61% del tiempo para generar el 50%, 75% y 90% de la misma.

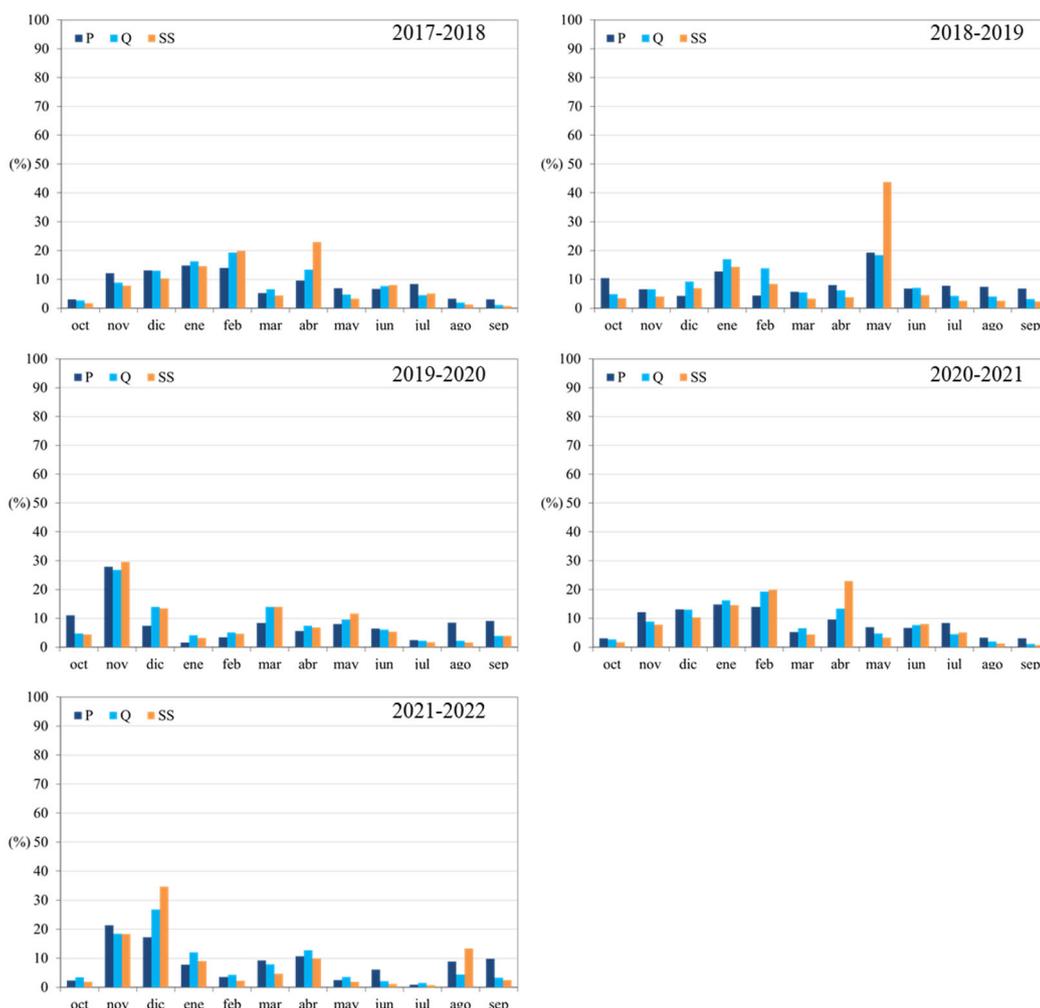


Figura 4.19: Distribución porcentual mensual de la precipitación (P), la escorrentía (Q) y la exportación de sedimentos en suspensión para la estación de aforos de Oiartzun para los años hidrológicos entre 2017-2018 y 2021-2022.

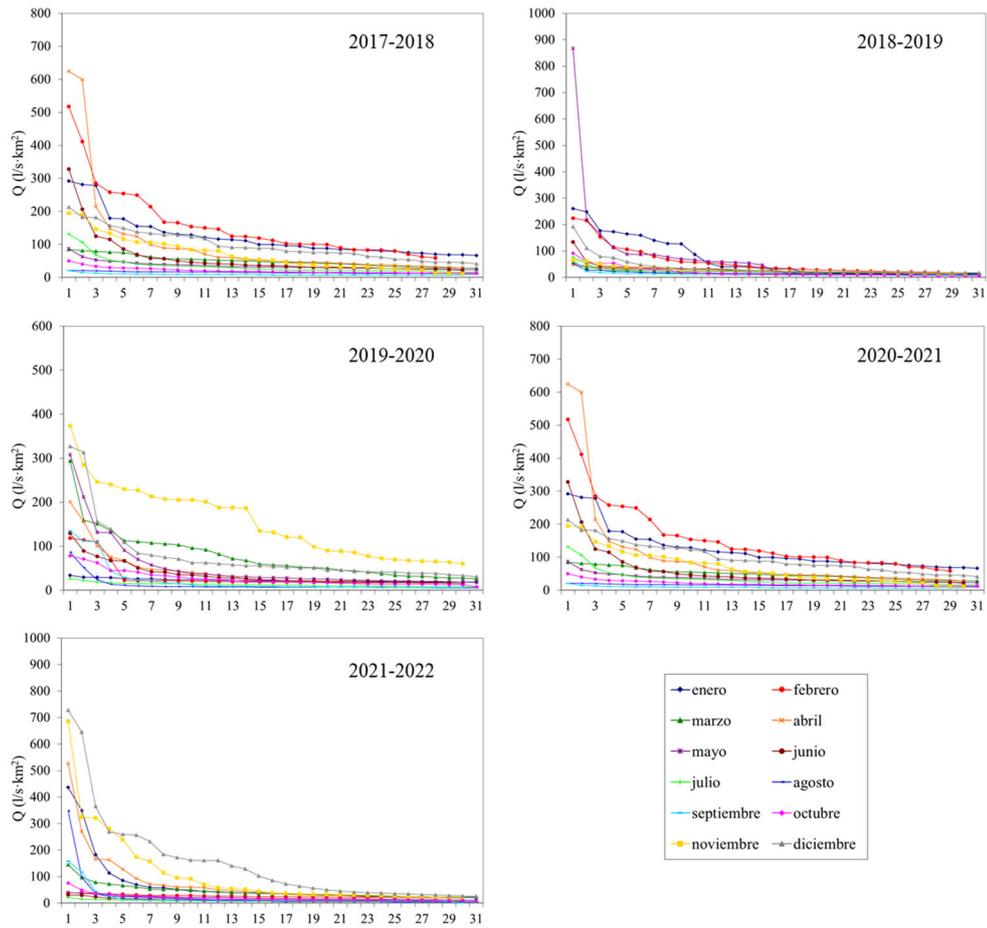


Figura 4.20: Distribución de los caudales diarios medios de cada mes (ordenados de mayor a menor) para la estación de aforos de Oiartzun para cada año hidrológico entre 2017-2018 y 2021-2022.

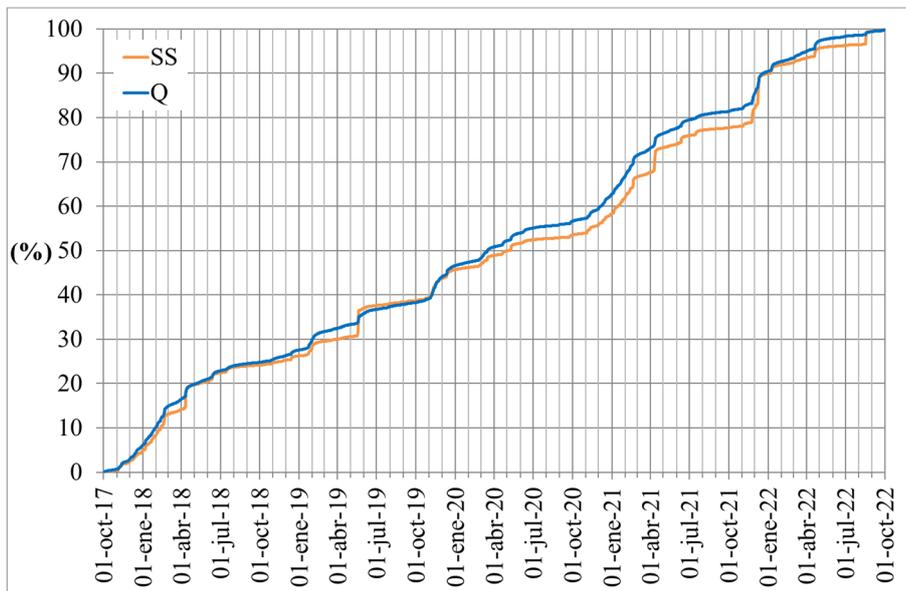


Figura 4.21: Porcentaje diario acumulado de escorrentía y exportación de sedimentos en suspensión para la estación de aforos de Oiartzun entre octubre de 2017 y septiembre de 2022.

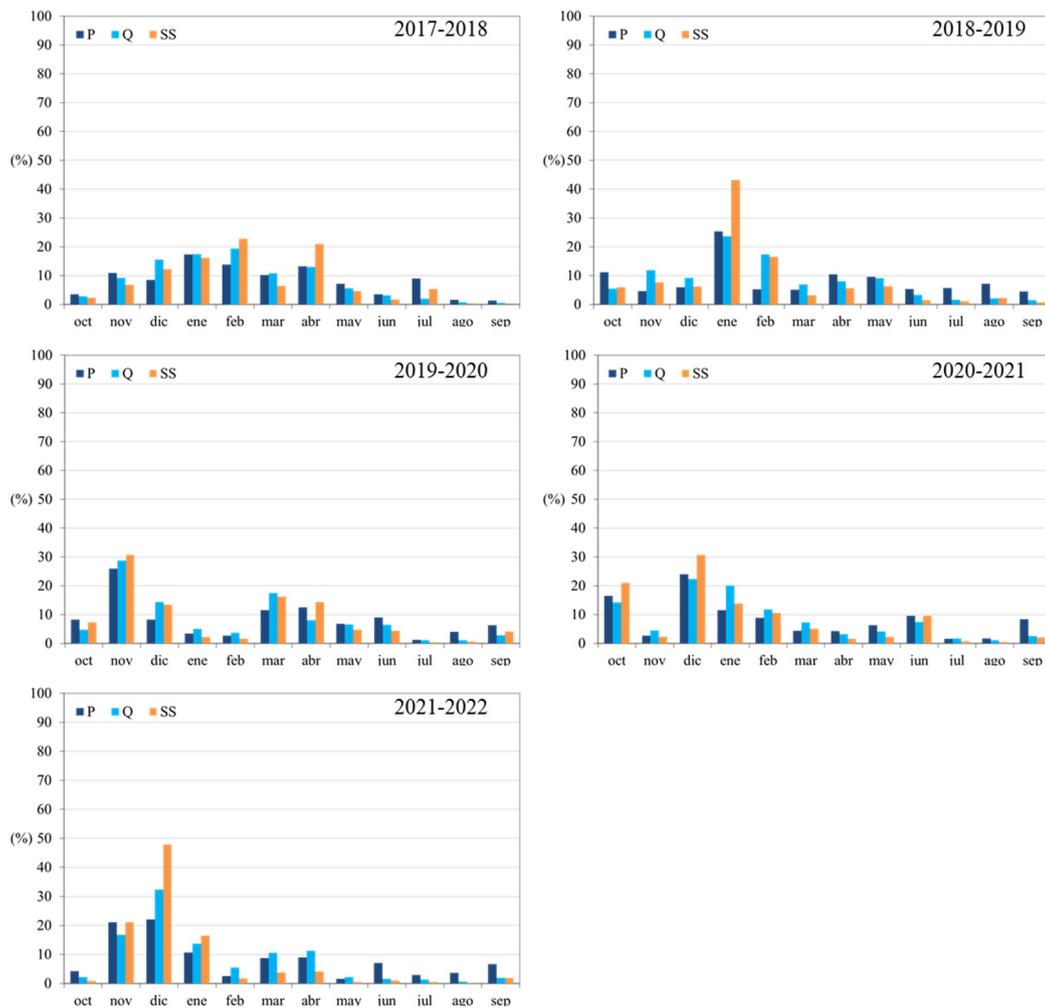


Figura 4.22: Distribución porcentual mensual de la precipitación (P), la escorrentía (Q) y la exportación de sedimentos en suspensión para la estación de aforos de Amundarain para los años hidrológicos entre 2017-2018 y 2021-2022.

La figura 4.22 muestra una distribución de la precipitación, la escorrentía y la exportación de sedimentos en suspensión similar a la de Lasarte para la estación de aforos de Amundarain. Los caudales medios diarios más altos se registran, como en el resto de estaciones, para diciembre de 2021 (fig. 4.23) con más de 700 l/s·km². Es en este mismo mes en el que se observa el pulso de exportación de sedimentos de mayor magnitud para el periodo analizado en el gráfico de acumulados (fig. 4.24). Así, en el caso de Amundarain, teniendo en cuenta el periodo 2017-2022, el 50% de los sedimentos se han exportado en el 3% del tiempo, el 75% de los sedimentos en el 11% del tiempo y el 90% de los sedimentos en el 27% del tiempo, mientras que, en el caso de la escorrentía ha hecho falta el 11%, 27% y 48% del tiempo para generar el 50%, 75% y 90% de la misma.

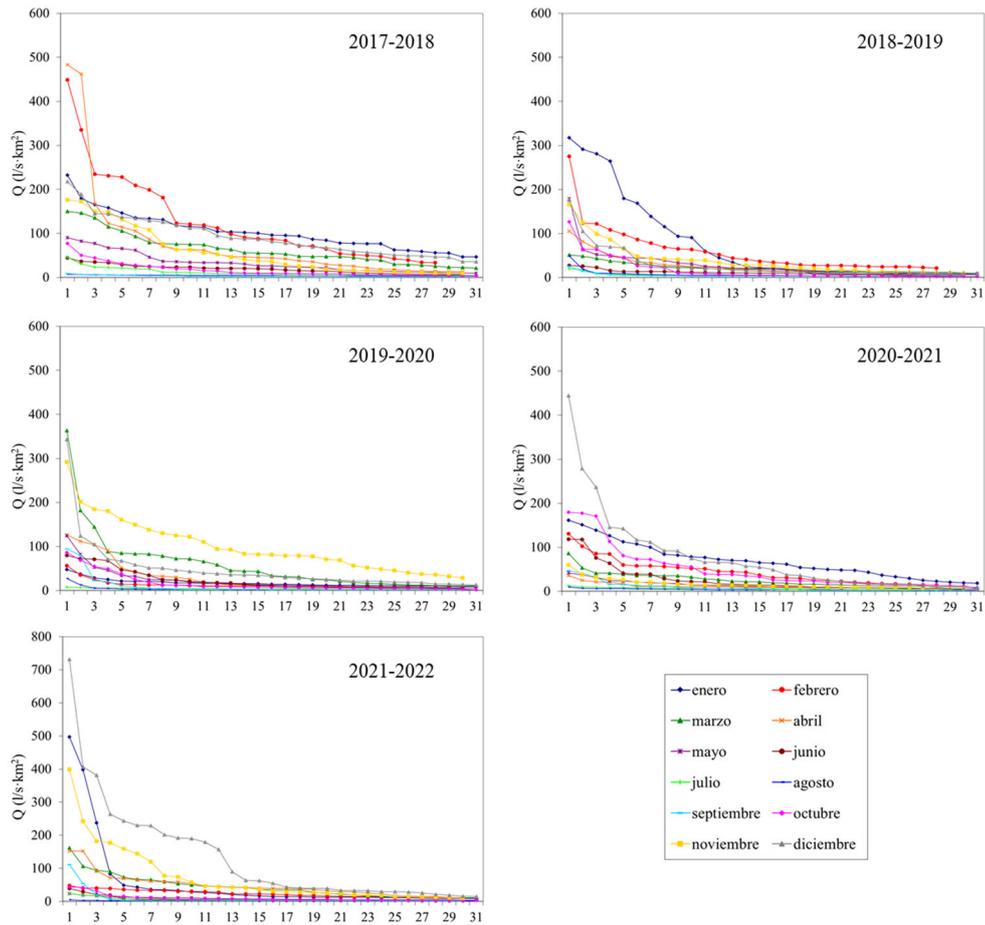


Figura 4.23: Distribución de los caudales diarios medios de cada mes (ordenados de mayor a menor) para la estación de aforos de Amundarain para cada año hidrológico entre 2017-2018 y 2021-2022.

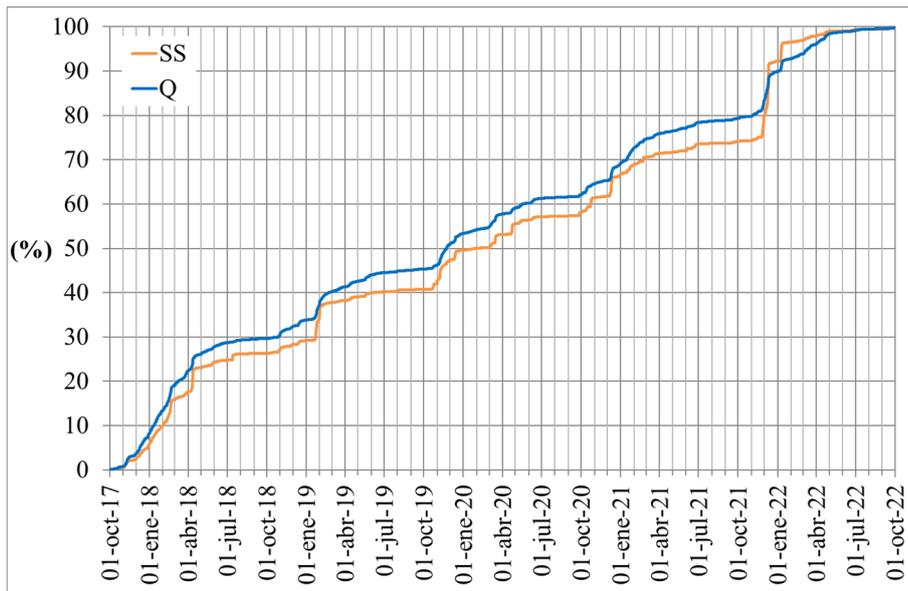


Figura 4.24: Porcentaje diario acumulado de escorrentía y exportación de sedimentos en suspensión para la estación de aforos de Amundarain entre octubre de 2017 y septiembre de 2022.

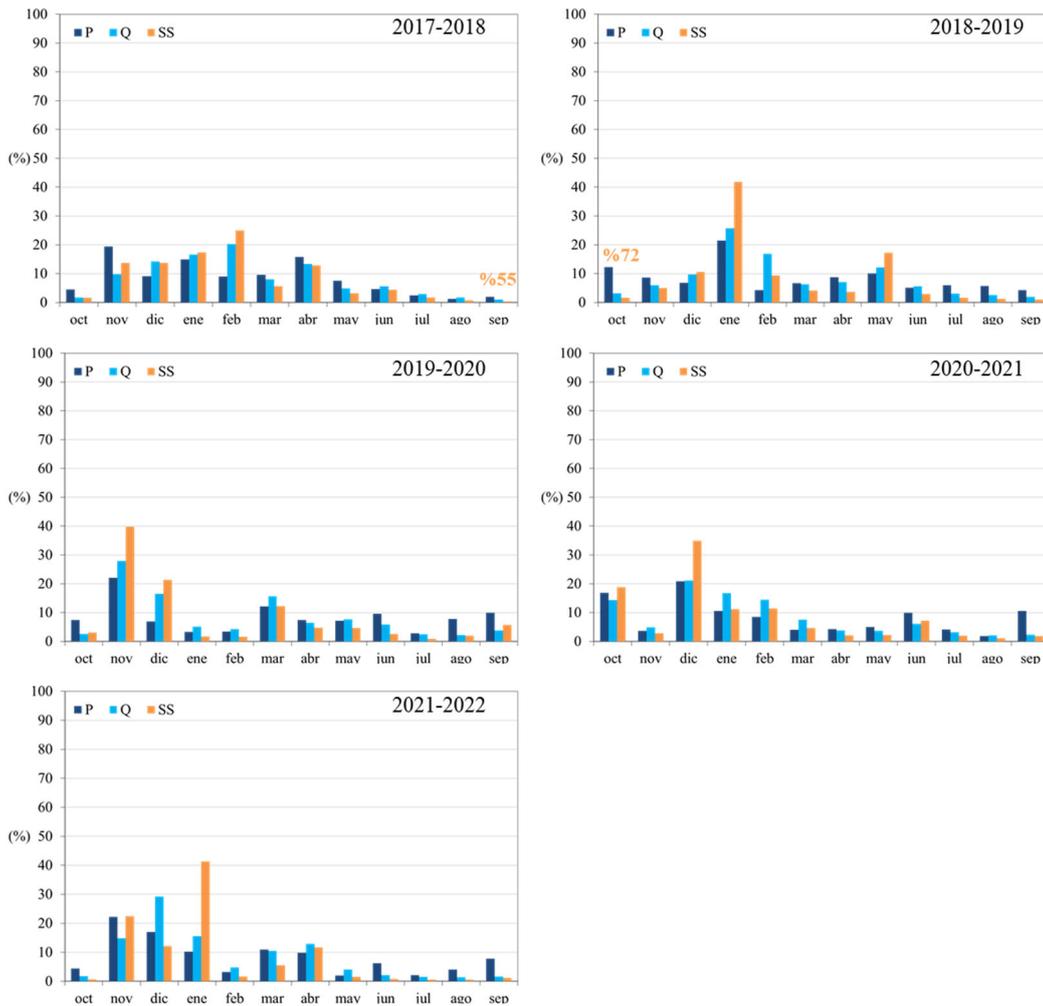


Figura 4.25: Distribución porcentual mensual de la precipitación (P), la escorrentía (Q) y la exportación de sedimentos en suspensión para la estación de aforos de Leitzarar para los años hidrológicos entre 2017-2018 y 2021-2022.

La distribución general de la precipitación, la escorrentía y la exportación de sedimentos en suspensión en el Leitzarar no difiere de manera significativa de la descrita hasta el momento (fig. 4.25). Se observa un año 2017-2018 con una distribución temporal más homogénea de los parámetros mencionados, sobre todo de la exportación de sedimentos, y los siguientes cuatro años con exportaciones que se concentran más en aquellos meses en los que se registran caudales diarios de mayor entidad (fig. 4.26). Los caudales medios diarios más altos se registran, en diciembre de 2021 y enero de 2022 siendo estos de alrededor de 900 l/s·km², siendo enero de 2022 el mes en el que se observa una mayor exportación para este año. El gráfico de acumulados (fig. 4.27) muestra para la exportación de sedimentos un primer tramo con una tendencia ascendente continuada que refleja una exportación de sedimentos repartida a lo largo del año 2017-2018 seguida de tramos con muy poca pendiente (poca exportación) que se ven alterados por aumentos puntuales (pulsos casi verticales) donde se da una exportación de sedimentos significativa. En el caso de Leitzarar, teniendo en cuenta el periodo 2017-2022, el 50% de los sedimentos se han exportado en el 3% del tiempo, el 75% de los sedimentos en el 12% del tiempo y el 90% de los sedimentos en el 36% del tiempo, mientras que, en el caso de la escorrentía ha hecho falta el 13%, 33% y 59% del tiempo para generar el 50%, 75% y 90% de la misma.

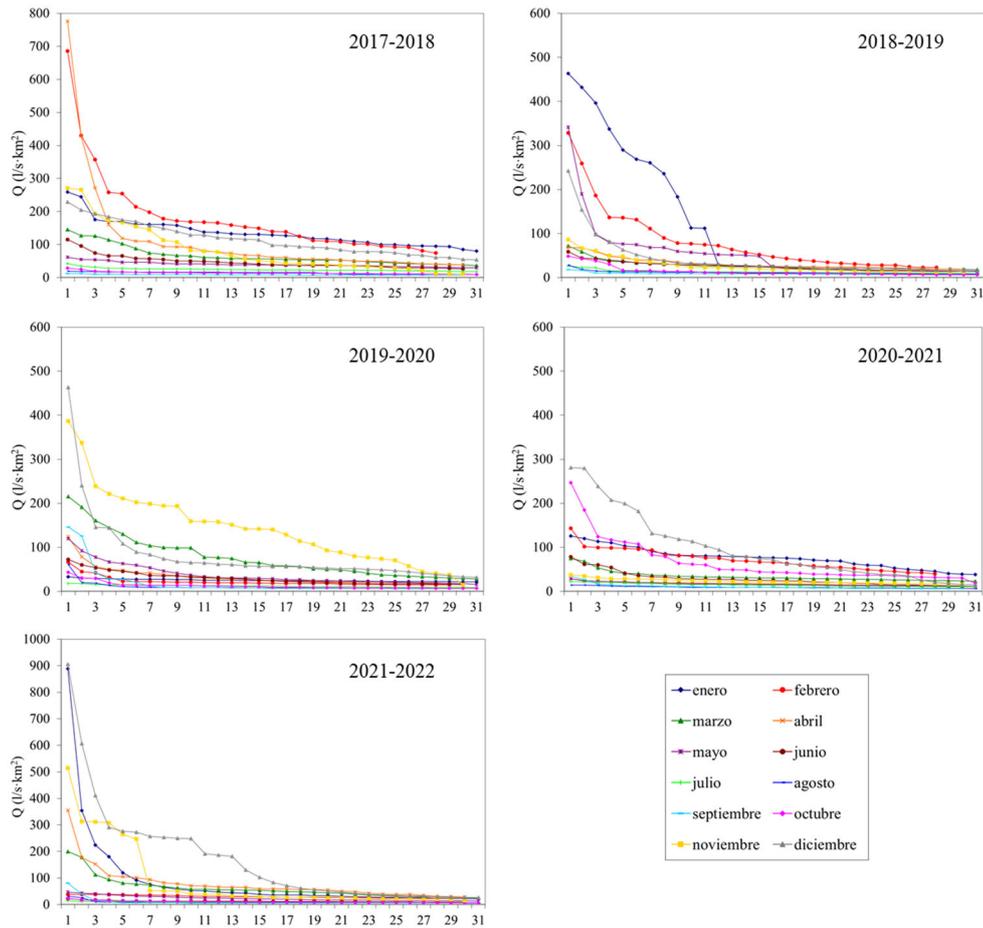


Figura 4.26: Distribución de los caudales diarios medios de cada mes (ordenados de mayor a menor) para la estación de aforos de Leitzarar para cada año hidrológico entre 2017-2018 y 2021-2022.

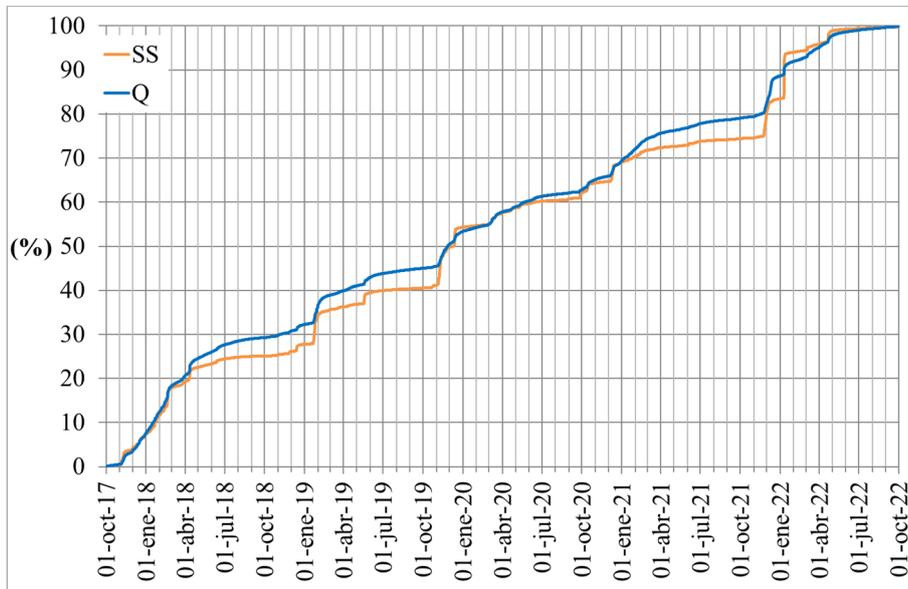


Figura 4.27: Porcentaje diario acumulado de escorrentía y exportación de sedimentos en suspensión para la estación de aforos de Leitzarar entre octubre de 2017 y septiembre de 2022.

En Añarbe (fig. 4.28) no se incluye en el análisis intra-anual el año 2017-2018, ya que no existen apenas datos para ese periodo. Para el resto de años, la distribución de la precipitación y de la escorrentía es

similar a la registrada en Ereñozu, cuenca a la que vierte sus aguas. Sin embargo, la distribución de la exportación de sedimentos en suspensión varía en cuanto a los meses en los que mayor cantidad de sedimento se exporta. En el 2018-2019 mayo es el mes en el que más sedimentos se exportan con más del 60% del sedimento exportado ese año y caudales medios diarios registrados de más de 600 l/s·km² (fig. 4.29). Durante el 2019-2020 la mayor parte del sedimento se exporta durante noviembre y diciembre, que suponen más del 65% del total entre los dos, y durante los que se han registrado caudales medios diarios de más de 300 y 400 l/s·km².

Para el 2020-2021 falta una cantidad de datos importante en septiembre, aunque, vistos los caudales medios diarios y las tendencias de otros años, no parece que esa falta de datos vaya a afectar mucho a la distribución mensual de la exportación de sedimentos o a la exportación total. Algo diferente es el caso del 2021-2022, año para el cual faltan datos durante los meses de octubre y noviembre. En noviembre de 2022 se registraron caudales medios diarios cercanos a los 1200 l/s·km², por lo que se puede pensar que la exportación de sedimentos calculada para ese mes es significativamente menor a la real. Esto influiría también en el gráfico de acumulados (fig. 4.30) en el que se observa un pulso de exportación de sedimentos muy significativo durante el mes de diciembre de 2021.

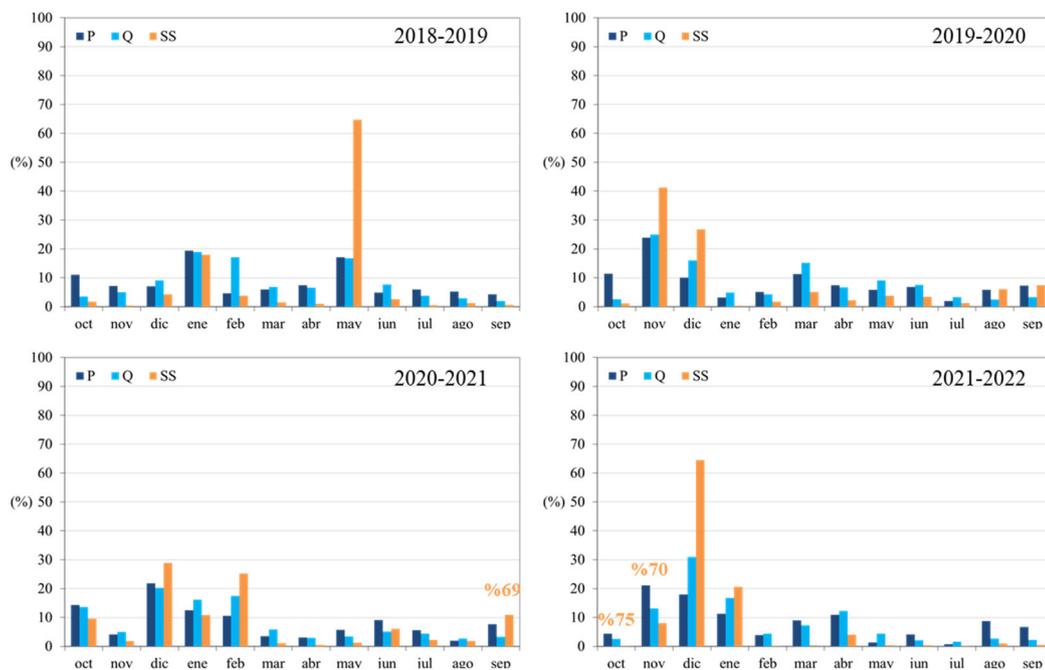


Figura 4.28: Distribución porcentual mensual de la precipitación (P), la escorrentía (Q) y la exportación de sedimentos en suspensión para la estación de aforos de Añarbe para los años hidrológicos entre 2018-2019 y 2021-2022.

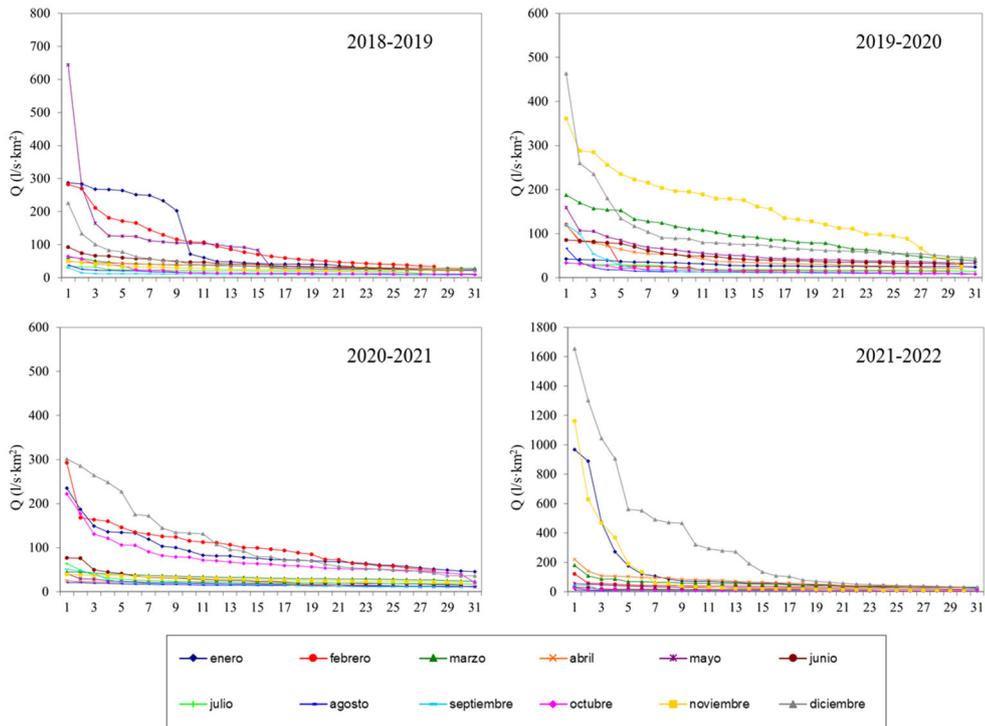


Figura 4.29: Distribución de los caudales diarios medios de cada mes (ordenados de mayor a menor) para la estación de aforos de Añarbe para cada año hidrológico entre 2018-2019 y 2021-2022.

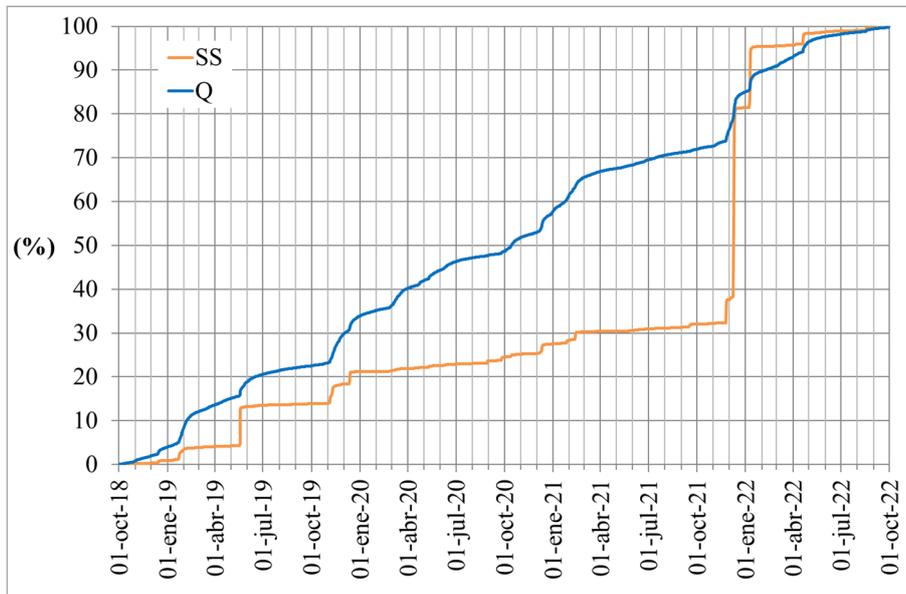


Figura 4.30: Porcentaje diario acumulado de escorrentía y exportación de sedimentos en suspensión para la estación de aforos de Añarbe entre octubre de 2018 y septiembre de 2022.



Figura 4.31: Distribución porcentual mensual de la precipitación (P), la escorrentía (Q) y la exportación de sedimentos en suspensión para la estación de aforos de San Prudentzio para los años hidrológicos entre 2017-2018 y 2021-2022.

En San Prudentzio (fig. 4.31), la distribución mensual de la precipitación, la escorrentía y la exportación de sedimentos en suspensión durante el periodo analizado es, en general, muy parecida al de Altzola y las diferencias más significativas se observan para el 2017-2018. En este caso, al igual que en Altzola los meses más lluviosos son los de otoño invierno, entre noviembre y febrero, los meses con mayor escorrentía son los diciembre, enero y febrero, y el mes con una mayor exportación de sedimentos, de en torno al 35% anual, es el mes de abril. Esta mayor exportación en abril está directamente relacionada con los caudales medios diarios de este mes, ya que, se registran días con caudales superiores a los 400 l/s·km² (fig. 4.32).

En la figura 4.33 se observa que el pulso más significativo en cuanto a la exportación de sedimentos en suspensión es el de enero de 2019, periodo en el que se superaron los 450 l/s·km² de caudales diarios medios. No hay que obviar, sin embargo, que entre diciembre de 2021 y marzo de 2022 falta un porcentaje de datos importante y que durante ese periodo se superan en varias ocasiones los 400 l/s·km² e incluso los 700 l/s·km² en el caso del mes de diciembre lo cual influye de manera significativa tanto en los gráficos presentados como en las cantidades totales de sedimentos exportado calculadas.

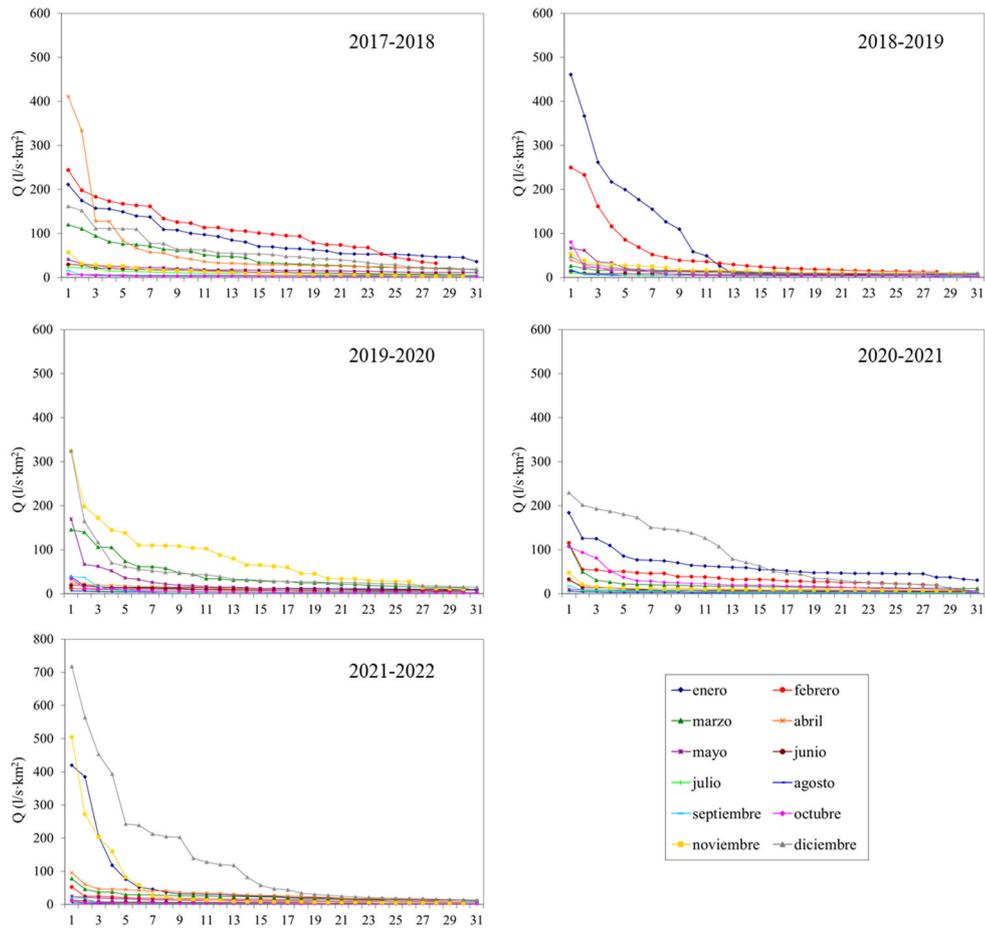


Figura 4.32: Distribución de los caudales diarios medios de cada mes (ordenados de mayor a menor) para la estación de aforos de San Prudentzio para cada año hidrológico entre 2017-2018 y 2021-2022.

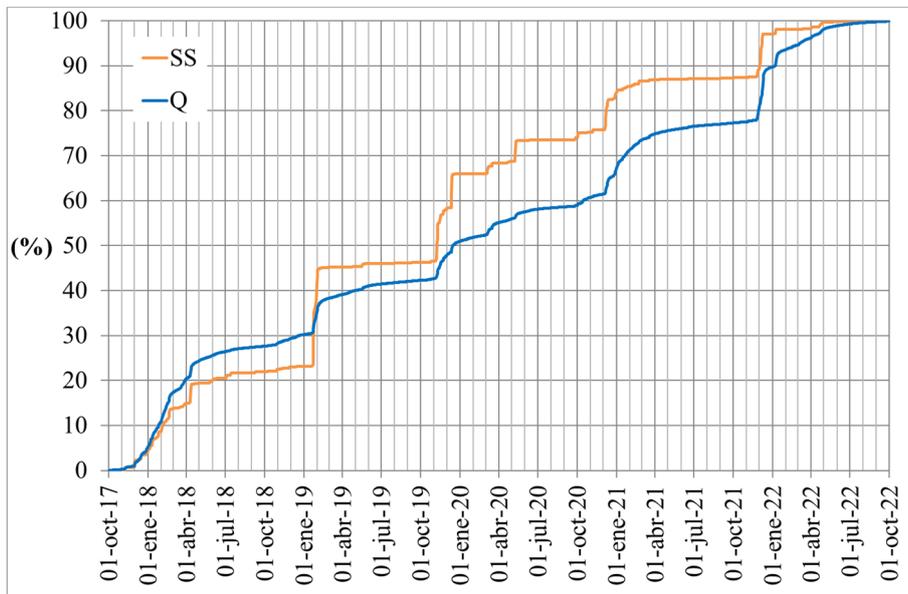


Figura 4.33: Porcentaje diario acumulado de escorrentía y exportación de sedimentos en suspensión para la estación de aforos de San Prudentzio entre octubre de 2017 y septiembre de 2022.

5. Conclusiones

Teniendo en cuenta las grandes cuencas del territorio y la masa específica (t/km^2) de sedimento exportado durante el periodo analizado, se pueden agrupar las cuencas en tres grupos, de mayor a menor exportación de sedimentos en suspensión (tabla 4.1): la cuenca del Oiartzun, con $129 t/km^2$, las de Oria, Urola y Deba, con $84, 75$ y $67 t/km^2$, respectivamente, y la del Urumea con $24 t/km^2$ exportados. En cuanto a las cuencas de menor tamaño, las que han exportado una mayor cantidad de sedimentos en suspensión han sido las del Leizaran y Alto Deba, con 73 y $71 t/km^2$, respectivamente, seguidas de Añarbe (sin datos para el 2017-2018) y Amundarain con 50 y $45 t/km^2$, respectivamente.

Teniendo en cuenta esos datos durante el periodo 2017-2022, se exportaron anualmente 130717 ± 3297 toneladas de sedimentos en suspensión desde las cinco cuencas principales de Gipuzkoa (Deba, Urola, Oria, Urumea y Oiartzun). Más de un 50 % de estos sedimentos se exportaron desde la cuenca del Oria y un 24 % desde la del Deba; por lo tanto, alrededor del 75 % de estos sedimentos se exportaron desde las cuencas del Deba y el Oria, a través de las estaciones de aforos de Altzola y Lasarte. Para el conjunto del Territorio Histórico la masa específica exportada resultante es de $72 t/km^2 \cdot \text{año}$.

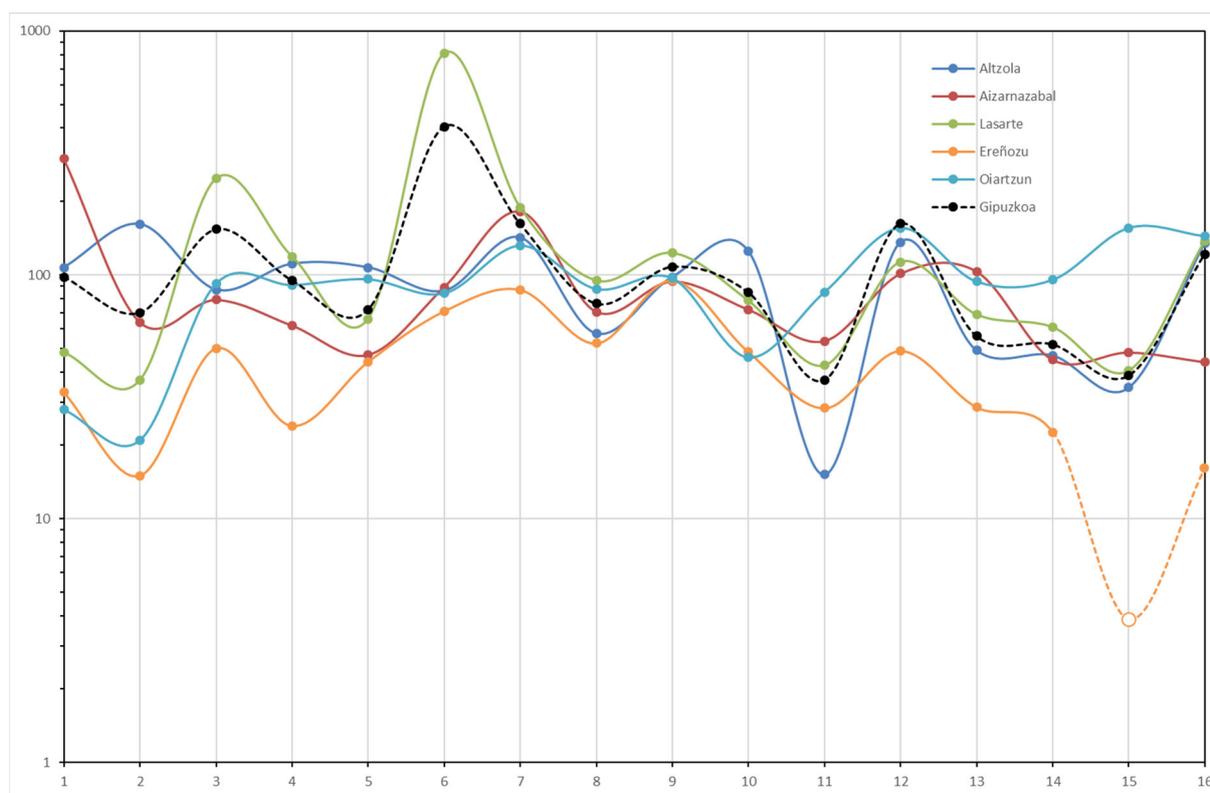


Figura 5.1: Evolución de las exportaciones de sedimentos en suspensión anuales (en t/km^2) registradas en las estaciones de aforo de Altzola, Aizarnazabal, Lasarte, Ereñozu y Oiartzun entre 2006 y 2022. En negro las exportaciones estimadas para el Territorio Histórico de Gipuzkoa.

Los años en los que se ha exportado una mayor cantidad de sedimentos han sido el 2017-2018 y el 2021-2022, con 94 y $122 t/km^2$, respectivamente. La exportación durante el 2021-2022 ha sido especialmente mucho más homogénea y en la mayoría de cuencas la exportación específica se sitúa entre las $134 t/km^2$ del Urola y las $144 t/km^2$ del Oiartzun. En las cuencas de cabecera el patrón temporal se repite hasta cierto punto. Así, los años 2017-2018 y 2021-2022 son los años en los que se ha exportado una mayor cantidad de sedimento en Amundarain, Leizaran y Añarbe (en este caso solo el 2021-2022 ya que no

existen datos para el 2017-2018), sin embargo, en el caso de San Prudentzio son los tres primeros años del periodo analizados los que registran mayores exportaciones.

Si se comparan los datos de exportación de sedimentos en suspensión obtenidos para las grandes cuencas de Gipuzkoa para los cinco años analizados en este documento con los obtenidos para los años anteriores, se observa que en Oiartzun, la exportación de sedimentos en suspensión entre 2017-2018 y 2021-2022 es, en general, superior a la media, y se observa, para estos cinco años un aumento de la exportación que no viene de la mano de un aumento en la precipitación y en la escorrentía. Esta tendencia al aumento de la exportación de sedimentos en Oiartzun ya se apuntaba para el año 2016-2017 (DFG, 2017), y se relaciona, en parte, a un mayor número de días con caudales medios diarios altos y también, a una mayor disponibilidad de sedimentos.

La distribución porcentual general de la precipitación y la escorrentía a lo largo del año es parecida en todas las cuencas, con excepciones puntuales en el caso de Añarbe y algo más generales en el caso de Oiartzun donde la exportación se da de una forma mucho más gradual (cuestión que ya se venía viendo en el informe anterior (DFG, 2017)). En cualquier caso, y de forma general, a partir de los datos observados, y teniendo en cuenta los datos de años anteriores, queda clara la relación existente entre los caudales máximos diarios y la exportación de sedimentos por un lado, y el agotamiento de sedimentos tras periodos de importante exportación, con lo que adquiere una gran importancia el momento en el que ocurre la crecida. Ambos conjuntamente apuntan a que la fuente principal del sedimento que se exporta es el sedimento que proviniendo del resto de la cuenca se acumula en el propio cauce y que en ciertos momentos, momentos de agotamiento, se pierde la conectividad entre la cuenca y el cauce en lo que a sedimentos se refiere.

En Oiartzun la distribución de la exportación de sedimentos es más homogénea a lo largo del tiempo, no se observan pulsos tan significativos como en el resto de estaciones de aforo, de modo que la exportación de sedimentos se da de forma más repartida y continuada en el tiempo lo cual ya se venía observando para el año 2016-2017 (DFG, 2017). Así, comparando los datos de Oiartzun con los de otras estaciones de aforo se observa que es necesario más tiempo para exportar una proporción similar de sedimentos. De hecho, el 90% de los sedimentos de Oiartzun se han exportado en el 48% del tiempo, mientras que en el resto de cuencas principales se ha exportado en menos del 20% del tiempo. Se concluye, por tanto, que en la cuenca de Oiartzun existe una mayor accesibilidad a los sedimentos, cuya fuente parece no agotarse a pesar de ser la cuenca en la que se registra el mayor número de días con caudales medios altos.

En el resto de cuencas, se observa claramente un agotamiento de los sedimentos tras momentos de exportación significativos que vienen sucedidos del acercamiento y acumulación de sedimentos hacia el cauce. Se trata, por tanto, de cuencas en las que el transporte de sedimentos está limitado por la accesibilidad a los mismos.

Finalmente, de cara a futuro, se observa la necesidad de obtener datos físicos de concentración de sedimentos en suspensión que permitan completar las curvas de calibración para las concentraciones más altas, de forma que sea posible obtener datos de exportación más certeros en momentos en los que la exportación de sedimentos es más significativa.

Bibliografía

- Brasington, J., Richards, K., 2000. Turbidity and suspended sediment dynamics in small catchments in the Nepal Middle Hills. *Hydrological Processes* 14, 2559-2574.
- Diputación Foral de Gipuzkoa, 2008. Cuantificación de la tasa de sedimentos exportados de las cuencas del Territorio Histórico de Gipuzkoa. Fase I. (Año hidrológico 2006-2007). Informe inédito realizado por el Grupo de Hidrogeología de la UPV/EHU.
- Diputación Foral de Gipuzkoa, 2009. Cuantificación de la tasa de sedimentos exportados de las cuencas del Territorio Histórico de Gipuzkoa. Fase II. (Año hidrológico 2007-2008). Informe inédito realizado por el Grupo de Hidrogeología de la UPV/EHU.
- Diputación Foral de Gipuzkoa, 2010. Cuantificación de la tasa de sedimentos exportados de las cuencas del Territorio Histórico de Gipuzkoa. Fase III. Proyecto Lorea (Año hidrológico 2008-2009). Informe inédito realizado por el Grupo de Hidrogeología de la UPV/EHU.
- Diputación Foral de Gipuzkoa, 2014. Cuantificación de la tasa de sedimentos exportados de las cuencas del Territorio Histórico de Gipuzkoa (Fase VIII). Caracterización de los contaminantes del sedimento de la cuenca del Urumea. (Año hidrológico 2013-2014). Informe inédito realizado por el Grupo de Hidrogeología de la UPV/EHU.
- DFG (Diputación Foral de Gipuzkoa), 2017. Seguimiento del transporte de sedimentos en la cuenca del río Leizaran debido a los trabajos del Life Irekibai. (Año hidrológico 2016-2017). Informe inédito realizado por el Grupo de Procesos Hidro-Ambientales de la UPV/EHU.
- Eilers, P.H.C., Marx, B.D., 1996. Flexible smoothing with B-splines and penalties. *Statistical Science* 1, 89-121.
- Foster, I.D.L., Millington, R., Grew, R.G., 1992. The impact of particle size controls on stream turbidity measurements; some implications for suspended sediment yield estimations. *International Association of Hydrological Sciences* 210, 51-62.
- Gippel, C.J., 1989. The use of turbidimeters in suspended sediment research. *Hydrobiologia* 176/177, 465-480.
- Gippel, C.J., 1995. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams. *Hydrological Processes* 9, 83-97.
- Hastie, T., Tibshirani, R., 1990. *Generalized Additive Models*. Chapman & Hall: London.
- HAZI (Fundación del Gobierno Vasco para el desarrollo del medio rural y marino), 2015. Cuantificación de la tasa de sedimentos exportados de la cuenca del río Leizaran antes, durante y después de la demolición de la presa de Inturia. Informe inédito realizado por el Grupo de Investigación Consolidado Hidrología-Geotecnia-Medio Ambiente de la UPV/EHU (IT598/13, Gobierno Vasco).
- Lewis, J., 1996. Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation. *Water Resources Research* 32(7): 2299-2310.
- Rice, J.A., Wu, C.O., 2001. Nonparametric mixed effects models for unequally sample noisy curves. *Biometrics* 57, 253-259.

Wood, S.N., 2006. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. Chapman & Hall/CRC: Boca Raton, FL.

Zabaleta, A., Martínez, M., Uriarte, J.A., Antigüedad, I., 2006. Determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment (Basque Country). *5th World FRIEND Conference. Climate Change and Hydrological Impacts. Conference Proceedings CD*.