

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DINÁMICA FLUVIAL Y ESTADO HIDROGEOMORFOLÓGICO DEL CURSO BAJO DEL RÍO GÁLLEGO (TÉRMINO MUNICIPAL DE ZUERA): DIAGNÓSTICO PARA SU RESTAURACIÓN

Autora: Valeria Noemí Pirchi

***Directores: Alfredo Ollero Ojeda
Daniel Ballarín Ferrer***

Máster Universitario en

Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del territorio: sistemas de información geográfica y teledetección

NOVIEMBRE DE 2023



**Universidad
Zaragoza**

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Resumen

El curso bajo del río Gállego destaca por su dinámica en constante cambio y su movilidad. Esto ha dado lugar a la formación de ambientes y ecosistemas únicos en Europa a pesar de los impactos sufridos en toda su cuenca. Este trabajo se centra en un tramo fluvial de 17 kilómetros en el municipio de Zuera, provincia de Zaragoza, donde coexisten intereses socioeconómicos y de conservación ambiental, evidenciando la estrecha relación entre el río y la comunidad local. El objetivo principal de este estudio es analizar la dinámica fluvial y estado hidrogeomorfológico de este tramo (período 1927-2023), diagnosticando su situación actual y proponiendo medidas para su restauración. La metodología empleada incluye el uso de Sistemas de Información Geográfica (S.I.G), fotointerpretación e índices de calidad hidrogeomorfológica para evaluar la funcionalidad del sistema fluvial, la morfología del cauce y las condiciones de las riberas. Se han identificado tres periodos fluviales en tres tramos del río con funcionalidades similares y se ha analizado la presencia de barras de sedimentos como indicador de las condiciones hidrogeomorfológicas. Los resultados revelan una notable transformación del río, pasando de un patrón de cauce trenzado y muy sano con barras aluviales en estado de formación en 1927 a uno divagante y meandriforme en 2023, caracterizado por un estado deficiente con incisión, estrechamiento por colonización vegetal, usos del suelo y la presencia escasa de barras de gravas. Se destaca la influencia de elementos antrópicos como perturbadores de la continuidad y dinámica natural del río. Este estudio proporciona una base de fundamento sólido para respaldar decisiones en la ordenación territorial y la restauración fluvial de un recurso hídrico vital para la comunidad local y el ecosistema fluvial.

Palabras Clave: *calidad hidrogeomorfológica, Sistemas de Información Geográfica (S.I.G), restauración fluvial, ordenación territorial.*

Abstract

The lower course of the Gállego River stands out for its constantly changing dynamics. This gave rise to the formation of unique environments and ecosystems in Europe despite the impacts suffered. This work focuses on a river section of 18.5 kilometers in the Zuera municipality (province Zaragoza), where socioeconomic and environmental conservation interests coexist, evidencing the close relationship between the river and the local community. The main objective of this study is to analyze the fluvial dynamics and hydrogeomorphological state of this section (1927-2023), diagnosing its current situation and proposing measures for its restoration. The methodology includes the use of Geographic Information Systems (GIS), photointerpretation and hydrogeomorphological quality indices to evaluate the functionality of the river system, the morphology of the channel and the conditions of the banks. Three fluvial moments have been identified in three sections of the river with similar functionalities and the presence of sediment bars was analyzed as an indicator of hydrogeomorphological conditions. The results reveal a notable transformation of the river, from a braided and very healthy channel pattern with alluvial bars in a state of formation in 1927 to a rambling and meandering one in 2023, characterized by a poor state with incision, narrowing due to plant colonization, land use and the scarce presence of gravel bars. The influence of anthropic elements is highlighted as disturbing the continuity and natural dynamics of the river. This study can support decisions in land use planning and the river restoration of a vital water resource for the local community and the river ecosystem.

Key Words: *Hydrogeomorphological quality, Geographic Information Systems (G.I.S), river restoration, Territorial planning.*

Dedicatoria especial

Con profundo respeto dedico este Trabajo Fin de Máster a la memoria del destacado geógrafo Luis Zubieta Lacámara, quien fuera presidente de la Fundación Odón de Buen y alcalde de la Villa de Zuera, a quién agradezco su amabilidad y generoso respaldo en este estudio. Su apoyo financiero a través de la Fundación Odón de Buen ha sido satisfactorio para la realización de este trabajo y ha contribuido al avance en el campo de la geomorfología fluvial para el grupo de investigación “*Clima, Agua, Cambio global y Sistemas naturales*”, no solo enriqueciendo nuestro conocimiento, sino que también ha ampliado las perspectivas de exploración en el área temática que se ha abordado.

Expreso también mi agradecimiento a la Universidad de Zaragoza y al Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio por brindarme la oportunidad de colaborar con la Fundación Odón de Buen y de participar como alumna extranjera en el programa de ayuda económica a la investigación. Quiero destacar la importancia de la cooperación entre el ámbito académico y el sector privado en la promoción de la investigación y el avance científico.

Mi especial reconocimiento a los docentes Marcos Rodrigues Mimbreno, Fernando Pérez Cabello y Jorge Lloret Gazo por su valioso tiempo y apoyo en la resolución de problemas técnicos. Asimismo, agradezco a las personas que contribuyeron a este trabajo a través de entrevistas y a José Ángel Losada por su colaboración en la adquisición de datos históricos georreferenciados.

Mi gratitud a los geógrafos Alfredo Ollero y Daniel Ballarín por su orientación y apoyo en el proceso de investigación. Sus valiosas enseñanzas y experiencias destacadas en el campo de los ríos han dejado una profunda huella en mí, inspirándome a seguir explorando este fascinante ámbito fluvial.

Índice

1. Introducción	pág. 1
1.1. Justificación, contexto general y antecedentes	pág. 1
1.2. Marco de trabajo	pág. 2
1.3. Objetivos	pág. 3
2. Área de estudio	pág. 3
2.1. El curso bajo del Gállego: tramo Ontinar de Salz-Zuera-S.M. de Gállego	pág. 3
3. Metodología	pág. 5
3.1. Recopilación de datos	pág. 6
3.1.1. Obtención de datos históricos	pág. 6
3.1.2. Obtención de datos topográficos	pág. 7
3.1.3. Obtención de datos hidrológicos	pág. 9
3.1.4. Obtención de datos en terreno	pág. 10
3.2. Sistemas de Información Geográfica (S.I.G)	pág. 11
3.2.1. Modelo de datos vectorial	pág. 11
3.2.2. Creación y edición de elementos geográficos	pág. 12
3.2.3. Análisis espacial multitemporal	pág. 14
3.3. Tramificación hidrogeomorfológica	pág. 15
3.4. Indicadores de calidad hidrogeomorfológica	pág. 16
3.4.1. Índice IHG	pág. 16
3.4.2. Índice IDBF	pág. 18
3.4.3. Índice IS	pág. 19
4. Resultados y discusiones	pág. 20
4.1. Evolución del estado del cauce y el corredor ribereño	pág. 20
4.2. Evolución de las coberturas del espacio fluvial	pág. 21
4.2.1. Análisis de superficies estables y dinámicas	pág. 25
4.3. Diagnóstico de la situación hidrogeomorfológica	pág. 28
4.3.1. Comportamiento hidrológico	pág. 28
4.3.2. Sinuosidad del cauce	pág. 32
4.3.3. Densidad de barras fluviales	pág. 37
4.4. Evolución de la calidad hidrogeomorfológica	pág. 49
4.4.1. Pirámide de calidad tramo 1 en Ontinar	pág. 49
4.4.2. Pirámide de calidad tramo 2 en Zuera	pág. 51
4.4.3. Pirámide de calidad tramo 3 en San Mateo	pág. 52
4.5. Estado actual del tramo en el curso bajo del Gállego	pág. 54
4.6. Propuestas de aplicaciones prácticas	pág. 58
4.6.1. De restauración fluvial	pág. 58
4.6.2. De educación ambiental	pág. 65
4.6.3. De monitoreo fluvial	pág. 67
5. Conclusiones	pág. 69
6. Bibliografía	pág. 71
7. Anexos	pág. I-1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación, contexto general y antecedentes

Los ríos son sistemas naturales de gran complejidad y dinamismo, lo que dificulta su comprensión debido a su respuesta impredecible ante diversos factores y procesos que operan a escala local y de cuenca (Benito y Hudson, 2010). Estos sistemas fluviales están influenciados por los efectos del cambio global, que engloba fenómenos como el cambio climático y la urbanización acelerada, desencadenando alteraciones en la dinámica hidrológica y geomorfológica de las cuencas (Ollero et al., 2021). Ante esta problemática, la geomorfología fluvial contribuye cada vez más a la valoración, ordenación y mejora de los sistemas fluviales. Esta disciplina evoluciona en sintonía con los avances de los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G) y la teledetección, lo que amplía la comprensión de estos procesos y factores involucrados (Leopold et al., 2020).

En ríos de cauces dinámicos, como el curso bajo del Gállego, los procesos geomorfológicos cambian constantemente, mostrando una enérgica erosión, transporte y sedimentación. La singularidad de esta dinámica es notable al compararla con ríos vecinos, como el Aragón al oeste y el Cinca al este, resaltando así la complicada naturaleza del Gállego (Ollero y Martín Vide, coords., 2005). Además, este río pirenaico se destaca como uno de los afluentes más representativos en la región central de la cuenca del Ebro, abarcando una superficie de cuenca de 4020 km². No obstante, su característica más distintiva radica en sus 200 km de longitud, lo que le confiere una forma alargada y estrecha, y por esto los afluentes del Gállego tienen corto recorrido y no son muy dinámicos (Ollero et al., 2004, Marqués, 2018). A lo largo de su trayecto, el río Gállego ha enfrentado considerables alteraciones hidrogeomorfológicas debido a la construcción de embalses, regulación de caudales, presas de retención de sedimentos y desviaciones de caudales, lo que ha desnaturalizado tanto el flujo de agua como el transporte de sedimentos e incrementado los síntomas de enfermedad (Marqués, 2018). Entre estos impactos, destaca el polémico proyecto del embalse de Biscarrués, cuya ejecución habría agravado los problemas del estado del río en la parte baja del Gállego y habría causado consecuencias socioeconómicas directas. A pesar de estos impactos, el curso bajo del Gállego, que es el foco de estudio en este trabajo, aún conserva ciertos rasgos de su dinámica y naturalidad que podrían ser considerados para iniciativas de restauración fluvial.

En España, el río Gállego ha sido objeto de un extenso análisis en el ámbito de la geografía física como lo evidencian la tesis doctoral de Marín (1987), autor que completó su investigación en diversas publicaciones científicas (Marín, 1989, 1993, Sánchez Fabre y Marín, 2000). El mismo grupo de investigadores (Ollero et al., 2004) desempeñó un papel clave al contribuir con un informe para la Confederación Hidrográfica del Ebro, en el cual se aplicó la clasificación de Rosgen (Sánchez Navarro, dir., 2004), y posteriormente en investigaciones enfocadas en el bajo Gállego para el Ayuntamiento de Zaragoza (Ollero y Martín Vide, coords., 2005). A partir de esta labor se incorporó el caso de incisión en el bajo Gállego en la tesis doctoral del ingeniero Ferrer-Boix (2010) y se publicó un artículo científico sobre las causas y procesos de incisión acelerada en el mismo tramo (Martín Vide et al., 2010). Asimismo, se han publicado trabajos sobre la dinámica fluvial en un tramo específico del curso bajo (Peña-Monné et al., 2011, 2020), además de trabajos fin de estudios (Ballarín, 2005; Moreno, 2005; Mora, 2007) y una aplicación del índice Hidrogeomorfológico IHG (Ballarín et al., 2010). Desde la Geología, también se ha contribuido al conocimiento del bajo Gállego a través de investigaciones como las de Marcos (1991), Benito (1989), Benito et al. (1996, 2010) y Marqués (2018). A pesar de esta riqueza de trabajos científicos que abarcan estudios generales de la cuenca y tramos específicos en Zaragoza, es importante destacar la ausencia de investigaciones que se enfoquen de manera específica en el tramo de Zuera, lo que significa que existe un vacío en el conocimiento actual sobre esta parte del río.

El estudio del bajo Gállego en su conjunto, y en particular, en Zuera, trasciende a problemáticas ambientales de mayor alcance. En los entornos áridos y semiáridos, como el entorno de Zaragoza, el agua es esencial tanto para la vida como para el desarrollo socioeconómico. Sin embargo, la escasez

de agua es una característica prominente en esta región. Esta problemática se ve agravada por las predicciones de la Unión Europea, que indican que el cambio climático podría llevar a reducciones de hasta el 20 % en los caudales de los ríos peninsulares (AEMA, 2008). Estos descensos ya se han confirmado como muy significativos en diferentes trabajos, tanto en el Gállego como en otros ríos de la cuenca (López Moreno y García Ruíz, 2003; García Ruíz et al. 2015). A medida que las presiones sobre este recurso aumentan, es vital comprender las implicaciones de satisfacer las demandas de agua en un escenario de creciente escasez. Considerando esta situación, los ríos han pasado de ser ecosistemas fluviales a canales funcionales para la distribución de agua. Asimismo, los sistemas fluviales son ecosistemas vitales para el suministro de agua dulce, la biodiversidad y la provisión de hábitat para diversas especies. También desempeñan un papel importante en la regulación del ciclo del agua y en la conexión entre sistemas terrestres y acuáticos. Sin embargo, la alteración como la regulación de ríos, la contaminación y la degradación de hábitat, pueden tener un impacto negativo en la salud de estos ecosistemas fluviales (Elosegi y Sabater, eds., 2009).

El curso bajo del río Gállego es de gran interés hidrogeomorfológico a nivel peninsular por varias razones. En primer lugar, el Gállego es un ejemplo representativo de un río aluvial de piedemonte, una tipología fluvial común y muy impactada en la península Ibérica. En segundo lugar, pese a enfrentar numerosas presiones y una alta regulación hidrológica, mantiene su resiliencia manifestada en una dinámica geomorfológica activa. En tercer lugar, experimenta en algunos tramos procesos acelerados de incisión alcanzando valores muy altos en el tramo bajo, ya en término de Zaragoza, desde la presa de Urdán hasta Santa Isabel. En cuarto lugar, este tramo del bajo Gállego puede servir como un laboratorio para estudiar procesos y desarrollar propuestas de gestión y restauración que tengan aplicabilidad en otros ríos ibéricos. Dentro de esta perspectiva, es necesario comprender las interacciones entre los cambios globales y los procesos locales que inciden en el río Gállego para lograr una gestión efectiva y la conservación de su singular dinámica hidrogeomorfológica.

En las últimas décadas, los ríos han demostrado ser indicadores sensibles de los cambios climáticos y globales al transformar sus cauces, generalmente con procesos de estrechamiento y simplificación (Liébault y Piégay, 2002; Wyzga, 2008; Jantzi, 2018; Segura y Sanchis, 2018; Ferrer-Boix et al., 2023). La evolución del cauce aluvial del bajo Gállego refleja de manera notoria este fenómeno, a través de meandros que se forman y desaparecen, vegetación que coloniza el cauce, disminución de barras y la propia incisión, cambios todos ellos influenciados tanto por la regulación del agua como por la alteración del entorno. El río Gállego, destacado por su heterogeneidad geomorfológica, atribuida a la diversidad de morfologías y su carácter aluvial, se convierte en un paisaje fluvial único en la cuenca del Ebro. Basado en investigaciones desarrolladas desde el año 2004 en el bajo Gállego en Zaragoza, este estudio se enfoca en el tramo de Zuera, una porción que hasta el momento no ha sido objeto de análisis, pero es esencial para entender la dinámica y el estado actual del bajo Gállego. Desde una perspectiva ambiental y de acuerdo con lo expuesto, este trabajo pretende valorar el funcionamiento hidrogeomorfológico del río, al mismo tiempo que busca sensibilizar acerca de su estatus como patrimonio natural por su destacada heterogeneidad geomorfológica, un aspecto que considero crucial proteger para las generaciones futuras.

1.2. Marco de trabajo

El presente Trabajo Fin de Máster se desarrolla en el marco del convenio de colaboración establecido entre la Universidad de Zaragoza y la Fundación Odón de Buen. La Comisión de Seguimiento del Convenio Fundación Odón de Buen – Universidad de Zaragoza constituida para la resolución de las Ayudas Odón de Buen del curso 2022-2023, resolvió por unanimidad conceder las ayudas económicas a dos proyectos de fin de estudios como las mejores propuestas relacionadas con cuestiones ambientales, siendo el presente estudio uno de los seleccionados. Es importante destacar que la colaboración de la Fundación Odón de Buen no solo valida la importancia de este estudio, sino que también reafirma un compromiso conjunto con la investigación científica en la promoción ambiental asociada con la protección de los recursos fluviales como patrimonio natural.

Durante el transcurso de la beca, se ha llevado a cabo una serie de tareas con un enfoque metódico y constante. El trabajo se desarrolló a lo largo de varios meses, tal y como se muestra en el cronograma de la Figura 1, detallando las actividades realizadas y su duración diaria mensual.



Figura 1. Cronograma de actividades y su duración diaria mensual. Elaboración propia.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de este estudio es establecer un diagnóstico de la situación hidrogeomorfológica actual del bajo Gállego, abordando tanto su dinámica como su estado. Se da especial énfasis al tramo del río Gállego que atraviesa el término de Zuera, con el propósito de evaluar la salud fluvial de esta zona, destacando su relevancia ambiental como patrimonio natural y la posibilidad de llevar a cabo acciones de restauración fluvial. Para dar cumplimiento a este objetivo general es preciso desarrollar los siguientes objetivos específicos:

- Cuantificar, identificar los factores, cartografiar e interpretar la evolución del cauce y del corredor ribereño del Gállego desde 1927 hasta el momento actual.
- Diagnosticar el estado hidrogeomorfológico identificando sus problemas, presiones e impactos.
- Proponer medidas de restauración fluvial que otorguen resiliencia al Gállego.

2. ÁREA DE ESTUDIO

2.1. El curso bajo del Gállego: tramo Ontinar de Salz-Zuera-San Mateo de Gállego

El área geográfica objeto de estudio se encuentra en la cuenca del río Gállego, en el norte de España, específicamente en un tramo fluvial ubicado en el sector bajo de su curso (Figura 2). El río Gállego, un afluente del río Ebro por la margen izquierda, tiene su origen en las montañas pirenaicas a una altitud de 2.200 metros sobre el nivel del mar. Después de recorrer unos 200 kilómetros de norte a sur a través de la Comunidad Autónoma de Aragón, desemboca en el río Ebro en la ciudad de Zaragoza, a una altitud de 180 metros sobre el nivel del mar. El clima de la cuenca varía de norte a sur. En la zona norte, en el entorno de los Pirineos, es más frío y lluvioso debido a la alta montaña. A medida que nos desplazamos hacia el sur, en la depresión del Ebro, el clima se vuelve semiárido y seco.

El área de estudio se enmarca en la Comarca central, en la provincia de Zaragoza y abarca el municipio de Zuera, donde el río Gállego atraviesa el núcleo poblacional de Zuera ubicado en la margen derecha del río y se encuentra a unos 25 kilómetros de la ciudad de Zaragoza. En esta zona, existen varios puntos de acceso y áreas recreativas dispuestas a lo largo del curso del río. El tramo que se analiza se extiende a lo largo de una longitud total de 17 kilómetros, desde el azud de Candevania hasta el azud de San Mateo de Gállego, incluyendo las áreas urbanas de Ontinar de Salz, Zuera y San Mateo del Gállego. Para facilitar el análisis en detalle, este tramo fluvial se ha subdividido en tres sectores funcionales, que se definieron siguiendo criterios establecidos en la metodología del apartado 3.3. Estos sectores funcionales son los que se describen a continuación:

- Sector funcional 1. Se extiende desde el azud de Candevania-Camarera en Ontinar de Salz hasta el puente de la carretera A-23 en Zuera.
- Sector funcional 2. Cubre el tramo desde el mencionado puente de la carretera A-23 hasta el puente ferroviario en la misma localidad.
- Sector funcional 3. Incluye el tramo desde el puente ferroviario hasta el azud de Zuera e involucra la estación de aforo 9209 en San Mateo de Gállego.

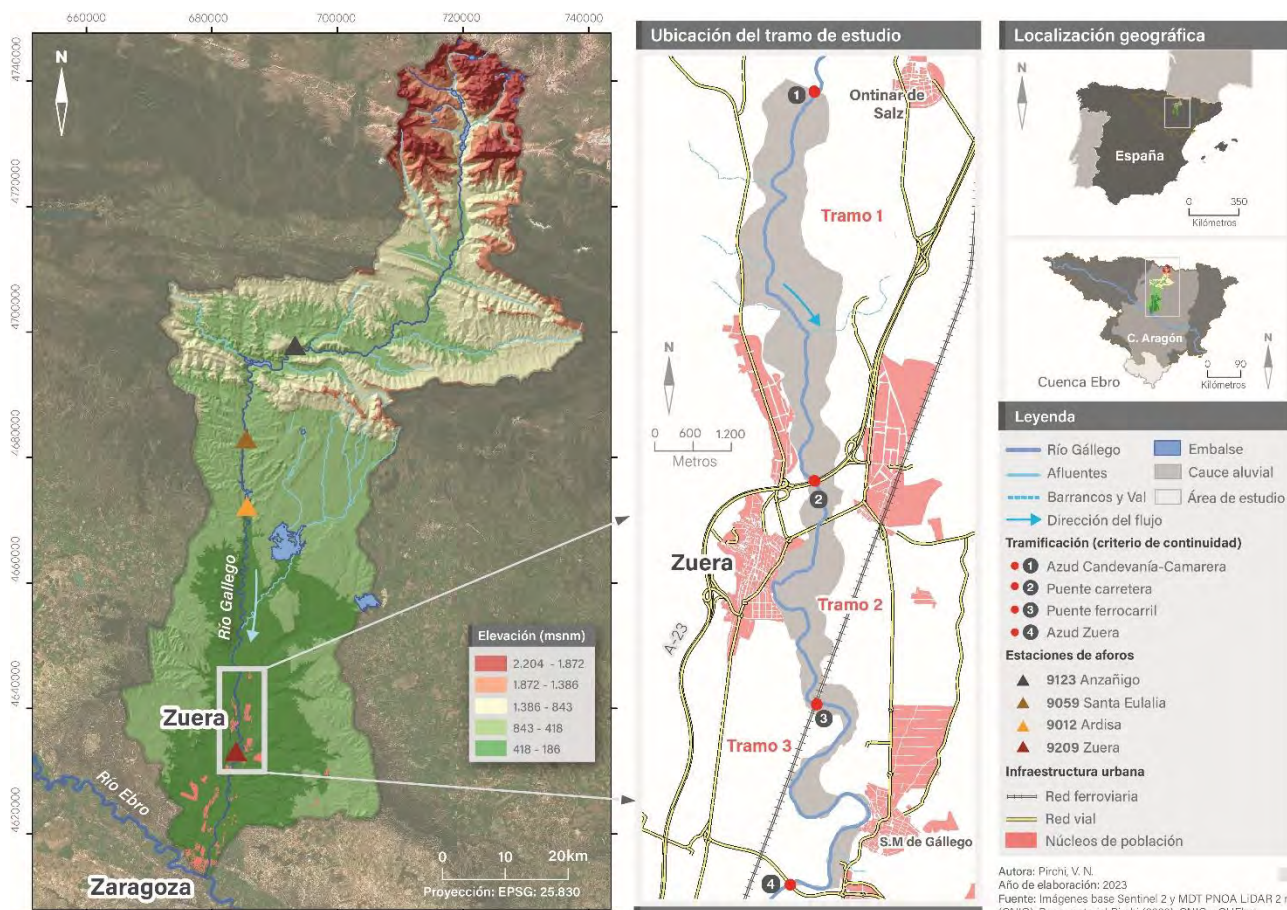


Figura 2. Mapa de ubicación geográfica del área de estudio en el contexto de la cuenca del río Gállego, estaciones de aforo analizadas y tramos seleccionados para su monitoreo. Elaboración propia.

El río Gállego es conocido por su belleza paisajística y también por su importancia ecológica. Específicamente en Zuera, el ecosistema fluvial alberga una gran diversidad de flora y fauna, que incluye aves acuáticas, mamíferos, peces y vegetación de ribera. Por otro lado, en el entorno del río Gállego, se despliega un complejo sistema de infraestructuras diseñadas para la regulación y almacenamiento de agua, principalmente con fines agrícolas. Este sistema incluye embalses, represas, azudes, desvíos, canalizaciones y acequias, entre otros elementos. En la cuenca media y baja del Gállego, dos elementos de importancia sobresalen en el territorio: el embalse de La Sotonera y el embalse de La Peña. Estas estructuras de origen antrópico desempeñan múltiples funciones en la cuenca, desde el suministro de agua para el riego de cultivos y el abastecimiento de agua potable a núcleos urbanos,

hasta la capacidad de regular el caudal del río mediante operaciones de embalse y desembalse, en función de las necesidades y las condiciones hidrometeorológicas. En esta región, la gestión integral del recurso hídrico es llevada a cabo por las autoridades competentes, encabezadas por la Confederación Hidrográfica del Ebro y en colaboración con las comunidades de regantes. Estas instituciones tienen la responsabilidad de garantizar un uso sostenible del recurso hídrico y de satisfacer las demandas de los diferentes sectores.

3. METODOLOGÍA

La asignatura 60401 “*Obtención y organización de la información geográfica*”, impartida durante el año académico 2022/2023 en este máster en Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del Territorio, en la Universidad de Zaragoza, ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de este estudio. Su importancia se fundamenta en su capacidad para proporcionar las herramientas y conocimientos indispensables para recopilar datos de diversas fuentes, así como en la habilidad para su eficiente organización y gestión (Figura 3). Por medio de esta asignatura, he adquirido competencias esenciales en el manejo de los datos y en la operatividad de programas especializados, como *Oracle 4.2.0* que demostró ser fundamental para agrupar, operar y extraer los registros hidrológicos, así como *ArcGis 10.7.1*, *ArcGis Pro 3.1.2* e *Inkscape*, utilizados para la creación y edición de elementos geográficos, la configuración de reglas topológicas para análisis espacial, la elaboración de cartografía y diseño del producto cartográfico final.

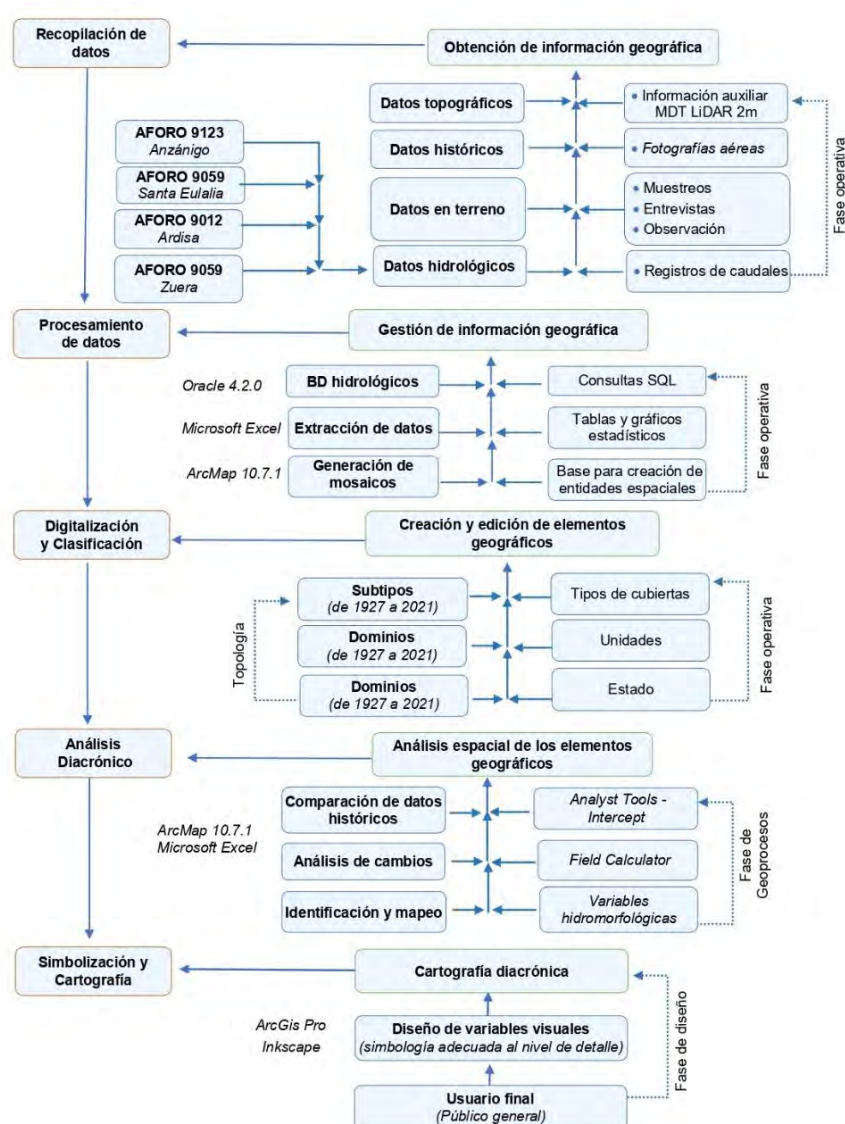


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de obtención, análisis y organización de la información geográfica. Elaboración propia.

3.1. Recopilación de datos

3.1.1. Obtención de datos históricos

Para recopilar los datos históricos necesarios para la elaboración de cartografía diacrónica, la fuente geográfica utilizada en este estudio son las imágenes aéreas de vuelos realizados en los años históricos que abarcan el periodo analizado: 1927, 1956, 2009, 2021 (Tabla 1). Para obtener estos documentos históricos se acudió a fuentes nacionales especializadas en cartografía, como el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y a nivel autonómico al Instituto Geográfico de Aragón (IGEAR), a través del servicio de Infraestructura de Datos Espaciales de Aragón (IDEAragón). Las imágenes aéreas fueron descargadas del CNIG y se seleccionaron en función a 4 momentos claves de evolución fluvial, relacionados con fechas anteriores a las principales crecidas históricas de las que se tiene constancia y que afectaron a Zuera, como las de 1938, 1979, 2003, 2012 y 2018. Estos productos se ubican en las hojas 323 y 355 del mapa Topográfico Nacional (MTN) a escala 1:50.000. Una novedad importante en este estudio es el producto cartográfico denominado “*Mosaico Georreferenciado de los fotoplanos del vuelo 1927 en la cuenca del Ebro*”, que fue proporcionado por el geógrafo José Ángel Losada a través de comunicación personal y lanzado el 20 de junio de 2023 por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). El documento base es un mosaico georreferenciado del vuelo 1927 a escala original 1:10.000 por hojas 323, 355 del MTN a escala 1:50.000, enviado vía e-mail recortado para el ámbito de este estudio. Todos los documentos históricos fueron georreferenciados según el sistema de proyección EPSG: 25830-ETRS89 UTM Zona 30 N.

Tabla 1. Características de las fotografías aéreas utilizadas.

Denominación	Fecha		Resolución	Escala	Fuente	Color
	Año	Mes				
Mosaico fotoplanos	1927	junio*	---	1:10.000	CHE	B/N
Ortofotos Vuelos AMS-B	1956	Enero/ noviembre	0,5 m	1:32.000	CNIG	B/N
Ortofotografías PNOA	2009	---	0,5 m	1:30.000	CNIG/ IDEAragón	RGB
MDT PNOA LiDAR	2016	---	2 m	1: 25.000	CNIG	RGB NIR
Ortofotografías PNOA	2021	agosto	0.25 m	1: 15.000	CNIG	RGB

*La fecha de vuelo es en verano en la franja de junio-septiembre (Testimonio de Losada, J.A. Comunicación personal, 14 de julio de 2023). Elaboración propia.

En el contexto de este trabajo, se identifica la existencia de una discrepancia geoespacial en el producto del vuelo capturado en 1927. En este caso, se ha encontrado que hay una diferencia de 30 metros en la posición de las fotografías aéreas, en comparación con los otros datos de los vuelos utilizados. Esta diferencia causa un problema para el análisis espacial que se ha llevado a cabo y ha afectado negativamente la manera en la que se lograron los objetivos planteados, puesto que ha dificultado la realización de geoprosesos en las cartografías diacrónicas como, por ejemplo, entorpecer la superposición y el análisis comparativo con este año. Ante esta situación, se ha decidido seguir un camino diferente para el vuelo del año 1927, concentrándose solamente en la fotointerpretación de las fotografías aéreas para entender cómo era el cauce y realizar los cálculos de superficies por separado e integrar a los resultados de los otros años. A pesar de esta limitación, la técnica de fotointerpretación proporcionó información valiosa. Sin embargo, es importante notar que se reconoce la necesidad de resolver este problema en investigaciones futuras, con el fin de evitar que esta diferencia genere complicaciones al momento de comparar datos en mapas.

Con el uso de un Sistema de Información Geográfica (S.I.G) como *ArcGis* 10.7.1, se llevó a cabo un tratamiento que implicó la creación de mosaicos, y posteriormente el recorte de las fotografías

aéreas y el MDT LiDAR (Figura 4). En primer lugar, se procedió al uso de herramientas de geoproceto como “*Mosaic to new raster*” que permitió la unión de varias imágenes aéreas, y posteriormente la herramienta “*Extract by Mask*” permitió el recorte de este mosaico utilizando un shapefile de polígono creado con los límites del área estudio. El resultado es un nuevo archivo ráster que contiene solo la información dentro de los límites establecidos.

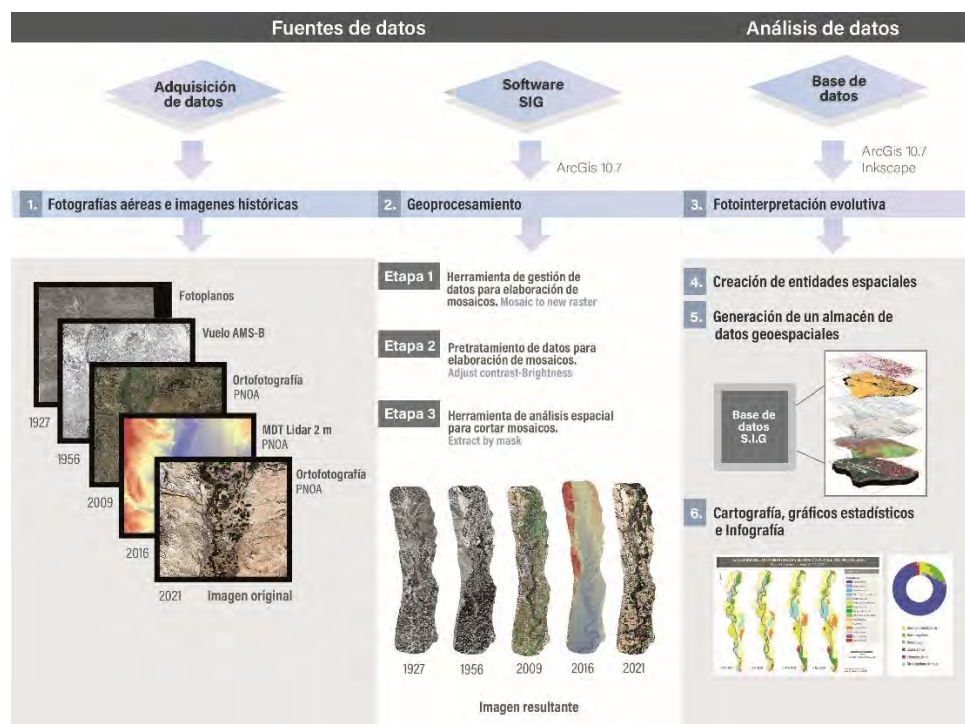


Figura 4. Esquema del tratamiento de fotografías aéreas. Elaboración propia.

3.1.2. Obtención de datos topográficos

En este estudio se empleó un Modelo Digital del Terreno (MDT) obtenido a partir de datos LiDAR con una resolución de 2 metros. Este producto cartográfico proporcionado por el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) en formato ráster (. asc) es el denominado PNOA LiDAR MDT02, el cual, contiene información geográfica de la elevación del terreno en cada celda de cuadrícula de 2 metros. Esta información se ha utilizado como recurso auxiliar en la fase de digitalización para delinear categorías de elementos geográficos dentro del espacio fluvial, contribuyendo a la caracterización detallada de los tramos de sectores funcionales estudiados. Por otro lado, se utilizó para adquirir datos topográficos (cotas) referentes a la altitud a escala de cuenca. También se generaron cortes transversales en tramos específicos de cada sector funcional para obtener perfiles topográficos detallados del terreno y se codificó la información de las diferentes coberturas del terreno, como se detalla en el Anexo I. Con el propósito de mejorar la visualización del área de menor elevación en el bajo Gállego, se discretizaron los datos altitudinales de la cuenca utilizando la herramienta *identify* en ArcMap. Esto permitió la creación de categorías basadas en cotas de interés identificadas en el tramo de estudio. Además, se implementó un mapa de sombras utilizando la herramienta *hillshade* para mejorar la visualización y legibilidad de las características del terreno. Por último, en la representación visual de los datos altitudinales se establece una codificación cromática que asigna colores convencionales relacionados con el relieve geográfico (Figura 5) en cinco categorías discretas de la variable altitud.

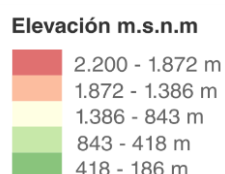


Figura 5. Discretización de la variable altitud en la cuenca Gállego. Elaboración propia.

El proceso de obtención de datos topográficos para crear perfiles representativos del terreno se realizó en el programa *ArcMap 10.7.1* empleando las herramientas geoespaciales. En este proceso se llevaron a cabo la generación de perfiles topográficos a lo largo de una línea transversal al cauce funcional en puntos específicos ubicados en el tramo de estudio utilizando un modelo de datos TIN creado a partir de los datos del MDT. Estas secciones transversales aportaron una visión detallada de las características topográficas del cauce fluvial. Además, permitieron la identificación de áreas elevadas en el lecho del río, lo que a su vez reveló las zonas propensas a una mayor erosión e incisión en el río. De manera complementaria los perfiles también destacaron áreas de menor altitud lo que sugiere una mayor acumulación de sedimentos en esas regiones.

En el proceso operativo se procedió a la creación de una entidad espacial de líneas que representen las secciones transversales a lo largo del cauce del río, tal como se ilustra en la figura 6. Estas secciones se posicionaron a intervalos regulares de 3000 metros a lo largo del tramo siendo superpuestas al modelo TIN que contiene las cotas. Este procedimiento involucra el proceso de interpolación de las cotas en las 6 secciones transversales. En la fase operativa del S.I.G se empleó la herramienta *Functional surface* para generar un nuevo shapefile con las secciones interpoladas sobre el modelo TIN obtenido del MDT02 mediante triangulación de cotas. La función *interpolate shape* fue utilizada para calcular los nuevos valores de cotas, los cuales se incorporaron en la tabla de atributos. Posteriormente se activó la herramienta *3D Analyst* y con la función *Profile Graph* en modo edición se crearon los perfiles topográficos a lo largo de las líneas transversales previamente definidas. Esto, a su vez, ha permitido la visualización y el análisis detallado de las elevaciones del terreno en las secciones específicas del cauce del río Gállego. Después de la generación y revisión de los perfiles en *Profile Graph*, los resultados se exportaron a un formato de hoja de cálculo en *Excel*. Esta última operación se realizó para facilitar su edición y análisis del relieve más preciso, en particular en lo que respecta a los elementos no deseados, como edificios, árboles y otros elementos de interferencia generados a partir de los datos LiDAR.

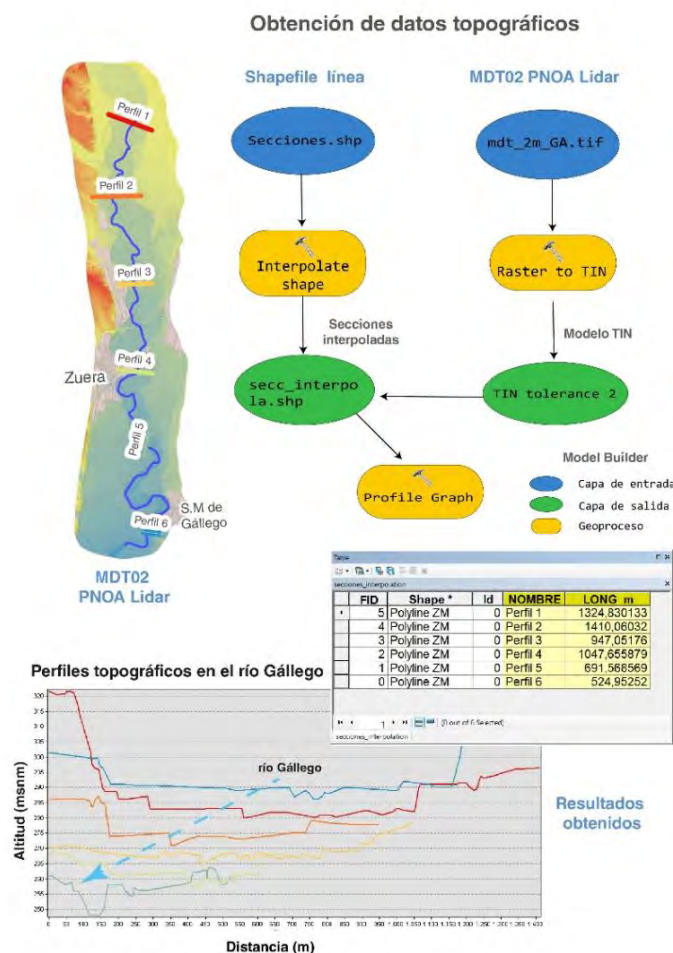


Figura 6. Esquema de obtención de datos topográficos del cauce. Elaboración propia.

3.1.3. Obtención de datos hidrológicos

En el estudio de los caudales del río Gállego es fundamental disponer de datos precisos sobre el flujo del agua del río a lo largo del tiempo. Para obtener estos datos se llevó a cabo un proceso de búsqueda en los organismos oficiales y se recolectaron datos de mediciones hidrológicas en puntos del curso del río. Estos puntos corresponden a estaciones de aforo del río Gállego que se encuentran situadas cercanas al tramo de estudio: Zuera (9209), Ardisa (9012), Santa Eulalia (9059) y Anzáñigo (9123), ubicadas geográficamente en la figura 2. No obstante, algunos de estos datos presentaron problemas dentro de la serie hidrológica, como valores nulos y valores erróneos. Para abordar estos problemas, se emplearon herramientas de procesamiento de datos como *Microsoft Excel*, *Oracle 4.2.0* y el lenguaje *Structured Query Language (SQL)*, que es un tipo de lenguaje especializado y diseñado para gestionar y consultar bases de datos.

El proceso metodológico incluyó la utilización de una base de datos proporcionada por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) y accesible en https://ceh.cedex.es/anuarioaforos/EBRO_csv.asp. Esta base de datos contiene registros de caudales en formato *CSV*, como se indica en la figura 7. Los datos se importaron a *Microsoft Excel*, donde se realizaron los procedimientos de discriminación de los años del periodo de estudio y la organización de la base de datos hidrológica. Posteriormente estos registros se transfirieron a una base de datos personal creada en el software *Oracle* para gestionar su análisis estadístico. Antes de llevar a cabo los cálculos estadísticos, se aplicó el lenguaje *SQL* para corregir y depurar los datos, eliminando los valores nulos y aquellos que presentaban errores. Además, se hizo uso de la *inteligencia artificial* por medio del asistente virtual de OpenAI *ChatGPT*, para crear las consultas *SQL* que contribuyeron a la identificación y filtrado de los datos hidrológicos. Finalmente, los datos depurados y organizados se analizaron estadísticamente mediante consultas *SQL* y se obtuvieron los datos promedios que se exportaron a *Microsoft Excel* para su posterior análisis gráfico en tablas dinámicas.



Figura 7. Obtención de datos hidrológicos. Fuente. Cedex (2023).

Con respecto al uso del lenguaje de consultas *SQL*, éste agilizó la gestión y organización de la base de datos en tablas de atributos, que posteriormente se exportaron a *Excel* para su tratamiento final. Estas tablas contienen variables relevantes, como caudales medios diarios (*qci*) que corresponde a la serie histórica de cada estación de aforo analizada y constituye información geográfica necesaria para establecer el diagnóstico de la calidad funcional del río Gállego en el tramo analizado. En el proceso de tratamiento de los registros hidrológicos se enfrentaron otros desafíos, esta vez relacionados con errores de sintaxis en las consultas *SQL* y problemas de compatibilidad entre los registros de “fecha” y “valores decimales” entre softwares, los cuales se solucionaron mediante ajustes manuales y configuraciones específicas. A pesar de los desafíos encontrados, esta etapa resultó esencial para garantizar la calidad y coherencia de los datos hidrológicos.

Para el análisis específico del caudal medio diario se utilizó el archivo *afiq.csv* que, según los metadatos, contenía información de las estaciones de aforo mencionadas anteriormente. La elección de *Oracle* se basó en su eficacia para gestionar grandes volúmenes de datos en un extenso periodo temporal, en este caso cerca de un siglo de información de historia hidrológica, que incluye un total de 93.506 registros. El proceso de identificación de valores nulos comenzó con la creación de una tabla dinámica en *Excel* destinada a recopilar, organizar y gestionar los valores nulos extraídos desde *Oracle*. Por otro lado, las consultas SQL desempeñaron un papel fundamental en el proceso de extracción, y análisis estadístico (Anexo II, 2.3). En la corrección de los valores nulos de los registros se establecieron criterios de aceptación de error con umbrales mensuales y anuales (Anexo II, tablas 2.1 y 2.2). Esta metodología permitió determinar la cantidad de días con errores y datos sin registro hidrológicos para cada estación de aforo y año hidrológico analizado.

3.1.4. Obtención de datos en terreno

La recolección de datos en terreno ha estado compuesta por dos fases fundamentales. La primera de ellas implicó la obtención de muestras de sedimentos para caracterizar las barras fluviales. La segunda fase se desarrolló en el laboratorio, donde se analizaron los datos recopilados durante la fase de campo. Las actividades en el terreno se realizaron en 4 visitas: 3/02/23, 21/03/23, 20/07/23 y 1/09/23. La primera salida se centró en la observación preliminar y el reconocimiento del área de estudio. Las tres visitas siguientes se enfocaron en verificar elementos digitalizados, recolectar muestras de sedimentos, realizar transectos para analizar la estructura de las barras, obtención de registros fotográficos y evaluar la vegetación ribereña, procesos fluviales e identificar impactos ambientales. Cabe mencionar que la observación se limitó a sitios accesibles y que, debido a los caudales altos en las visitas, no fue posible medir directamente las barras previamente monitoreadas mediante imágenes aéreas.

Para evaluar las dimensiones de los sedimentos en las barras se empleó el método de *Transecto lineal* propuesto por Wolman (1954). Esta metodología consiste en el despliegue de una cinta métrica sobre la barra y se tomaron muestras de gravas en intervalos de 0,50 y 1 metros, dependiendo de la longitud de la barra. Utilizando un calibrador, se mide la anchura de cada muestra. Este procedimiento se realiza de manera sistemática para asegurar la aleatoriedad de las muestras (n). Además, se emplea un muestreo por cuadrantes de 40 cm x 40 cm para analizar el *índice de acorazamiento* y caracterizar la coraza de la barra sedimentaria (Figura 8). Esta técnica consiste en retirar la capa superficial de sedimentos (coraza) y separar las muestras en bolsas identificadas para su posterior tamizado y medición en el laboratorio. Se repite este procedimiento para la capa subsuperficial de sedimentos (subcoraza).

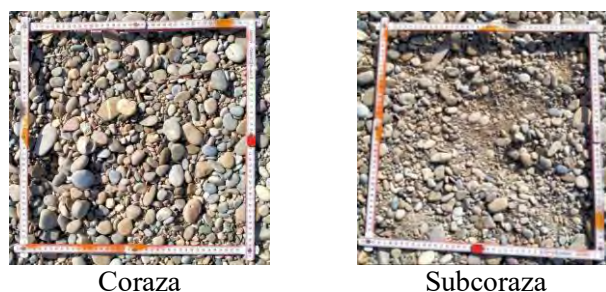


Figura 8. Instrumentos de muestreo de la coraza y subcoraza. Fuente: fotografías tomadas en campo por la autora.

En el laboratorio, se procedió a la caracterización granulométrica de la coraza y subcoraza para el cálculo del índice de acorazamiento. El proceso implica tamizar las muestras que previamente se habían separado en bolsas. Después de tamizar las muestras, se registra el peso de los sedimentos y se mide el tamaño del sedimento por el ancho del lado más pequeño de cada partícula tamizada utilizando un gravelómetro (Figura 9). Para calcular la *coraza*, se multiplica el peso de cada fracción de la muestra (expresado en gramos) por el tamaño medio de la partícula correspondiente (en milímetros). Luego, se divide el resultado entre la suma total de estos productos, dividida entre el peso total de los sedimentos de la muestra.



Tamiz



Gravelómetro

Figura 9. Instrumentos de medición del tamaño de las partículas. Fuente: fotografías tomadas en laboratorio por la autora.

En cuanto al *índice de acorazamiento (IA)* se obtuvo de la ratio entre el tamaño medio de los materiales de la coraza y el tamaño medio de los materiales de la subcoraza como se expresa en la ecuación I. Este índice proporciona información sobre la diferencia en el tamaño medio de los sedimentos de la capa superficial y subsuperficial, como indicadores del grado de consolidación de la barra en el lecho de un río.

$$IA = \frac{T_{\overline{xc}}}{T_{\overline{xsc}}} \quad \text{Ecuación I}$$

Donde: **IA** es el índice de acorazamiento, $T_{\overline{xc}}$ es el tamaño medio del material de la coraza y $T_{\overline{xsc}}$ es el tamaño medio del material de la subcoraza.

Finalmente, para la obtención de datos relacionados con la gestión del río, se emplearon entrevistas como una técnica cualitativa dentro del análisis espacial. Las entrevistas se diseñaron para ser dirigidas a personas directamente involucradas en la gestión del río Gállego. La herramienta formulario *Google Forms* fue utilizada para facilitar la distribución rápida de las entrevistas cuyo formato de preguntas se puede ver en el Anexo I.

3.2. Sistemas de Información Geográfica (S.I.G)

3.2.1. Modelo de datos vectorial

El modelo de datos vectorial es el elegido en este trabajo para organizar y representar los datos geoespaciales relacionados con el río Gállego y su entorno ribereño. Este modelo de datos ha implicado la definición de categorías que abarcan diversas características del río, algunas de las cuales se han configurado para su edición espacial como dominios y subtipos, como se detalla en la tabla 2. En tal caso, se han creado las capas de información “cauce” para cada año, representadas espacialmente como entidades poligonales, cada una con atributos específicos para su caracterización. Entre estos atributos se incluyen campos de datos definidos previamente como *subtipos* y vinculados a los registros de las diferentes coberturas asociadas al espacio ribereño, así como *dominios* con valores predefinidos en la *geodatabase* para los subtipos coberturas.

Los *dominios* describen, en cada tramo, los contextos geomorfológicos y el estado de calidad del río, utilizando para este caso un rango de valor predefinido en un intervalo de 0-90, y representando la puntuación del índice de calidad hidrogeomorfológica. Además, se asigna un código identificador único (ID) a cada atributo, facilitando la identificación individual para establecer relaciones topológicas entre las tablas de atributos de las entidades espaciales. Cabe aclarar que se han descargado de IDE Aragón y CNIG otras capas de información temática como carreteras, vías férreas, manzanas urbanas, entre otras, pero no han intervenido en el análisis espacial. En el marco de este estudio se han implementado distintos índices hidrogeomorfológicos con el objetivo de evaluar las características y dinámicas del curso del río en la región de interés y se ha buscado desarrollar el modelo de datos vectorial que lo explique. Sin embargo, es importante destacar que la cartografía generada a partir de estos índices no ha producido los resultados esperados en esta fase inicial de la investigación siendo reemplazada por otro tipo de representación como los gráficos geoestadísticos.

Tabla 2. Descripción de campos que se comportan como dominios y subtipos

Entidad espacial	Campos de atributos			
	COD_COB	NOM_COB (Subtipos)	Dominios	
Cauce (<i>polígono</i>)			Unidad	CA CR ZI
	11	Cauce activo		
	12	Brazo ciego		
	13	Canal secundario	Tramificado	1
	14	Otras láminas de agua		2
	21	Barra desnuda		3
	22	Barra en colonización		
	23	Barra vegetada	Estado	MB
	24	Bosque de ribera		B
	25	Otras masas vegetales		M
	31	Plantaciones		D
	32	Cultivos		MM
	41	Área alterada	Rango	0
	42	Área urbana		90
	43	Área industrial		
	44	Infraestructura		
			Corresponde al rango de valores de 0 a 90 puntos del índice IHG	

Elaboración propia.

3.2.2. Creación y edición de elementos geográficos

La digitalización y elaboración de cartografía diacrónica del sector de estudio se ha llevado a cabo en un Sistema de Información Geográfica, específicamente, en el software *ArcGis 10.7.1*. Las técnicas de fotointerpretación y digitalización de imágenes aéreas permitieron la creación y edición de capas de elementos geográficos (*feature class*). Durante el proceso de fotointerpretación digital y de digitalización se han tenido en cuenta los siguientes criterios de análisis visual de imágenes aerotransportadas:

- Se utilizó como información auxiliar el modelo digital del terreno PNOA LiDAR MDT02 con una resolución espacial a 2 metros para mejorar la digitalización y delimitación precisa de los escarpes del espacio fluvial del Gállego en el tramo estudiado.
- Al digitalizar las categorías, se consideró la Unidad Mínima Cartografiada (UMC). En una escala 1: 500 se definió que el área mínima representable en el mapa es de 0,0005 hectáreas (5 m²), eliminando cualquier objeto cuyo tamaño fuera inferior a esta medida.
- Se utilizaron los criterios propuestos por Chuvieco (2008) como tono, color, textura, tamaño y forma para identificar elementos geográficos. Para las cubiertas vegetales se aplicaron criterios visuales más complejos como sombras, patrón espacial y fenología.

En el proceso de construcción del modelo vectorial en el software *ArcMap*, se configuraron los *dominios* en una *file geodatabase*, y los *subtipos* en las capas que se van a digitalizar durante la fase de creación de elementos geográficos y de los atributos que describen sus características. Durante la fase de digitalización se utilizaron algunas herramientas de edición como el ajuste de vértices y el *Snapping* con una tolerancia de 5 píxeles y para modificar la geometría de los elementos se realizó la ejecución de acciones como autocompletar, cortar (*cut*), trazar (*trace*) y fusionar polígonos (*merge*). Estas herramientas son las que resultaron más útiles para ajustar las superficies de territorio que cambiaron en los diferentes años, ya sea para ampliar o reducir su extensión. Una vez concluida esta fase de digitalización, se procede a establecer la topología, procedimiento que regula mediante reglas la relación espacial entre las entidades de elementos geográficos y con ello se verifican los errores de

edición. Posteriormente se editan los dominios y subtipos específicos en las tablas de atributos, y de esta manera se realizó una organización estructurada de la información geográfica.

En relación a las reglas de topología para las entidades espaciales de tipo polígonos, se aplicaron dos: “*Must not overlap*” para evitar superposiciones entre las áreas de entidades espaciales y “*Must not have gaps*” para evitar huecos entre áreas o polígonos adyacentes. Una vez establecidas estas reglas se editan los errores detectados por el sistema (Tabla 3). Por ejemplo, al comparar los datos de los años 2009 y 2021 se identificaron dos casos de solapamiento y uno de huecos, además de un caso de *excepción* común a todos los años y que está relacionada con el borde del polígono que no tiene conexión con otras entidades espaciales por ser el límite del área estudiada. La solución a estos errores fue la edición de vértices y finalmente se pudo validar la topología.

Tabla 3. Resultados de errores de edición de elementos geográficos.

Tipo de regla	Año	Errores	Corrección y validación
1. <i>Must not overlap</i>	1956	143	Edit vertices Autocompletar polígono
2. <i>Must not have gaps</i>		91	
1. <i>Must not overlap</i>	2009	1	Edit vertices
2. <i>Must not have gaps</i>	2021	2	

Elaboración propia.

No obstante, en el caso del año 1956 el sistema detectó múltiples errores, la mayoría de los cuales se originaron debido a un desplazamiento del cauce durante la fase de digitalización. Esto se debió a que, en la etapa de edición, se utilizó la capa ya digitalizada correspondiente al año más reciente para actualizar el dinámico cauce y su entorno fluvial. Para abordar la corrección de estos errores se optó por un ajuste manual que implicó la modificación de nodos y vértices utilizando las herramientas de “*Edit vertices*”. En los casos de errores más complejos se recurrió a la eliminación y creación de polígonos utilizando la herramienta de “*autocompletar polígonos*”. El uso del visor “comparador de mapas” del IGN-CNIG fue de gran ayuda en esta fase.

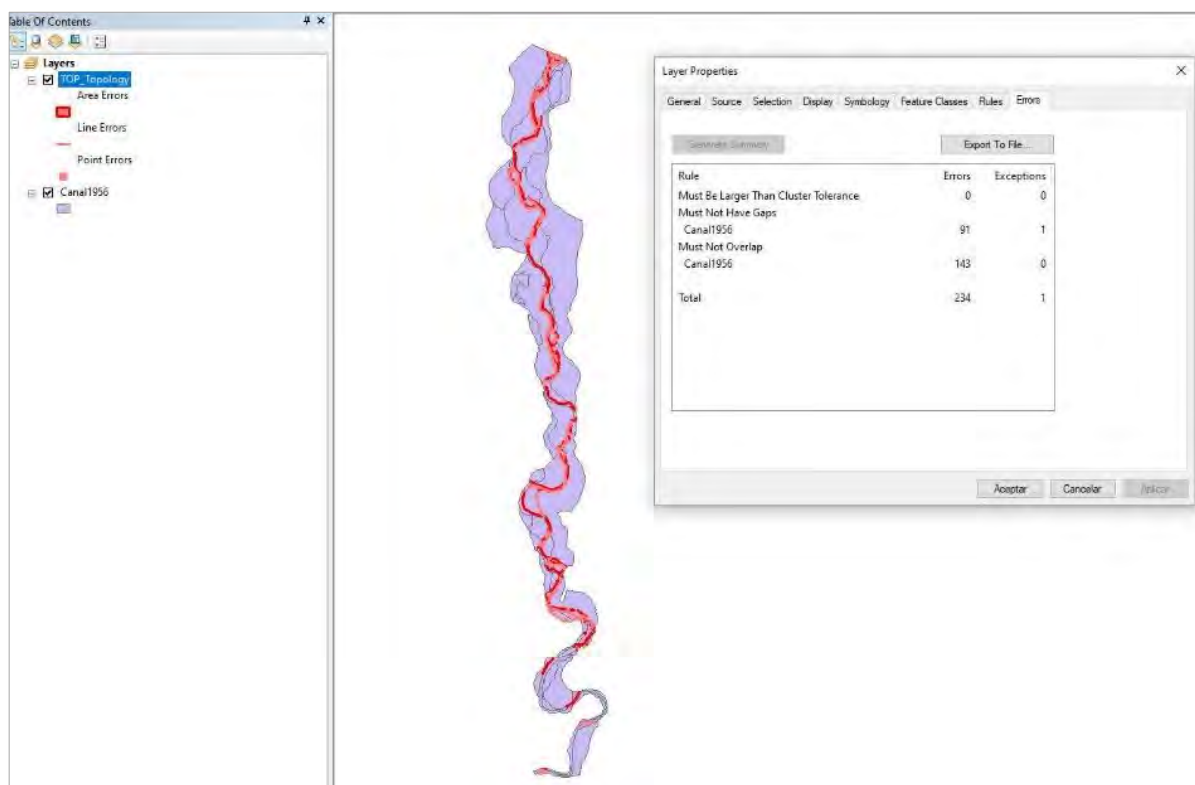


Figura 10. Errores de edición identificados en la topología de 1956. Elaboración propia.

3.2.3. Análisis espacial multitemporal

En el análisis espacial multitemporal de los elementos geográficos se compararon capas vectoriales de polígonos correspondientes a los años 1927, 1956, 2009 y 2021. Estas capas representan datos temáticos sobre coberturas del suelo en el cauce activo, el corredor ribereño y el espacio fluvial del río Gállego en diferentes momentos fluviales. Para identificar áreas que experimentaron cambios se utilizó la herramienta de geoprocésamiento *Intersect*. En el proceso operativo se combinan por superposición las capas de los diferentes años y se genera una nueva capa temática que hereda los atributos de las capas originales. Luego se calcularon las áreas de coberturas intersectadas y se creó un campo de tipo texto llamado “Cambio” para distinguir los valores de los registros de coberturas que percibieron cambios (dinámico) de aquellos que no cambiaron (estable). Para este geoprocésamiento se utilizó el código identificador de cada cubierta (COD_COB) con el propósito de efectuar el enlace entre tablas de atributos y se empleó para reclasificar los nuevos valores de cambios una condición IF creada mediante *script Python* en la calculadora de campo (Anexo II, 2.5). En la sintaxis del código se evalúa la siguiente condición:

Si los valores en el campo COD_COB de las capas analizadas son iguales o diferentes entonces en la columna llamada “cambio”, se asigna “DINÁMICO” en caso de que la cobertura sí ha cambiado y se devuelve “ESTABLE” en el caso de que la cubierta no ha cambiado.

Los términos “coberturas” y “usos” del suelo son conceptos relacionados, pero presentan diferencias y tienen un amplio uso en los campos de la Geografía, cartografía y planificación del uso de la tierra. Según la clasificación europea de Corine Land Cover las coberturas del suelo se refieren a la categorización de la superficie terrestre en distintas unidades según sus características biofísicas en términos de lo que la cubre (cubiertas naturales y artificiales), mientras que los usos del suelo hacen referencia a la categorización del territorio según la dimensión funcional utilizable o su dedicación socioeconómica actual. Las categorías de unidades establecidas para el cálculo de las superficies de cambio e indicadas en la tabla 4 son coberturas que se derivan de un estudio llevado a cabo en el bajo Gállego en el año 2004 (Ollero et al. 2004). Además, utilizando como base a Corine Land Cover se incluyen otras coberturas definidas mediante fotointerpretación digital por la autora de este trabajo. Los detalles de las categorías de coberturas del espacio fluvial se describen a continuación:

Tipos de cubiertas

1. Superficies de agua

- **Cauce activo:** corresponde al canal principal del lecho del río donde circula la lámina de agua del río Gállego de manera permanente y activa en el momento de la observación y digitalización.
- **Brazo ciego:** esta categoría se refiere a cauces del río que conectan con el cauce principal en un solo punto y que en aguas altas suelen convertirse en brazos funcionales secundarios.
- **Canal secundario:** son canales más pequeños que se bifurcan desde el cauce principal del río.
- **Otras láminas de agua:** incluye cuerpos de agua más pequeños como lagunas, cauces abandonados y/o en reactivación, salinas y áreas encharcadas que son parte del río principal en aguas altas incluyendo las zonas de los barrancos.

2. Superficies húmedas con vegetación natural y/o inducida en suelo de gravas

- **Barra desnuda:** representa áreas de sedimentos expuestos dentro del lecho del río, generalmente sin vegetación.
- **Barra en colonización:** son áreas de sedimentos dentro del lecho del río donde la vegetación está comenzando a establecerse.
- **Barra vegetada:** representa las áreas dentro del lecho del río donde la vegetación ha crecido de manera significativa.

- **Bosque de ribera:** engloba áreas de vegetación boscosa que se encuentran en las orillas del río e incluso cerca de su cauce.
- **Otras masas vegetales:** incluye cualquier otro tipo de cobertura vegetal natural y/o inducida.

3. Superficies agrícolas

- **Plantaciones:** hace referencia a usos en áreas donde se han plantado árboles con un propósito específico.
- **Cultivos:** indica áreas dedicadas a la labor agrícola.

4. Superficies artificiales

- **Área alterada:** son superficies sin uso definido que incluyen espacios abandonados por causa de las actividades antrópicas, deteriorados y degradados por la acción física, química o biológica del medio.
- **Área urbana:** responden a la ocupación del suelo comprendiendo tanto edificaciones urbanas como industriales y áreas de parcelas y urbanizaciones dispersas.
- **Área industrial:** responden a la ocupación del suelo con edificación industrial y el desarrollo de su actividad productiva.
- **Infraestructura:** se han incluido diversos usos como azudes, acequias, canalizaciones, carreteras, vías de ferrocarril, puentes y algunos tramos de caminos, senderos y pistas especialmente anchos.

Tabla 4. Categorías de coberturas en el espacio fluvial del río Gállego

Categorías de coberturas					
Tipo de cubierta (nivel 1)		Código	Nombre (nivel 2)	Simbología	RGB
1	Superficies de agua	11	Cauce activo		077-077-255
		12	Brazo ciego		166-166-255
		13	Canal secundario		000-204-242
		14	Otras láminas de agua		128-242-230
2	Superficies húmedas con vegetación natural y/o inducida en suelo de gravas	21	Barra desnuda		204-204-204
		22	Barra en colonización		230-230-000
		23	Barra vegetada		077-255-000
		24	Bosque de ribera		000-166-000
		25	Otras masas vegetales		166-230-077
3	Superficies agrícolas	31	Plantaciones		242-204-166
		32	Cultivos		255-255-168
4	Superficies artificiales	41	Área alterada		230-128-000
		42	Área urbana		230-204-204
		43	Área industrial		204-077-242
		44	Infraestructura		204-000-000

Elaboración propia

3.3. Tramificación hidrogeomorfológica

Los criterios metodológicos utilizados para definir los sectores funcionales en el tramo de estudio se basaron en el concepto de continuidad funcional del río (Figura 11). La continuidad funcional es la capacidad del sistema fluvial para mantener un flujo constante de agua sin interrupciones, lo que permite la conexión con diferentes entornos a lo largo del curso de agua (Gutiérrez Elorza, 2008; Ollero et al., 2009).

Durante el procedimiento de tramificación del río se han identificado elementos de origen antrópico, como azudes y puentes, que intervienen en la continuidad del flujo y en la morfología del río. En particular son relevantes para este estudio los azudes de Candevania-Camarera ubicado aguas arriba de Zuera y el azud del aforo 9209 ubicado aguas debajo de este núcleo de población. Además, se ha llevado a cabo un análisis detallado de la presencia de barras en el cauce funcional y el corredor ribereño como indicadores clave para comprender las características hidrológicas y geomorfológicas. Este análisis ha permitido la identificación de tres sectores funcionales con dinámicas fluviales internamente homogéneas, caracterizados por la presencia y/o disminución de barras. El criterio de tramificación fluvial se ve representado en el mapa de la figura 2.

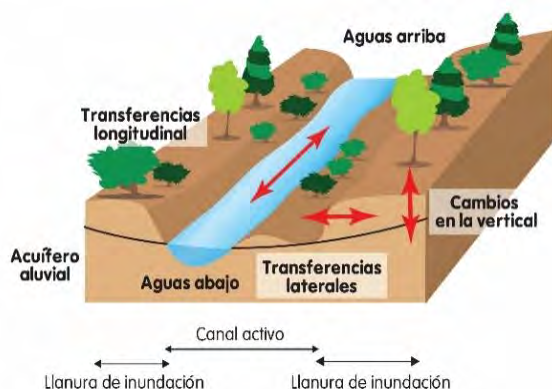


Figura 11. Continuidad funcional de un río. Fuente: ilustración propia modificada de Gutiérrez Elorza (2008) en Pirchi (2019).

3.4. Indicadores de calidad hidrogeomorfológica

3.4.1. Índice hidrogeomorfológico (IHG)

El índice Hidrogeomorfológico (IHG) creado por Ollero et al. (2007, 2009) es muy utilizado en estudios de geomorfología fluvial para valorar la calidad hidrogeomorfológica de un río o un tramo específico (Ollero et al., 2021, Ballarín, 2022, Conesa García et al., 2022; Pirchi et al., 2023). Este índice busca cuantificar y relacionar diferentes componentes del río para proporcionar un diagnóstico integral de su estado, es decir, examina la salud y establece el estado del río, en función de tres aspectos de calidad relacionados con lo hidrológico, geomorfológico y ecológico. Estos tres aspectos son los bloques de calidad que se descomponen en varios indicadores. En la zona estudiada, se procedió a la aplicación individualizada del *Índice Hidrogeomorfológico (IHG)* en tres sectores funcionales, claramente identificados y definidos conforme a los criterios expuestos en el apartado 3.3. Este procedimiento implica la evaluación de tres bloques específicos: (I) calidad funcional del sistema fluvial, (II) calidad del cauce y (III) calidad de las riberas. Cada uno de estos bloques se compone de tres parámetros distintos, totalizando 9 elementos evaluativos (Tabla 5).

La asignación de puntuaciones a cada parámetro se ejecuta en una escala que oscila entre 0, reflejando un estado de alteración completa, y 10, indicativo de una condición natural inalterada. La ponderación final puede llevarse a cabo de manera parcial para cada uno de los bloques señalados (I-II-III), o de forma integral, abarcando todos los parámetros examinados en conjunto como se detalla en la tabla 6. El proceso de evaluación ha demandado la utilización de imágenes aéreas actuales y anteriores, documentación integral de la cuenca hidrográfica en cuestión, así como elaboración de cartografías de detalle. Por otro lado, se han realizado dos evaluaciones del índice IHG, una relativa al año 1927 y la otra correspondiente al año 2023. Con el fin de comparar la calidad hidrogeomorfológica en los diferentes sectores funcionales del río, se empleó un sistema de representación basado en gráficos de pirámides (Figura 12) desarrollado por Pirchi et al. (2023) y adaptado para un público general.

Tabla 5. Indicadores y parámetros de evaluación

Indicador de calidad		Parámetros	
I	Calidad funcional del sistema (CF)	A	Naturalidad del régimen de caudal
		B	Disponibilidad y movilidad de sedimentos
		C	Funcionalidad de la llanura de inundación
II	Calidad del cauce (CC)	D	Naturalidad del trazado y de la morfología en planta
		E	Continuidad y naturalidad del lecho, de los procesos longitudinales y verticales
		F	Naturalidad de las márgenes y de la movilidad lateral
III	Calidad de las riberas (CR)	G	Continuidad longitudinal
		H	Anchura del corredor ribereño
		I	Estructura, naturalidad y conectividad transversal

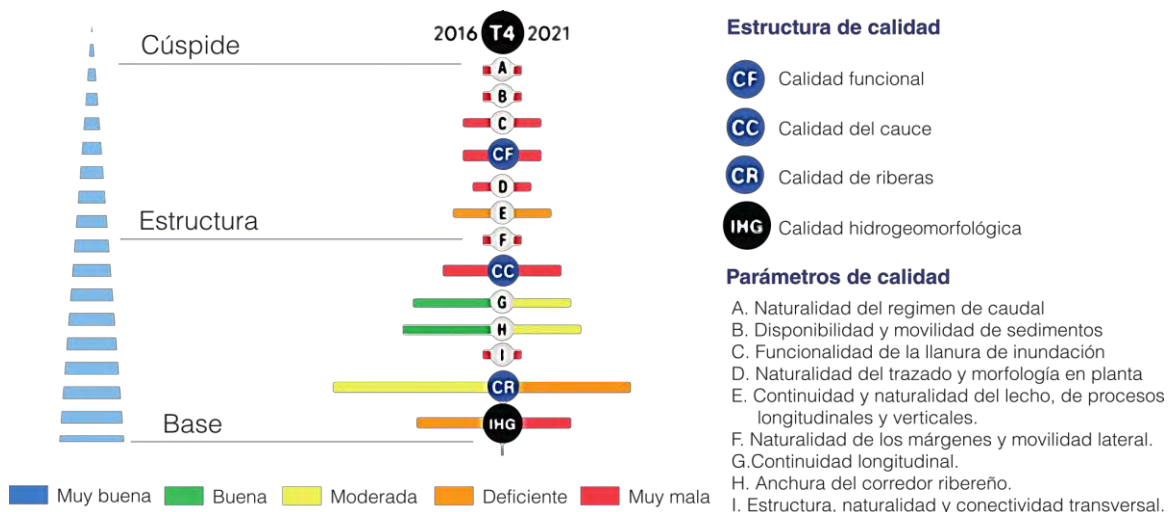
Fuente: Ollero et al., 2009

Tabla 6. Puntuación para la valoración del IHG

Calidad hidrogeomorfológica	Puntuación individual por parámetro	Puntuación parcial por bloque (I,II,III)	Puntuación total
Muy buena	9-10	30-25	75-90
Buena	7-8	24-20	60-74
Moderada	5-6	19-14	42-59
Deficiente	3-4	13-7	21-41
Muy mala	0-2	6-0	0-20

Fuente: Ollero et al., 2009

Las pirámides de calidad hidrogeomorfológica son representaciones visuales que grafican la salud de un río específico. Estas gráficas constan de barras de doble graduación que ilustran tanto la calidad hidrogeomorfológica total como los grupos de parámetros individuales de los bloques de calidad. Esto se presenta en función del sector funcional que se esté evaluando, años y periodos de tiempo. En la base de la pirámide se encuentra la calidad hidrogeomorfológica total, mientras en el centro y cúspide se encuentra la estructura que representa la calidad hidrogeomorfológica del río y los parámetros que intervienen en el diagnóstico de su salud. Dependiendo de la variable considerada, se determina el tipo de pirámide a divulgar, ya sea una pirámide de calidad total, funcional, del cauce o de riberas.

**Figura 12. Pirámide de calidad hidrogeomorfológica. Fuente: modificado de Pirchi et al. (2023).**

3.4.2. Índice de densidad de barras fluviales (IDBF)

En la evaluación de la calidad hidrogeomorfológica de los bloques I y II, se utilizan dos índices: el *Índice de Densidad de Barras Fluviales (IDBF)* y el *Índice de Sinuosidad del cauce (IS)*. El IDBF se enfoca en analizar las barras en el río para comprender la disponibilidad y movilidad de sedimentos e inferir el comportamiento del flujo. Por otro lado, el IS mide la curvatura del río y cómo cambia su forma con el tiempo. Al combinar estos dos índices se pudo entender mejor cómo las características del cauce, la carga de sedimentos y la forma del río se relacionan a lo largo del periodo de estudio.

El IDBF es una métrica creada específicamente para la presente investigación y aún se encuentra en fase experimental. Mide la cantidad de barras en un tramo dividiendo la superficie total de las barras por la longitud del cauce en ese tramo a diagnosticar (ecuación 2). El objetivo de este índice es evaluar la densidad y distribución de barras en el río y puede ser útil en estudios de geomorfología fluvial.

$$IDBF = db/Lc \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde: *IDBF*: ratio del índice de densidad de barras fluviales; *db*: superficie total de barra, *Lc*: longitud del cauce activo en el tramo en cuestión.

En este caso, las barras se clasifican en términos de su dinámica fluvial en tres categorías: barra desnuda (altamente activas y dinámicas), barra en colonización y barra vegetadas (menos activas y estables). También se clasifican según su ubicación en el cauce funcional y en el corredor ribereño. Se calcula la ratio IDBF para cada una de estas categorías en los tres sectores funcionales tramificados del río Gállego.

En el entorno del Sistema de Información Geográfica el proceso para calcular el IDBF implica digitalizar las barras de sedimentos en cada año estudiado, medir la longitud total del cauce para cada tramo con la herramienta *measure* y determinar la superficie total de cambio en las barras aplicando geoproceso *Intersect y reclasificación* en un campo para las áreas de barras calculadas en *summarize* mediante la operación *sum*. Los resultados se expresan en superficie de barras por metro de longitud del tramo de río. Por ejemplo, un valor de 10 m²/m para barras desnuda significa que hay 10 m² de barra desnuda por cada metro de longitud del tramo fluvial. Esta medida proporciona información sobre la distribución espacial de las barras a lo largo del río Gállego y su estado dinámico o estable.

Finalmente, para representar los resultados en un mapa (Figura 13), se utilizan categorías basadas en los valores del IDBF y el mismo código de colores empleado en el Índice Hidrogeomorfológico (IHG). En este caso los colores más oscuros y fríos indican una mayor densidad de barras y una mayor dinámica fluvial propias de un río sano, mientras que los colores más cálidos representan una menor densidad de barras y mayor estabilidad del cauce. Sin embargo, la cartografía no se considera definitiva para los índices estudiados y está actualmente en proceso de experimentación (Anexo II, 2.5 y 2.6).



Figura 13. Código cartográfico y discretización de variables. Fuente: Elaboración propia.

3.4.3. Índice de sinuosidad (IS)

El Índice de sinuosidad (IS) constituye una variable importante para cuantificar el grado de sinuosidad en el trazado del río, y es también un parámetro que mide la presencia de meandros en los ríos. Este indicador se calcula utilizando el método de la relación de la longitud, basado en Leopold & Wolman (1957) como una medida espacial del río en su territorio. Este método se apoya en la medición de la longitud de la línea del talweg trazada por el río a lo largo de su cauce principal. Luego esta longitud se compara con la distancia entre los mismo dos puntos, pero esta vez siguiendo la dirección predominante del curso del río en el valle, como se indica en la ecuación 3.

$$IS = Lc/Lv \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde: *IS*: ratio del índice de sinuosidad; *Lc*: longitud del canal trazado por la línea del talweg, *Lv*: longitud del valle.

Con el resultado del índice IS se determina la tipología del cauce dependiendo de las características morfológicas del mismo (Tabla 7). En términos generales, el comportamiento del cauce para los tres sectores tramificados en el Gállego se clasificó en cuatro categorías:

Tabla 7. Categorías de patrones morfológicos del Gállego

Índice IS	Tipología de cauce
$IS < 1,05$	trenzado (braided)
$1,05 < IS < 1,25$	divagante (wandering)
$1,25 < IS < 1,5$	sinuoso (sinuous)
$IS > 1,5$	meandriforme (meandering)

Elaboración propia.

El cálculo del índice de sinuosidad en el software *ArcMap* implica varias etapas (Figura 14). Primero se crean 4 capas que contienen los atributos de sinuosidad por cada año y tramo analizado. Luego, en el editor, se digitalizó el recorrido del río, siguiendo su talweg o la línea más profunda del valle. Después se mide la longitud del cauce utilizando la calculadora de geometría “*calculate geometry*” en metros y se crea un campo para almacenar estos valores. Simultáneamente, en otro campo nuevo se registra la longitud del valle medida en línea recta entre los dos extremos del talweg mediante la herramienta “*measure*”. Por último, para calcular el índice de sinuosidad, se establece un campo específico para el año de interés. En la calculadora de campo “*Field Calculator*” se utiliza la expresión $L_{\text{canal}}/L_{\text{valle}}$.

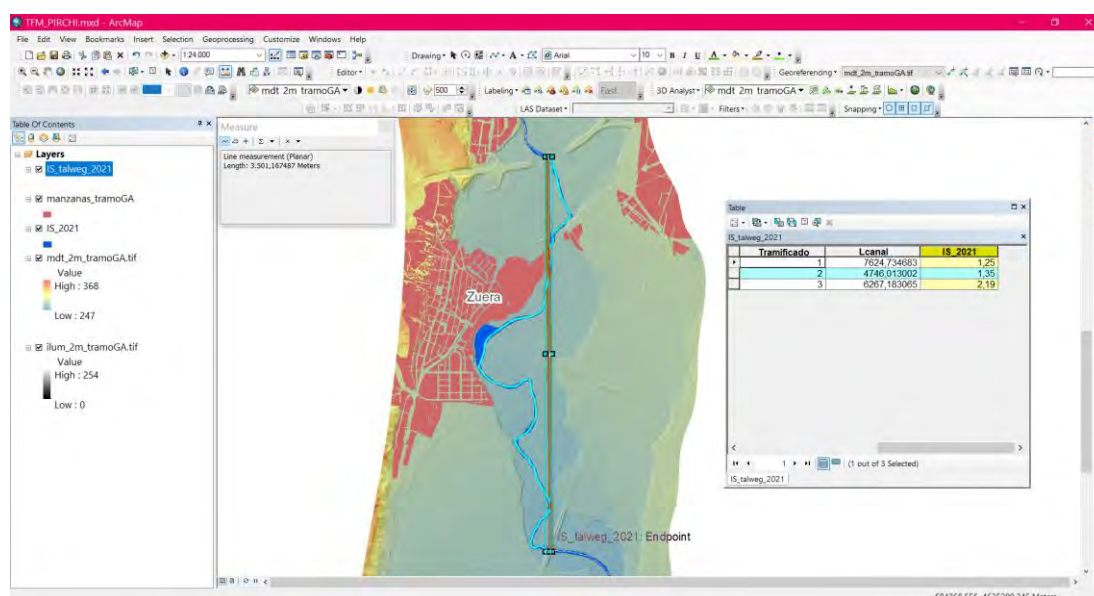


Figura 14. Herramientas utilizadas en el cálculo de la variable sinuosidad. Elaboración propia.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Evolución del estado del cauce y el corredor ribereño

El enfoque de este trabajo se centra en periodos fluviales, cada uno de los cuales está marcado por un hito hidrogeomorfológico que distingue un periodo particular en la historia del cauce y el corredor ribereño del río Gállego. Estos periodos fluviales representan etapas claramente diferenciadas en la evolución del río y su entorno, como se ilustra en la figura 15. Asimismo, cada uno de los periodos probablemente estén estrechamente relacionados con acontecimientos históricos y características ambientales específicas que no serán analizados en detalle en este estudio.

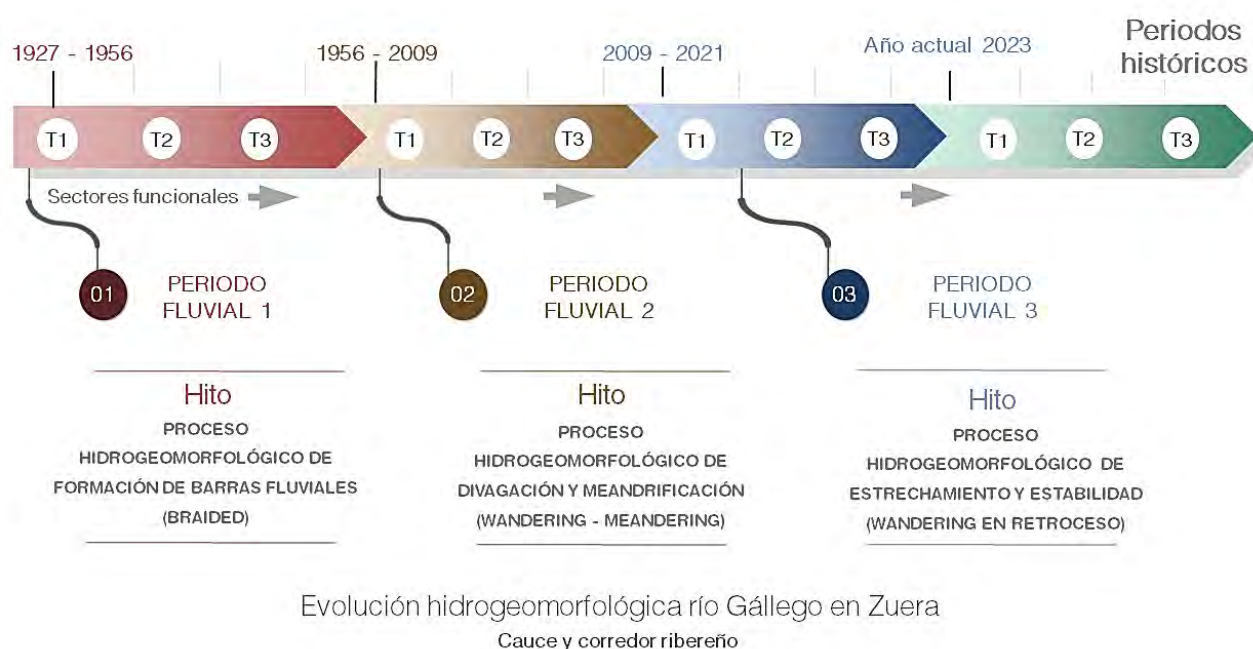


Figura 15. Periodos históricos considerados en la evolución hidrogeomorfológica. Elaboración propia.

El primer periodo fluvial, que se remonta a la fase de 1927-1956, se caracteriza por la presencia de un alto número de barras fluviales en el cauce del río, razón por la cual se le ha denominado de “*formación de barras*”. Durante esta época, la sinuosidad del río se mantenía en niveles bajos (menos de 1,36) en todo el tramo analizado, lo que indicaba la existencia de un cauce relativamente trenzado o *braided*. La calidad hidrogeomorfológica era muy buena, lo que sugería un sistema fluvial en proceso de construcción, sano, con marcada heterogeneidad geomórfica. Este periodo se asocia con una fase de formación activa de barras aluviales e inestabilidad, lo que influyó en la configuración del cauce y el corredor ribereño en constante cambio.

El segundo periodo fluvial, que tuvo lugar durante la fase 1956-2009, se caracterizó por la presencia moderada de barras fluviales. La sinuosidad del río en todo el tramo estudiado se situaba en niveles intermedios (1,52), lo que indica la existencia de un cauce meandriforme o *meandering*. La calidad hidrogeomorfológica se encontraba en niveles moderados. Este periodo representa una etapa inicial de estabilización en la dinámica del río Gállego y su geomorfología. Se le denomina fase de “*meandrificación*” debido a la formación de meandros más encajados acompañados de un incipiente proceso de incisión. Durante este periodo, el sistema fluvial alcanza un equilibrio relativo en la formación de barras, con posibles ajustes locales, lo que influye nuevamente en la configuración del cauce y el corredor ribereño.

El último periodo fluvial, que comprende desde 2009 hasta la actualidad, se distingue por la escasez notable de barras fluviales. La sinuosidad del río en todo el tramo estudiado se mantiene en

niveles de alta sinuosidad (1,50) indicativos de un cauce meandriforme. Sin embargo, la calidad hidrogeomorfológica se considera deficiente a muy mala, lo que señala un sistema fluvial en estado de estabilidad. Este periodo fluvial denominado de “*estabilidad modificada*”, se caracteriza por una marcada reducción en la formación de barras debido a factores antrópicos junto con una meandrificación estable del río. La estabilidad geomorfológica ha marcado esta fase, influyendo en la morfología del cauce y el corredor ribereño.

Estos tres periodos fluviales proporcionan una visión general de la evolución del río Gállego a lo largo del tiempo, relacionando los indicadores de barras fluviales, sinuosidad y calidad hidrogeomorfológica con la dinámica del río y su corredor ribereño. Todos estos aspectos serán analizados para una comprensión más profunda a continuación.

4.2. Evolución de las coberturas del espacio fluvial

El monitoreo de los cambios en las coberturas y usos del suelo en el río Gállego resulta fundamental para detectar anomalías y reconocer alteraciones que afecten la salud general del río y su entorno. En este sentido, la evolución de las coberturas que ocupan el espacio fluvial del río Gállego es representado en las cartografías diacrónicas elaboradas para cada uno de los sectores funcionales. En este estudio, se adopta el enfoque integral propuesto por Ollero e Ibisate (2012) para definir espacio fluvial. Según esta perspectiva el espacio fluvial incluye el cauce funcional, el corredor ribereño y la llanura de inundación frecuente. Precisamente, el cauce funcional o activo es el área por donde el río fluye de manera habitual, incluyendo el espacio necesario para su dinámica, es decir, el espacio ocupado por el flujo de agua y la movilidad del río en condiciones normales. El corredor ribereño abarca el área adyacente al cauce del río que incluye la franja próxima al río donde las interacciones entre el río y la vegetación ribereña son importantes para el equilibrio del ecosistema, mientras que la llanura de inundación frecuente es el área que tiende a inundarse durante eventos de crecidas del río que ocurren con una frecuencia de retorno de 50 años.

En primer lugar, se explican los resultados de las diferentes cubiertas que conforman el espacio fluvial, abarcando los tres sectores funcionales y considerando el periodo de análisis 1927-2021. Posteriormente, se realiza un análisis de las áreas que han experimentado cambios, identificándolas como áreas dinámicas en contraposición a aquellas que han permanecido estables. De estas áreas dinámicas, se otorga especial atención a las coberturas presentes en el cauce funcional y el corredor ribereño, dado que constituyen variables de estudio fundamentales para el cumplimiento del primer objetivo de esta investigación, que consiste en analizar la evolución del cauce y el corredor ribereño.

De manera general se observan tendencias significativas en las coberturas del cauce funcional, corredor ribereño y llanura inundable. En el cauce funcional (Tabla 8) se observa una reducción progresiva en la extensión de las áreas de barras desnudas desde 1927 a la actualidad, lo cual indica un cambio en la dinámica fluvial en el transcurso de estas décadas.

Tabla 8. Evolución de las coberturas en el cauce funcional

Áreas de coberturas (ha)	Periodos fluviales			
	1927	1956	2009	2021
Tipo de cobertura				
Barra desnuda	23,35	26,54	▼ 4,04	▼ 0,62
Barra en colonización	2,28	▲ 12,81	▲ 5,79	▲ 3,79
Barra vegetada		0,76	▲ 8,49	▲ 12,74
Brazo ciego	4,43	3,39		▼ 2,20
Cauce activo	78,36	84,41	58,26	60,74
Infraestructura	2,24	2,28	0,68	▲ 3,00
Otras láminas de agua				1,36

Los signos indican incremento (▲) y reducción (▼) de áreas de cobertura. Elaboración propia.

Por otro lado, las barras en colonización experimentan fluctuaciones a lo largo del tiempo, con un aumento notorio entre 1956-2009, seguido de un aumento, aunque a un ritmo más lento en los años siguientes, como se puede observar en la cartografía diacrónica del sector funcional del tramo 1 (Figura 15). Este fenómeno puede estar relacionado con procesos naturales de sedimentación y cambios en la dinámica fluvial. En contraste, las barras vegetadas experimentaron un aumento en la superficie en el momento fluvial más reciente 2009-2021, lo que podría estar relacionado con una disminución de la dinámica de crecidas y su consecuente problema de colonización vegetal. Además los brazos ciegos disminuyeron, lo que sugiere una mayor estabilización del cauce del río.

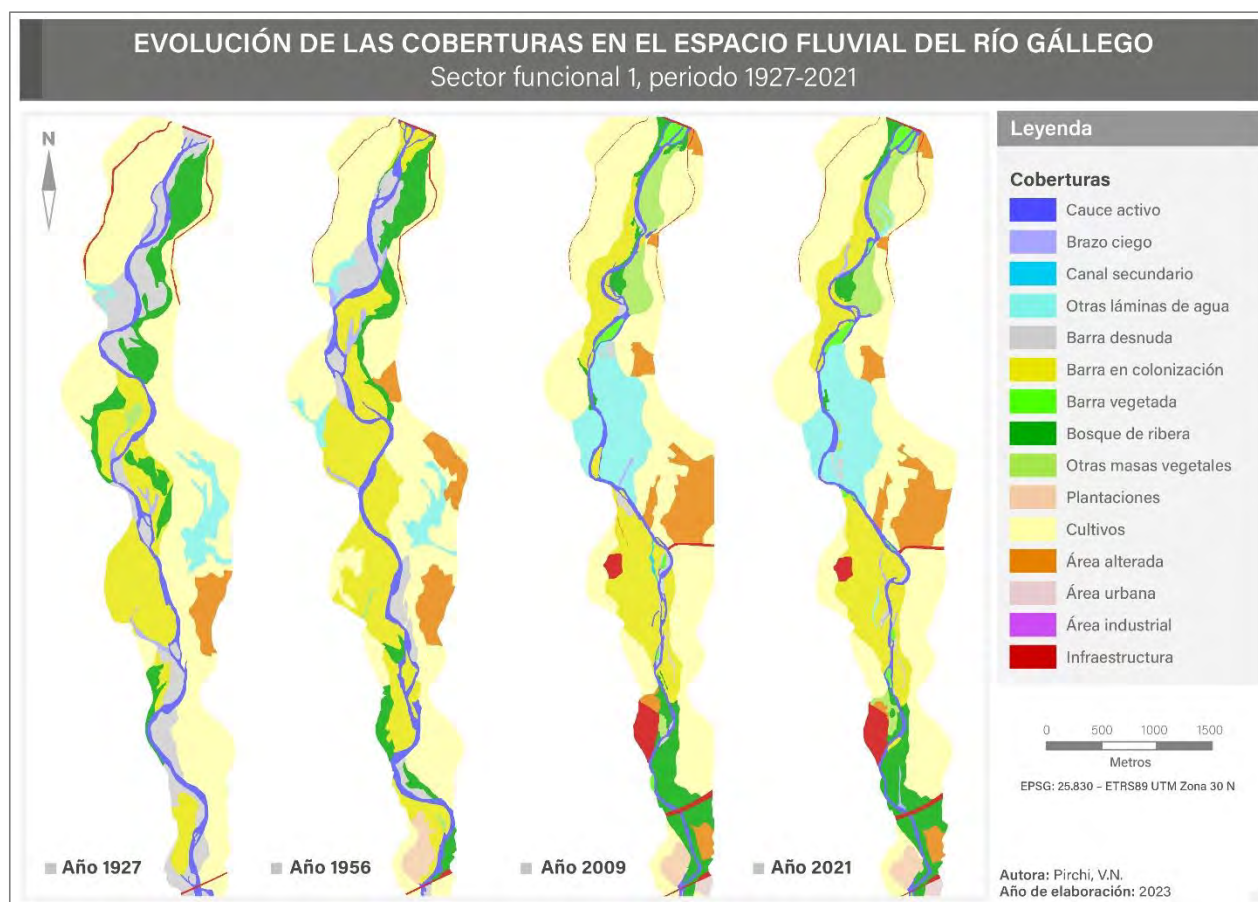


Figura 15. Evolución de las coberturas en el tramo 1, periodo 1927-2021. Elaboración propia.

Es evidente que las barras fluviales se concentran predominantemente en el cauce funcional y corredor ribereño, lo cual destaca la importancia de estas áreas para la dinámica fluvial y la biodiversidad. Una de las evidencias más destacadas es el aumento significativo de las barras en colonización, especialmente en los primeros años del periodo analizado. Este fenómeno está relacionado con que las barras eran aluviales y se mostraban escasamente colonizadas y por ello eran extensas y abundantes también en el espacio del corredor ribereño. La cartografía diacrónica del sector funcional del tramo 3 (Figuras 16) pone de manifiesto el predominio actual de barras estabilizadas y muy colonizadas.

Tabla 9. Evolución de las coberturas en el corredor ribereño (1927-2021)

Área de cobertura (ha)	Periodos fluviales			
Tipo de cobertura	1927	1956	2009	2021
Área alterada			10,94	▲ 37,83
Área industrial			0,59	▲ 2,87
Área urbana			10,35	▲ 10,38
Barra desnuda	77,53	▼ 53,00	▼ 3,83	▼ 2,22
Barra en colonización	137,29	▲ 148,34	▲ 75,70	▲ 78,04
Barra vegetada			▲ 1,22	▲ 0,31
Bosque de ribera	83,60	65,89	▲ 142,68	132,98
Brazo ciego		2,39	0,74	
Canal secundario			0,71	
Cultivos	29,72	▼ 3,66	8,39	▲ 26,50
Infraestructura			▲ 4,07	2,85
Otras láminas de agua		7,18	▲ 52,18	53,92
Otras masas vegetales	2,28	5,19	▲ 22,70	▲ 24,40
Plantaciones		▲ 19,53	11,24	11,50

Los signos indican incremento (▲) y reducción (▼) de áreas de cobertura. Elaboración propia.

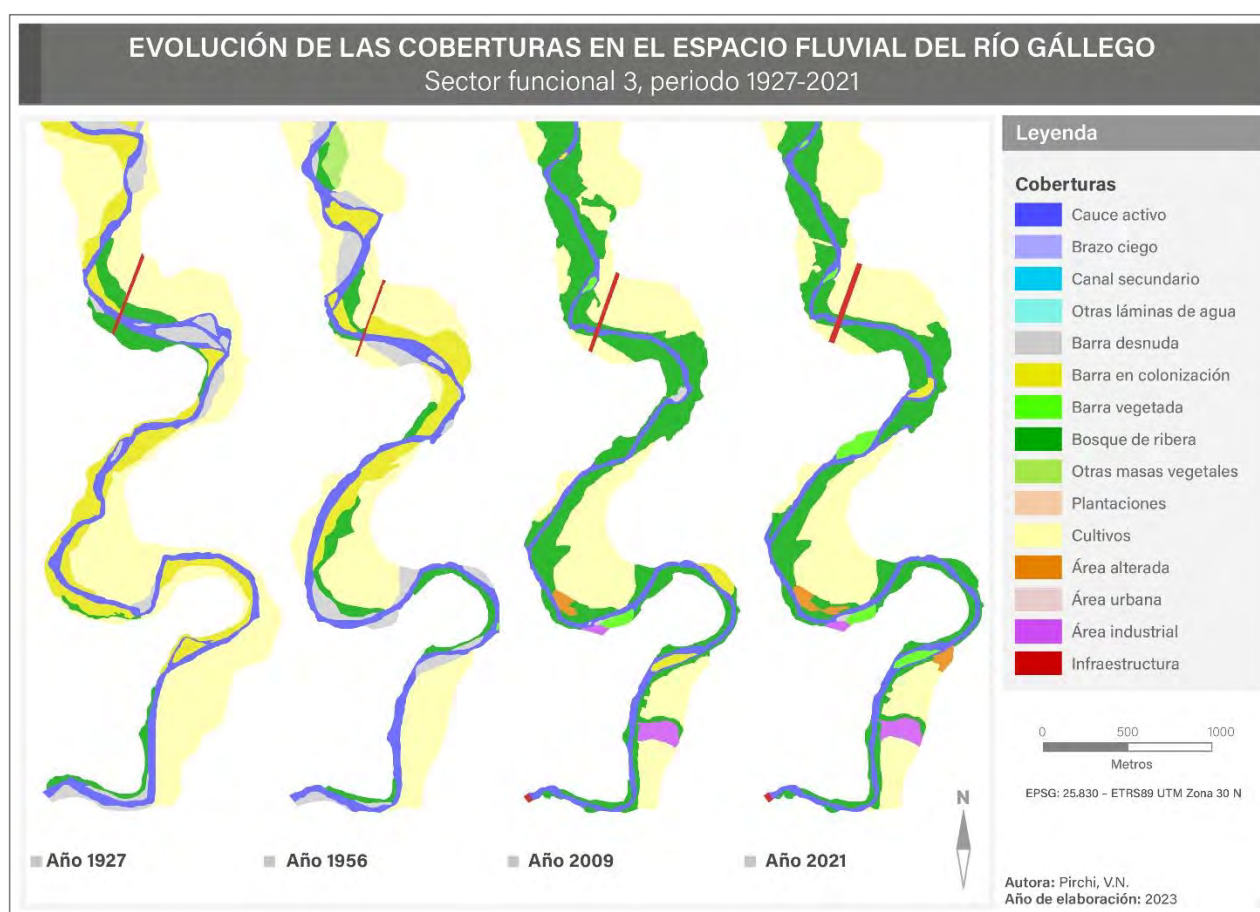


Figura 16. Evolución de las coberturas en el tramo 3, periodo 1927-2021. Elaboración propia.

En contraste con lo anterior, las barras desnudas disminuyeron considerablemente, lo cual indica una transformación en la configuración del corredor ribereño. Además, se observa un incremento notorio del bosque de ribera en el periodo fluvial actual en los tramos más urbanos, lo que puede reflejar los esfuerzos de conservación y restauración de la vegetación del corredor ribereño en estas áreas. Este proceso se observa con mayor intensidad en el sector funcional del tramo 2 (Figura 17).

Por otra parte, resulta llamativo el aumento de áreas alteradas y áreas industriales en el momento fluvial más reciente, lo que puede tener implicaciones para la calidad del espacio fluvial y la biodiversidad. En cuanto a la disminución de superficies de cultivos y su transformación en áreas degradadas, sugiere cambios en los usos de la tierra del corredor ribereño. Por último, se destaca el incremento de otras láminas de agua, como pequeños cuerpos de agua cerrados, cauces abandonados y áreas encharcadas. También se detectaron aumentos en las superficies de masas vegetales y plantaciones en el periodo actual (2009-2021). Estos cambios pueden reflejar una mayor diversificación y dinamismo en el corredor ribereño del río Gállego en los últimos años, lo que podría ser importante para la salud y equilibrio del ecosistema fluvial.

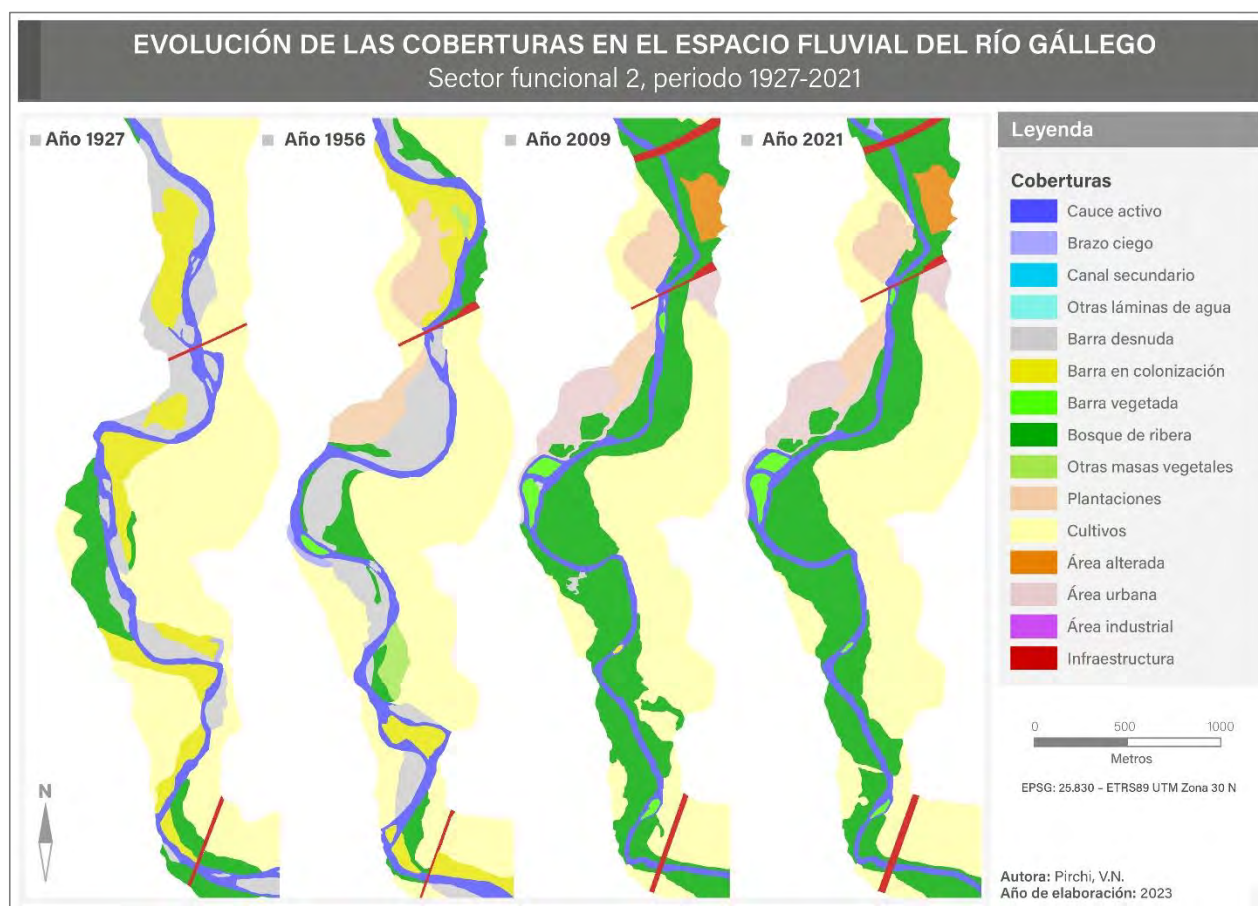


Figura 17. Evolución de las coberturas en el tramo 2, periodo 1927-2021. Elaboración propia.

En la llanura de inundación destaca que el área alterada experimenta un aumento notable en el segundo periodo fluvial (1956-2009). Este aumento está relacionado con la modificación del paisaje por abandono de actividades humanas en su mayor parte por actividades agrícolas. La expansión agrícola ha llevado a una mayor conversión de áreas naturales en tierras de cultivos y es la cobertura que domina el espacio de la llanura inundable, lo que a su vez ha provocado alteraciones en el espacio fluvial del Gállego. También se observa un aumento en la infraestructura en el segundo periodo fluvial, lo que está relacionado con el crecimiento urbano y la necesidad de infraestructura de transporte y comunicación en la región. Este fenómeno espacial también contribuye a las alteraciones en la llanura de inundación. Por otro lado, la cobertura referida a otras láminas de agua ha desaparecido en la llanura de inundación en el periodo fluvial actual, lo cual podría indicar que el río está manifestando un proceso de incisión quedando desconectado de la llanura de inundación en eventos de crecidas frecuentes.

Tabla 10. Evolución de las coberturas en la llanura de inundación

Área de cobertura (ha)	Periodos fluviales			
Tipo de cobertura	1927	1956	2009	2021
Área alterada	14,96	▲ 31,38	▲ 38,72	▲ 7,87
Área industrial			▲ 2,91	0,60
Área urbana			▲ 2,22	2,26
Bosque de ribera			1,15	
Cultivos	441,55	391,99	391,83	380,03
Infraestructura	4,69	2,91	▲ 13,46	▲ 11,12
Otras láminas de agua	22,63	10,78		

Los signos indican incremento (▲) y reducción (▼) de áreas de cobertura. Elaboración propia.

4.2.1. Análisis de las superficies estables y dinámicas

La comparación multitemporal de las áreas de cobertura en el río ha sido importante para identificar las superficies que experimentaron cambios en los diferentes periodos fluviales. Estos cambios se dividen en dos categorías: “superficie estable” para las coberturas que no cambiaron y “superficie dinámica” para las coberturas que sí cambiaron. El análisis espacial que se explica a continuación se enfoca en las áreas dinámicas, ya que son críticas para evaluar el estado actual del río Gállego.

▪ Periodo fluvial 1927-1956 (58% estable, 42% dinámico)

Durante este periodo, el 58% del total de coberturas se mantuvieron estables cubriendo 355,49 hectáreas, lo que sugiere una continuidad de las características de las cubiertas del espacio fluvial del río Gállego, probablemente relacionada con prácticas agrícolas. El 42% restante, que equivale a 494,27 hectáreas, se considera dinámico indicando cambios significativos en la cobertura del espacio fluvial durante este tiempo. Estos cambios son atribuidos a factores como la agricultura y modificaciones en la dinámica del río. En la cartografía (Figura 18) la mancha roja indica dónde hubo cambios de coberturas.

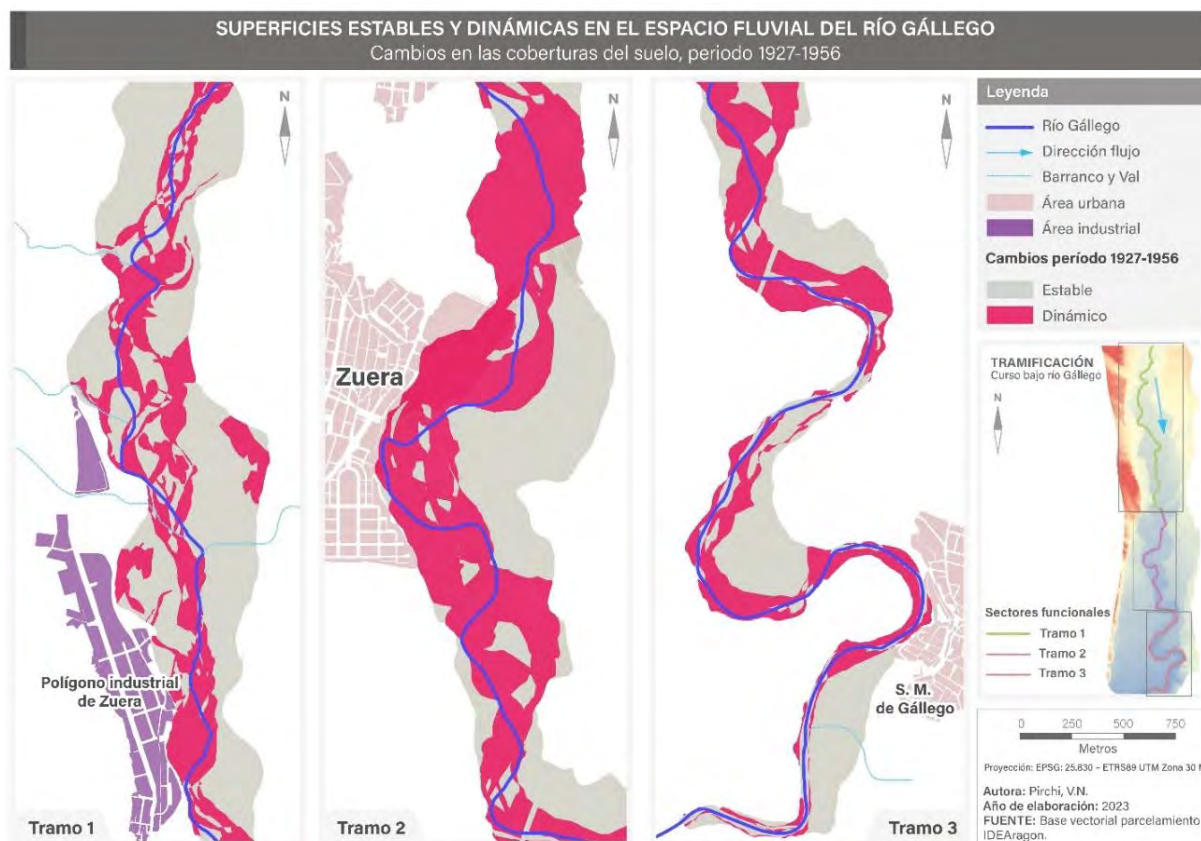


Figura 18. Superficies dinámicas y estables, periodo 1927-1956. Elaboración propia.

- **Periodo fluvial 1956-2009 (50% estable, 50% dinámico)**

Este periodo presenta un equilibrio entre áreas estables que equivale a 431,59 hectáreas y dinámicas con 434,30 hectáreas (Figura 19). Es notable que el porcentaje de áreas dinámicas sea igual al de áreas estables (50%), lo que sugiere cambios significativos en el espacio fluvial en la segunda mitad del siglo XX. Estos cambios pueden estar relacionados con la urbanización y medidas de gestión del río como la regulación de caudales para riego, el desarrollo del parque fluvial y el incremento de la vegetación ribereña para estabilizar el río y promover el uso recreativo como un corredor verde.

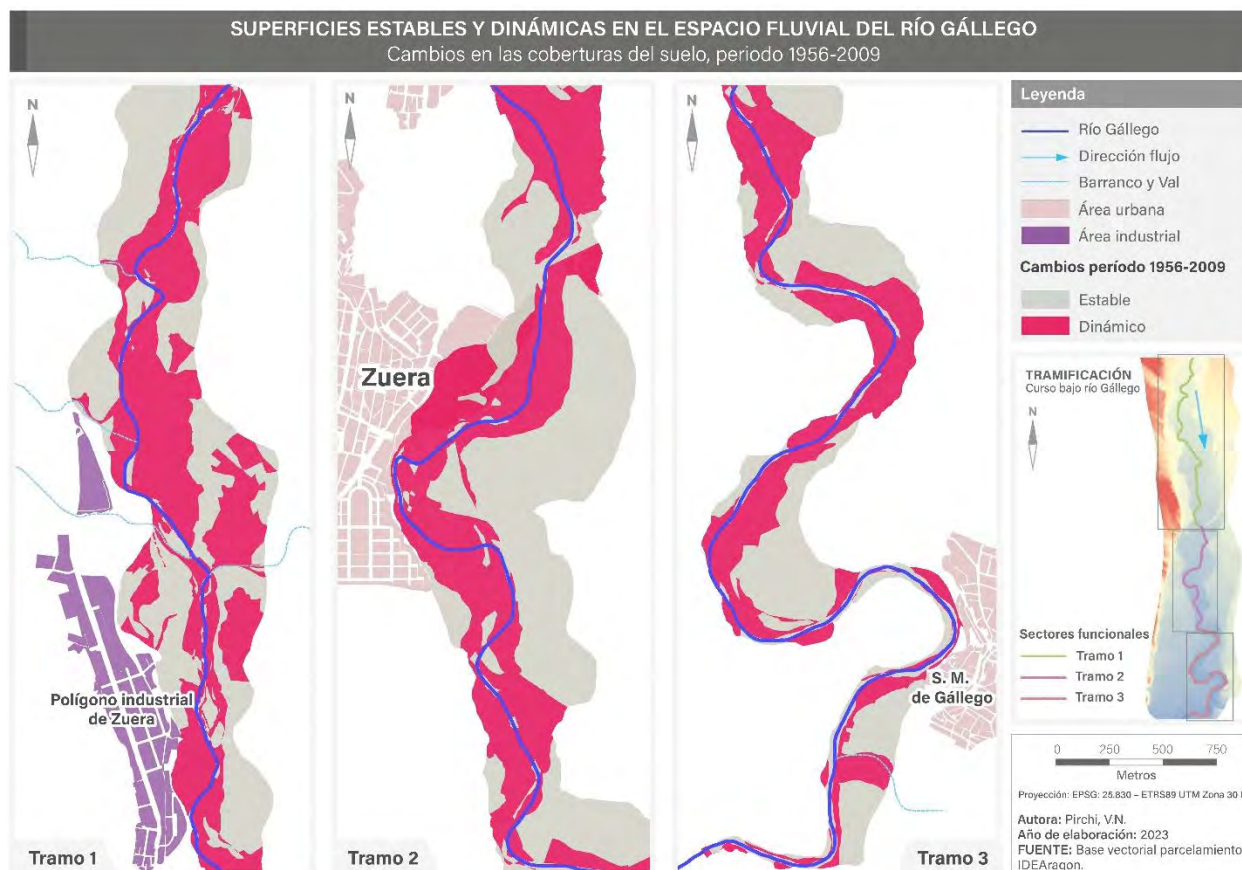


Figura 19. Superficies dinámicas y estables, periodo 1956-2009. Elaboración propia.

- **Periodo fluvial 2009-2021 (94% estable, 6% dinámico)**

En este último periodo la gran mayoría de las áreas se consideran estables (94%), lo que indica una disminución significativa en la dinámica de las coberturas del espacio fluvial. Solo 52,97 hectáreas han experimentado cambios en 12 años, equivalente al 6%. La estabilidad se observa en 818,71 hectáreas (Figura 20), lo que podría indicar que gran parte de la zona está protegida o destinada a usos que no implican cambios importantes en su extensión como son las áreas de conservación declaradas como corredores verdes fluviales, Lugares de Interés Comunitario (LIC), parques periurbanos como el parque fluvial en Zuera, usos del suelo agrícola o zonas urbanas. Sin embargo, los cambios dinámicos fueron percibidos principalmente en el cauce del río, evidenciados por las barras y láminas de agua que fluctúan debido a variaciones en los caudales, así como en algunos usos del suelo que han evolucionado hacia áreas degradadas. A pesar de que la superficie dinámica es menor en hectáreas, es posible que estas áreas experimenten cambios más significativos en términos de dinámica fluvial y usos del suelo, lo que podría incluir el crecimiento urbano o cambios en la vegetación, tanto en las riberas como en las barras de sedimentos.

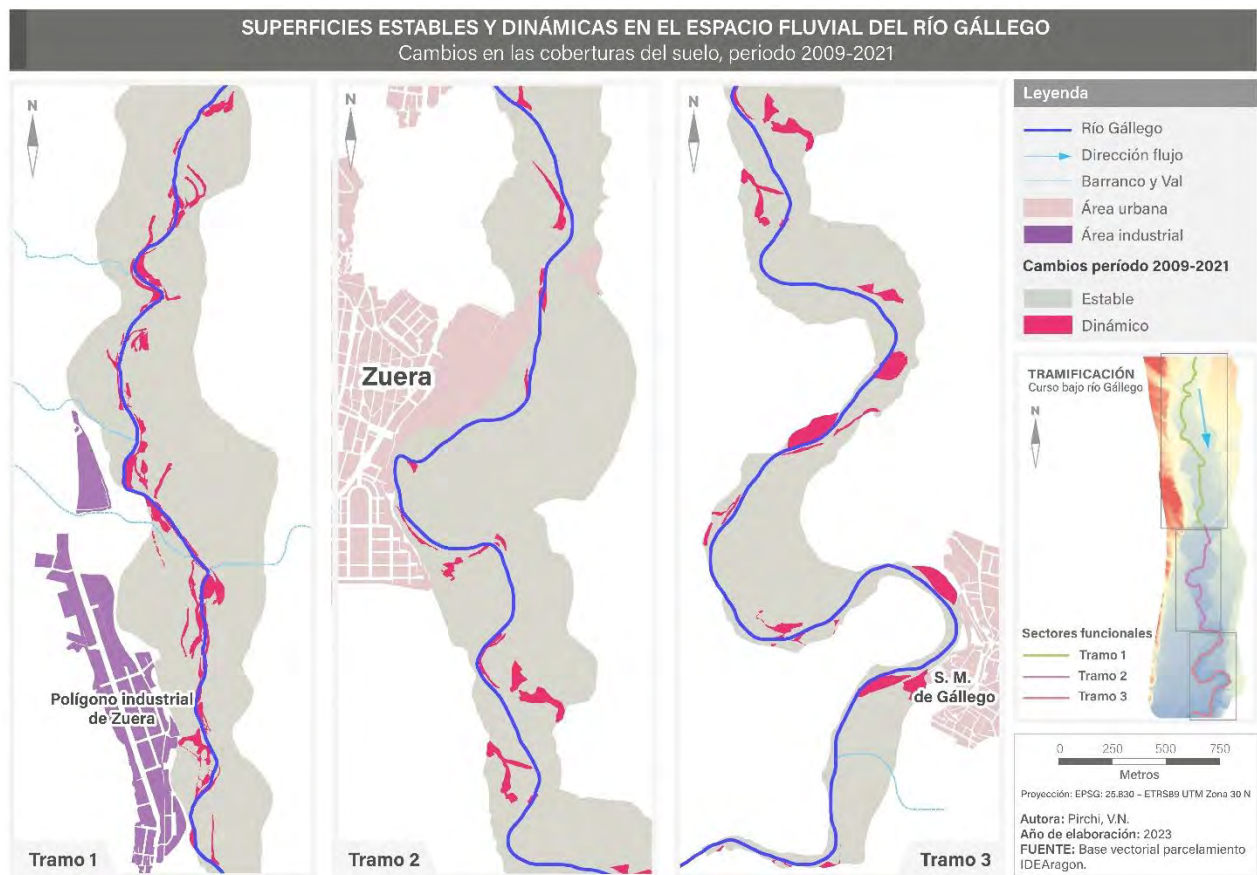


Figura 20. Superficies dinámicas y estables, periodo 2009-2021. Elaboración propia.

4.3. Diagnóstico de la situación hidrogeomorfológica

4.3.1. Comportamiento hidrológico

La intervención humana en el flujo de agua del río Gállego es notable. En su curso alto se han establecido embalses para la producción de energía hidroeléctrica y, a medida que avanzamos río abajo, el número de los embalses aumenta, a la vez que su utilidad cambia tanto para riego como para consumo humano, como es el caso de Ardisa y su derivación al embalse de Sotonera. Además de los embalses, se ha establecido un complejo sistema de canales y acequias que desvían, y en algunos casos, devuelven parte del caudal del río en distintos puntos de su curso (Del Valle et al., 2005). Esto significa que los datos de caudal obtenidos de las estaciones de aforo no reflejan la dinámica natural del río, sino que están fuertemente influenciados por la presencia de embalses y sistemas de riego. Por lo dicho, es importante tener en cuenta que el comportamiento real del río difiere de lo que se espera según las condiciones naturales de la cuenca.

El análisis del comportamiento hidrológico se centra en el estudio de 4 estaciones de aforo (Figura 21): estación 9123 (Anzánigo), la estación 9059 (Santa Eulalia) y la estación 9012 (Ardisa) y la estación 9209 (Zuera), esta última ubicada en la zona del tramo de estudio. Las variables analizadas han sido caudales estacionales máximos, mínimos y medios trimestrales.

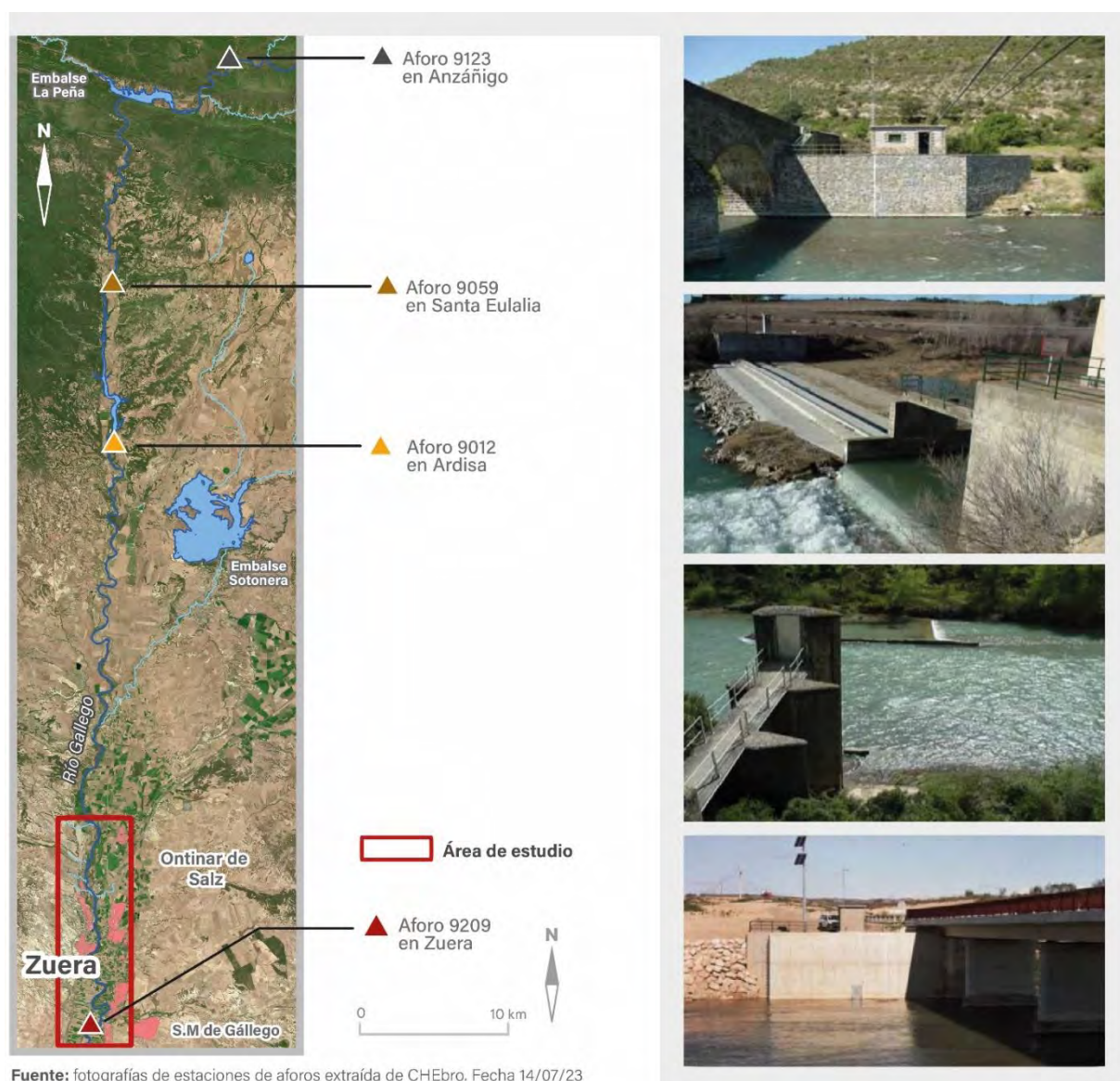


Figura 21. Ubicación de las estaciones de aforo analizadas. Elaboración propia.

A pesar de que no se ha contado con información histórica detallada sobre los caudales en el tramo monitoreado, se tuvo acceso a los datos de caudales de las estaciones de aforo que se encuentran más cercanas a la zona de estudio. Después de analizar estos datos se revela un patrón de caudal regulado. Las estaciones de aforo de Anzánigo y Santa Eulalia registraron los caudales más altos debido a su ubicación en el tramo medio, donde se recogen los caudales iniciales incluyendo a los principales afluentes. A partir de Ardisa se observan los caudales más bajos a lo largo de los años debido al fuerte impacto de las regulaciones y desvíos para el riego. Por otro lado, la estación Zuera, la penúltima de las estaciones de aforo en la cuenca del Gállego, inicio sus registros en el año 2005 y la comparación con las otras estaciones no es muy representativa. Sin embargo, esta estación se caracteriza por tener caudales relativamente altos y fuertemente regulados, ya que conserva y mantiene agua para dos canales de riego aguas abajo, lo que también afecta significativamente su naturalidad. Ya cerca de la desembocadura en el Ebro hay una última estación de aforo, la de Zaragoza, que ha funcionado de forma muy deficiente en las dos últimas décadas, por lo que ha sido descartada para su estudio.

Los registros hidrológicos reunidos en la tabla 11 de cada estación de aforo (Indroea) se analizan según el año hidrológico iniciado en el mes de octubre y finalizado en el mes de septiembre. Los caudales estacionales máximos, mínimos y trimestrales se tomaron de la siguiente manera: en el mes estacional 1 (oct-nov-dic) en el mes estacional 2 (ene-feb-mar) en el mes estacional 3 (abr-may-jun) y en el mes estacional 4 (jul-ago-sep). A continuación se detalla el comportamiento del caudal por estación de aforo mencionando los promedios históricos de la serie y la media estacional de los caudales medios diarios (qci), máximos y mínimos mensuales y trimestrales.

Tabla 11. Promedios de caudales estacionales según el año hidrológico de los aforos analizados.

Estación de aforo	Indroea	Año Hidrológico	Mes estacional	Promedios de caudales (m³/seg)		
				Qci máx. mensual	Qci mín. mensual	Qci trimestral
Anzánigo	9123	1949 a 2019	1	67,9	10,1	22,6
			2	65,4	14,4	27,2
			3	78,2	20,1	37,4
			4	34,6	9,5	17,0
Santa Eulalia	9059	1944 a 2019	1	67,7	12,2	23,1
			2	81,1	17,0	31,6
			3	85,5	21,5	38,4
			4	34,0	13,2	18,0
Ardisa	9012	1912 a 2019	1	71,6	6,1	17,9
			2	84,0	8,5	24,6
			3	85,5	9,0	27,4
			4	59,5	6,7	12,8
Zuera	9209	2005-2019	1	44,0	5,0	10,4
			2	56,9	10,8	22,3
			3	72,6	11,6	27,0
			4	14,8	9,5	11,1

Fuente. Datos hidrológicos otorgados por CEDEX (2023).

Estación Anzánigo

El río Gállego en Anzánigo, para la serie de datos utilizada, muestra una marcada variación estacional en sus caudales. Durante los meses de primavera los caudales experimentan un aumento significativo. La media histórica del caudal se sitúa en 61,5 m³/s mientras que la media estacional en primavera alcanza los 78,2 m³/s (Anexo IV-Figura 4.2). Además, las líneas de tendencias indican una

pendiente moderada, lo que sugiere una regulación efectiva de los caudales, especialmente durante la época de deshielo. Se observan picos máximos mensuales de 746 m³/s en octubre de 1960 y de 597 m³/s en junio de 1978.

En contraste, durante la estación de estiaje en los meses de julio, agosto y septiembre se observa una significativa disminución en los caudales, marcada por los valores medios máximos más bajos registrados. La media histórica de caudal se mantiene en 61,5 m³/s mientras que la media estacional en verano desciende notablemente a 34,6 m³/s (Anexo IV, figura 4.3). Esta pronunciada disminución en los caudales durante el verano se refleja en las líneas de tendencia, que presentan una pendiente negativa más acentuada. Este patrón sugiere una regulación deficiente de los caudales en esta época del año, posiblemente influenciada por una disminución de las lluvias y una mayor extracción de agua para el sistema de riego y consumo humano, factores que contribuyen a la reducción de los caudales durante los meses de julio, agosto y setiembre.

En cuanto a los caudales mínimos se han analizado de manera similar a los caudales máximos y se confirma que, durante los meses de abril, mayo y junio, se registra un aumento en los mismos, destacándose por sus valores medios máximos. La media histórica de caudal se mantiene en 13,5 m³/s, mientras que la media estacional en primavera asciende a 20,1 m³/s (Anexo IV, figura 4.6). Asimismo, las líneas de tendencia de abril y mayo presentan una pendiente positiva, lo que sugiere una efectiva regulación de los caudales, especialmente al comienzo de la época de deshielo. Por otro lado, en el mes de junio se observa una marcada pendiente negativa debido al aumento de extracciones de agua.

Adicionalmente, al examinar detalladamente los gráficos resultantes (Anexo IV, figura 4.9 a 4.12) se puede observar que los caudales medios mensuales por trimestre y estación muestran una variabilidad significativa. Por ejemplo, la media del caudal histórico es de 26,2 m³/s aumentando a 27,2 m³/s en la estación invernal, 37,4 m³/s en primavera, 17 m³/s en verano y 22,6 m³/s en otoño. Además, es evidente que entre 1949 y 1985 se registraron 42 ocasiones con caudales que superaron los 100 m³/s, mientras que desde 1985 hasta 2020 solo se produjeron 29 registros, lo que refleja una disminución en el caudal del río a lo largo de los años. También para el Qci mínimo entre 1949 y 1985 se registraron 33 momentos con caudales inferiores a los 50 m³/s, mientras que desde 1985 hasta 2020 solo se produjeron 43 registros, repitiendo la tendencia a la baja.

Estación Santa Eulalia

El río Gállego en Santa Eulalia muestra un aumento en la media histórica de caudal, que se sitúa en 67,1 m³/s, en comparación con los 61,5 m³/s de Anzánigo, mientras que la media estacional en primavera alcanza los 85,5 m³/s en comparación con los 78,2 m³/s (Anexo V, figura 5.2). Además las líneas de tendencia indican una pendiente más moderada, lo que sugiere una regulación efectiva de los caudales, especialmente durante la época de deshielo. Se observan picos máximos de 736 m³/s en junio de 1978, 506 m³/s en junio de 1959 y 524 m³/s en diciembre de 1997.

A diferencia de Anzánigo, la temporada de estiaje en Santa Eulalia abarca los meses de julio a diciembre y se observa que la media estacional en verano es de 13,2 m³/s, y de 12,2 m³/s en la estación de otoño (Anexo V, figura 5.3). Esta pronunciada disminución en los caudales durante el verano se refleja en las líneas de tendencia que presentan una pendiente negativa más acentuada. Este patrón nuevamente sugiere una regulación deficiente de los caudales en esta época del año, posiblemente influenciada por una disminución de las lluvias y una mayor extracción de agua para el sistema de riego y consumo humano, factores que contribuyen a la reducción de los caudales durante los meses de verano.

En Santa Eulalia la media histórica de caudal mínimo es 15,9 m³/s y una media estacional en primavera de 21,5 m³/s (Anexo V, figura 5.6). Estos valores muestran una diferencia mínima en comparación con los de Anzánigo. Además las líneas de tendencia de abril y mayo presentan una pendiente positiva, lo que sugiere una efectiva regulación de los caudales, en especial al comienzo de la época de deshielo. Por otro lado, en junio se observa una leve pendiente negativa que se infiere puede

deberse al aumento de extracciones de agua. Asimismo, al examinar detalladamente los gráficos de caudales medios (Anexo V, figuras 5.9 a 5.12) se puede observar que los caudales medios mensuales por trimestre y estación del año muestran una variabilidad significativa. Por ejemplo, la media del caudal histórico es de 27,8 m³/s aumentando a 31,6 m³/s en la estación invernal, 38,4 m³/s en primavera, 18 m³/s en verano y 23,1 m³/s en otoño. Además es evidente que entre 1949 y 1985 se registraron 58 ocasiones con caudales que superaron los 100 m³/s, mientras que desde 1985 hasta 2020, solo se produjeron 22 registros, lo que refleja una disminución en el caudal del río a lo largo de los años. Para el Qci mínimo, entre 1949 y 1985 se registraron 33 ocasiones con caudales inferiores a los 50 m³/s, mientras que desde 1985 hasta 2020, solo se produjeron 36 registros.

Estación Ardisa

El río Gállego en Ardisa tiene una media histórica en caudales máximos de 72,7 m³/s, la más alta comparativamente con los otros aforos. La media estacional en primavera alcanza los 85,5 m³/s, (Anexo VI, figura 6.2). Las líneas de tendencia indican una pendiente negativa más acentuada, sugiriendo una regulación ineficiente de los caudales debido a la derivación de caudal a Sotonera para la demanda creciente de regadíos. Se observan picos máximos de 1000 m³/s seguidos de otros picos como lo indica la tabla 12.

Tabla 12. Registro de picos máximos de caudales en Ardisa

Indroea	Picos máximos	Fecha de registro
9012	1000 m ³ /s	Septiembre de 1948
	971 m ³ /s	Junio de 1978
	755 m ³ /s	Noviembre de 1966
	624 m ³ /s	Junio de 1959
	592 m ³ /s	Diciembre de 1997
	541 m ³ /s	Marzo de 1946
	529 m ³ /s	Junio de 1918
	498 m ³ /s	Febrero de 1918

Fuente: datos hidrológicos otorgados por CEDEX (2023).

La temporada de estiaje, que se desarrolla durante los meses de verano muestra una media estacional de 59,9 m³/s (Anexo VI, figura 6.7). La marcada disminución en los caudales durante el verano entre los años 1989 y 2004, se refleja en las líneas de tendencias con una pendiente negativa acentuada, cayendo por debajo de la línea cero de la abscisa. La década de los 90 se caracterizó por una notable sequía en términos generales en la cuenca del Ebro (Mestre y Moreno, 2009), lo que plantea la posibilidad de que se incrementara el suministro de agua destinado a fines de riego. Este patrón sugiere una regulación deficiente del recurso hídrico resultado de la combinación de las condiciones secas previamente mencionadas y la influencia de la derivación de caudal hacia Sotonera, tanto para fines de riego como para el consumo humano. Estos factores contribuyen a la disminución de los caudales durante el periodo comprendido entre los meses de julio a septiembre.

En cuanto a los caudales mínimos, se observa una media histórica de 7,7 m³/s y una media estacional en primavera de 9,0 m³/s (Anexo VI, figura 6.6). Estos valores son significativamente inferiores a los otros aforos presentados. Las líneas de tendencia presentan una pendiente positiva, posiblemente influenciada por errores de medición. Al analizar detenidamente los gráficos de caudales medios mensuales (Anexo VI, figuras 6.9 a 6.12) se observa una notable variabilidad hidrológica en los caudales medios mensuales por trimestre estacional. Por ejemplo, la media del caudal histórico es de 20,8 m³/s aumentando a 27,4 m³/s en primavera, 24,6 m³/s en invierno, 12,8 m³/s en verano y 17,9 m³/s en otoño. Asimismo, entre 1949 y 1985 se registraron 62 momentos con caudales que superaron los 100 m³/s, mientras que desde 1985 hasta 2020 se produjeron 21 registros. Para los Qci mínimos, entre 1949 y 1985 se registraron 87 ocasiones con caudales inferiores a los 50 m³/s, mientras que

desde 1985 hasta 2020 se produjeron 101 registros. Se debe tener en cuenta que esta disminución podría estar influenciada por errores de medición.

Estación Zuera

El río Gállego en Zuera muestra una media histórica de caudales de 47,1 m³/s, mientras que la media estacional en primavera se eleva a 72,6 m³/s (Anexo VII, figura 7.2). Las líneas de tendencia muestran una pendiente positiva moderada, sugiriendo una regulación efectiva de los caudales junto con aportes menores posiblemente del barranco de la Violada. Se destaca un pico máximo de 486 m³/s registrado en octubre de 2012, coincidiendo con un año en el que se documentaron efectos en Zuera como resultado de la crecida. Es importante recordar que el registro de datos comenzó en 2006 y no cuenta con una cantidad de registro como los otros aforos, lo que limita el análisis comparativo.

La temporada de estiaje se manifiesta en los meses de julio, agosto y septiembre con una media estacional de verano de 14,8 m³/s (Anexo VII, figura 7.7). La disminución de los caudales no se refleja en las líneas de tendencia, las cuales presentan una pendiente estable y/o positiva. En cuanto a los caudales mínimos, se observa una media histórica de 9,3 m³/s y una media estacional en primavera de 11,6 m³/s (Anexo VII, figura 7.6). Las líneas de tendencia en primavera presentan una pendiente positiva que sugiere una regulación efectiva de los caudales.

4.3.2. Evolución de la sinuosidad del cauce

▪ Diferenciación de tramos

Para llevar a cabo un estudio más detallado y facilitar la posterior aplicación de los indicadores de calidad, el curso del río Gállego se ha dividido en 3 sectores funcionales (Figura 1). El criterio de diferenciación entre tramos se basa en aspectos hidrogeomorfológicos, con un enfoque en la continuidad funcional del río para asegurar coherencia con el índice de calidad hidrogeomorfológica. En este sentido se han establecido diferenciaciones entre los tramos en puntos donde se observan alteraciones en la continuidad longitudinal del curso, que son atribuidos a presiones antropogénicas (Tabla 13), así como en áreas donde se producen cambios geomorfológicos en las características y disposición de las barras de sedimentos debido a la presencia de barreras que obstruyen su movilidad. Estos cambios morfológicos tienen un impacto en la sinuosidad del río, que es un indicador importante para evaluar la calidad hidrogeomorfológica. El índice de sinuosidad (IS) se presenta como una herramienta para evaluación de la calidad hidrogeomorfológica del río, ya que refleja su movilidad y la morfología.

Tabla 13. Presiones antropogénicas identificadas en terreno.

Sectores funcionales	Nombre	Longitud (metros)	Elementos de alteración de continuidad fluvial *				
			Azud	Puentes	Acequia	Dragado	Defensas
Tramo 1	Ontinar de Salz	6.109	1	1	2	1 Cambio en talud	1
Tramo 2	Zuera	4.746	1 ornamental	1	2 ramificada	---	1 muro de contención
Tramo 3	S. M. de Gállego	6.267	1	1	2 ramificada	---	1 muro dañado

* La cantidad de presiones identificadas en el terreno se basa en observaciones realizadas, reconociendo la posibilidad de elementos no detectados.

Elaboración propia.

En los resultados de este parámetro, como se detallan en la tabla 14, se han identificado tres tramos a lo largo del río Gállego, cada uno caracterizado por diferentes cambios morfológicos y, por ende, diferentes valores de sinuosidad en los años de estudio.

Tabla 14. Índice de sinuosidad del cauce funcional del Gállego

Sector funcional	Cambios morfológicos	Índice de sinuosidad				Periodo 1927-2021
		1927	1956	2009	2021	
Tramo 1	Braided a wandering	1,23	1,23	1,21	▲ 1,25	1,23
Tramo 2	Wandering a meandering	1,36	▲ 1,51	1,34	1,35	1,40
Tramo 3	Meandering	2,21	2,16	2,16	▲ 2,19	2,18
Total tramo		1,60	1,63	1,57	1,60	1,60

Los signos indican incremento (▲) y reducción (▼) de sinuosidad. Elaboración propia.

▪ *Tramo 1. Trenzado a divagante*

El sector funcional 1 presenta una longitud de 6.109 metros y una sinuosidad promedio baja de 1,23. El sector se caracteriza por un amplio valle con presencia de terrazas aluviales escalonadas y llanuras de inundación de elevado aporte sedimentario ocupado por cultivos de regadío (Anexo I, Figuras 1.1 y 1.2). La pendiente media del valle es del 0,19% y en esta zona de terrazas el río menos encajado atraviesa materiales yesíferos y margo yesíferos (Sánchez Navarro, Dir., 2004).

La ribera izquierda se caracteriza por su densa vegetación, en algunos casos impenetrable y con escasa diversidad de especies: sauce (*Salix eleagnus* y *Salix alba*), chopo (*Populus nigra*), álamo (*Populus alba*), taray (*Tamarix gallica*), zarza (*Rubus ulmifolius*) y carrizo (*Phragmites* sp.). En la margen derecha la variedad de especies se limita prácticamente a dos: taray (*Tamarix gallica*) y carrizo (*Phragmites* sp.). Los ejemplares de taray se localizan puntualmente entre el cauce menor y una franja muy densa de carrizo que oscila entre 50 y 5 metros de distancia al mismo. El suelo está cubierto de herbáceas (Sánchez Navarro, Dir., 2004).

Entre 1927 y 1956 este tramo se caracterizaba por una sinuosidad constante de 1,23, lo que indicaba un patrón morfológico trenzado o *braided*. Estos valores de la sinuosidad podrían asociarse a un río que en ese momento no presentaba una influencia antrópica intensa. No obstante, para el año 2009 la sinuosidad decreció a 1,21 sugiriendo una mayor tendencia hacia la divagación del cauce. Esta modificación en el trazado está vinculada a la reducción del espacio fluvial ocasionada por actividades antropogénicas (Figura 22). Hacia el año 2021 la sinuosidad experimentó un aumento a 1,25 lo que indica una tendencia hacia una morfología más sinuosa y de mayor divagación (*wandering*).

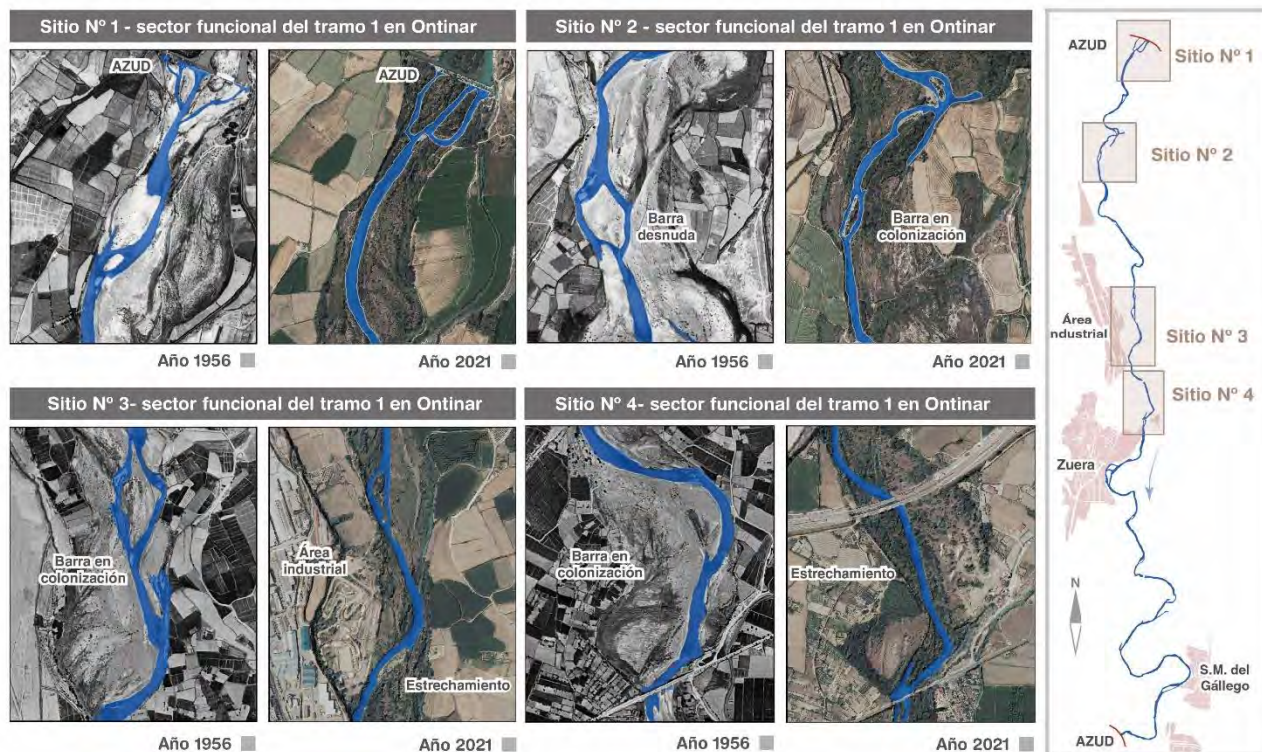


Figura 22. Cambios en el trazado del cauce, sector funcional tramo 1. Elaboración propia.

▪ *Tramo 2. Divagante a meandriforme*

El sector funcional 2 presenta una longitud de 4.746 metros y una sinuosidad promedio alta de 1,40. En este sector el río discurre a través de potentes depósitos aluviales y terrazas encajadas, existiendo un último afloramiento de yesos junto a la localidad de Zuera, en la margen derecha del curso fluvial (Anexo I, Figuras 1.3 y 1.4). La pendiente media es superior a la anterior, del 0,28%, y en esta zona se registran diversos choques del cauce menor con los escarpes de terraza, especialmente en la margen derecha donde se ubica la villa de Zuera, en los que el socavamiento basal es activo (Sánchez Navarro, Dir., 2004). La ribera izquierda se caracteriza por su densa vegetación, en algunos casos impenetrable y, como en el tramo anterior, con escasa diversidad de especies: sauce (*Salix eleagnus* y *Salix alba*), chopo (*Populus nigra*), álamo (*Populus alba*), taray (*Tamarix gallica*), zarza (*Rubus ulmifolius*) y carrizo (*Phragmites* sp.). En la margen derecha se desarrolla el taray (*Tamarix gallica*) y carrizo (*Phragmites* sp.) y una serie de plantaciones de pino carrasco (*Pinus halepensis*) con incipiente colonización hacia el río. Este tramo ha mostrado una tendencia de aumento en la sinuosidad a lo largo del periodo.

En el año 1927 la sinuosidad era de 1,36 lo que sugiere una morfología divagante (*wandering*). En 1956 la sinuosidad aumentó indicando una mayor divagación; posiblemente este cambio está relacionado con las actividades humanas que alteraron la dinámica del río. Sin embargo, en los años 2009 y 2021 la sinuosidad disminuyó a 1,34 y 1,35, respectivamente, lo que podría estar relacionado con la transición hacia una morfología de cauce más simplificada (Figura 23). Se ha comprobado en las cartografías diacrónicas de coberturas la reducción del espacio fluvial debido a la antropización, lo que disminuye la capacidad del río para desarrollar una morfología más meandriforme.

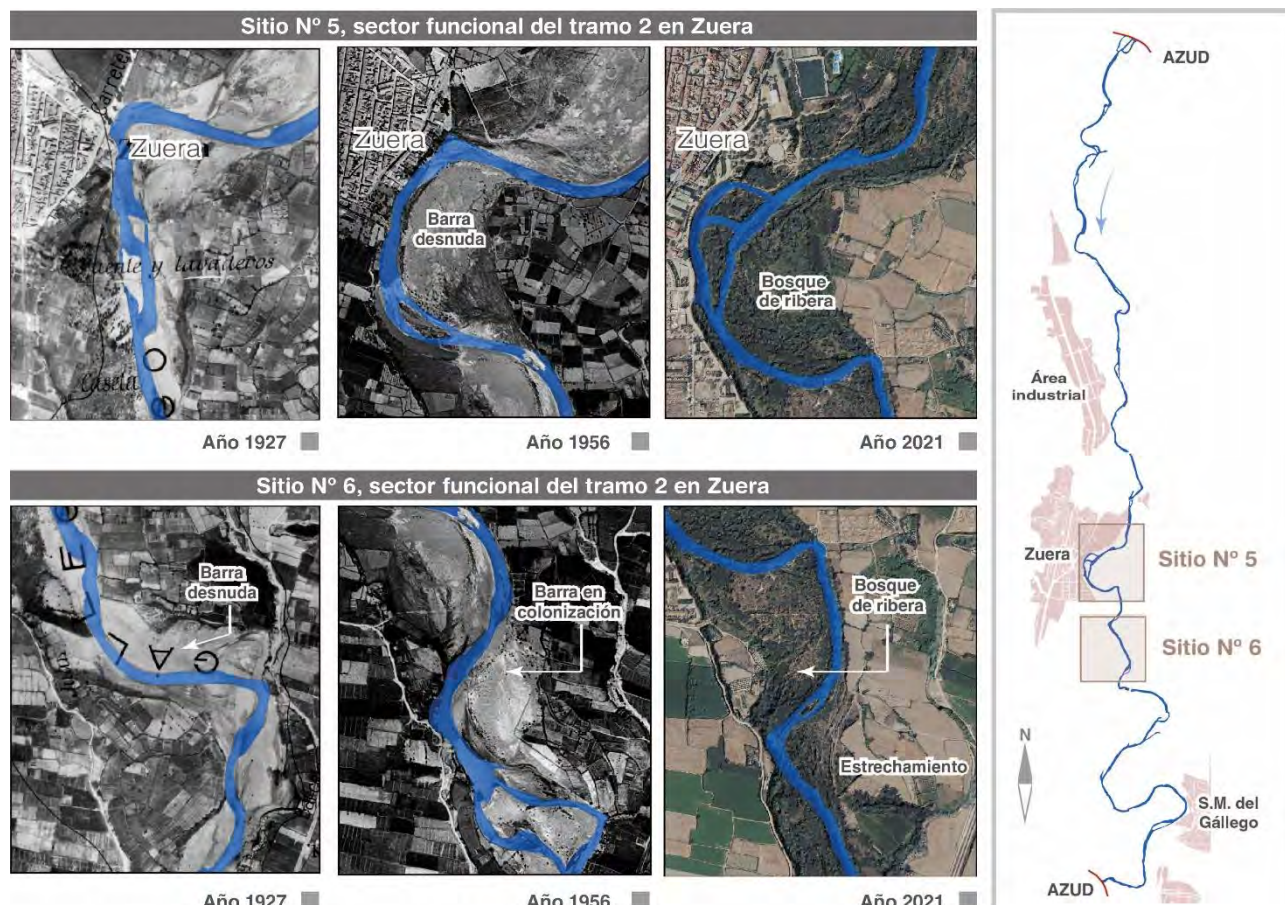


Figura 23. Cambios en el trazado del cauce, sector funcional tramo 2. Elaboración propia.

- *Tramo 3. Meandriforme a encajado*

El sector funcional 3 presenta una longitud de 6.267 metros y una sinuosidad promedio de 2,18 alcanzando el valor más elevado de todo el curso del Gállego. El sector se caracteriza por un amplio valle de laderas controladas estructuralmente, con una llanura de inundación de limitado desarrollo por moderado encajamiento. El perfil topográfico actual marca un cauce encajado entre paredes escarpadas (Anexo I, figuras 1.5 y 1.6). La pendiente media es inferior a la anterior, en concreto del 0,21 % (Sánchez Navarro, Dir., 2004) Además es el tramo más estable en cuanto a sinuosidad y de mayor estrechez en el corredor ribereño, lo cual se debe al confinamiento encontrado. En la estructura de la ribera izquierda se diferencian perfectamente dos bandas paralelas. La más próxima al río está compuesta por carrizo (*Phragmites* sp.), formando una banda impenetrable de 8 metros de ancho por 2 de alto. A continuación aparece una hilera más o menos limitada por los campos de cultivos adyacentes compuesta por chopo (*Populus nigra*) y álamo (*Populus alba*), con un sotobosque denso de zarza (*Rubus ulmifolius*). De cualquier forma, la ribera no supera los 20 metros de anchura (las dos bandas juntas) debido a la presencia de los campos de cultivo. En margen derecha en la zona próxima al río la vegetación va colonizando progresivamente la barra existente. Juncos, chopos de muy poca altura y carrizos colonizan en este orden esta margen. Ejemplares más desarrollados de chopo y álamo junto con algún sauce (*Salix alba*) se localizan en el límite con el escarpe que comunica con los prados de cultivo contiguos. La anchura supera los 40 metros en este punto, pero está en función de la proximidad de los cultivos (Sánchez Navarro, Dir., 2004).

En 1927 y 1956 el tramo exhibe una morfología meandriforme, donde se observa un cauce con actividad fluvial y la presencia de barras aluviales de gravas. Estos rasgos indican un curso de agua que, en ese entonces, mantenía una dinámica saludable. Sin embargo, en la actualidad se ha notado un mayor grado de incisión en el río lo que ha llevado a una morfología encajada. La pérdida de barras

aluviales son indicativos de una mayor erosión y falta de aporte de sedimentos, procesos que son influenciados por el sistema de regulación al que está sometido el río.

Los cambios observados en la sinuosidad del río revelan la influencia directa de las actividades humanas en su entorno. Los datos obtenidos de su evolución indican una clara tendencia hacia una morfología más estable y un trazado del cauce menos divagante, caracterizada por un estrechamiento acelerado que ha conducido a una pérdida de movilidad fluvial en el curso activo del río en los años más actuales (Figura 24). Estos patrones coinciden con los identificados en otros afluentes del Ebro como el Aragón o el Cinca (Ibisate et al., 2013; Trullenque et al., 2022). La colonización vegetal en el lecho del río surge como un factor relevante en esta transformación. El arraigo de la vegetación en las orillas desempeña un papel directo en la estabilización del cauce activo, lo que conlleva una reducción de su movilidad (Corenblit et al., 2009; Liro, 2019). Sin embargo, es importante reconocer que esta disminución en la sinuosidad no puede atribuirse exclusivamente a la colonización vegetal. La presión antropogénica, evidente en la construcción de embalses, estructuras como azudes, acequias y puentes, el uso industrial y otras actividades humanas, ha impactado en la estructura y funcionamiento del río a lo largo del periodo analizado, siguiendo patrones similares a otros casos de ríos en zonas de transición montaña-llanura en Europa (García et al., 2021).

En consecuencia, estas acciones humanas han provocado alteraciones en la dinámica fluvial natural, limitando su capacidad de flujo libre y distorsionando su morfología natural. Esto, a su vez, ha generado efectos en el flujo de agua y sedimentos en el río Gállego, como también en el espacio disponible para su movilidad, el cual, se ha visto reducido (Ollero et al., 2015 c). Este cambio en la dinámica fluvial del río tiene efectos negativos en la salud general del río y en la biodiversidad que depende de él. Por ende, la conservación de la salud hidrogeomorfológica del Gállego se vuelve necesaria para proteger sus funciones ecológicas y sostener los servicios vitales que proporciona al ecosistema.

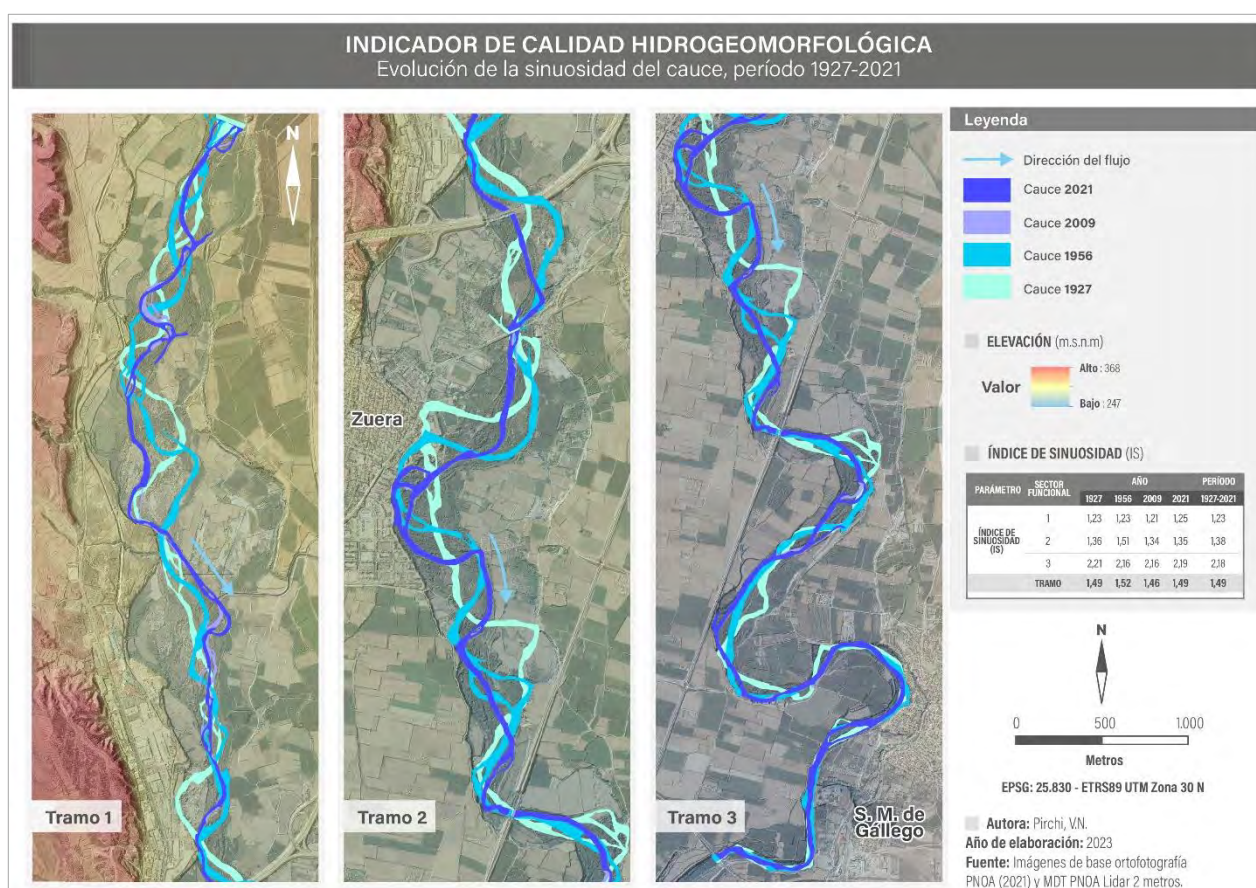


Figura 24. Evolución de la movilidad del cauce activo, periodo 1927-2021. Elaboración propia.

4.3.3. Densidad de barras fluviales

Las barras fluviales, formadas por acumulaciones de sedimentos, son elementos geomorfológicos presentes en el río Gállego que desempeñan un papel crucial. No solo son indicadores de la dinámica del río, sino también de su estado general. La cantidad y distribución de estas barras fluviales a lo largo del río, es decir, su densidad, están estrechamente ligadas al buen funcionamiento del sistema fluvial y la salud general del río, especialmente en relación a la calidad del caudal que transporta (Crosato y Mosselman, 2020). Su presencia es de suma importancia, ya que contribuyen al equilibrio natural de los ríos y desempeñan funciones de autorregulación del flujo hídrico, reduciendo tanto la energía asociada a inundaciones como la erosión del terreno circundante. Además son útiles como hábitats para una diversidad de especies acuáticas y terrestre, lo que promueve la biodiversidad y ofrece refugio y alimento para la fauna local (Gilvear et al., 2008; Gaeuman y Boyce, 2016). Otro aspecto relevante es su función como filtros naturales permitiendo que el agua se filtre de manera natural en el suelo y favorece a la recarga de los acuíferos subterráneos (Buffin-Bélanger et al., 2015).

En este estudio, se presenta una clasificación de las barras fluviales en tres categorías basadas en las diferentes etapas de su desarrollo en el tramo del río evaluado. También se ha examinado cómo estas barras se distribuyen en dos entornos específicos del espacio fluvial: el cauce funcional y el corredor ribereño (Tabla 15). Se analizan a continuación la evolución de las categorías de barras desnuda, en proceso de colonización y vegetadas, considerando su presencia en el cauce funcional como en las áreas adyacentes a las riberas. Las definiciones correspondientes a las categorías se detallaron en el capítulo de metodología, específicamente en el apartado 3.2.3.

Tabla 15. Clasificación de barras fluviales en el espacio fluvial.

Criterio	Categorías
Estado de desarrollo	1. Barras desnuda
	2. Barras en proceso de colonización
	3. Barras vegetadas
Distribución	1. Cauce funcional o activo
	2. Corredor ribereño

Elaboración propia.

En el tramo 1, se observa una disminución significativa en la superficie de barras desnuda en el cauce funcional a lo largo de los años (Figura 25). Desde 1927, cuando la cobertura era de 14,77 hectáreas, se registró una reducción drástica pasando a cubrir 0,39 hectáreas en el año 2021. Este cambio en las barras desnuda sugiere variaciones en la dinámica fluvial, posiblemente asociadas a una mayor actividad fluvial en el primer periodo 1927-1956, como así también a una intensificación de intervenciones humanas en los periodos fluviales intermedios (1956-2009). Por otro lado, las barras en proceso de colonización también mostraron una disminución, aunque menos marcada que la barra desnuda. La cobertura de estas barras era de 5,63 hectáreas en 1956 y descendió a 2,97 hectáreas en 2021, con fluctuaciones descendentes en el periodo intermedio. En contraste, las barras vegetadas presentaron una tendencia diferente. Su cobertura aumentó de 5,79 hectáreas en 2009 a 6,65 hectáreas en 2021, lo cual indica una mayor colonización y desarrollo vegetal a lo largo del tiempo y una mayor estabilidad en el cauce del río Gállego.

En el corredor ribereño (Figura 26) las tendencias de las barras desnuda muestran una importante reducción a lo largo de los años, pasando de 49,19 hectáreas en 1927 a 2,22 hectáreas en 2021. En cuanto a las barras en proceso de colonización, su cobertura era notable en 1956 (121,70 hectáreas). Entre 1956-2009, se observó un crecimiento continuo en la colonización vegetal de las barras, aunque a una escala menor, alcanzando una cobertura de 78,04 hectáreas para el año 2021. Este cambio en el corredor ribereño está asociado con la transformación de las áreas antes ocupadas por barras fluviales de sedimentos expuestos hacia la formación de los actuales bosques ribereños.

Los gráficos de barras representan modelos de regresión lineal correspondientes a cada tipo de barras fluviales, considerando su distribución tanto en el cauce funcional como en el corredor ribereño del tramo fluvial. Las ecuaciones de la línea y los coeficientes de determinación (r^2) proporcionan detalles sobre la relación y el ajuste entre estas variables.

▪ **Tendencias de barras en el cauce funcional del tramo 1**

En el cauce funcional del tramo 1, las áreas cubiertas por barra desnuda muestran una tendencia decreciente en su área ($-5,365x+21,472$) a lo largo del tiempo (Figura 25). Esto sugiere una disminución constante en su extensión espacial. El alto valor de r^2 (0,9011) sugiere que el modelo se ajusta bastante bien a los datos recopilados. Asimismo, para las barras en proceso de colonización, se observa una tendencia decreciente en su área, reflejada en la ecuación ($-1,3306x+8,349$), lo que señala una disminución en su área de cobertura. El valor extremadamente alto de r^2 (0,9944) indican un ajuste muy bueno del modelo a los datos observados. Por otro lado, en el caso de las barras vegetadas, la ecuación ($0,8523x+3,2362$) muestra una relación lineal positiva con un coeficiente de determinación r^2 de 1, indicando un crecimiento constante en el área de cobertura de estas barras en el periodo 2009-2021.

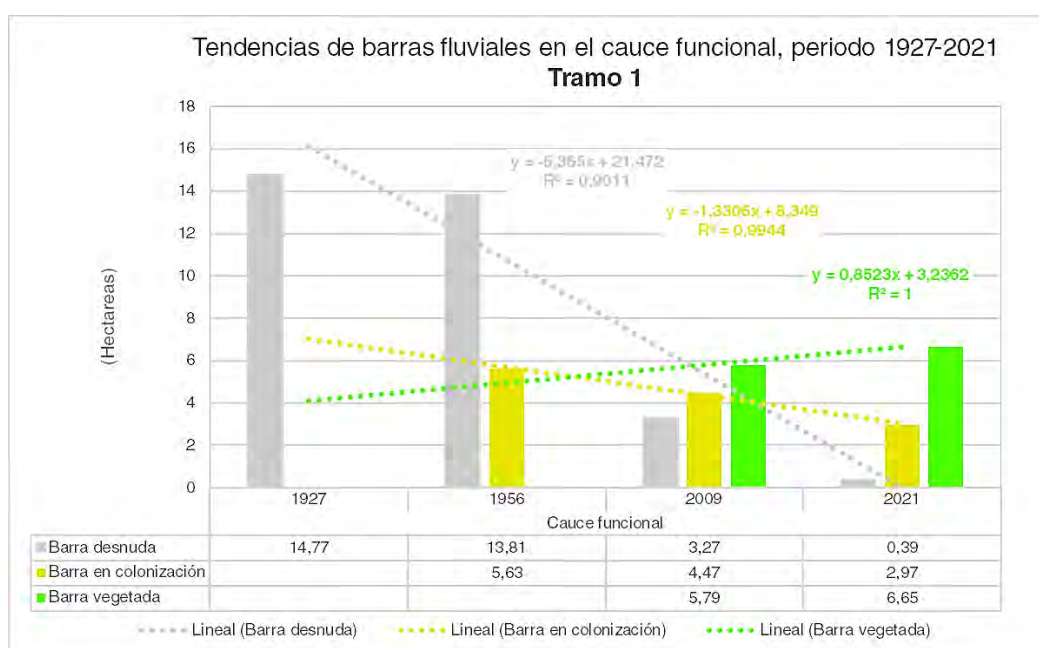


Figura 25. Tendencias de barras fluviales en tramo 1. Elaboración propia.

▪ **Tendencias de barras en el corredor ribereño del tramo 1**

En el corredor ribereño, las áreas cubiertas por barra desnuda muestran una marcada tendencia decreciente ($-15,865x+58,666$), lo que sugiere una disminución considerable en su extensión a lo largo del tiempo (Figura 26). El valor de r^2 (0,8738) indica un ajuste bastante bueno del modelo de regresión lineal. Por otro lado, las barras en proceso de colonización, presentan una ecuación que indica una tendencia negativa ($-6,0984x+104,33$), aunque el valor de r^2 (0,1279) sugiere que el modelo no se ajusta bien a los datos. Esto se explica por una mayor inestabilidad en esta variable, relacionada con la transformación de las barras fluviales en proceso de colonización hacia la formación de bosque de ribera en un espacio en desarrollo. Es importante tener en cuenta que las barras en colonización del periodo 1927-1956, exhiben una enorme cantidad de sedimentos expuestos; sin embargo, no se clasifican como barra desnuda debido a la presencia de incipiente desarrollo vegetal.

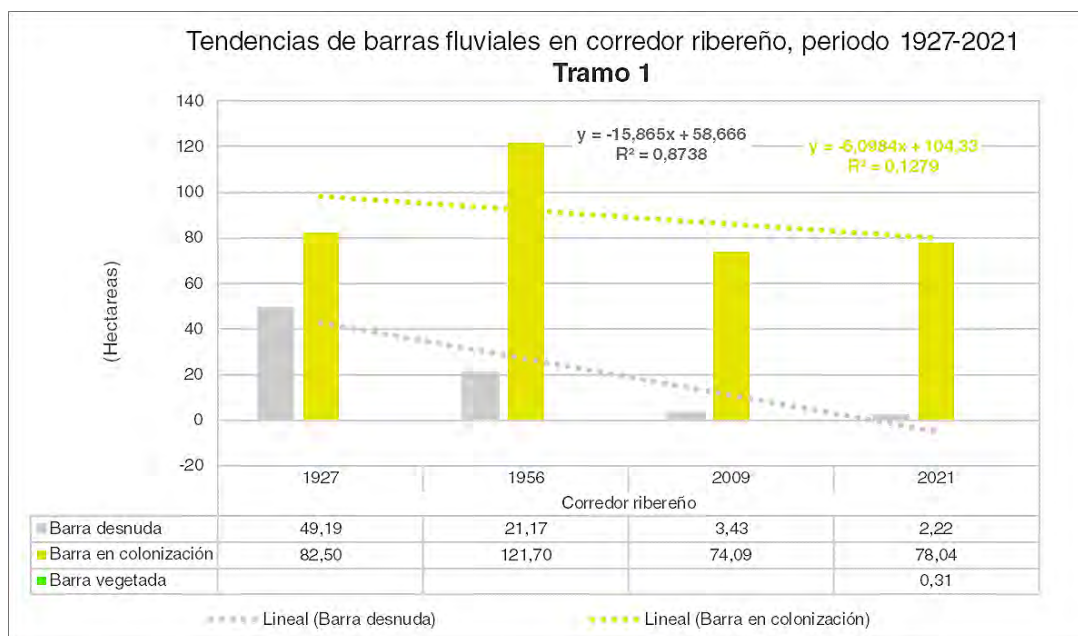


Figura 26. Tendencias de barras fluviales en tramo 1. Elaboración propia.

En el tramo 2 del río Gállego, los resultados revelan fluctuaciones en las distintas categorías de barras fluviales a lo largo del tiempo. En el año 1927, se ha identificado 2,75 hectáreas de barras desnuda en el cauce funcional (Figura 27), que han disminuido a 2,48 hectáreas en 1956, y aún más a 0,14 hectáreas en 2009, desapareciendo completamente en el año 2021. Esta ausencia de barras desnuda refleja cambios en la actividad sedimentaria del cauce del río e indica síntomas de estabilidad del cauce y pérdida de dinámica fluvial. En 1927, el cauce funcional exhibía una notable actividad fluvial, caracterizado por la presencia de barras aluviales extensas y una dinámica sedimentaria considerable. Sin embargo, con el transcurso del tiempo, estas áreas inicialmente desnudas y muy activas en términos de dinámica fluvial, han experimentado un proceso de colonización progresiva hasta ser completamente cubiertas por bosques ribereños, plantaciones y otras masas vegetales en la actualidad. Para evidenciar este cambio, en 1956 se ha observado 4,88 hectáreas de barras en proceso de colonización en el cauce funcional y 0,10 hectáreas de barras se han colonizado en el año 2009. Con respecto a las barras vegetadas, sigue el mismo patrón que las barras en proceso de colonización. En este caso se ha detectado 0,62 hectáreas en 1956, incrementándose a 2,70 hectáreas en 2009 quedando estabilizadas en el periodo actual.

En el corredor ribereño, en el año 1927 se ha registrado 24,67 hectáreas de barra desnuda, aumentando a 29,11 hectáreas en 1956 pero desaparecen en el año 2009 (Figura 28). En cuanto a las barras en proceso de colonización se ha identificado 33,65 hectáreas en 1927 y 10,43 hectáreas en 1956 pero no se registran procesos de colonización en los años recientes debido a que las riberas se encuentran totalmente estabilizadas.

▪ **Tendencias de barras en el cauce funcional del tramo 2**

En el cauce funcional, los modelos de tendencia lineal muestran relaciones específicas entre el tiempo (x) y el área cubierta por barras fluviales en las diferentes etapas de su desarrollo, como así lo indican las líneas de tendencias del gráfico de la figura 27. Para las barras desnuda se observa una disminución con el tiempo, lo cual se ve representado en la pendiente negativa (-1,3077).

Las barras en colonización, en cambio, parecen disminuir significativamente a lo largo del tiempo con una pendiente negativa más pronunciada (-4,7719), lo que indica un descenso progresivo en su área debido a que ya están colonizadas y estables. Por último, las barras vegetadas muestran una tendencia ligeramente creciente representada por una pendiente positiva (1,0632) aunque con una variabilidad evidenciada por el coeficiente de determinación ($r^2=0,7645$).

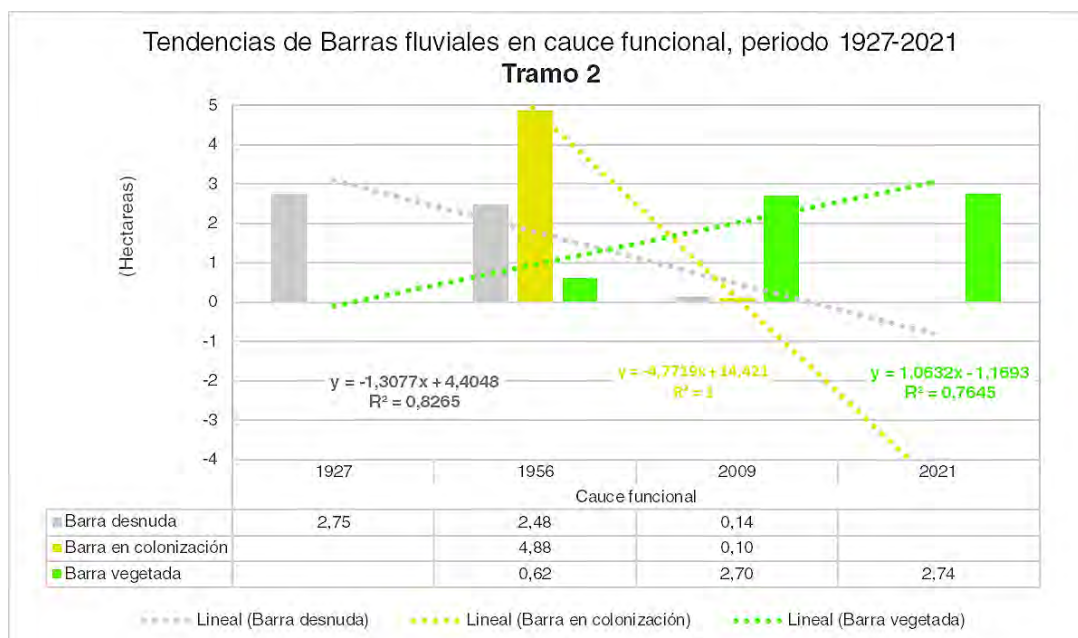


Figura 27. Tendencias de barras fluviales en tramo 2. Elaboración propia.

▪ ***Tendencias de barras en el corredor ribereño del tramo 2***

En el corredor ribereño, se evidencian patrones similares en la relación entre el tiempo y el área ocupada por las distintas barras fluviales (Figura 28). Las áreas de barra desnuda muestran una disminución marcada a lo largo del tiempo con una pendiente negativa considerable (-12,133). Por otro lado, las barras en proceso de colonización muestran una tendencia aún más pronunciada de disminución, representada por una pendiente más elevada (-23,227), lo que sugiere una reducción constante en su área. El alto coeficiente de determinación ($r^2=1$) indica un ajuste perfecto del modelo de regresión lineal para las barras en colonización asociada a una relación precisa y consistente con el tiempo.

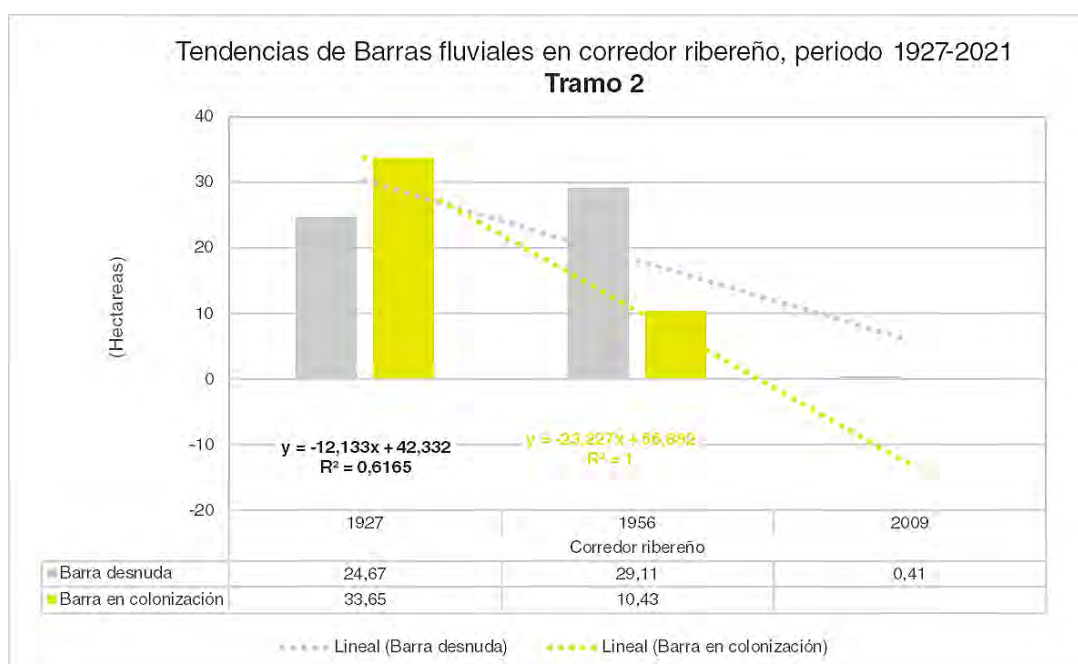


Figura 28. Tendencias de barras fluviales en tramo 2. Elaboración propia.

El tramo 3, evidencia fluctuaciones notables en las distintas categorías de barras en el cauce funcional a lo largo del tiempo. En el año 1927, se ha identificado que el área de barras desnuda era de 5,83 hectáreas aumentando a 10,25 hectáreas en 1956 (Figura 29). Sin embargo, en años posteriores, esta cobertura disminuye de manera considerable alcanzando 0,63 y 0,23 hectáreas respectivamente. Respecto a las barras en proceso de colonización los cambios son menores, registrando entre 2,28 y 2,31 hectáreas desde 1956 hasta 2009, pero descendieron a 0,82 hectáreas en el año 2021. La presencia de vegetación en las barras ha mostrado un patrón de variación mayor, el cual aumenta de 0,14 hectáreas en 1956 a 4,46 hectáreas en 2021. En el corredor ribereño, la superficie de barras desnuda decrece de 3,66 hectáreas en 1927 a 1,61 hectáreas en el año 2009, lo cual indica una reducción en la dinámica sedimentaria del río hasta el momento actual (Figura 30). La presencia de barras en proceso de colonización se reduce considerablemente de 21,13 hectáreas a 1,61 hectáreas. Por último, las barras vegetadas aumentaron en el año 2009 (1,22 hectáreas).

▪ **Tendencias de barras en el cauce funcional del tramo 3**

En el cauce funcional del tramo 3 (Figura 29), las tendencias temporales de las barras fluviales del río Gállego sugieren una reducción progresiva en la superficie cubierta de barras desnuda como lo indica la regresión lineal negativa ($y = -2,6425x + 10,843$, $r^2 = 0,515$). Por otro lado, las áreas de barras en colonización presentan una disminución menos pronunciada según se refleja en la ecuación ($y = -0,5494x + 3,0289$, $r^2 = 0,8793$), mientras que las áreas de barras vegetadas reflejan un aumento gradual ($y = 2,1612x - 4,1803$, $r^2 = 1$).

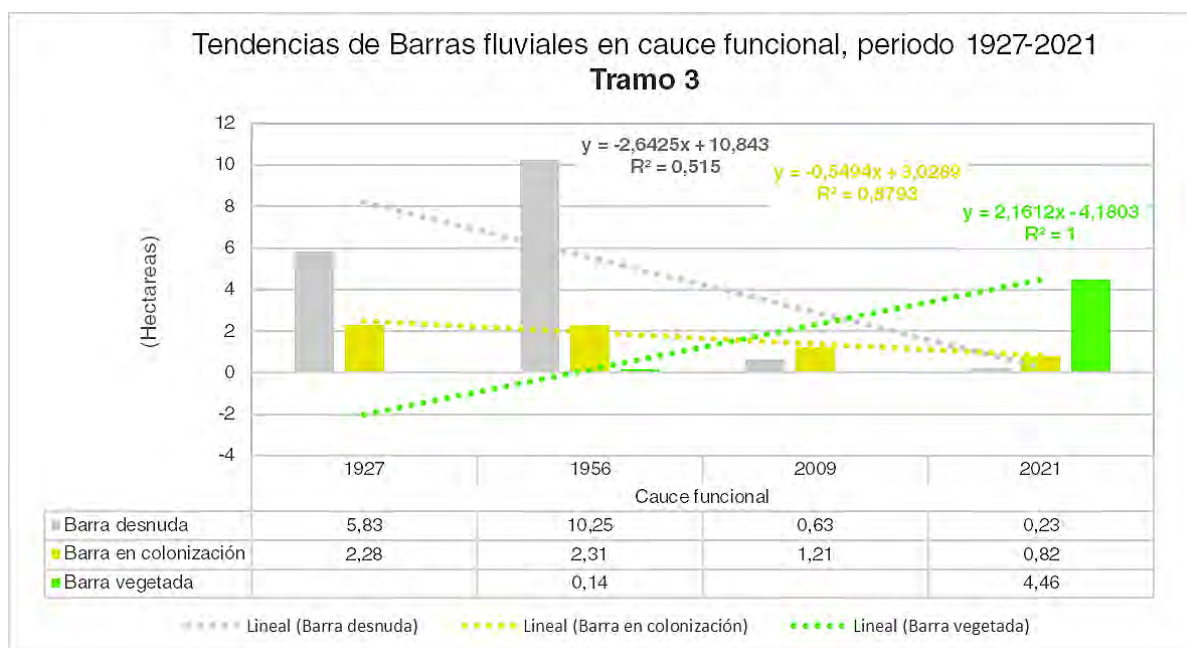


Figura 29. Tendencias de barras fluviales en tramo 3. Elaboración propia.

▪ **Tendencias de barras en el corredor ribereño del tramo 3**

En el tramo 3 durante el periodo 1927-2009 (Figura 30), se observa una tendencia decreciente en las áreas de barra desnuda distribuidas en el corredor ribereño ($y = -0,9519x + 4,6151$, $r^2 = 1$), mientras que las barras en proceso de colonización muestran una disminución con cierta variabilidad, como se refleja en la ecuación ($y = -9,759x + 32,503$, $r^2 = 0,9242$). Estos resultados indican cambios en la dinámica y composición de las barras a lo largo de los años en las diferentes áreas del río.

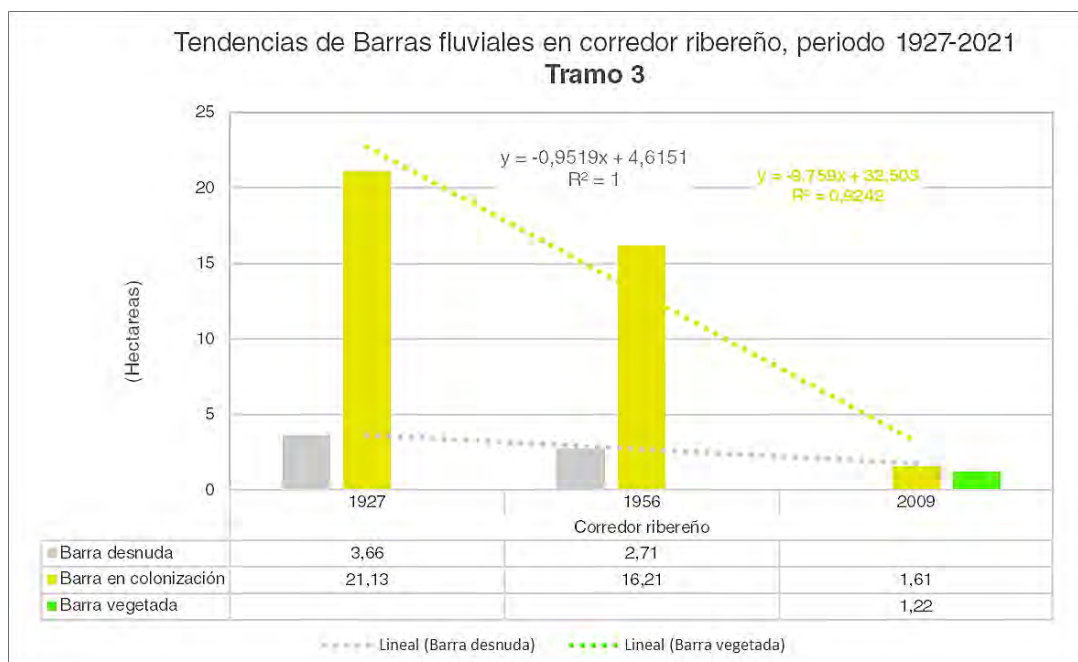


Figura 30. Tendencias de barras fluviales en tramo 3. Elaboración propia.

Las tendencias observadas en los tres tramos del río Gállego reflejan cambios bruscos en la distribución y extensión espacial de las barras fluviales a lo largo del tiempo, como resultado de diversos factores interrelacionados. La presión humana ejercida a través de la canalización del río y la implementación de infraestructuras hidráulicas, han influido notablemente en la presencia y distribución de barras fluviales, disminuyendo áreas previamente cubiertas por ellas. Además variaciones en la dinámica fluvial, como cambios en los patrones de flujo de agua debido a sistemas de riego o modificaciones en la disponibilidad de sedimentos son factores que han influido en la evolución de estas geoforma a lo largo del tiempo. La reducción de áreas de sedimentos expuestos en las barras es el resultado tanto de procesos naturales de sucesión ecológica como de intervenciones humanas, incluyendo la introducción gradual de especies vegetales que han ido colonizando áreas antes expuestas. Por otra parte, los esfuerzos de gestión fluvial y conservación en las últimas décadas posiblemente han contribuido al aumento de áreas vegetadas, aunque a expensas de otras categorías de barras fluviales. Esta compleja interacción entre factores humanos y naturales son las causantes de haber modelado las áreas de barras fluviales en el cauce funcional y el corredor ribereño durante 1927-2023.

▪ **Índice de Densidad de Barras Fluviales (IDBF)**

En el estudio de los ríos, comprender su dinámica es fundamental para evaluar su estado en términos de agua, sedimentos y su flujo a lo largo del territorio, aspectos críticos para la gestión adecuada de los recursos hídricos y la conservación del ecosistema fluvial (Ollero et al. 2007, 2009). En esta línea, el Índice de Densidad de Barras Fluviales (IDBF) surge como un indicador geomorfológico al exponer variaciones en la densidad de barras y al proporcionar información acerca de su evolución en el curso de un río.

Los resultados del índice IDBF, obtenidos mediante un script de *Python* ejecutado en un Sistema de Información Geográfica durante el análisis vectorial multitemporal (Anexo II – 2.5), se presentan en diferentes rangos de densidad, desde niveles muy bajos (rojo) hasta niveles muy altos (azul), como se detalla en la tabla 16. La síntesis de estos resultados se recoge en la tabla 17, mientras que un análisis más detallado se encuentra disponible en el Anexo III. Estos datos geográficos fueron posteriormente procesados y visualizados en tablas dinámicas en *Microsoft Excel*, acompañados de gráficos estadísticos, según se detalla en el Anexo III – 2, tras completar el proceso de obtención, análisis y representación de resultados.

Tabla.16 Valoración índice de densidad de barras (IDBF)

DENSIDAD		RGB	VALORACIÓN
Muy Baja		240-123-110	Muy Baja: 0 a 5 m ² /m
Baja		240-187-123	Baja: 5.1 a 10 m ² /m
Media		234-234-137	Media: 10.1 a 20 m ² /m
Alta		146-235-162	Alta: 20.1 a 30 m ² /m
Muy Alta		147-188-235	Muy Alta: > 30.1 m ² /m

Elaboración propia.

▪ **Variabilidad en la densidad de barras fluviales**

A lo largo del tramo estudiado del curso bajo del río Gállego se ha observado un progresivo decrecimiento en la densidad de barras fluviales desde 1927 hasta el año más reciente 2021 (Tabla 17). Esta disminución en la presencia de barras fluviales en cada segmento del río tramificado se atribuye principalmente a su migración o a cambios provocados por el crecimiento de la vegetación sobre los depósitos aluviales que, con el transcurso del tiempo, estas barras han evolucionado hacia bosques de ribera o islas vegetadas, indicando cambios en la dinámica fluvial y transformaciones en la configuración misma del río.

Tabla 17. Síntesis de resultados del índice de densidad de barras (IDBF)

Índice IDBF	1927		1956		2009		2021	
Coberturas	Cauce funcional	Corredor ribereño	Cauce funcional	Corredor ribereño	Cauce funcional	Corredor ribereño	Cauce funcional	Corredor ribereño
Barra desnuda	34,63	123,00	39,60	87,43	5,74	5,50	0,88	2,92
Tramo 1	19,67	65,53	18,36	28,14	4,43	4,64	0,52	2,92
Tramo 2	5,76	51,68	4,68	54,90	0,29	0,86		
Tramo 3	9,20	5,78	16,57	4,38	1,03		0,36	
Barra en colonización	3,61	213,75	20,41	207,64	8,24	102,90	5,20	102,35
Tramo 1		109,90	7,48	161,79	6,05	100,29	3,89	102,35
Tramo 2		70,50	9,20	19,66	0,22			
Tramo 3	3,61	33,36	3,73	26,19	1,96	2,61	1,30	
Barra vegetada			1,39		13,56	1,97	21,62	0,41
Tramo 1					7,84		8,72	0,41
Tramo 2			1,16		5,71		5,78	
Tramo 3			0,23			1,97	7,12	

Nota: Los resultados de densidad de barras se expresan en m²/m. Elaboración propia.

A lo largo del periodo analizado, se han podido apreciar notables contrastes entre los tres tramos del río. En el tramo 1, se han detectado cambios en las barras desnudas evidenciando una reducción en su densidad desde 1927 (85,2 m²/m) hasta el año 2021 (3,44 m²/m). La densidad de barras en proceso de colonización también se ha reducido desde 1927 (109,90 m²/m) hasta el año 2021 (106,24 m²/m), mientras que la densidad de barras vegetada aumentó en detrimento de las barras desnuda desde el año 2009 (7,84 m²/m) hasta el año 2021 (9,13 m²/m). En el tramo 2, se ha observado un patrón similar al tramo 1: una marcada reducción en la densidad de barras desnuda desde 1927 (57,44 m²/m) hasta el año 2009 (1,15 m²/m), y en el año 2021 estas han desaparecido por completo. La densidad de barras en colonización se ha reducido desde 1927 (70,50 m²/m) hasta una densidad de 0,22 m²/m en el año 2009 y las barras vegetadas han mantenido su estabilidad desde 2009. En el tramo 3, se aprecia una tendencia a la baja densidad de barras desnuda desde 1927 (14,98 m²/m) hasta el

año 2021 ($0,32 \text{ m}^2/\text{m}$). Las barras en colonización muestran una disminución progresiva en la densidad desde 1927 ($36,97 \text{ m}^2/\text{m}$) hasta 2021 ($1,30 \text{ m}^2/\text{m}$) y las barras vegetadas un aumento desde 2009 ($1,97 \text{ m}^2/\text{m}$) hasta 2021 ($7,12 \text{ m}^2/\text{m}$). La reducción en la densidad de barras fluviales puede ser atribuida a varios factores, entre los identificados se destacan distintos elementos que han modificado el entorno fluvial:

- Los cambios en el uso del suelo, resultado de modificaciones en el cauce debido a la urbanización y la agricultura intensiva han impactado el transporte de sedimentos en el río, lo que a su vez ha incidido en la formación de barras.
- La regulación fluvial a través de la construcción de embalses, represas, azudes y sistemas de riego por acequias, ha ejercido una influencia significativa en la morfología del río. Específicamente, el tramo 1 entre Ontinar y Zuera (Figura 31) muestra una pérdida notable de barras fluviales y de crecidas. Estos cambios han propiciado la colonización vegetal del cauce, transformando su estructura pasada claramente *braided* a un cauce mucho más estable con un canal único, aunque aún conserva canales secundarios en eventos de aguas altas (Ollero y Martín Vide, 2005).
- Cambios climáticos, aunque no ha sido objeto de análisis en este estudio, las fluctuaciones en variables climáticas como la precipitación y temperatura pueden haber influido directamente en el flujo de agua del río, su cantidad y velocidad, lo que a su vez impacta en la estabilidad y en la formación de barras fluviales.
- Las intervenciones humanas que incluyen obras de infraestructuras, dragados, extracción de sedimentos (Figura 32) y acciones para controlar inundaciones han modificado la dinámica fluvial y el trazado del cauce, impactando en la morfología, movilidad fluvial y en la formación de barras fluviales.



Figura 31. Barras de sedimentos en el tramo 1. Fotografías de la autora (20/07/23).



Figura 32. Extracción de gravas del lecho en el tramo 1. Fotografías de la autora (20/07/23).

▪ **Valoración final de barras fluviales**

En el periodo 1927-1956 se evidencia una densa presencia de barras desnudas en los tramos 1 y 2 del río Gállego, con densidades clasificadas como “muy altas”, mientras que el tramo 3 se mantiene en el rango de densidad “media”. Cuantitativamente, en el tramo 1 la densidad de barras desnudas en el cauce funcional es “media” de $19 \text{ m}^2/\text{m}$ respecto a la media de los tres tramos ($37,11 \text{ m}^2/\text{m}$). En el corredor ribereño, la barra desnuda se concentra en densidades “muy altas”, tanto en el tramo 1 como en el tramo 2, con valores medios que oscilan entre $46,83$ y $53,29 \text{ m}^2/\text{m}$ respectivamente. Sin embargo, en el periodo más reciente de (2009-2021), la densidad de barras desnuda desciende de manera abrupta a niveles de densidad “bajos” e incluso desapareciendo en algunos tramos. Esta reducción se observa de manera uniforme en los tres tramos fluviales, con valores medios entre $3,31 \text{ m}^2/\text{m}$ para el cauce funcional y $4,41 \text{ m}^2/\text{m}$ en corredor ribereño. En Anexo III-2 se puede observar la evolución del índice IDBF considerando el número de barras, su tipología y distribución en cada uno de los sectores tramificados del río.

En el índice IDBF, se observa inestabilidad en el corredor ribereño del Tramo durante el proceso de colonización en las barras entre 1927 y 1956. Sin embargo, en los tramos 2 y 3 durante periodo 2009-2021, se evidencia una notable disminución debido al desarrollo máximo alcanzado por el bosque ribereño en la zona del corredor fluvial. Por otro lado, en el periodo 1927-1956, el índice IDBF indica una escasez total de barras vegetadas en el cauce funcional y en el corredor ribereño en los tres tramos fluviales, mientras que para el periodo 2009-2021 se evidencia un incremento, aunque en densidades “bajas”. Estos datos nos alertan sobre la reducción de la dinámica fluvial del río y las tendencias nos demuestran que es necesario elaborar planes de restauración fluvial que contemplen los aspectos geomorfológicos como indicadores clave de los síntomas de deterioro en la salud de los sistemas fluviales (García et al., 2021).

En contraste con otros tramos, el tramo Ontinar, Zuera y S.M. del Gállego en el curso bajo del río Gállego se distingue por una marcada pérdida de dinámica fluvial evidenciada por valores extremadamente bajos en la densidad de barras. Esta escasez en la densidad de barras fluviales indica una disminución en la actividad del río y sugiere un incremento en la estabilidad del cauce. Estos hallazgos, específicamente destacados en esta parte del río, destacan la importancia de este tramo como un punto de referencia significativo para comprender los cambios en la dinámica fluvial y evaluar la evolución del ecosistema fluvial.

▪ **Caracterización de barras fluviales**

Para evaluar la dinámica fluvial reciente y actual, se ha procedido al análisis de sedimentos examinando la granulometría y el acorazamiento en dos barras fluviales situadas en la margen derecha del Gállego en los tramos 1 y 3. La elección de estas barras se debió a la limitada accesibilidad al cauce, lo que restringió la disponibilidad de sitios de muestreo. Este análisis permitió identificar la presencia de barras en el terreno y proporcionar una caracterización fluvial aproximada de las mismas. El análisis de barras fluviales se centró en el *índice de acorazamiento (IA)*, utilizado para establecer la relación entre las capas de coraza y subcoraza de las barras fluviales. El acorazamiento es un fenómeno habitual en la mayoría de los cauces aluviales, donde las capas superficiales del lecho presentan una granulometría más gruesa que las capas más profundas. Este proceso se origina debido al transporte selectivo del río, donde el material fino es movilizado por la corriente, mientras que el material grueso se asienta en la superficie, formando un pavimento que solo crecidas considerables pueden remover y modificar (Ollero et al., 2009).

Los resultados de los muestreos realizados en campo en las dos barras fluviales muestran lo siguiente:

En el tramo 1, en la barra lateral de la margen derecha del río Gállego, ubicada en Ontinar de Salz (Figura 33) se observa una línea de tendencia que indica una relación débil entre la distancia horizontal y el tamaño del sedimento. La pendiente ($0,0683$) sugiere que un cambio de $0,5$ metros en la distancia horizontal apenas afecta el tamaño de sedimento. Además el valor de R^2 ($0,0014$) con-

firma que la variabilidad en el tamaño de sedimento no guarda una relación significativa con la distancia horizontal en esta ubicación, lo que indica una dispersión en los datos. Esta relación sugiere la influencia de otros factores, no considerados en el análisis, como posiblemente la vegetación, dado que la barra se encontraba en proceso de colonización durante el muestreo (Figura 34).

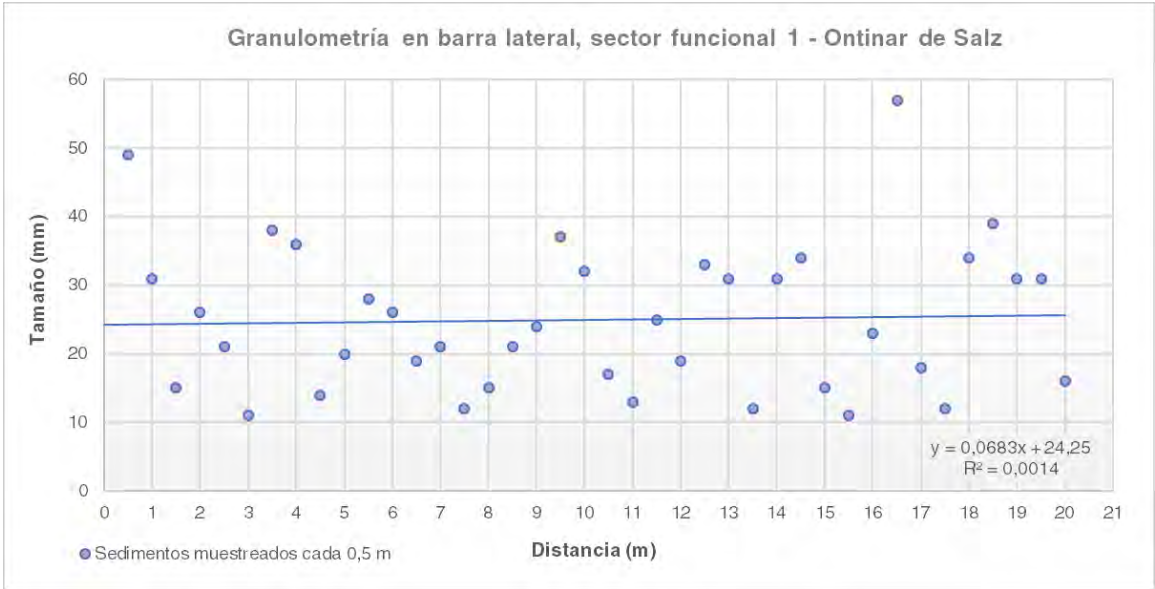


Figura 33. Granulometría de barra lateral sector funcional tramo 1. Elaboración propia.

En esta misma barra fluvial, los resultados obtenidos del muestreo indican un índice de acorazamiento de 2,29. El tamaño medio del sedimento es de 22 mm para la capa de coraza y 9,6 mm para la subcoraza (Tabla 18). Estos datos revelan una diferencia considerable en el tamaño medio de las partículas de sedimentos entre estas dos capas del lecho. La presencia de una capa superior de materiales más grandes y resistente a la corriente (coraza), que cubre y protege a las partículas más finas debajo de ella (subcoraza), es evidente a partir de esta diferencia en el tamaño de las partículas.

Tabla 18. Granulometría en coraza y subcoraza de barra, sector funcional 1

Coraza					
variable	unidad	Grava grande	Grava mediana	Grava pequeña	Gravilla
tamaño	mm	38,5	27,3	19,3	12
peso	gr	400	660	310	915

Subcoraza						
variable	unidad	Grava mediana	Grava pequeña	Gravilla	Arena	Limo
tamaño	mm	27,3	19,3	7	0,5	0,005
peso	gr	67	105	475	88	15

INDICE DE ACORAZAMIENTO – TRAMO 1	2,29
-----------------------------------	------

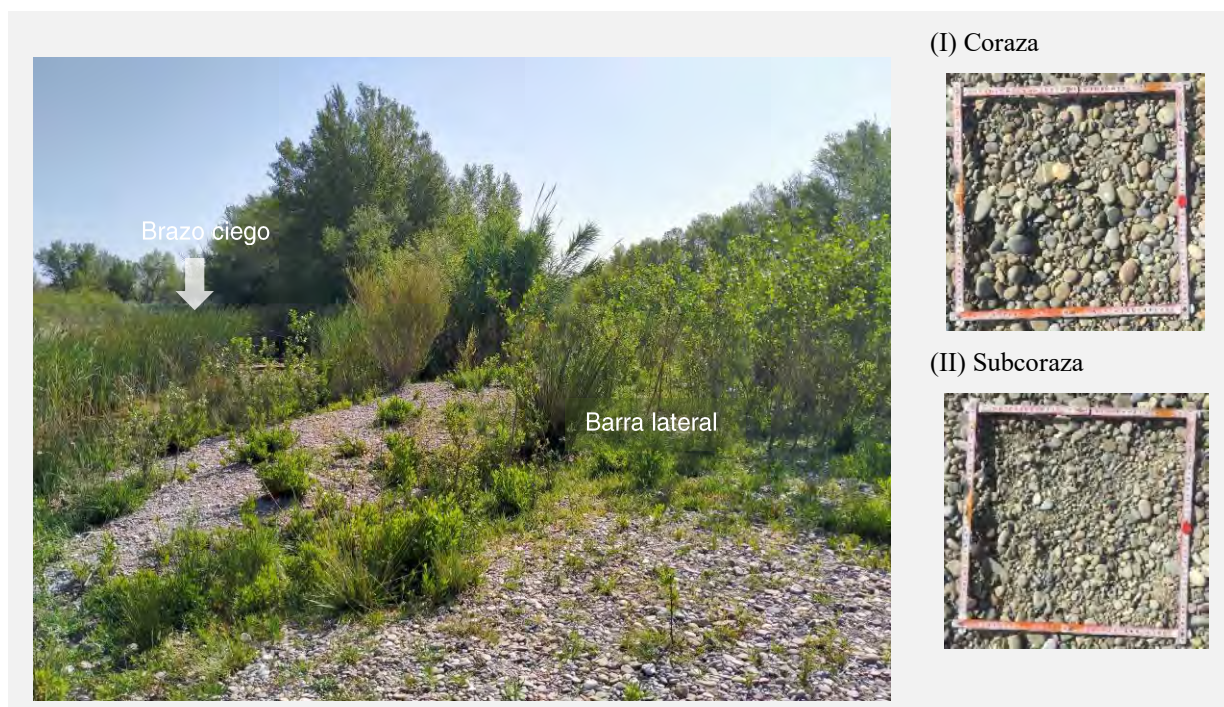


Figura 34. Granulometría Barra lateral con brazo ciego en tramo 1. Fotografías de la autora (20/07/23).

En el tramo 3, en la barra lateral de la margen derecha del río Gállego, ubicada en San Mateo del Gállego (Figura 35), se observa un patrón similar al tramo superior, aunque el tamaño medio del sedimento es mayor, de gran espesor y sin material fino. La tendencia indica una relación muy débil entre la distancia horizontal (en metros) y el tamaño de sedimento (en milímetros), tal como lo indica el valor extremadamente bajo de R^2 (0,0041). La ecuación de la línea de tendencia muestra una pendiente negativa, lo que implica que, en promedio, a medida que aumenta la distancia horizontal cada 1 metro, el tamaño del sedimento tiende a disminuir. No obstante, esta disminución es gradual y la variación en el tamaño del sedimento no se explica significativamente por la distancia horizontal, lo que resulta en una dispersión de datos. Al igual que en el caso anterior, la falta de relación sugiere la influencia de otros factores no considerados en el análisis. Un posible factor puede ser el pisoteo de ganado ovino, ya que la barra presentaba evidencia de remoción y abundante material de excremento animal durante el muestreo (Figura 36).

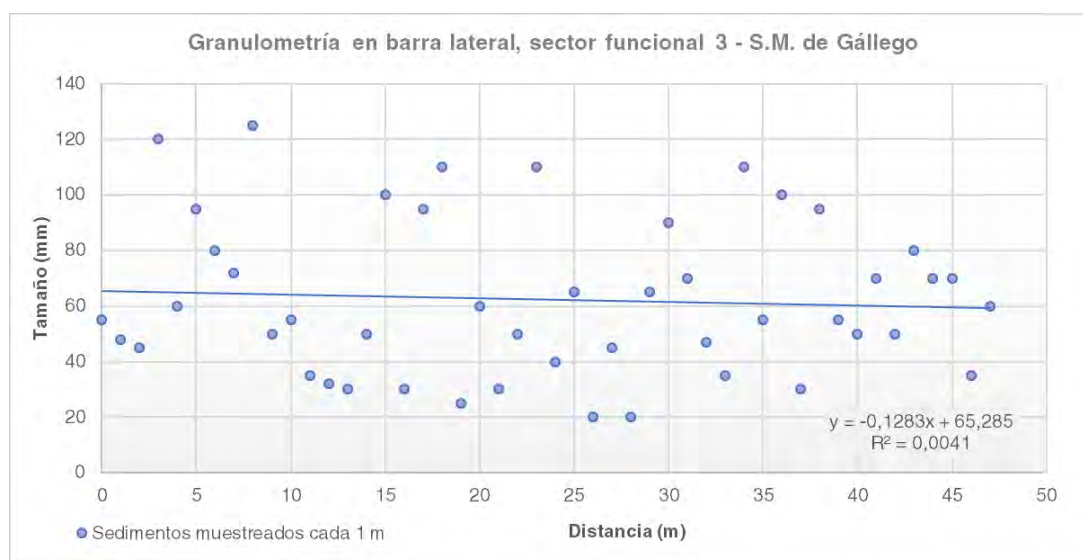


Figura 35. Granulometría de barra lateral sector funcional tramo 3. Elaboración propia.

El índice de acorazamiento es de 3,10 con un tamaño medio de sedimento de 67,2 mm para la capa de coraza y 21,7 mm para la subcoraza (Tabla 19). Este índice revela una marcada diferencia en

el tamaño medio de las partículas entre la capa de coraza y subcoraza. En términos de la estabilidad del lecho del río, un índice de acorazamiento alto y una coraza de espesor y tamaño grande pueden ser beneficioso para prevenir la erosión y el transporte de sedimentos durante eventos de crecidas. La disparidad en el tamaño entre la coraza y subcoraza, junto con el índice de acorazamiento, aporta información sobre la morfología y la dinámica de este tramo del río Gállego.

Tabla 19. Granulometría en coraza y subcoraza de barra, sector funcional 3

Coraza					
variable	unidad	Bloque grande	Grava grande	Grava media grande	Grava media
Tamaño	mm	90,5	64	45,3	32
peso	gr	3114	2611	710	136

Subcoraza							
variable	unidad	Grava	Grava pequeña	Gravilla	Gravilla pequeña	Arena	Limo
Tamaño	mm	22,6	16	11,3	8	0,5	0,005
peso	gr	210	186	26	379	18	3

INDICE DE ACORAZAMIENTO – TRAMO 3

3.10



Figura 36. Granulometría Barra lateral en tramo 3. Fotografías de la autora (1/09/23).

Los valores de los índices de acorazamiento registrados en ambas barras se sitúan dentro del rango de ríos que presentan una buena gradación de caudales, normalmente el rango está entre 1,5 y 4 (Martín Vide, 2002). Sin embargo, en San Mateo del Gállego, se evidencia un índice de acorazamiento más alto, indicando un mayor proceso de lavado de materiales más pequeños en esta ubicación. Este incremento está relacionado con las singularidades del cauce en esta zona, dado que el cauce es más estrecho y la corriente es más concentrada, por ende, la potencia del flujo impacta con mayor fuerza sobre las gravas del lecho. Esto posibilita la movilización de las partículas más pequeñas, permitiendo su desplazamiento o su caída entre los intersticios de las gravas de mayor tamaño.

4.4. Evolución de la calidad hidrogeomorfológica

El índice hidrogeomorfológico (IHG) es una herramienta geomorfológica de valoración fluvial que proporciona una visión integral de la salud de los ríos, permitiendo identificar tanto las presiones como los impactos ambientales. Inicialmente implementado en la cuenca del Ebro (Ollero et al., 2007), este índice ha sido ampliamente utilizado en diversos cursos fluviales de la península ibérica, y en países iberoamericanos (Ollero et al., 2021; Espinosa, 2022; Pirchi et al., 2023). En este estudio, se aplica el índice IHG para analizar las presiones e impactos que afectan al río Gállego en su curso bajo, empleando imágenes aéreas y trabajo de campo para evaluar cualquier alteración en su estado natural.

Los resultados derivados de la aplicación del índice hidrogeomorfológico, resumen la evolución del cauce funcional y el corredor ribereño mediante pirámides representativas de la calidad hidrogeomorfológica en los tramos evaluados desde 1927 a 2023. Esta pirámide tiene una estructura peculiar: la base refleja la calidad global del sistema fluvial, siendo el resultado de la evaluación integral de todos los parámetros que componen la calidad hidrogeomorfológica. En la cúspide de esta pirámide se encuentra el bloque I, que engloba parámetros para el indicador de calidad funcional del sistema, siendo esencial al influir en los bloques II y III, relacionados con parámetros de los indicadores de calidad del cauce y de las riberas, respectivamente. La evaluación conjunta de estos tres bloques de indicadores de calidad hidrogeomorfológica ofrece una visión completa de la salud del río.

La forma de la pirámide ilustra las interrelaciones entre estos aspectos fluviales proporcionando una representación visual legible, dirigida a un público general y concisa de la salud del sistema fluvial. En su interpretación una base ancha indica una calidad hidrogeomorfológica muy buena, mientras que una base estrecha refleja una calidad muy mala, patrón que se mantiene en toda la estructura de la pirámide.

4.4.1. Pirámide de calidad tramo 1 en Ontinar de Salz

El río Gállego, desde su nacimiento hasta el embalse de Ardisa, presenta una marcada intervención humana para usos hidroeléctricos y riego (Tabla 20). En la cuenca alta, entre la presa de Lanuza y la cola del embalse Búbal, su caudal se ve reducido debido a la desviación de agua hacia la central hidroeléctrica de Lanuza. Esta zona también incluye el río Escarra, represado en el embalse del río homónimo (Del Valle et al. 2005). Desde el embalse de La Peña, el río sigue un rumbo norte-sur atravesando el prepirineo y creando paisajes de acantilados cerca de los Mallos de Riglos, marcando así su transición desde el Pirineo hacia la depresión del Ebro. Hasta el embalse de Ardisa, el río fluye de manera natural sin infraestructuras notables.

En Ardisa, el río se embalsa para alimentar el canal del Gállego hacia La Sotonera, donde parte de su agua se utiliza para generar energía en la Central de Valdespartera, alterando su caudal. La Sotonera abastece agua al canal Los Monegros, conectándose al canal del río Cinca para mejorar el riego en el Alto Aragón. Entre este tramo y su desembocadura en Zaragoza, el río Gállego cuenta con las centrales de Marracos (15 km aguas arriba del tramo 1) y San Mateo (tramo 3). Estas centrales extraen una cantidad considerable de agua para riego, llegando a una demanda anual de 190 hm³ en el bajo Gállego (C.H.E), lo que provoca una notable disminución en su caudal.

El deterioro progresivo del río es evidente a unos 25 kilómetros de su desembocadura en Zuera, intensificándose aún más aguas abajo hasta Zaragoza (Ollero y Martín Vide (Coords., 2005); Del Valle et al. (2005)). Este tramo del curso bajo del Gállego sufre la influencia de dos polígonos industriales y áreas de servicios, algunas con un alto nivel de contaminación. Además está bajo la influencia de un sistema de acequias compuesto por cuatro canales principales: la acequia Camarera y Urdán, en la margen izquierda del Gállego, y la acequia Candevanía y Rabal, en la margen derecha. Entre estas, las acequias Candevanía y Camarera ejercen la mayor influencia en el espacio fluvial analizado en este trabajo, resultando en notables intervenciones y alteraciones. La disminución en el caudal debido

a extracciones considerables, especialmente para riego, se suma a la presencia de vertidos de residuos y a la degradación frecuente de las orillas. También se han identificado actividades de dragado, extracciones de áridos, profundización del lecho y apertura de brazo ciego y el deterioro en la vegetación ribereña en términos de alteraciones en la anchura del corredor ribereño (específicamente en el tramo 3 de San Mateo), así como en la estructura, naturalidad y conectividad (tramo 1 de Ontinar) junto con acumulación de escombros y basura.

Tabla 20. Datos básicos de las principales infraestructuras reguladoras de caudal en el río Gállego.

Infraestructura de regulación	Capacidad (hm³)	Superficie Inundada (ha)	Año de finalización	Uso agua
Lanuza	16,86	114	1980	Riegos Energía (52,000 kw)
Búbal	64,26	234	1971	Riegos Energía (60,000 kw)
Ardisa	3	216	1932	Riegos
La Sotonera	189,38	234	1971	Riegos Energía (4 Gw/año)

Fuente. Datos de embalses (C.H.E) en Del Valle et al., (2005).

La alteración en la continuidad longitudinal fluvial se considera una de las principales alteraciones hidrogeomorfológicas derivadas de la actividad humana sobre los ríos, impactando directamente en el movimiento de los organismos acuáticos y la dinámica del sedimento (Elosegi y Sabater, 2009; Ollero et al., 2007)). En el tramo 1 el azud de Candevanía-Camarera es una infraestructura que perturba la calidad funcional del sistema, en este y en los tramos adyacentes, afectando el régimen hidrológico y el transporte sedimentario. Otras presiones antropogénicas identificadas incluyen las dos acequias y sus derivaciones de caudal para riego que cubren completamente el espacio fluvial del tramo estudio (Figura 37). También se ha observado afecciones en la disponibilidad y movilidad de sedimentos debido a dragados detectados en la margen derecha del barranco La Violada, lo que ha reducido la funcionalidad de la llanura de inundación.



Azud Candevanía-Camarera



Acequia Candevanía

Figura 37. Afecciones en la continuidad longitudinal, tramo 1. Fuente: fotografías de la autora (1/09/2023).

La calidad del cauce se ve afectada por la intensa antropización, modificando la naturalidad del trazado del río de un trazado *braided* (trenzado) en 1927 a un cauce *wandering* (divagante) perdiendo su trazado natural en 2023. La ocupación agrícola en ambas márgenes del río ha causado desequilibrios en la sedimentación. La continuidad longitudinal y anchura de las riberas se ven afectadas por la presencia de superficies de cultivos que cubren el 70 % de las márgenes, aunque éstas se encuentran igualmente en buen estado.

El análisis del índice IHG para el periodo 1927-2023 en el tramo 1 (Figura 38), muestra una disminución en la calidad funcional del sistema fluvial pasando de 25 puntos (muy buena) a 9 puntos (deficiente). Este descenso se debe a las alteraciones en el caudal como resultado de las presiones antropogénicas previamente mencionadas. En cuanto a la calidad del cauce se registra una disminución de 26 puntos (muy buena) a 15 puntos (moderada). A pesar de ello, la calidad de las riberas pasa de 27 puntos (muy buena) a 22 puntos (buena), manteniéndose en buen estado. Los parámetros internos de la estructura de la pirámide han demostrado una disminución en el año 2023, especialmente en los aspectos relacionados con la naturalidad en el régimen de caudales y la morfología del cauce, reflejando el impacto acumulado de las actividades humanas en el espacio fluvial a lo largo del tiempo.



Figura 38. Pirámide de calidad hidrogeomorfológica, tramo 1. Fuente: modificado de Pirchi et al (2023).

4.4.2. Pirámide de calidad en tramo 2 de Zuera

El tramo de Zuera, experimentó un cambio significativo en el trazado a partir de 2001, cuando se llevaron a cabo modificaciones en un brazo del río para establecer un parque fluvial con un canal ornamental, destinado a mitigar el problema de la erosión de orillas. Esta intervención incluyó la instalación de escolleras para controlar la erosión, pero estas acciones generaron una simplificación del cauce y provocaron un proceso de incisión (Figura 39). Como resultado, se observa un impacto considerable en la calidad del cauce, específicamente en los parámetros (D y F).

Estos cambios han provocado el descenso en los indicadores de calidad del índice hidrogeomorfológico que registró una reducción notable en la calidad funcional del sistema fluvial de 24 (calidad buena) a 5 (calidad muy mala). Asimismo, la calidad del cauce se redujo de 24 (calidad buena) a 8 (calidad deficiente). Este deterioro se manifestó en la pérdida de dinámica fluvial, la reducción en la disponibilidad y movilidad de sedimentos, y un evidente estrechamiento del río, detectado a través del monitoreo de imágenes aéreas.



Esollera en antiguo brazo del Gállego, tramo 2.



Continúa esollera en Parque fluvial Zuera, tramo 2

Figura 39. Afecciones en la estabilidad de márgenes. Fuente: fotografías de la autora (1/09/2023).

Los parámetros internos de la estructura de la pirámide muestran una disminución en su calidad hidrológica y geomorfológica en el año 2023, especialmente en aspectos relacionados con los parámetros de calidad funcional y calidad del cauce. Las alteraciones en los caudales debido a la construcción de embalses, dragados y obras hidráulicas ya mencionadas son presiones que afectan el funcionamiento del agua y los sedimentos transportados por el río, reduciendo la calidad de los parámetros A y B. La reducción en los parámetros D y F se atribuye a las obras de estabilización de márgenes, como las esolleras y los rellenos del terreno.



Figura 40. Pirámide de calidad hidrogeomorfológica, tramo 2. Fuente: modificado de Pirchi et al (2023).

4.4.3. Pirámide de calidad en tramo 3 en San Mateo

Entre 1927 y 1956, las imágenes aéreas muestran un lecho del río Gállego de entre 350 y 700 metros de ancho, pero para el año 2023 se ve reducido a una anchura de entre 120 y 250 metros. El cauce se observa en buenas condiciones y altamente dinámico, con múltiples canales y barras de gravas aluviales sin vegetación. El río fluía libremente, adoptando un patrón *braided* posiblemente debido a la ausencia de defensas en las riberas, más allá de la existencia de cultivos.

La regulación del caudal se daba a través de una red compleja de acequias, que se han mantenido hasta la actualidad, aunque con mayor complejidad, resultando en un estado de calidad muy mala (Figura 41). En un estudio Peña Monné et al. (2020) explican que, aguas abajo de San Mateo la alta movilidad lateral de los canales del Gállego se debe a la fragilidad de las orillas compuestas por formaciones yesíferas excavadas por el río en niveles de terrazas. Además se identifican algunos canales fluviales abandonados que evidencian una actividad fluvial más activa en el pasado. En este periodo la calidad hidrogeomorfológica del cauce era muy buena y saludable, con barras de gravas de gran extensión y una zona aluvial con acumulaciones de abundante material, muy dinámica y cambiante. Estas características eran similares en toda la extensión del curso bajo del Gállego.

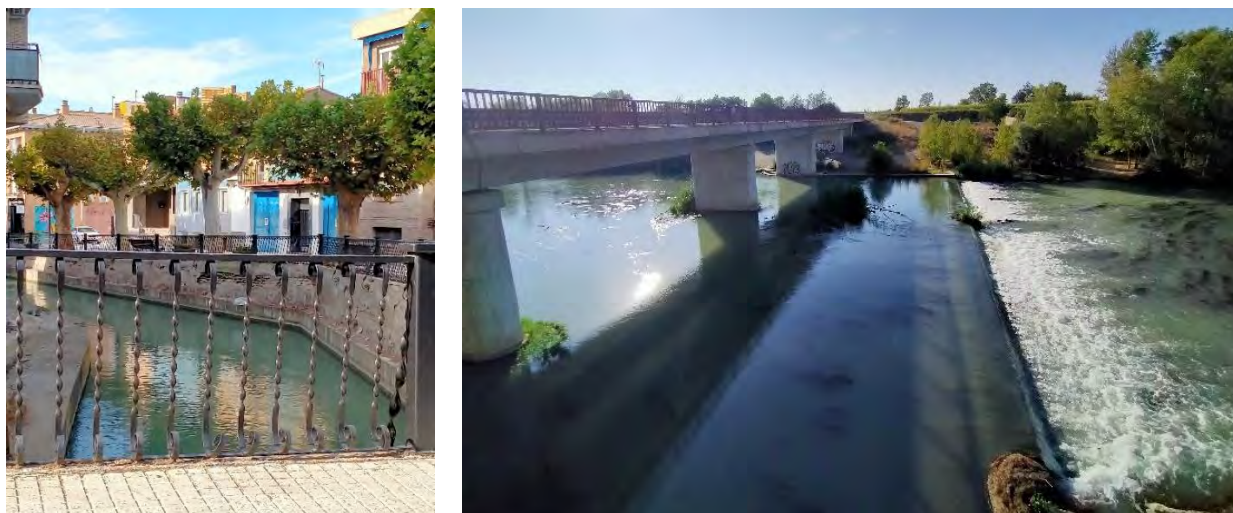


Figura 41. Imágenes tomadas en terreno de las acequias Camarera a su paso por San Mateo de Gállego (foto izquierda) y Azud de aforo 9209 (foto derecha). Fuente: fotografías de la autora (1/09/2023).

Sin embargo, en los periodos fluviales 1956-2009 y 2009-2023 el crecimiento progresivo de las urbanizaciones de Zuera y San Mateo, la creación de un polígono industrial en Zuera y la construcción de vías de comunicación (carreteras y ferrocarril) transformaron completamente el paisaje. En el análisis del índice de calidad hidrogeomorfológica para el periodo de 1927 a 2023 e ilustrado en la figura 42, se destaca una considerable disminución en la calidad funcional del sistema (CF). Esta disminución es notoria, pasando de un valor ponderado de 23 (calidad buena) a 5 (muy mala). al mismo tiempo, se observa un descenso en la calidad del cauce (CC), disminuyendo de 24 (calidad muy buena) a 10 (calidad deficiente). En contraste, la calidad de las riberas también se ve afectada al reducirse de 25 (calidad muy buena) a 20 (calidad buena) manteniéndose en un estado aceptable.

Los componentes internos del índice IHG muestran una clara tendencia a la disminución para el año 2023, especialmente en aspectos vinculados con la calidad funcional del sistema (CF) y la calidad del cauce (CC). Estos cambios se relacionan directamente con la intensificación de presiones antropogénicas a lo largo del tiempo. Por ejemplo, se identifica que la reducción en la anchura del corredor ribereño, consecuencia de cambios en la cobertura del espacio ribereño (de vegetación ribereña a áreas alteradas por el abandono de cultivos), incide negativamente en el parámetro (H). Este deterioro en la salud del sistema fluvial refleja el impacto de las actividades humanas en el entorno fluvial. La intervención en las márgenes del río, el cambio en la cobertura vegetal y el abandono de cultivos han contribuido a la degradación observada en la calidad hidrogeomorfológica.

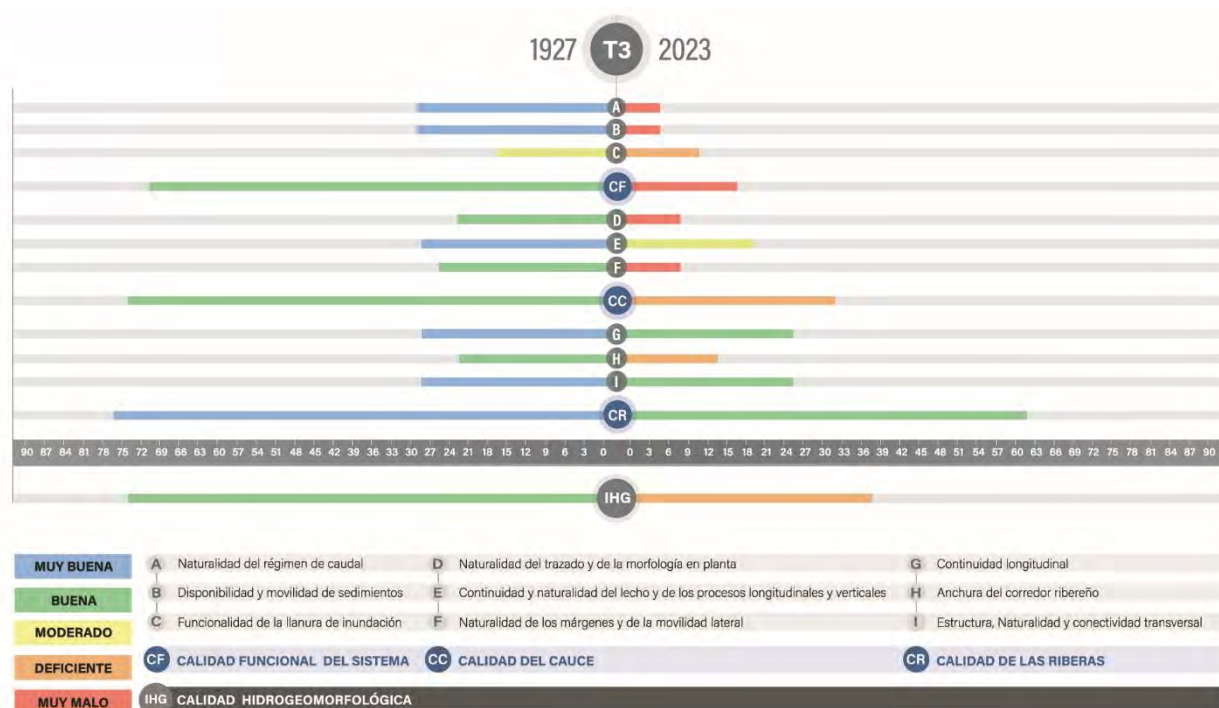


Figura 42. Pirámide de calidad hidrogeomorfológica, tramo 3. Fuente: modificado de Pirchi et al (2023).

4.5. Estado hidrogeomorfológico actual del tramo en el curso bajo del Gállego

El análisis de los parámetros de calidad hidrogeomorfológica en los tres tramos estudiados revela una variabilidad en la condición actual de la masa de agua, los sedimentos y la morfología del cauce, incluyendo la llanura inundable. Estas condiciones varían desde muy malas a deficientes, de acuerdo con los patrones hidrológicos y geomorfológicos (Tabla 21). Por otro lado, en lo que respecta a los patrones biológicos asociados a los sotos de ribera, como la anchura, continuidad, estructura, naturalidad y conectividad, se evidencia un mejor estado. Específicamente, en este tramo de Ontinar, Zuera y San Mateo, se ha constatado que los espacios fluviales del corredor ribereño se conservan en condiciones relativamente buenas, manteniendo hasta un 70 % de continuidad. Sin embargo, se evidencian algunas interrupciones en las márgenes debido a actividades agrícolas, áreas de recreación urbana (como el circuito motocross) e instalaciones industriales, lo que afecta negativamente su calidad hidrogeomorfológica. Esta evaluación se replica en el siguiente tramo, desde San Mateo a Zaragoza, aunque se destaca una degradación significativa en las riberas del río Gállego (Ollero y Martín Vide, coords., 2005).

Tabla 21. Síntesis de presiones a la masa de agua y sedimentos en el área de estudio tramificada.

Presiones	Presión	Valor medio IHG*		Diagnóstico *	
		Año 1927	Año 2023	Año 1927	Año 2023
Alteraciones del régimen de caudales	1. Extracciones				
	2. Regulación por embalses	9	2	Muy buena	Muy mala
	3. Acequias				
Alteraciones morfológicas	1. Lineales	7	3	buena	deficiente
	2. Transversales				
Alteraciones en márgenes	1. Usos urbanos				
	2. Usos agrícolas	8	3	buena	deficiente
	3. Usos industriales				
	4. Infraestructuras				

* Valor promedio de los parámetros relacionados con la presión humana. Elaboración propia.

Junto a los impactos citados en la tabla 21, se han identificado elementos ocultos entre los sotos ribereños, tales como escombros, vertidos y basura dispersa. Estos elementos no solo interrumpen la continuidad paisajística, fragmentando los sotos, sino que también representan una amenaza para la contaminación de las aguas del río Gállego y los acuíferos, con el potencial de desencadenar desastres ecológicos (Ollero y Martín Vide, coords., 2005).

La alteración morfológica transversal del río Gállego, influenciada por estructuras como los azudes de Candevanía-Camarera en Ontinar de Salz y el azud de Urdán en Villanueva de Gállego, que alimentan las acequias de Camarera, Candevanía, Urdán y Rabal, es una de las causas que han llevado a la disminución drástica del caudal en la desembocadura del río en Zaragoza, representando el 10 % de su flujo natural. Este territorio, a pesar de ser designado como Zona Especial de Conservación (ZEC) por su valor como corredor natural, se enfrenta a una paradoja: ¿Cómo proteger una zona altamente afectada por intereses económicos que amenazan su integridad? Las regulaciones actuales, que han reducido el caudal, entran en conflicto con los objetivos de conservación y muestran una clara necesidad de restauración fluvial. La influencia de estas estructuras y de los embalses aguas arriba en la disminución de la cantidad de sedimentos y agua ha alterado significativamente la dinámica fluvial del Gállego, lo que ha resultado en la pérdida de barras fluviales tal como se ha documentado en capítulos previos. La presencia de estas estructuras ha afectado la capacidad del río para mantener su flujo natural y la formación de barras fluviales, contribuyendo así a la disminución de la dinámica fluvial en el último siglo.

El análisis del tramo revela problemas específicos, como el azud de Ontinar que durante el verano deja casi seco el cauce, afectando negativamente al ecosistema fluvial. También se han identificado casos de erosión en las márgenes con desprendimientos del talud, especialmente cerca del puente de la carretera a Huesca en Zuera, donde los cimientos se desprenden y la vegetación invade el cauce debido a la pérdida de dinámica fluvial (Figura 43). Por otro lado, el entorno de la masa de agua se ve afectado por urbanizaciones y campo de cultivos que ocupan las márgenes del río. En los tramos urbanos de Zuera y San Mateo, las márgenes se ven interrumpidas por una densa vegetación de cañas (*Arundo donax*) y la presencia de escolleras, agravando los problemas de incisión y encajamiento del cauce. Estas problemáticas destacan la urgente necesidad de implementar acciones de restauración fluvial. Para abordar estos desafíos, se requiere el uso sostenible de las estructuras que limitan el flujo natural del río, la reforestación de márgenes con especies nativas, estrategias amigables para controlar la erosión y la promoción de prácticas sostenibles en las áreas adyacentes al río. Además se debe reconsiderar la gestión de esta Zona Especial de Conservación, que aseguren un equilibrio entre las medidas de conservación y los intereses económicos para proteger su integridad ambiental a largo plazo.



Figura 43. Materiales desprendidos de infraestructuras e invasión vegetal del cauce en tramo de Zuera. Fotografía de la autora (3/02/23).

En el núcleo de la zona del tramo 1 del río Gállego en Ontinar, se extienden terrenos destinados a cultivos de regadíos y pastos intensivos. A pesar de la presión moderada para este tipo de uso del suelo, estos espacios fluviales reciben vertidos del Barranco de la Violada, impactando la calidad del agua debido a los retornos de riego. Por otro lado, la actividad ganadera es importante en Zuera y San Mateo de Gállego al igual que en los municipios de Leciñena, Villanueva de Gállego y Zaragoza. Si bien en su mayoría se practica una actividad ganadera estabulada, donde los animales pasan la mayor parte de su tiempo en recintos cerrados, existe un matadero industrial que vierte residuos al río.

El informe de la Confederación Hidrográfica del Ebro revela resultados que indican una disminución en la calidad del agua que coincide con la llegada de las aguas procedentes del barranco mencionado (CHE, 2009). Este informe destaca el tramo que va desde el Ontinar hasta la desembocadura en Zaragoza como una de las áreas con mayor incidencia de contaminación en la cuenca del río Ebro. En esta parte del curso bajo del Gállego hasta su desembocadura, se distribuyen 12 núcleos poblacionales que en conjunto suman aproximadamente 40.000 habitantes (Tabla 22). Varios de estos núcleos cuentan con sistemas de depuración que conectan sus vertidos industriales mediante colectores.

Tabla 22. Situación actual de las principales poblaciones del curso bajo del Gállego.

	Núcleo poblacional	Población (hab.)	Depuradora de vertidos residuales
Tramo 1	La Paúl	223	Zuera
	Ontinar de Salz	796	Zuera
Tramo 2	Zuera	8.632	Zuera
	E. Portazgo	427	Zuera
Tramo 3	San Mateo	3.452	San Mateo
Tramo Bajo final	Lomas del Gállego	468	---
	Leciñena	1.116	Leciñena
	Villanueva de Gállego	4.769	Villanueva de Gállego
	Peñaflor de Gállego	1.247	Conectada a La Cartuja
	Perdiguera	553	---
	S. J. de Mozarrifar	2.618	Conectada a La Cartuja
	San Gregorio	613	Conectada a La Cartuja
	Montañana	3.216	Conectada a La Cartuja
	Villamayor	2.827	Conectada a La Cartuja

Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas de España (INE, 2022) y Portal CHEbro.

Los vertidos industriales son especialmente preocupantes por su impacto negativo en la calidad del agua del río Gállego, siendo ejemplos de esta problemática:

- **Los vertidos residuales**, en el río Gállego provenientes de los polígonos industriales de El Campillo en Zuera y en San Mateo del Gállego han provocado un incipiente proceso de eutrofización en el agua del río, afectando el parque fluvial de Zuera. Durante las observaciones en el terreno, específicamente en el antiguo brazo del Gállego convertido en un canal ornamental en el parque fluvial, se ha percibido un olor a putrefacción en las aguas de este sector del tramo.
- **La papelera de Montañana**, que extrae agua de pozos y descarga de manera constante entre 400 l/s y 1000 l/s (CHE, 2009). Durante periodos de bajo caudal del río, este vertido afecta notablemente la calidad del agua y el cambio en la coloración del agua es una evidencia de ello.

En general, se observa un deterioro progresivo en la calidad hidrogeomorfológica a medida que el río atraviesa áreas más urbanizadas, transitando por zonas de cultivos y núcleos urbanos. Los tramos urbanos 2 (Zuera) y 3 (San Mateo) exhiben el deterioro más pronunciado en su calidad hidrogeomorfológica debido a la acumulación de presiones antropogénicas e impactos. La tabla 23 ofrece una síntesis de las variaciones en los valores del índice de calidad hidrogeomorfológica (IHG) a lo largo del último siglo, proporcionando un diagnóstico actual de esta calidad.

Particularmente, el tramo de Ontinar, Zuera y San Mateo en el curso bajo del río Gállego ha experimentado una disminución notable en su estado hidrogeomorfológico. Este tramo ha pasado de ser calificado como bueno a presentar condiciones moderadas y deficientes, reflejando una reducción en un rango de entre 46 y 35 puntos en una escala total de 90 puntos. A pesar de ello, la calidad de las riberas se mantiene en niveles de estado bueno, siendo uno de los indicadores más consistentes.

El análisis de las variaciones en las puntuaciones de calidad junto con la observación de las estructuras de las piramidales de calidad hidrogeomorfológica, resalta la disminución en los indicadores del bloque I y II. Esta reducción evidencia los impactos negativos en los caudales del río y de la compleja red de canales, acequias y embalses. Estos impactos han afectado negativamente el funcionamiento hidrológico, sedimentológico y geomorfológico, generando repercusiones en el sistema fluvial del curso bajo del río Gállego.

Tabla 23. Síntesis de variaciones en las puntuaciones totales entre 1927-2023

Parámetros hidrogeomorfológicos		Tramo 1 Ontinar	Tramo 2 Zuera	Tramo 3 San Mateo
A	Naturalidad del régimen de caudal	- 8	- 8	- 8
B	Disponibilidad y movilidad de sedimentos	- 6	- 8	- 8
C	Funcionalidad de la llanura de inundación	- 2	- 3	- 2
CF	CALIDAD FUNCIONAL DEL SISTEMA	-16	-19	-19
D	Naturalidad del trazado y morfología del cauce	- 6	- 5	- 5
E	Continuidad, naturalidad del lecho y procesos	- 4	- 5	- 3
F	Naturalidad de márgenes y movilidad fluvial	- 2	- 6	- 6
CC	CALIDAD DEL CAUCE	-11	-16	-14
G	Continuidad longitudinal	- 1	- 1	- 1
H	Anchura del corredor ribereño	- 1	- 1	- 3
I	Estructura, naturalidad y conectividad	- 3	- 1	- 1
CR	CALIDAD DE RIBERAS	- 5	- 3	- 5
IHG	Variaciones totales	- 32	- 38	- 37
	CALIDAD HIDROGEOMORFOLÓGICA ACTUAL	46/90	35/90	35/90
	DIAGNÓSTICO ACTUAL	MODERADA	DEFICIENTE	DEFICIENTE

Elaboración propia

4.6. Propuestas de aplicaciones prácticas

En esta sección final del trabajo se presentan tres propuestas elaboradas para la recuperación y mejora del espacio fluvial del río Gállego en Zuera. La primera propuesta se centra en abordar las inquietudes expresadas por los entrevistados y brindar una solución a sus problemas con la elaboración de una actuación de restauración fluvial basada en los conocimientos de geomorfología fluvial. Con esto se busca recuperar el entorno del río empleando métodos que respeten los procesos naturales del sistema fluvial. La segunda propuesta se centra en la promoción de la educación ambiental en la zona para concienciar a la comunidad sobre la importancia de proteger y preservar el entorno del río que habitan. La tercera propuesta tiene como objetivo la creación de un “Laboratorio fluvial del Gállego” en un área designada por el Gobierno de Aragón como Lugar de Importancia Comunitaria (LIC). Este laboratorio serviría como punto de monitoreo hidrogeomorfológico, permitiendo la recopilación de datos científicos esenciales para comprender mejor el río Gállego y su ecosistema.

4.6.1. Propuestas de restauración fluvial

La restauración fluvial es un proceso integral encaminado a la recuperación de la estructura y funcionamiento de un sistema fluvial degradado y tiene como objeto reestablecer su equilibrio natural y promover la biodiversidad (Ciref, 2010). En Europa, la restauración fluvial ha cobrado importancia en los años 2000 con la Directiva Marco de Agua 2000/60/CE. Esta directiva introduce el concepto de restauración dinámica que considera los procesos fluviales en que interactúa el agua, el sedimento y el entorno natural (Dufour y Piégay, 2009; Ollero et al., 2009; Ciref, 2010) y busca corregir impactos negativos que han afectado a los ríos. En España, el Centro Ibérico de Restauración Fluvial (CIREF) lidera esfuerzos para restaurar los entornos fluviales de este país y de Portugal. Numerosos proyectos de restauración fluvial se encuentran documentados y disponibles en el sitio oficial del CIREF (disponible en: <https://cirefluvial.com/>).

La restauración geomorfológica, que es la que se propone en el presente estudio, requiere de un diagnóstico detallado de la dinámica fluvial. Este diagnóstico debe abordar diversos aspectos, como la disposición en planta, el perfil longitudinal, la geometría hidráulica de secciones críticas, la interacción con la vegetación, el tamaño y las propiedades de los sedimentos, entre otros elementos clave (Cavalli et al., 2008; Grabowski et al., 2014). Esta evaluación debe tener en cuenta tanto la evolución histórica como las presiones actuales que afectan o podrían afectar esta dinámica (Ollero, 2011). Además numerosos estudios han destacado la importancia de restaurar procesos fluviales fundamentales para la salud del río, utilizando indicadores de dinámica geomorfológica desarrollados por investigadores como Ollero (2010), Palmer et al. (2005), Gillilan et al. (2005), Newson y Large (2006), Horacio (2015), Ollero (2015a), Magdaleno et al. (2018), Conesa García et al. (2022), Ballarín, (2022) y Espinosa (2023). En el contexto de ríos con características aluviales y lechos de gravas, como el curso bajo del Gállego, se proponen una serie de acciones de restauración fluvial que se centran en la geomorfología para recuperar la dinámica, mejorar el estado de salud y la resiliencia del río Gállego en Zuera.

Propuesta 1. “Recuperación de la dinámica fluvial del río Gállego en Zuera”

El mapa de la figura 44 ilustra la propuesta de restauración fluvial para el río Gállego. Su diseño está pensado para devolver al río su dinámica fluvial. La restauración de la zona contempla una serie de acciones que ayudarán al río a recuperar su dinámica fluvial y a mejorar su estado y resiliencia a largo plazo. La medida de restauración incluye las siguientes acciones:

▪ **Acciones:**

1. Recuperación del cauce histórico
2. Reconexión del meandro actual
3. Gestión del agua y sedimentos
4. Creación de humedal (zona de amortiguación)

5. Revegetación y manejo de corredores ribereños
6. Control de la contaminación



Figura 44. Propuesta de restauración fluvial en tramo 2. Elaboración propia.

Algunas de estas acciones surgen de las preocupaciones y opiniones obtenidas después de las entrevistas aplicadas a personas comprometidas con la gestión del río Gállego. Considero que la restauración fluvial es un proceso verdaderamente complejo que no solo implica la restauración física de un río, sino que también requiere la colaboración activa de diversas partes interesadas. Este proceso debe ser cuidadosamente diseñado teniendo en cuenta una amplia gama de factores, que abarcan desde cuestiones ambientales y ecológicas hasta consideraciones sociales y económicas (Ollero, 2015 b). Por otra parte, el análisis de las entrevistas ha sido fundamental en mi investigación. A través de las respuestas abiertas proporcionadas por estas personas he podido extraer información relevante y valiosa para desarrollar propuestas prácticas de restauración. También considero que la restauración exitosa no solo se basa en datos y opiniones, sino en la acción concreta y la implementación de medidas sostenibles que permitan la recuperación del río.

En cuanto a la entrevista, consta de 5 preguntas abiertas de libre extensión para conocer la situación actual del río, las acciones y proyectos que se están llevando a cabo para su conservación y los desafíos que enfrenta su gestión. Las respuestas obtenidas han sido categorizadas en función de los temas que han sido destacados en repetidas oportunidades por los entrevistados (Tabla 24). Este enfoque metodológico ha resultado muy satisfactorio para la identificación de las principales preocupaciones asociadas al río Gállego y a su gestión. Las preguntas son las siguientes:

1. ¿Qué acciones y/o proyectos se están llevando a cabo para la gestión y conservación del río Gállego en Zuera?
2. ¿Qué aspectos consideras que podrían mejorar el estado fluvial del río Gállego?
3. ¿Existen programas de educación ambiental en el río Gállego que involucren a todos los habitantes de Zuera?
4. ¿Qué opinión tienes sobre el desarrollo de una posible propuesta de restauración fluvial en el río Gállego en el término de Zuera?

5. ¿Qué medidas concretas de restauración propondrías?

Tabla 24. Categorización de respuestas según temas de la entrevista

Temas	Opiniones y preocupaciones más recurrentes
Acciones y proyectos	- En el momento actual ninguna
Mejora del estado fluvial	- Control de la contaminación agrícola e industrial, a pesar de los colectores. - Control de vertidos de aguas residuales al río para mejorar el problema de eutrofización del agua del río en la zona de un antiguo brazo del río que es empleado como canal ornamental en la zona del Parque Fluvial. - Control de la actividad agrícola en zona La Violada por derivación de agua contaminada al freático del Gállego. - Control exhaustivo en materia de riego y sobrantes de acequias con control de nitratos derivados de las actividades ganaderas. - Ordenanzas y normativas locales. - Regular los usos y actividades en el entorno fluvial. - Campañas de difusión del valor de las riberas y el ecosistema fluvial. - Sensibilización y educación ambiental en los colegios y más visitas al entorno natural. - Limpiezas del cauce con salidas periódicas con voluntarios. - Establecer programas de educación ambiental desde el ayuntamiento de Zuera y campañas con escolares e itinerarios didácticos.
Educación ambiental	- En el momento actual ningún programa
Medidas de restauración fluvial	- Trabajo de investigación sobre calidad del agua del río y evaluación del estado del ecosistema. - Limpieza de residuos en el entorno fluvial. - Información y cartelería de concienciación de la basura en el medio. - Eliminar especies invasoras. - Adecuación de los tramos canalizados y eliminación de motas inútiles. - Fomentar el establecimiento de especies favoreciendo refugios naturales. - Implicar a la población local en proyectos de restauración fluvial.

Elaboración propia.

Acción 1. Recuperación del cauce histórico

Como se evidencia en el apartado anterior de resultados, la situación pasada del río muestra una dinámica fluvial activa y saludable con la formación de barras aluviales y una destacada movilidad fluvial. Sin embargo, en la situación actual y según los resultados del diagnóstico del último momento fluvial, se aprecia un cauce único y estrecho, con escasa presencia de barras activas, como así lo ilustra la figura 45, que muestra el proceso de estrechamiento y pérdida de movilidad del cauce.

Ante esta realidad, se plantea la restauración del cauce histórico del Gállego involucrando la eliminación de obstáculos artificiales y estructuras que han perturbado su curso natural. Esta acción o actuación permitiría al río recuperar su naturalidad, el espacio fluvial, su forma pasada y la reactivación de sus procesos de erosión y sedimentación.

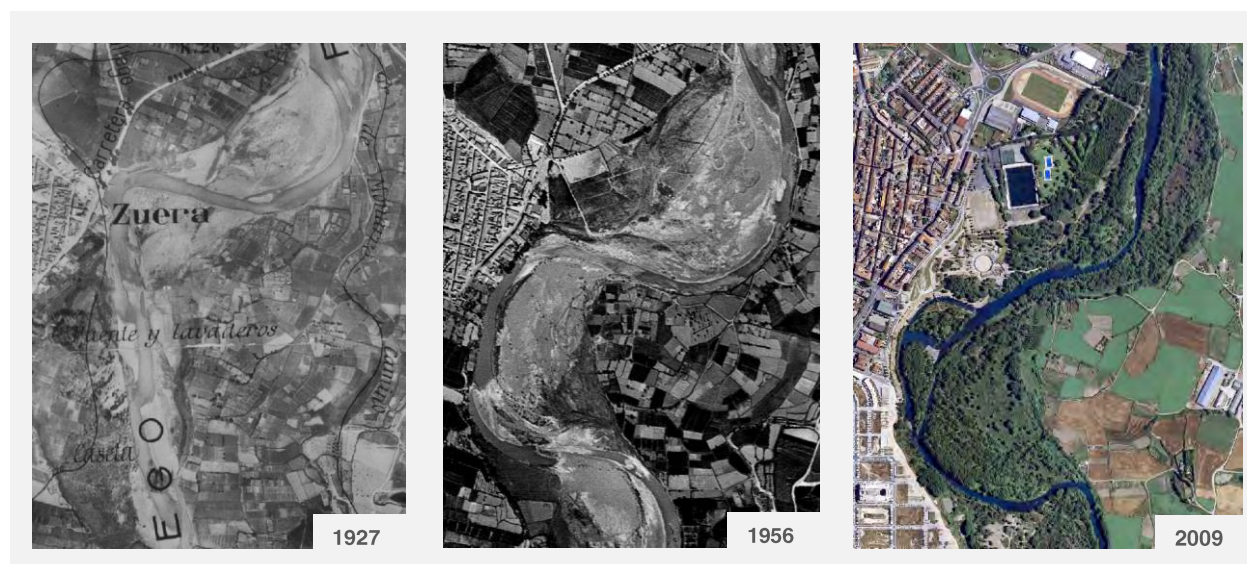


Figura 45. Cauce histórico en Zuera vista de los vuelos 1927, 1956 y 2009. Fuente: CNIG-IGN.

Acción 2. Reconexión del meandro actual

En la misma línea de recuperar la naturalidad del cauce, Ollero (2015b) destaca la importancia de que un río cuente con un territorio ancho, continuo y sin defensas u obstáculos antrópicos que puedan obstruir sus procesos hidrogeomorfológicos o que rompan la conectividad dentro del espacio fluvial. La medida que se propone implicará la apertura de canales antiguos que conecten con el meandro del parque fluvial, una reconfiguración de los usos actuales del espacio fluvial y la creación de un humedal abastecido por el Gállego. Este humedal, en conjunto con la zona de decantación de sedimentos, conformará un sistema de control de inundaciones, además será filtro natural de elementos contaminantes provenientes de los vertidos agrícolas e industriales al río que deberán ser controlados por monitoreo de sensores.

Acción 3. Gestión del agua y sedimentos

En el proceso de restauración del cauce histórico resulta muy necesario y urgente abordar el problema del caudal en el río Gállego. Tras un detallado análisis de las variaciones de caudal observadas en las estaciones de aforo, se constata la existencia de un régimen invertido, provocado por la influencia de embalses y desembalses, lo cual ha dado lugar a un caudal diseñado en función de las necesidades de los regadíos agrícolas en lugar de respetar el flujo natural del río.

Dada la gravedad de esta problemática, ya que el caudal constituye un elemento fundamental en la dinámica fluvial, se han pensado medidas encaminadas a regular de manera sostenible tanto el volumen de agua en circulación como la sedimentación en el río. Estas acciones incluyen la gestión de los caudales de riego, redirigiéndolos hacia valores más acordes con la naturaleza, en lugar de enfocarse únicamente en los intereses agrícolas. Esta acción permitirá que el caudal se asemeje más a su estado natural. Adicionalmente, con el propósito de abordar el problema del déficit de sedimentación y las obstrucciones en el corredor ribereño, específicamente en la entrada al meandro del parque fluvial, se llevará a cabo una gestión sostenible con la participación de expertos especializados en sedimentación de todas las disciplinas afines. Esta iniciativa se complementará con la eliminación de obstáculos que dificultan el transporte de sedimentos como escolleras (Figura 46). Que el río recupere su carga sólida no es un problema, más bien las barras de sedimentos aportarían nutrientes que aumentarán la calidad del agua y mejorará la salud del ecosistema fluvial.



Figura 46. Escollera en margen izquierda, zona del parque fluvial. Fuente: fotografía de la autora (4/2/23).

Acción 4. Creación de un humedal

El humedal ocuparía la zona comprendida desde la orilla del río hacia la llanura de inundación y se ubicaría en la zona de un antiguo meandro del Gállego, actualmente ocupado por el Pabellón de usos múltiples del Parque fluvial de Zuera (Figura 39). Este neoecosistema será una zona de amortiguación adyacente al cauce funcional del río y formando parte del corredor ribereño. La zona de amortiguación para el río tiene algunos propósitos y beneficios que incluyen:

- *Protección de la calidad del agua:* la vegetación en la zona de amortiguación actúa como un filtro natural, ayudando a reducir la escorrentía de contaminantes y sedimentos hacia el río. Esto mejora la calidad y protege la vida acuática.
- *Prevención de inundaciones:* la vegetación ribereña puede ayudar a reducir el impacto de las inundaciones al absorber el exceso de agua y mantener la estabilidad de las orillas del río.
- *Hábitats para la vida silvestre:* esta zona proporcionará refugio, alimento y lugares de reproducción para la vida silvestre.
- *Estabilidad de las orillas:* la vegetación en la zona de amortiguación ayudará a prevenir la erosión de las orillas al mantener la estructura del suelo y las raíces la estabilidad de las orillas.

Acción 5. Revegetación y manejo adecuado de corredores ribereños

En un sector del corredor ribereño se ha identificado la proliferación de repoblaciones de *Pinus halepensis*, conocidos como pinos carrasco (Figura 47). Estas repoblaciones están presentes también como plantaciones en áreas inundables y plantean algunas preocupaciones. En primer lugar los pinos carrasco son árboles conocidos por su resistencia a la aridez y su elevado consumo de agua, lo que podría competir con la vegetación ribereña nativa. En consecuencia resultaría en una disminución de la biodiversidad y un impacto negativo en la salud general del ecosistema fluvial (Esteve, 2018). En segundo lugar representan un riesgo potencial en caso de incendios, especialmente en una región propensa a los incendios forestales. Durante la visita de campo de identificaron fogatas en varios puntos del interior de las plantaciones de *Pinus halepensis* (Figura 48). También se ha observado un cambio en la coloración de las hojas de algunos de estos árboles hacia un tono marrón grisáceo lo que sugiere un posible deterioro del tejido foliar, probablemente debido al descenso del nivel freático causado por la sequía.

Para abordar estos problemas, es importante tomar medidas para preservar la vegetación autóctona en el corredor ribereño y garantizar la salud del ecosistema. Esto implica la eliminación de los *Pinus halepensis* del corredor ribereño y la revegetación con especies autóctonas. La revegetación con especies nativas al tiempo mejorará la estabilidad de las orillas y el control de la erosión. Es

necesario implementar un mantenimiento adecuado de los corredores ribereños para garantizar que la vegetación de las plantaciones no se extienda al corredor ribereño para que pueda prosperar de manera óptima.



Figura 47. Pinus halepensis jóvenes diseminados en el corredor ribereño. Fotografías de la autora 4/02/23.



Figura 48. Repoblación de Pinus halepensis. Fotografías de la autora (4/02/23).

El cauce y el corredor ribereño presentan otro problema que debe ser atendido de manera inmediata y está relacionado con la presencia de la caña común (*Arundo donax*). Esta especie exótica ha sido catalogada por The World Conservation Union (UICN) como una de las 100 especies invasoras más peligrosas y nocivas a escala mundial por su capacidad para desplazar a la vegetación autóctona. Por este motivo, considero necesario que se elimine de manera inmediata y se controle su presencia en el bosque ribereño y orillas del cauce.

En un informe realizado por el grupo Tragsa para el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino del Gobierno de España (Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/>) se ha comprobado que la caña provoca impactos como el desplazamiento de vegetación autóctona de las riberas, disminución de la capacidad de desagüe de los ríos, aumento en la regularidad de incendios dada la gran densidad de crecimiento de esta especie invasora. Por otro lado, la caña se ha naturalizado en espacios húmedos de la isla creada en el meandro del parque fluvial de Zuera, y también a lo largo del Gállego está invadiendo las márgenes del río, caminos, campos y se está introduciendo dentro de los sotos, de ahí, el interés por eliminarla (Figura 49).



Figura 49. Especie invasora *Arundo donax* (caña) tramo 2. Fotografías de la autora (1/03/23).

Acción 6. Control de la contaminación

Esta propuesta se centra en mejorar la calidad del agua siendo una de las preocupaciones más nombrada por las personas entrevistadas. En este caso es necesario realizar un estudio de contaminación del agua y el sitio ideal para llevar a cabo ese monitoreo de contaminantes sería el humedal creado en esta propuesta. En este humedal se harían ensayos químicos en los que se podrían involucrar a los colegios para que experimenten y adquieran conocimientos científicos con salidas al entorno del río. Por otro lado, se ha identificado varios vertidos al río y basura a lo largo del corredor ribereño, en el cauce funcional y en el interior de la isla artificial creada en el meandro del parque fluvial (Figura 50). Para mejorar la calidad del cauce funcional y del corredor ribereño se propone realizar una gestión de limpieza y retirada de desechos sólidos urbanos involucrando a la población local desde niños, jóvenes y adultos. Es necesario lanzar campañas de difusión que eduquen sobre el valor de las riberas y del ecosistema fluvial para sensibilizar a la comunidad y promover estas prácticas responsables.



Vertidos dirigidos al río, S.M. del Gállego.



Basura en isla del parque fluvial, Zuera.

Figura 50. Problemas de contaminación en el Gállego. Fotografías de la autora (1/09/23).

4.6.2. *Propuestas de educación ambiental*

Propuesta 2. Programas de gestión participativa

Acción 1. Participación comunitaria

Otro aspecto importante a destacar es el poco conocimiento e interés de la población local por el río. No existen asociaciones o movimientos que promuevan actuaciones en el río. Por ello se propone las siguientes acciones:

- **Charlas educativas** organizadas de manera regular en los colegios locales para enseñar a los estudiantes sobre la importancia del río y su ecosistema fluvial.
- **Realizar talleres prácticos** que aborden temas relacionados a la conservación del río que involucren salidas educativas al río y actuaciones de limpieza de residuos en la que se entregará a cada alumno un kit de materiales para la recolección de Basura y promover un entorno más limpio.
- **Recorridos interpretativos** guiados por expertos en temas fluviales a lo largo de las orillas del río para destacar sus características naturales, con infografías didácticas que enseñen la evolución fluvial pasada y presente del Gállego en los sitios más impactados para generar mayor concienciación y sensibilización.
- **Invitar a la comunidad** a participar en actividades de restauración fluvial, como en la plantación de árboles.
- **Programas de voluntariado** para que la comunidad participe activamente en la conservación del río, como por ejemplo en el monitoreo regular del espacio fluvial, en la realización de inventarios de especies vegetales enfermas y mantenimiento de la limpieza del río.
- **Sesiones de sensibilización** organizadas para discutir los desafíos y soluciones relacionadas con el río y fomentar la participación activa de la comunidad en la toma de decisiones.

Acción 2. Valor del río Gállego como patrimonio natural

Desde la Fundación Odón de Buen mostraron mucho interés en que se estudiara la problemática ambiental del río Gállego, al que consideran de gran valor, y que se propusieran una serie de actuaciones que repercutieran positivamente en la zona de estudio. Teniendo en cuenta los numerosos impactos sobre el río, es necesario trabajar para su mejora y para promover su reconocimiento y puesta en valor como patrimonio natural y cultural. La puesta en valor de su belleza paisajística y su herencia histórica, contribuirá a su desarrollo como un atractivo turístico, particularmente en una zona que carece de una oferta significativa en este sentido. Dentro de las medidas que se proponen, es altamente

beneficioso realizar una cartografía detallada que identifique una serie de áreas de interés hidrogeomorfológico, destacando tanto el patrimonio natural presente en el tramo estudiado como en otros lugares del bajo Gállego.

Los motivos para destacar a este cauce fluvial como patrimonio natural están en su paisaje. El tramo bajo del río Gállego hasta su desembocadura, alberga una serie de enclaves sumamente atractivos que poseen un gran potencial para atraer el turismo a esta zona de la Comunidad Autónoma de Aragón. En cuanto al paisaje fluvial del tramo estudiado, sobresalen pendientes abruptas y altamente erosivas en la zona de barrancos de la Val Cerrera. Estas pendientes presentan una dinámica fluvial sumamente activa, dando forma a una extensa área encharcada o inundada en el río Gállego. En esta área es posible observar conos aluviales que aportan materiales foráneos al río, así como la formación de lóbulos de derrames de gravas y barras de sedimentos de gran actividad. Además, se encuentran brazos ciegos con ecosistemas únicos de buena calidad e islas vegetadas que albergan una rica biodiversidad, tanto en términos de fauna como de flora (Figura 51). Por otra parte, en los tramos más urbanos, el paisaje fluvial se caracteriza por ser más verde, con corredores ribereños de alta calidad y un ecosistema fluvial que alberga una diversidad abundante de aves (Figuras 52). Este conjunto de características naturales hace del río Gállego un patrimonio natural de gran valor y atractivo, propicio para su promoción turística.



Figura 51. Enclaves paisajísticos del río Gállego. Fotografía tomada por la autora, (21/03/23).



Figura 52. Enclaves verdes urbanos del río Gállego. Fotografía tomada por la autora, (1/09/23).

4.6.3. Propuestas de monitoreo fluvial

Propuesta 3. “Laboratorio fluvial para el conocimiento científico”

Acción 1. Evaluación continua del Gállego y el entorno fluvial

Esta propuesta establece la creación de un laboratorio fluvial en un área designada por el Gobierno de Aragón como Lugar de Interés Comunitario (LIC). El laboratorio permitirá el monitoreo continuo de la dinámica fluvial, la experimentación y la recopilación de datos científicos clave. Además, el análisis de estos datos proporcionará información de valor para la gestión del río y la toma de decisiones basadas en evidencia. El sitio es de gran importancia debido a que se caracteriza por ser la zona más dinámica a pesar de sus impactos. Presenta una significativa actividad de escurrimientos pluviales desde la zona de la Val hacia el río Gállego, incluyendo la presencia de escurrimientos subsuperficial que emergen en el acantilado. Estas características hacen del lugar un punto estratégico para el estudio y monitoreo de los procesos fluviales de erosión, sedimentación y las interacciones entre los escurrimientos pluviales y el río Gállego. A continuación, se detallan fotografías tomadas en campo (Figuras 53 y 54) en el sitio donde se ubicaría el Laboratorio fluvial de Zuera.



Figura 53. Vista ampliada del lóbulo de derrame en margen izquierda. Fotografías de la autora, (21/3/23).

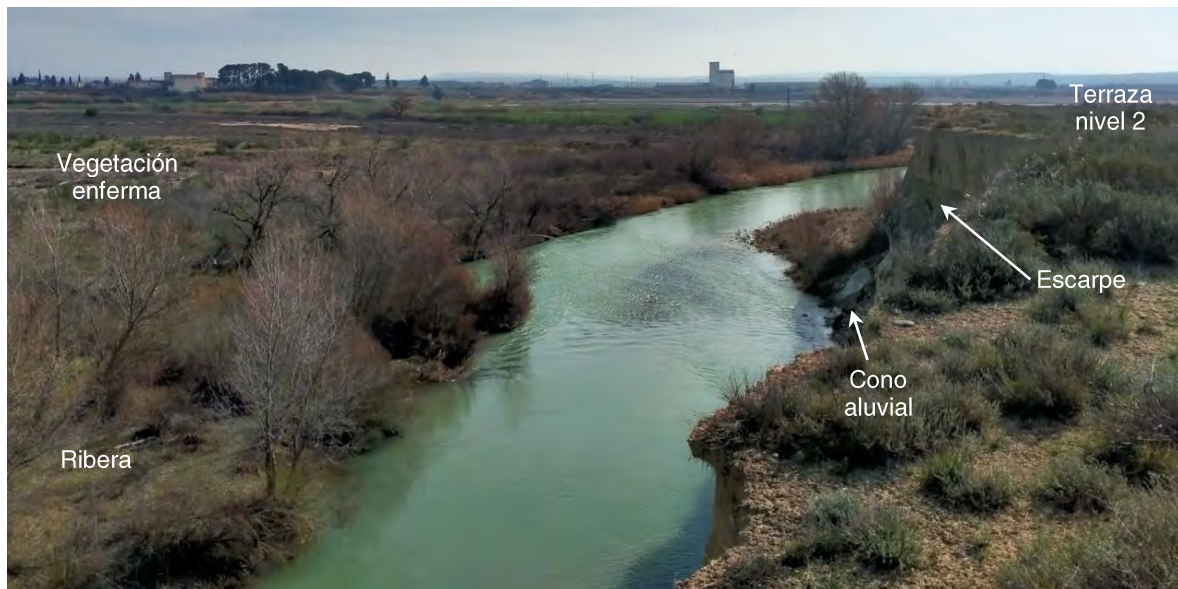


Figura 54. Vista desde la terraza de la Val Cerrera. Fotografías de la autora, (21/3/23).

5. CONCLUSIONES

La investigación llevada a cabo sobre la dinámica fluvial y el estado hidrogeomorfológico del curso bajo del río Gállego, específicamente en el término municipal de Zuera, ha permitido alcanzar una comprensión de la situación actual de este ecosistema fluvial. Bajo el título “*Dinámica fluvial y estado hidrogeomorfológico del curso bajo del río Gállego (Término municipal de Zuera): Diagnóstico para su restauración*”, se trazaron objetivos específicos que han sido abordados a lo largo de esta investigación. En primer lugar, el objetivo central consistía en establecer un diagnóstico integral de la situación hidrogeomorfológica del bajo Gállego, enfocándose tanto en su dinámica como en su estado actual. Se ha logrado cuantificar, identificar factores determinantes y cartografiar la evolución del cauce y corredor ribereño desde 1927 hasta el presente, proporcionando una visión histórica que ha revelado transformaciones significativas en la morfología fluvial a lo largo del tiempo.

En consonancia con el segundo objetivo, se ha realizado un diagnóstico exhaustivo del estado hidrogeomorfológico, identificando con precisión los problemas, presiones e impactos que afectan al río Gállego en este tramo. Este análisis ha destacado la evidente influencia de la actividad humana, manifestada en la urbanización, la construcción de embalses, la regulación de caudales y otras acciones antropogénicas como factores determinantes en las alteraciones observadas en la dinámica fluvial y morfología del río. El tercer objetivo ha sido proponer medidas de restauración fluvial orientadas a otorgar resiliencia al Gállego. Los resultados obtenidos a partir de los índices hidrogeomorfológicos como el índice IDBF, el índice IHG y el índice IS han proporcionado una base sólida para identificar áreas críticas, patrones de cambio y tendencias a lo largo del tiempo, facilitando la formulación de medidas concretas de restauración fluvial. Considero que es fundamental el desarrollo de propuestas de restauración como herramientas clave para mantener la salud y funcionalidad de un sistema fluvial.

Entre los principales hallazgos se destaca la transformación en el cauce y el corredor ribereño a lo largo de tres periodos fluviales. Desde un patrón trezado en 1927 hasta un patrón morfológico de tipo meandriforme y divagante en el año 2023, con cambios notables en la formación de barras fluviales y una mayor perturbación en la continuidad longitudinal y trazado del río. La evaluación del estado hidrogeomorfológico ha identificado problemas y presiones, destacando la influencia de actividades humanas como la urbanización, construcción de embalses y regulación de caudales en las alteraciones observadas en la dinámica fluvial y morfología del cauce del río.

El análisis de las tendencias en las áreas de coberturas, tanto en el corredor ribereño como en el cauce funcional, proporciona una visión completa de la dinámica fluvial del espacio fluvial del río Gállego. Estas tendencias, que evidencian cambios significativos en la distribución de las barras a lo largo del tiempo son fundamentales para comprender la compleja interacción entre factores naturales y actividades humanas. Asimismo, la información geográfica obtenida del análisis espacial de geodatos y con el apoyo de un S.I.G puede ofrecer datos relevantes para diseñar e implementar estrategias de gestión y conservación dirigidas a preservar la salud y funcionalidad de estos ecosistemas fluviales.

En continuidad con otros hallazgos en los resultados obtenidos, el estudio de las barras fluviales en el río Gállego revela cambios notables en su dinámica. Se evidencia una reducción creciente de barras desnudas, indicando estabilidad y menos flujo, mientras aumentan las barras vegetadas sugiriendo menor número de crecidas. Estos cambios atribuidos a factores ambientales y humanos complejizan la gestión del ecosistema fluvial. El índice IDBF, esencial en este estudio, ha permitido entender estos cambios, identificando tendencias y patrones clave a lo largo del último siglo. Su importancia se encuentra en entender las barras fluviales como indicadores fundamentales de la salud del río, orientando así las estrategias para conservarlo y restaurarlo. También se destaca por su contribución al conocimiento de la dinámica de las barras y su impacto en el río.

La complejidad inherente al estudio de los ríos, al ser sistemas naturales en constante cambio, se intensifica en el caso del río Gállego, alterado en toda su cuenca por la actividad humana. Estas acciones manifestadas a través de presiones como la urbanización, la construcción de embalses, la re-

gulación de caudales y las desviaciones por acequias, han perturbado su flujo natural generando notables impactos en su salud. Frente a este panorama crítico, el río Gállego emerge como un claro indicador de las alteraciones en los ecosistemas fluviales, instándonos a tomar medidas tempranas para preservar su integridad ambiental. En el contexto de este estudio es fundamental destacar la importancia de abordar el análisis de los ríos como un patrimonio natural de gran valor para la ordenación del territorio como así lo exige la Directiva marco del Agua 2000/60/CE. A pesar de su alteración, el río Gállego es un enorme patrimonio natural para Zuera. Con propuestas de restauración fluvial y educación ambiental como las que se proponen en este estudio se puede reforzar y poner en valor ese patrimonio. El río podrá ganar resiliencia y Zuera podrá convertirse en un ejemplo ciudadano de buena gestión fluvial.

BIBLIOGRAFÍA

- AEMA (2008). *Impacts of Europe's changing climate, indicator-based assessment*. Copenhagen. 246 pp.
- Ballarín, D. (2022). Revisión crítica de indicadores hidrogeomorfológicos fluviales y análisis de aplicabilidad sobre el terreno. *Tesis doctoral (inédita)*. Universidad de Zaragoza.
- Ballarín, D., Mora, D. & Ollero, A. (2010). Aplicación del índice hidrogeomorfológico IHG en las cuencas del Gállego y Matarraña. En Úbeda, X.; Vericat, D. y Batalla, R.J. (Eds.) *Avances de la Geomorfología en España, 2008-2010. XI Reunión Nacional de Geomorfología*, 193-197, Solsona.
- Ballarín, D. (2005). Estudio de dinámica fluvial a través del análisis de las comunidades vegetales de ribera. *Trabajo de investigación de doctorado*. Universidad de Zaragoza.
- Benito, G., Sancho, C., Peña, J.L., Machado, M.J. & Rhodes, E.J. (2010). Large-scale karst subsidence and accelerated fluvial aggradation during MIS6 in NE Spain: climatic and paleohydrological implications. *Quaternary Science Reviews*, 29, 2694-2704.
- Benito, G. & Hudson, P. (2010). *Flood hazards: the context of fluvial geomorphology. Geomorphological hazards and disaster prevention*. 111-128 pp.
- Benito, G., Pérez-González, A., Gutiérrez, F. & Machado, M.J. (1996). Modelo morfo-sedimentario de evolución fluvial cuaternaria en condiciones de subsidencia kárstica de evaporitas (río Gállego, cuenca del Ebro). *Cuadernos de Geología Ibérica*, 21: 395-420.
- Benito, G. (1989). Geomorfología de la cuenca baja del río Gállego. *Tesis Doctoral*. Universidad de Zaragoza.
- Buffin-Bélanger, T., Cloutier, C.A., Tremblay, C., Chaillou, G., Larocque, M. (2015) Dynamics of groundwater floodwaves and groundwater flood events in an alluvial aquifer. *Canadian Water Resources Journal*, DOI: 10.1080/07011784.2015.1102651.
- Cavalli, M., Tarolli, P., Marchi, L. & Dalla Fontana, G. (2008). *The effectiveness of airborne Lidar data in the recognition of channel-bed morphology*. *Catena*, 73 (3): 249-260.
- Centro Ibérico de Restauración de Espacios Fluviales (CIREF). (2010). ¿Qué es restauración fluvial? Notas técnicas del CIREF, nº4. Pdf. Disponible en: https://www.dropbox.com/s/gjgychnas7stpz/nota_4-2010_4_Restauracion-Fluvial.pdf
- CHE (2009). *Consultoría y asistencia para el estudio de las repercusiones de la actividad humana en el estado de las aguas superficiales. Caracterización adicional del riesgo, en especial de las masas de agua en riesgo en estudio de la Confederación Hidrográfica del Ebro*. Confederación Hidrográfica del Ebro. Octubre 2009. 640-673 pp.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio*. Ed. Ariel, 595 pp.
- Conesa García, C., Ollero, A., Ibisate, A., Conesa García, C., Ollero, A., Ibisate, A., Vidal-Abarca, M.R., Suárez, M.L., Pérez Cutillas, P., García Lorenzo, R., Pirchi, V., Hermoso, Y., Sanmartín, S. & Martínez Salvador, A. (2022). Indicators of Resilience, evaluation and criteria for management and restoration. In Ollero, A., Conesa García, C. & Vidal Abarca Gutiérrez, M.R., (Eds.). *A guide to good practices for the management and restoration of Mediterranean ephemeral streams: resilience and adaptation to climate change*. 184 pp. Publisher: Edit.um, Ediciones de la Universidad de Murcia. DOI: 10.6018/editum.2912. ISBN: 978-84-09-33842-9.
- Corenblit, D., Steiger, J., Gurnell, A.M., Tabacchi, E. & Roques, L. (2009). Control of sediment dynamics by vegetation as a key function driving biogeomorphic succession within fluvial corridors. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34: 1790-1810.
- Crosato, A., Mosselman, E. (2020) An integrated review of river bars for engineering, management and transdisciplinary research. *Water*, 12, doi:10.3390/w12020596

- Del Valle Melendo, J., Ollero, A. & Sánchez Fabre, M. (2005). Cuenca del río Gállego. Atlas de los ríos de Aragón. (1era ed). Ed: Prames, S.A. I.S.B.N: 84-8321-186-6. 45-63 pp.
- Duarte, P. (2017). Inventario ambiental y propuestas de actuación para el Bajo Gállego, en el término municipal de Zaragoza. *Informe de resultados*. Ayuntamiento de Zaragoza. 88 pp.
- Dufour, S. & Piégay, H. (2009). From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits. *River Research and Applications*, Vol. 25, Issue 5, 568-581. <https://doi.org/10.1002/rra.1239>.
- Elosegi, A. & Sabater, S. (Eds.). (2009). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Fundación BBVA. Primera edición: abril 2009, Ed.: Rubes: España. 444 pp.
- Espinosa, P., De Meulder, B., Shannon, S. & Ollero, A. (2023). Living on (in) the Edge. River Restoration as a New Urban Design Strategy.
- Esteve Selma, M., Carreño Fructuoso, M., Moya Pérez, J., Montoya Bernabéu, P., Martínez Fernández, J., Pérez Navarro, M. & Lloret, F. (2018). *Respuesta de los bosques de Pinus halepensis del sureste ibérico al cambio climático: Los eventos de sequía extrema*. Universidad de Murcia.
- Ferrer-Boix, C., Scorpio, V., Martín Vide, J.P., Núñez, F. & Mora, D. (2023). Massive incision and outcropping of bedrock in a former braided river attributed to mining and training. *Geomorphology*, doi 10.1016/j.geomorph.2023.108774
- Ferrer-Boix, C. (2010). Incisión de ríos por extracción aluvial y retirada de presas. Estudio matemático y experimental. *PhD Thesis*, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Gaeuman, D., Boyce, J. (2018) Effects of gravel supply on gravel bar morphology and physical habitat in a reach of the Trinity River, California, USA. *12th ISE 2018*, Tokyo.
- García, J.H., Ollero, A., Ibisate, A., Fuller, I.C., Death, R.G. & Piégay, H. (2021). Promoting fluvial geomorphology to “live with rivers” in the Anthropocene Era. *Geomorphology*, 380, doi 10.1016/j.geomorph.2021.107649.
- García-Ruiz, J. M., López-Moreno, J. I., Lasanta, T., Vicente-Serrano, S. M., González-Sampériz, P., Valero-Garcés, B. L., Sanjuán, Y., Beguería, S., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N. & Gómez-Villar, A. (2015). Los efectos geoecológicos del cambio global en el Pirineo Central español: una revisión a distintas escalas espaciales y temporales. *Pirineos*, 170, e012. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2015.170005>
- Gillilan, S., Boyd, K., Hoitsma, T. & Kauffman, M. (2005). Challenges in developing and implementing ecological standards for geomorphic river restoration projects: a practitioner's response to. *Journal of Applied Ecology*. 42 (2), 223-227.
- Gilvear, D., Francis, R., Willby, N., Gurnell, A. (2008) Gravel bars: a key habitat of gravel-bed rivers for vegetation. In Habersack, H., Piégay, H., Rinaldi, M. (Eds.) *Gravel bed rivers VI: from process understanding to river restoration*, 677-700, Elsevier, Amsterdam.
- Grabowski, R. C., Surian, N. & Gurnell, A.M. (2014). Characterizing geomorphological change to support sustainable river restoration and management. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 1 (5), 483-512.
- Gutiérrez Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Editorial Pearson Educación, Madrid.
- Horacio, J. (2015). *Medicina fluvial. Un Nuevo paradigma en la conservación y restauración de ríos bajo el enfoque de la geomorfología*. Jolube, Jaca. 123 pp.
- Ibisate, A., Díaz, E., Ollero, A., Acín, V. & Granado, D. (2013). Channel response to multiple damming in a meandering river, middle and lower Aragón River (Spain). *Hydrobiologia*, 712, 5-23, doi: 10.1007/s10750-013-1490-0.
- Jantzi, H. (2018). *Incision fluviale et transition d'une rivière alluviale vers une rivière à fond rocheux: formation et évolution des seuils molassiques de la moyenne Garonne toulousaine au cours du 20e siècle*. Thèse de Doctorat, Université Toulouse Jean Jaurès.

- Leopold, L. B. & Wolman, G. M. (1957). *River channel patterns: braided, meandering, and straight*. Washington, DC: US Government Printing Office. 37-86 pp.
- Liébault, F. & Piégay, H. (2002). Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of Southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 425-444.
- Liro, M. (2019). Dam reservoir backwater as a field-scale laboratory of human-induced changes in river biogeomorphology: a review focused on gravel-bed rivers. *Science of the Total Environment*, 651: 2899-2912.
- Leopold, L. B., Wolman, G. M., & Miller, J.P. (2020). *Fluvial Processes in Geomorphology*. (2nd ed.). Dover Publications.
- López Moreno, J.I. & García Ruiz, J.M. (2003). Influencia de los embalses sobre el régimen fluvial en los Pirineos centrales. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 29, 7-21. <https://doi.org/10.18172/cig.1055>
- Magdaleno, F., Díez, J., González, G. Martínez-Capel, F. & García, E. (2018). El diseño de la restauración fluvial: criterios y alternativas. En Díez, J. & Ibisate, A. (Eds.). *Retos y Experiencias de Restauración Fluvial en el Ámbito de la Red Natura 2000*. Vitoria-Gasteiz. 267pp.
- Marcos, A. (1991). Análisis de la evolución reciente de la morfología del cauce del Bajo Gállego en las proximidades de Zaragoza: influencia de las actuaciones humanas en su entorno. *Acta Geológica Hispánica*, 26(1): 23-33.
- Marqués, L.A. (2018). Alteraciones hidrogeomorfológicas en el Bajo Gállego a partir del registro instrumental. *Tesis doctoral*. Universidad de Zaragoza.
- Marín, J.M. (1993). Balance hídrico e hidrológico de la cuenca media del río Gállego. *Geographicalia*, 30: 243-257.
- Marín, J.M. (1989). Balance hídrico e hidrológico de la cuenca alta del río Gállego. *Geographicalia*, 26: 175- 181.
- Marín, J.M. (1987). Estructura hidrológica y utilización de las aguas en la cuenca alta y media del río Gállego. *Tesis doctoral inédita*. Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza.
- Martín Vide, J.P., Ferrer-Boix, C. & Ollero, A. (2010). Incision due to gravel mining: modeling a case study from the Gállego River, Spain. *Geomorphology*, 117: 261-271.
- Martín Vide, J.P. (2002) *Ingeniería de ríos*. Edicions UPC, 331 p., Barcelona (edición especial por Alfaomega, México).
- Mestre, A. y Moreno, J.V. (2009). El seguimiento de la sequía en estaciones y grandes cuencas usando el índice SPI. *AME Boletín*, 23: 36-41.
- Mora, D. (2007). Análisis de la evolución de los usos del suelo y la dinámica fluvial del curso bajo del río Gállego. *Memoria fin de master TIG*.
- Moreno, S. (2005). Restauración ecológica en ríos de la cuenca del Ebro. Propuestas de actuaciones de restauración en los Ojos de Monreal del Campo-Río Jiloca (Teruel) y tramos del curso bajo del río Gállego (Zaragoza). *Tesis Master CIHEAM-Instituto Agronómico Mediterráneo*, Zaragoza.
- Newson, M. & Large, A. (2006). Natural rivers, hydromorphological quality and river restoration: a challenging new agenda for applied fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*. 31 (13), 1606-1624.
- Ollero, A., Ballarín, D., García, J.H., Ibisate, A., Mora, D., & Sánchez Fabre, M. (2021). Diagnóstico fluvial, impactos en cauces y cambio global: aplicaciones del índice hidrogeomorfológico IHG. *Geographicalia*, (73), 295-3160. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.2021735191
- Ollero, A., Ballarín, D., Díaz, E., Mora, D., Sánchez, M., Acín, V., Echeverría, M., Granado, D., Ibisate, A., Sánchez, L., & Sánchez, N. (2015 a). Un índice hidrogeomorfológico (IHG) para la

- evaluación del estado ecológico de sistemas fluviales. *Geographicalia*, (52), 113–141. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.2007521109
- Ollero, A. (2015 b). *Guía metodológica sobre buenas prácticas en restauración fluvial. Manual para gestores*. Fundación ecología y Desarrollo. Zaragoza.
- Ollero, A., Ibisate, A., Granado, D. & Real de Asua, R. (2015 c). Channel responses to global change and local impacts: perspectives and tools for floodplain management (Ebro River and tributaries, NE Spain). In Hudson, P.F. and Middelkoop, H. (ed.) *Geomorphic approaches to integrated floodplain management of lowland fluvial systems in North America and Europe*, 27–52, Springer, New York. DOI 10.1007/978-1-4939-2380-9_3.
- Ollero, A. & Ibisate, A. (2012). Space for the river: a flood management tool. In Wong, T.S.W. (Ed.): *Flood risk and flood management*, 199–218, Nova Pub., Hauppauge, NY.
- Ollero, A. (2011). Los cauces fluviales como indicadores de cambio global: propuesta metodológica. *Zubía*, 23: 189–202.
- Ollero, A. (2010). Channel changes and Floodplain Management in the Meandering Middle Ebro River, Spain. *Geomorphology*, 117: 247–260.
- Ollero, A., Ballarín, D., & Mora, D. (2009). Aplicación del índice hidrogeomorfológico IHG en la cuenca del Ebro. *Guía metodológica. Confederación Hidrográfica del Ebro*. Zaragoza, España.
- Ollero, A., Ballarín, D., Díaz, E., Mora, D., Sánchez Fabre, M., Acín, V., Echeverría, M., Granado, D., Ibisate, A., Sánchez, L. & Sánchez, N. (2007). Un Índice Hidrogeomorfológico (IHG) para la evaluación del estado ecológico de sistemas fluviales. *Geographicalia*. 52. 113–141.
- Ollero, A. & Martín Vide, J.P. (Coords., 2005). Estudio hidrológico, geomorfológico, hidráulico y ecológico del bajo Gállego en el término municipal de Zaragoza para su gestión como espacio fluvial. *Estudio técnico. Ayuntamiento de Zaragoza*.
- Ollero, A., Sánchez Fabre, M., Marín, J.M., Fernández, D., Ballarín, D., Mora, D., Montorio, R., Beguería, S. & Zúñiga, M. (2004). Caracterización hidromorfológica del río Gállego. En Peña, J.L., Longares, L.A., Sánchez Fabre, M. (Eds.). *Geografía Física de Aragón*. Aspectos generales y temáticos, 117–129, Universidad de Zaragoza e Institución Fernando el Católico, Zaragoza.
- Palmer, M., Bernhardt, E., Allan, J., Lake, P., Alexander, G., Brooks, S. & Galat, D. (2005). Standards for ecologically successful river restoration. *Journal of applied ecology*. 42 (2): 208–207.
- Peña-Monné, J.L., Longares, L.A., Rubio, V., Sampietro, M.M. & Sánchez Fabre, M. (2020). Dynamic changes in the lower Gállego river (Ebro basin, NE Spain) and their relationship with anthropic activities and the quaternary substrate. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 46(2): 371–393.
- Peña-Monné, J.L., Rubio, V., Longares, L.A. & Sánchez Fabre, M. (2011). El meandro de la Peña el Cuervo: un ejemplo de la dinámica fluvial actual del bajo Gállego (Depresión del Ebro). *Geographicalia*, 59–60: 281–294.
- Pirchi, V.N., Zapperi, P. A., & Volonté, A. (2023). “Calidad hidrogeomorfológica en áreas fluviales de expansión urbana. Aplicación del Índice Hidrogeomorfológico (IHG) en un tramo antropizado del arroyo Napostá Grande (Argentina)”. *Investigaciones Geográficas*, (80), 129–149. <https://doi.org/10.14198/INGEO.23931>
- Pirchi, V. (2019). Análisis hidrogeomorfológico en el periurbano norte de la ciudad de Bahía Blanca. *Tesis de Grado (inédita)*. Universidad Nacional del Sur. Recuperada de <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/5563>
- Sánchez Fabre, M. & Marín, J.M. (2000). Comportamiento hidrológico de la cuenca alta del Gállego. *Boletín Glaciológico Aragonés*, 1: 111–126.
- Sánchez Navarro, J.A. (Dir., 2004). Aplicación de la clasificación de Rosgen al río Gállego. Confederación Hidrográfica del Ebro (inédito).

- Scott, D.N., Shahverdian, S., Flitcroft, R., Wohl, E. (2022) Refining geomorphic heterogeneity as a framework for assessing river corridor processes and characteristics. *River Research and Applications*, doi 10.1002/rra.4036
- Segura, F. & Sanchis, C. (2018). Estrechamiento de cauces y cambio de patrón en cursos fluviales mediterráneos como consecuencia del cambio global en las últimas seis décadas: indicadores geomorfológicos. En García, C., Gómez-Pujol, L., Morán-Tejeda, E., Batalla, R.J. (Eds.) *Geomorfología del “Antropoceno”: Efectos del cambio global sobre los procesos geomorfológicos. XV Reunión Nacional de Geomorfología*, 395-398, Universitat de les Illes Balears, Mallorca.
- Trullenque, V., Montealegre, A.L. & Ollero, A. (2022). Análisis multi-temporal de los cambios geomorfológicos y de la cubierta vegetal en un cauce extenso de gravas: el río Cinca, Aragón (España). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 92, doi 10.21138/bage.3111.
- Wolman, M. G. (1954). A method of sampling coarse river-bed material. EOS, *Transactions American Geophysical Union*. 35(6), 951-956.
- Wyżga, B. (2008). A review on channel incision in the Polish Carpathian rivers during the 20th century. In Habersack, H., Piégay, H. y Rinaldi, M. (Eds.) *Gravel bed rivers VI: from process understanding to river restoration*, 525-553, Elsevier, Amsterdam.

Páginas web consultadas

- CEDEX https://ceh.cedex.es/anuarioaforos/EBRO_csv.asp
- IGN-CNIG: <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- IGN-CNIG: <https://www.ign.es/web/mapasantiguos/index.html>
- IDEARAGON: https://idearagon.aragon.es/fichaDescarga/fichaDescarga_50298.html
- CHEbro: <https://www.chebro.es/ca/rio-gallego>
- ArcGis: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/data-management-toolbox/calculate-field.htm>
- CORINE LAND COVER: https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/5728541/KS-HA-11-001-12_EN.PDF.pdf/88b77a74-2628-4ed7-bb9f-24244d6c78a1?t=1414775978000
- CIREF (2023). <https://cirefluvial.com/restauracion-fluvial/>

ANEXO I

Obtención de datos del terreno: Perfiles topográficos de secciones transversales del cauce y entrevistas cualitativas

I. Obtención de datos topográficos: *perfiles del terreno obtenidos del S.I.G*

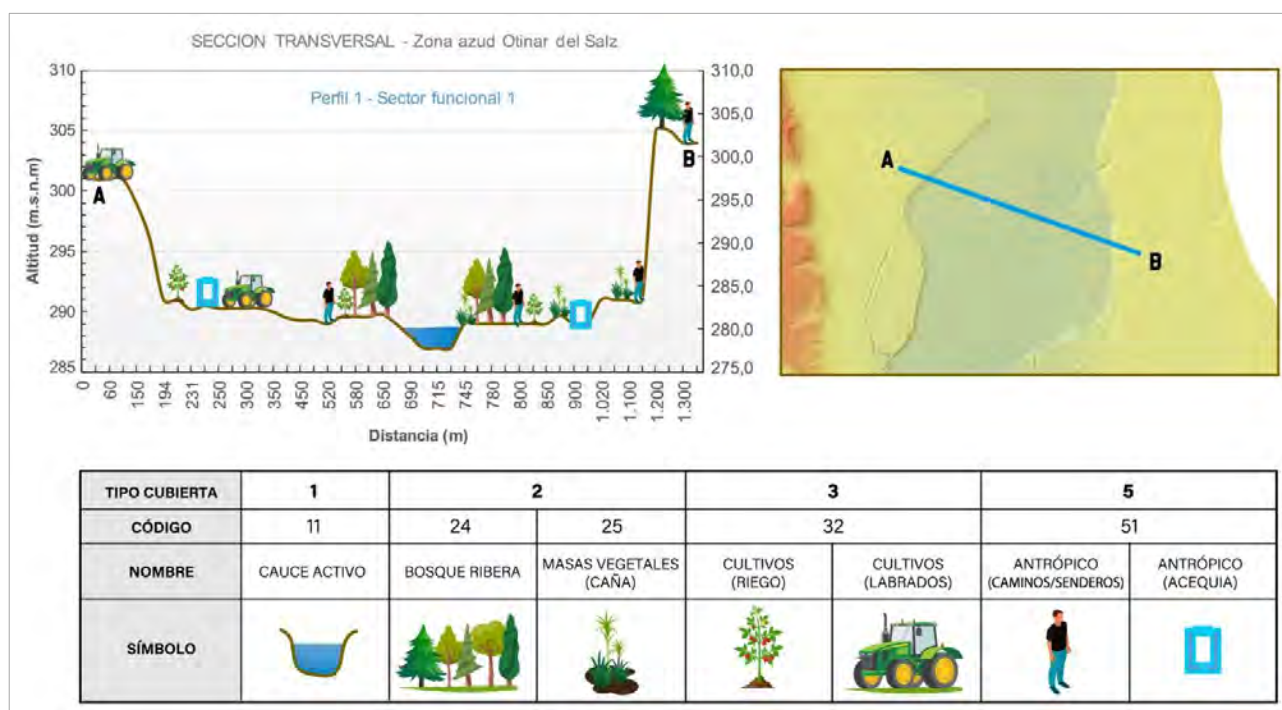


Figura 1.1. Perfil 1 en sector funcional 1, zona azud Candevania. Elaboración propia.

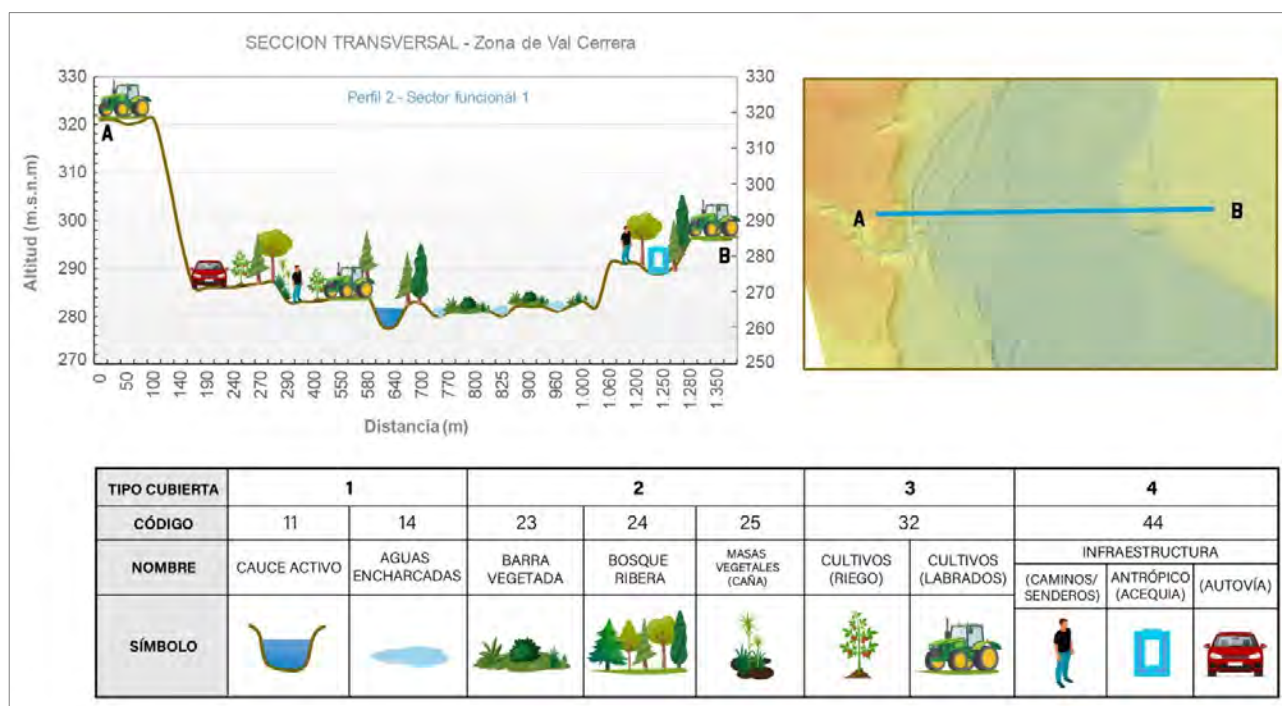


Figura 1.2. Perfil 2 en sector funcional 1, zona Val Cerrera. Elaboración propia.

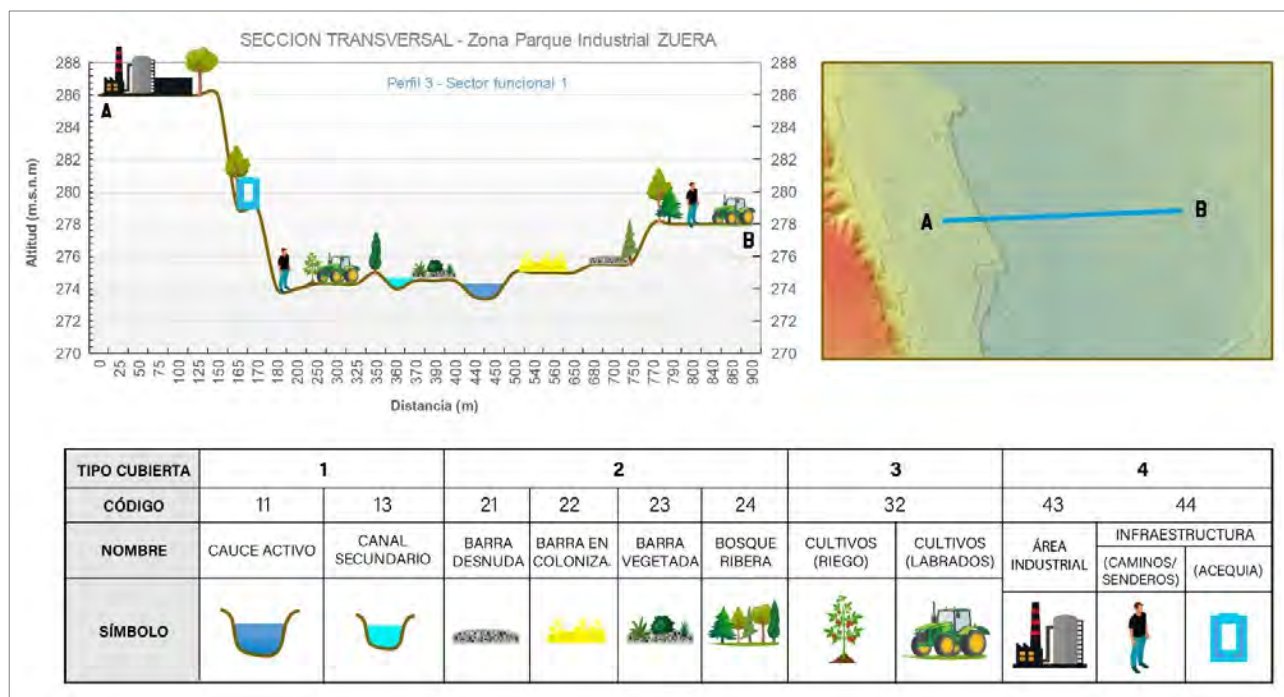


Figura 1.3. Perfil 3 en sector funcional 1, zona parque industrial de Zuera. Elaboración propia.

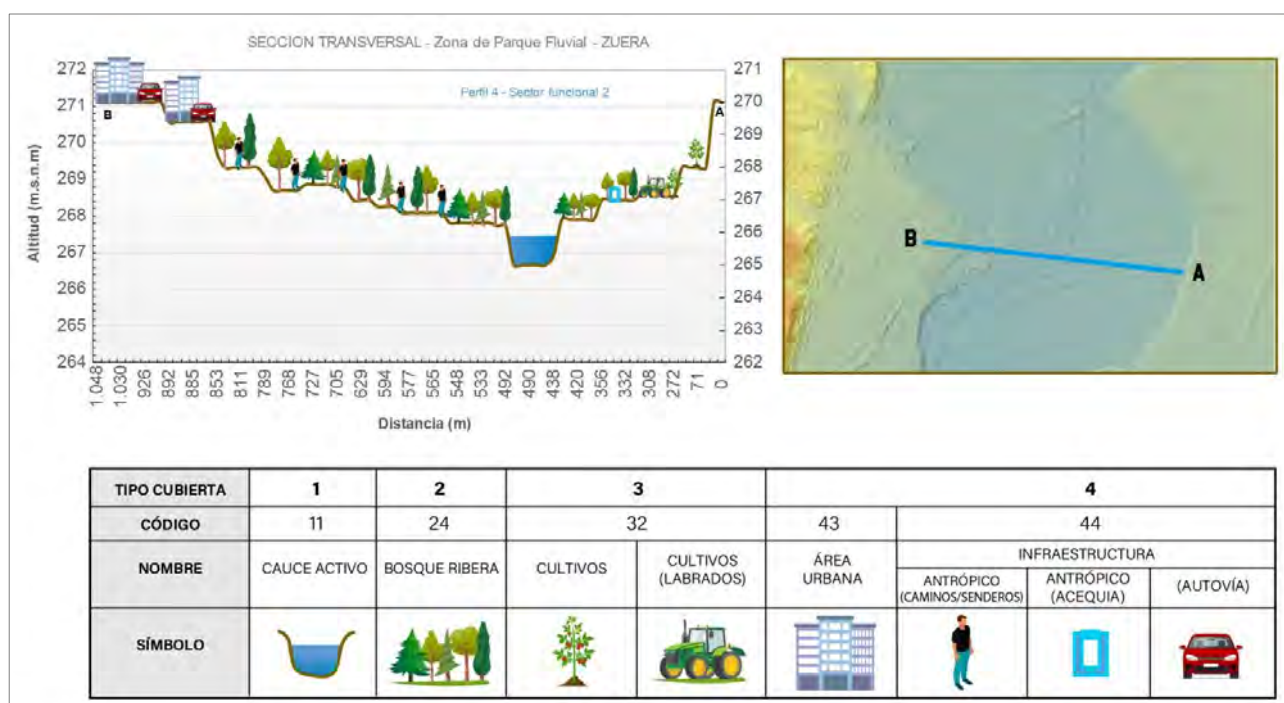


Figura 1.4. Perfil 4 en sector funcional 2, zona parque fluvial de Zuera. Elaboración propia.

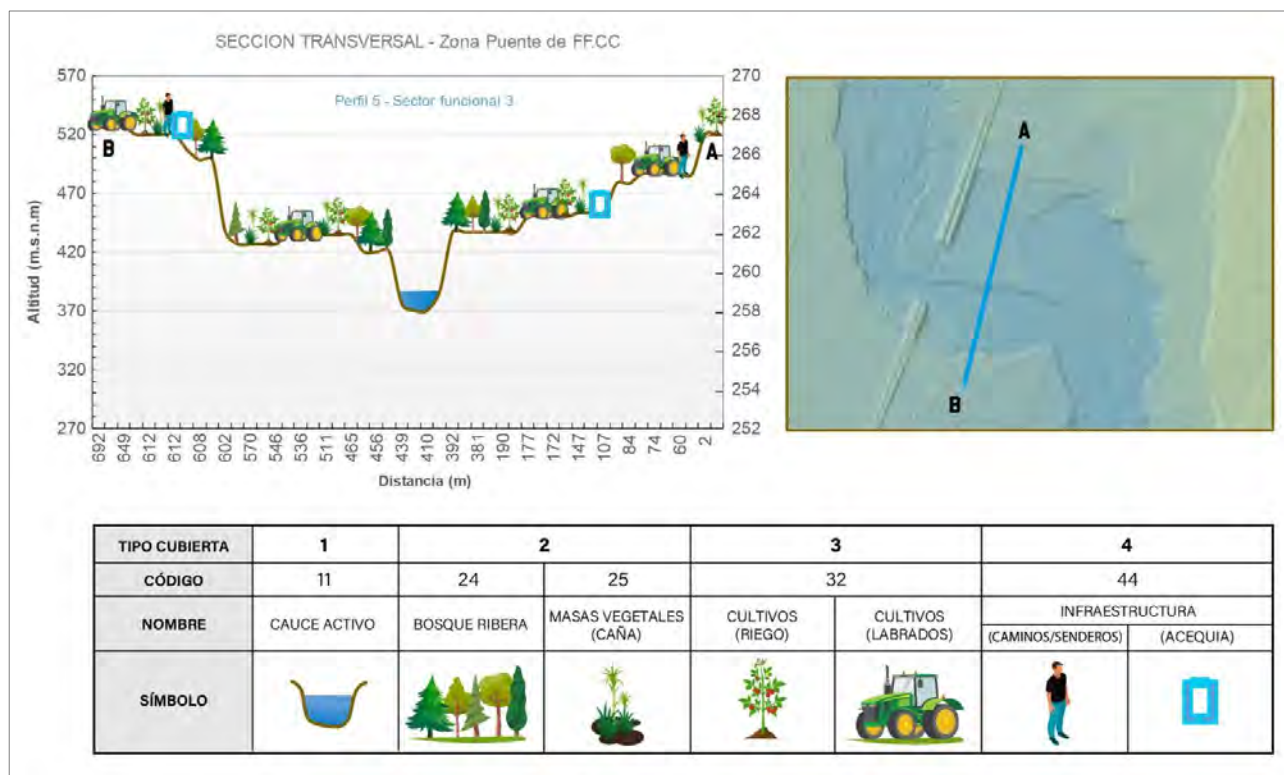


Figura 1.5. Perfil 5 en sector funcional 3, zona puente del ferrocarril de Zuera. Elaboración propia.

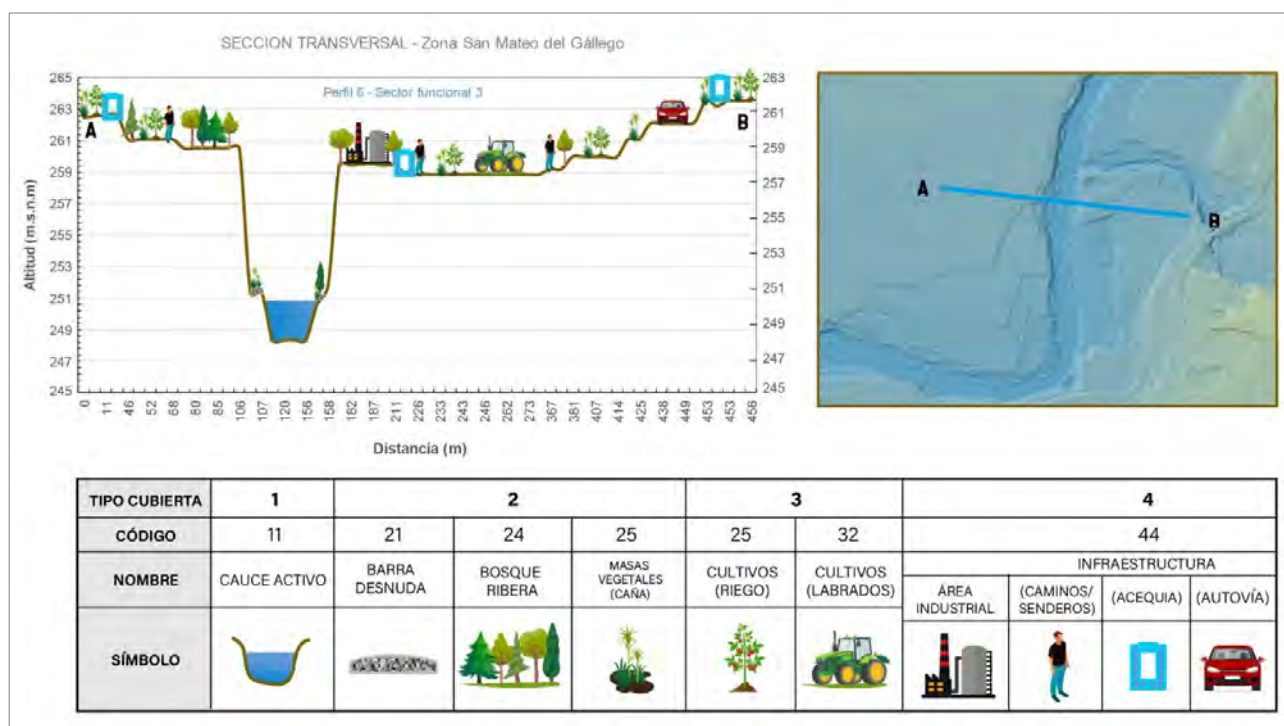


Figura 1.6. Perfil 6 en sector funcional 3, zona barranco S.M. de Gállego. Elaboración propia.

I. Entrevista realizada en la aplicación formulario *Google Forms*

12/8/23, 10:41

Dinámica fluvial y estado hidromorfológico del curso bajo del río Gállego en Zuera: diagnóstico para su restauración

Dinámica fluvial y estado hidromorfológico del curso bajo del río Gállego en Zuera: diagnóstico para su restauración

Entrevista personal sobre el río Gállego en Zuera

Estimados,

Mi nombre es Valeria Pirchi y me encuentro realizando el Trabajo Fin de Máster en Tecnologías de la Información Geográfica en la Universidad de Zaragoza. Me pongo en contacto para solicitar su colaboración respondiendo a una entrevista sobre el río Gállego, su estado actual y la gestión de este recurso en el municipio de Zuera. La finalidad de esta entrevista es conocer más sobre la situación actual del río y los desafíos y oportunidades que enfrenta su gestión. Así mismo, sería relevante conocer las acciones y proyectos que se están llevando a cabo para su conservación. El río Gállego es patrimonio natural de gran importancia para la comunidad local y para el medio ambiente en general. Comprender mejor su estado y las medidas que se están tomando para su protección nos ayudará a promover su cuidado y preservación a largo plazo. La entrevista consta de 5 preguntas abiertas de libre extensión, y su participación será de gran valor para la investigación. Estaré muy agradecida si pudiera dedicar unos minutos para responder y compartir su perspectiva.

Sus respuestas serán tratadas con confidencialidad y solo se utilizarán con fines académicos y de investigación.

Reciba un cordial saludo.

Valeria Pirchi.

** Indica que la pregunta es obligatoria*

1. **1. ¿Qué acciones y/o proyectos se están llevando a cabo para la gestión y conservación del río Gállego en Zuera?** *

2. **2. ¿Qué aspectos consideras que podrían mejorar el estado fluvial del río Gállego?** *

<https://docs.google.com/forms/d/1PSI5oOpGgyU4SAaiceuf12Kihoz3uRRftPTpZlmDnLM/edit>

1/2

3. **3. ¿Existen programas de educación ambiental en el río Gállego que involucren a todos los habitantes de Zuera?** *

(Por favor, mencione y comente brevemente, los programas que considere más relevantes para la conservación del río Gállego).

4. **4. ¿Qué opinión tienes sobre el desarrollo de una posible propuesta de restauración fluvial en el río Gállego en el término de Zuera?** *

5. **5. ¿Qué medidas concretas de restauración propondrías?** *

¡Gracias por tu tiempo!

Para responder cualquier duda adicional o compartir más información sobre el tema, no dudes en contactar a la dirección de correo electrónico v.pirchi@gmail.com

Este contenido no ha sido creado ni aprobado por Google.

Google Formularios

ANEXO II

Obtención y extracción de datos: lenguaje de programación SQL, Python

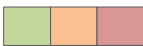
Tabla 2.1. Obtención de registros nulos y errores (Qci)

Criterio de aceptación para valores nulos y sin registro													
Aforo/ año	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	Total año
9012	483	504	559	589	562	598	508	487	485	532	527	521	6355
1911				31	29	31	30	31	30	31	31	30	274
1912	31	30	31			1				1			94
1914					1				1		1	1	4
1915	4							1	1	1	5	5	17
1916	4	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	2	20
1917	3	18	19	5	20	16	3	4	5	6	14	12	125
1918	3	5	11	1	1								21
1919											1	8	9
1920		6	5	4	1	5	4	1	1	2	6	2	37
1921	19	4	21	14	2	2	2	2	2	2	1	2	73
1922	2	9	18	20	2	2			1	1	1	1	57
1923			1	1	1	1				6			10
1924		4		20	5	2	2	2	2	4	3	4	48
1925	13	2	3								3		21
1928			7	31	18				1		14	20	91
1929	3												3
1930										7		9	16
1931	17		10	31	29	31	30	31	30	31	31	30	301
1932	31	30	31	31	28	31	30	31	30	31	31	30	365
1933	31	30	31	31	28	31	30	31	30	31	31	30	365
1934	31	30	31	31	28	31	30	31	30	31	31	30	365
1935	31	30	31	31	29	31	30	31	30	31	31	30	366
1936	31	30	31	31	28	31	30	31	30	31	31	30	365
1937	31	30	31	31	28	31	30	31	30	31	31	30	365
1938	31	30	31	31	28	31	30	31	30	31	31	30	365
1939	31	30	31	31	29	31	30	31	30	31	31	30	366
1940	31	30	31	31	28	31	30	31	30	31	31	30	365
1941	31	30	31	31	28	31	30	31	30	31	31	30	365
1942	2	30	17	10	10				9	27	13	12	130
1943	7	16	21	25	29	31	16	8	9	29	29	29	249
1944	31	30	31	31	28	31	30	31	30	10			283
1970					28	31							59
1983					12	31	30	31	26				130
2004						20	30	31	30	31	31	30	203
2005	31	30	31	31	28	31	30	3	6	31	31	24	307
2012	3	17	2	1	23	21							67
2013		1	20	21	11								53
2016		1											1
9059	31	37	51	31	35	49	94	78	54	31	58	54	603
1944			2		6	2	2		1				13
1946							30	16					46

Criterio de aceptación para valores nulos y sin registro													
Aforo/ año	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	Total año
1978		7	14										21
1981			4										4
1987											27	24	51
1991	31	30	31	31	29	31	30	31	30	31	31	30	366
2004						16	30	31	23				100
2009							2						2
9123	31	30	31	31	28	46	60	62	60	62	62	60	563
1961	31	30	31	31	28	31	30	31	30	31	31	30	365
1993						15	30	31	30	31	31	30	198
9209	31	10											41
2005	31	10											41

Elaboración propia.

De esta tabla resulta:

- Años excluidos de todo cálculo, los coloreados 1961
- Años excluidos del cálculo $Q_{ci_{MIN}}$ y $Q_{ci_{MED}}$ las celdas que contienen los valores coloreados en 
- Estación de aforo analizada se indican en 9123 9059 9012 9209
- 1° columna: es el año de toma de lectura e identificación numérica del aforo. En la primera fila se lee la cantidad mensual de lecturas NULL y en la última el total del año.
- 2° a 13° columna: indican cantidad de valores nulos sin registro por mes.
- 14° columna: indica os totales generales por año.

Tratamiento de datos nulos y errores de medición hidrológica

Se ha considerado necesario plantear, un **criterio de aceptación (error)** para extraer los datos nulos de caudal Q_c (caudal diario) obtenidos de las bases de datos de la Cedex (**afiq.csv** - Datos diarios de estaciones de aforo en río) y tratados a través del sistema Oracle. Se exportaron de Oracle los registros ya tratados a una tabla dinámica en Excel (**afliq_QCI0.xls**) para gestionar más puntuales los datos con errores y sin registro para ser luego eliminados del análisis hidrológico final.

En primer lugar, se han definido dos errores: el error sistemático y el error aleatorio. El *error sistemático* se refiere a errores que ocurren de manera permanente en igual sentido para todas las mediciones de aforo. Estos errores son predecibles y generalmente se deben a problemas en el instrumental de medición, calibración incorrecta o condiciones ambientales no controladas. Pueden corregirse mediante calibración y ajuste adecuados. En este caso de estudio viene determinado por el ente CEDEX. Por otro lado, los errores aleatorios son impredecibles y fluctúan aleatoriamente en torno a un valor verdadero. Se deben a variaciones temporales, fluctuaciones en las condiciones ambientales y errores humanos. Se pueden reducir mediante la repetición de mediciones y el cálculo de promedios. En el caso del presente estudio los datos NULL son por falta de registro de información en la toma de lectura, que alteran los cálculos de $Q_{ci_{min}}$ (caudal mínimo), cálculos de valores medios o cálculos de caudales estacionales. Por ello, según Norma ISO9002 se ha definido un criterio de aceptación en los datos hidrológicos los que fueron tratados de la siguiente manera e indicados en la tabla 2.2.

Se propone como error máximo mensual el 12 % del total de las mediciones obtenidas mensualmente y es equivalente a 4 días, mientras que para las anuales el 12 % serán 47 días totales de error de medición.

Tabla 2.2. criterios de aceptación del error de medición

% mediciones nulas por mes			% mediciones nulas por año		
	$E \leq 2$	(6,5%)		$E \leq 25$	(6,83%)
	$2 > E \leq 4$	(9 – 12,9%)		$25 > E \leq 47$	(7,1 – 12,84%)
	$4 > E \leq 15$	(16 – 48,3%)		$48 > E \leq 177$	(13,1 – 48,3%)
	$15 > E \leq 24$	(51,6 – 77,4%)		$177 > E \leq 282$	(48,6 – 77,4%)
	$E > 25$	(80 – 100%)		$E > 282$	(80 – 100%)

Elaboración propia

2.3. Consultas SQL de los datos hidrológicos en Oracle 4.2.0

- **Consulta 1.** Conteo y extracción de registros de días nulos por mes, año y aforo.

En esta consulta se ejecuta una orden para contabilizar los días nulos por mes, año y aforo. De los metadatos del *Anuario de Aforos* del CEDEX se utilizaron los campos de información de la tabla 2.4, y con ellos se han creado y gestionado todas las consultas SQL. En cada caso, se acompaña de capturas de pantalla con algunos de los registros seleccionados.

Tabla 2.4. Descripción de campos y unidades gestionadas.

Archivo	Descripción	Campos y unidades
AFLIQ	Datos diarios de estaciones de aforo en río	Anomes: fecha (día, mes, año) en la que se toma el dato Indroea: identificador de la estación de aforo Qci: caudal medio diario (m³/s)

Elaboración propia.

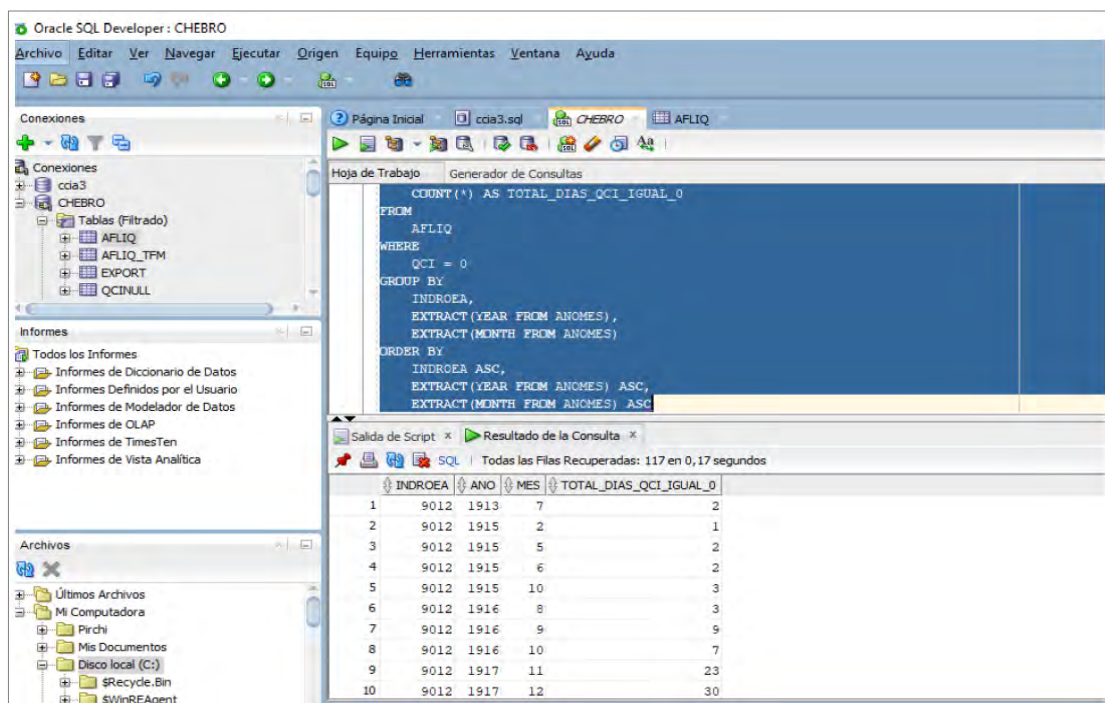
La sintaxis de la consulta 1 se utilizó para seleccionar y extraer los registros de la tabla *Afliq* donde el valor de caudal *Qci* sea 0. Luego se agrupa estos registros por estación de aforo *Indroea*, año y mes. El sistema *Oracle* cuenta cuantos registros cumplen con esa condición y los ordena en orden ascendente por *Indroea*, año y mes. Los registros se extraen para su tratamiento en tablas dinámicas en Excel cuyos resultados ya organizados se encuentran en la tabla 2.1 de este anexo.

```

---CONSULTA 1. Contabilizar los días nulos por mes, año y aforo
---Extrae todos los datos hidrológicos que cumplan la condición de nulos

SELECT INDROEA,
       EXTRACT(YEAR FROM ANOMES) AS ANO, EXTRACT(MONTH FROM ANOMES) AS MES,
       COUNT(*) AS TOTAL_DIAS_QCI_IGUAL_0
FROM AFLIQ
WHERE QCI = 0
GROUP BY INDROEA,
         EXTRACT(YEAR FROM ANOMES), EXTRACT(MONTH FROM ANOMES)
ORDER BY INDROEA ASC,
         EXTRACT (YEAR FROM ANOMES) ASC, EXTRACT(MONTH FROM ANOMES) ASC;

```



▪ **Consulta 2.** Organización en listado de todos los datos nulos en una nueva tabla.

Esta consulta genera una lista de resultados que muestra el valor de *Indroea*, *Qci*, *Mes*, *Año* y *Anohidrologico* para los registros donde el caudal *Qci* es igual a 0. Los resultados se ordenan primero por estación de aforo *Indroea*, luego por año hidrológico *Anohidrologico* y finalmente por mes permitiendo así detectar los valores nulos de caudal por cada estación de aforo, año hidrológico y mes.

---CONSULTA 2. Listado de todos los datos hidrológicos que cumplan la condición de nulos

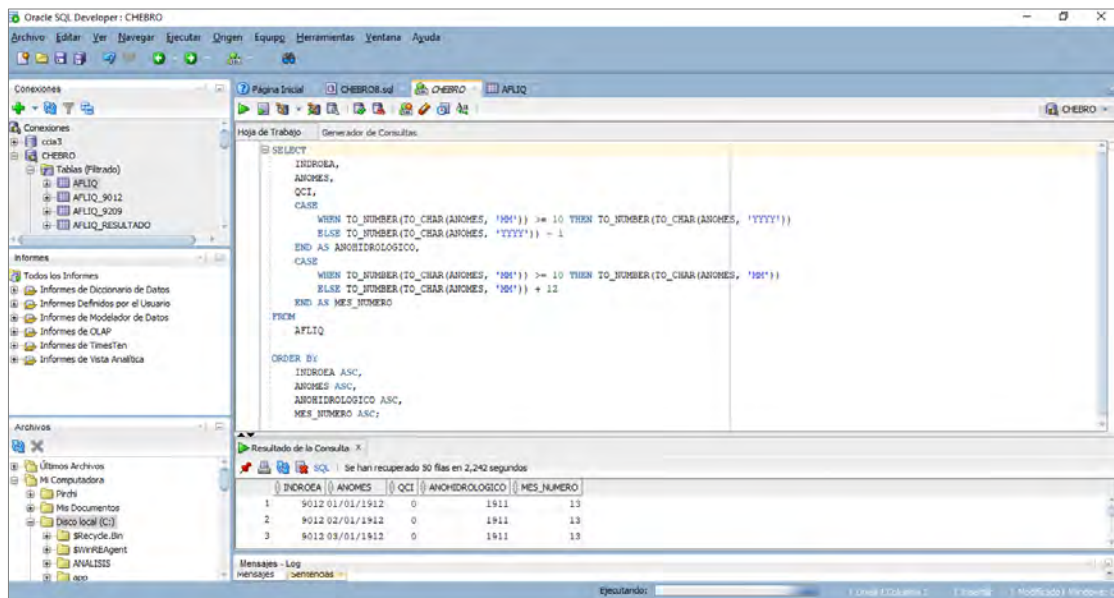
```
SELECT INDROEA, ANOMES, QCI,
       TO_CHAR(ANOMES, 'MON') AS MES,
       TO_CHAR(ANOMES, 'YYYY') AS ANO,
CASE
  WHEN TO_NUMBER(TO_CHAR(ANOMES, 'MM')) >= 10 THEN TO_NUMBER(TO_CHAR(ANOMES, 'YYYY'))
ELSE TO_NUMBER(TO_CHAR(ANOMES, 'YYYY')) - 1 END AS ANOHIDROLOGICO
FROM QCINULL
WHERE QCI = 0
ORDER BY INDROEA AS, ANOHIDROLOGICO AS, MES AS,
```

▪ **Consulta 3.** Organización de los registros por año hidrológico

Con esta consulta se han organizado los datos según el año hidrológico iniciando en el mes de octubre (inicio del año hidrológico para el río Gállego) utilizando en la sentencia **CASE** que evalúa una lista de condiciones y devuelve un resultado. Los resultados se ordenan primero por año hidrológico y luego por número de mes. Se acompaña de la captura de pantalla con algunos de los registros seleccionados.

---CONSULTA 3. Cómo generar el año hidrológico

```
SELECT INDROEA, ANOMES, QCI,
CASE
  WHEN TO_NUMBER(TO_CHAR(ANOMES, 'MM')) >= 10 THEN TO_NUMBER(TO_CHAR(ANOMES, 'YYYY'))
  ELSE TO_NUMBER(TO_CHAR(ANOMES, 'YYYY')) - 1 END AS ANOHIDROLOGICO,
CASE
  WHEN TO_NUMBER(TO_CHAR(ANOMES, 'MM')) >= 10 THEN TO_NUMBER(TO_CHAR(ANOMES, 'MM'))
  ELSE TO_NUMBER(TO_CHAR(ANOMES, 'MM')) + 12 END AS MES_NUMERO
FROM AFLIQ
WHERE QCI = 0
ORDER BY ANOMES ASC, ANOHIDROLOGICO ASC, MES_NUMERO ASC;
```



■ Consulta 4. Obtención de los caudales medios.

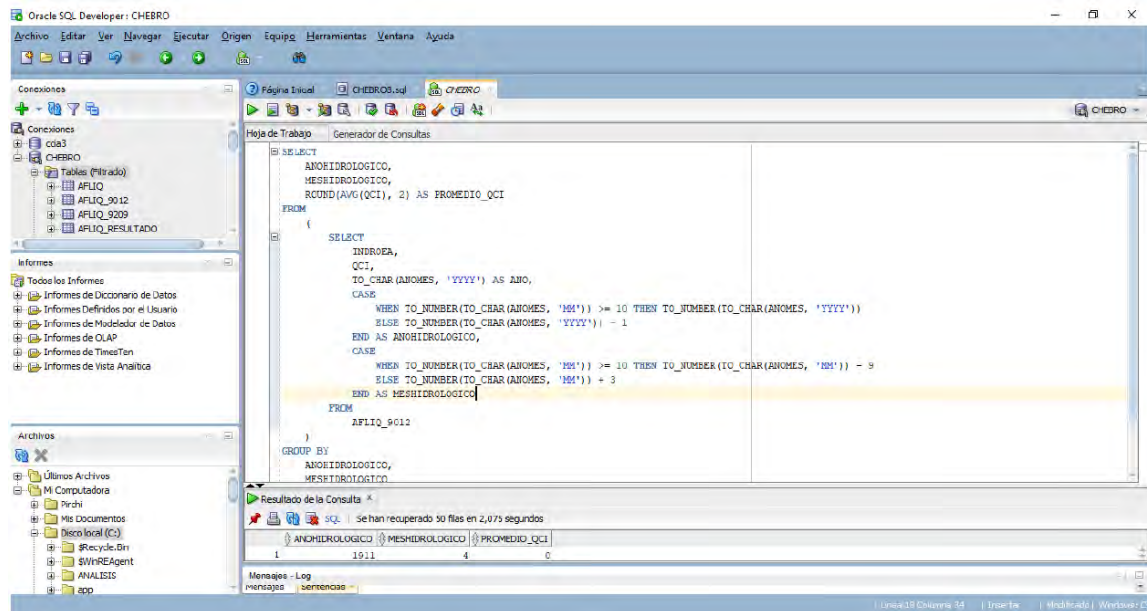
Esta sintaxis se utilizó para calcular el promedio de los valores de caudal *Qci* mensuales de las 4 estaciones de aforo analizadas *Indroea*. Los datos se extraen de la tabla *afliq*, agrupados por año hidrológico y mes hidrológico. Se acompaña de la captura de pantalla con algunos de los registros seleccionados.

---CONSULTA 4. Obtención de tabla con los cálculos de caudales medios

```

SELECT ANOHIDROLOGICO, MESHIDROLOGICO,
  ROUND(AVG(QCI), 2) AS PROMEDIO_QCI
FROM (
  SELECT INDROEA, QCI, TO_CHAR (ANOMES, 'YYYY') AS ANO,
  CASE
    WHEN TO_NUMBER(TO_CHAR(ANOMES, 'MM')) >= 10 THEN TO_NUMBER(TO_CHAR(ANOMES, 'YYYY'))
    ELSE TO_NUMBER(TO_CHAR(ANOMES, 'YYYY')) - 1 END AS ANOHIDROLOGICO,
  CASE
    WHEN TO_NUMBER(TO_CHAR(ANOMES, 'MM')) >= 10 THEN TO_NUMBER(TO_CHAR(ANOMES, 'MM')) - 9
    ELSE TO_NUMBER(TO_CHAR(ANOMES, 'MM')) + 3 END AS MESHIDROLOGICO
  FROM AFLIQ_9012
)
GROUP BY ANOHIDROLOGICO, MESHIDROLOGICO
ORDER BY ANOHIDROLOGICO ASC, MESHIDROLOGICO ASC,

```



2.5. Código Python utilizado en análisis vectorial multitemporal

Código 1. Se utilizó el siguiente código Python para la implementación en la calculadora de campo de la condición *IF* para la función *reclass* necesaria para la reclasificación de las zonas que percibieron cambios en el espacio fluvial mediante la comparación de los campos que contienen los códigos de coberturas. El código se ha desarrollado según tutoriales obtenidos en la plataforma de Esri y accesible en <https://support.esri.com/en-us/knowledge-base/how-to-use-if-statements-in-the-field-calculator-000022370>

```
# CÓDIGO PYTHON 1. Declaración IF en la Calculadora de campo.
# Función reclass que compara los registros de valores en dos campos y devuelve "Estable" si son iguales (no hubo cambios) y "Dinámico" si no son iguales (sí hubo cambios).

def reclass(field1, field2):
    if field1==field2:
        return "Estable"
    else:
        return "Dinámico"
CAMBIO =
reclass(!COD_COB!, !COD_COB_1!)
```

Código 2. El siguiente código Python se encuentra en fase de experimentación para ser implementado en la calculadora de campo una vez que obtenga el índice IDBF. Será utilizado para incorporar en el entorno S.I.G de ArcMap y colorear de acuerdo a la escala cromática correspondiente a las categorías de valores del índice IDBF. A este código le faltarán los valores determinados para cada color y la condición para reclasificar dicho índice.

```
# Código en fase de experimentación. Falta asignar valores IDBF
IF IDBF <=5:
    Color = "azul"
elif IDBF <=10:
    Color = "verde"
elif IDBF <=20:
    Color = "amarillo"
elif IDBF <=30:
    Color = "naranja"
else:
    color = "rojo"
```

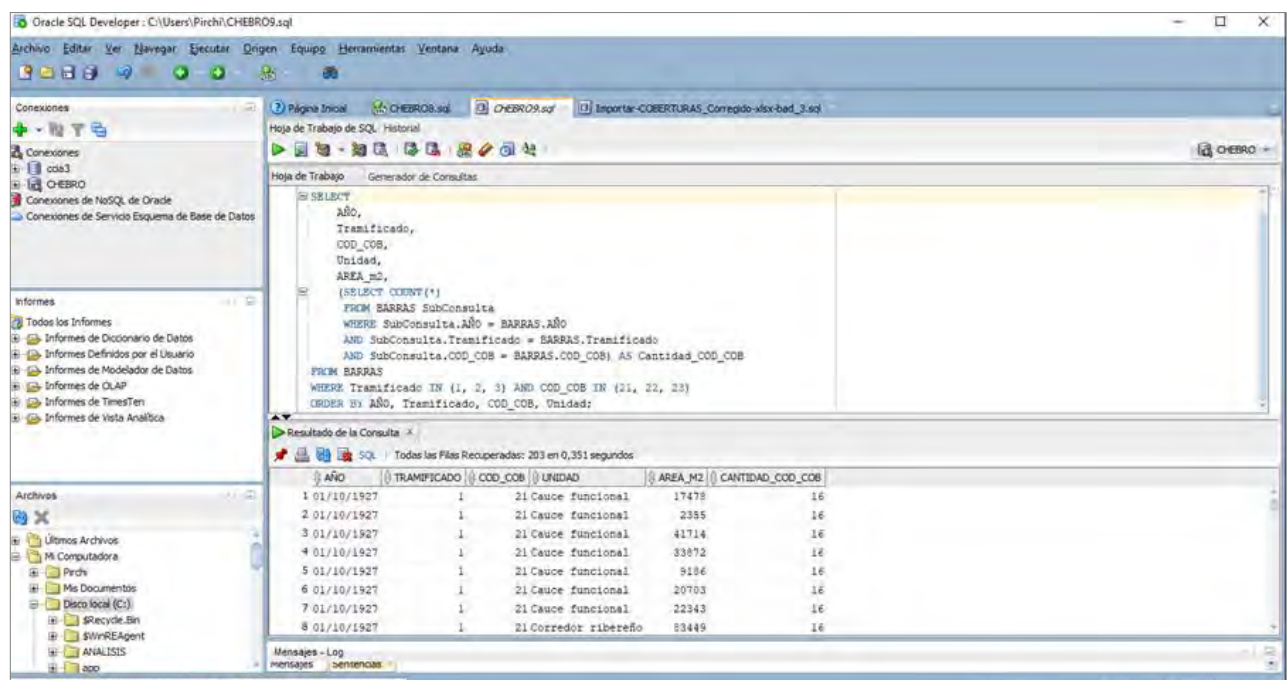
2.6. Consultas SQL en Oracle para extracción de datos para IDBF

- **Consulta 5.** Creación tabla “Barras”, selección y extracción de los datos para índice IDBF

Esta consulta en lenguaje SQL, selecciona datos de la tabla "BARRAS" filtrados por los valores de "Tramificado" (1, 2, 3) y "COD_COB" (21, 22 o 23) correspondientes a las categorías de barras desnuda, en colonización y vegetadas que intervienen en el cálculo del índice IDBF. Luego, cuenta la cantidad de registros que cumplen con las condiciones específicas para cada combinación única de "AÑO," "Tramificado" y "COD_COB." Los campos seleccionados incluyen "AÑO," "Tramificado," "COD_COB," "Unidad" y "ÁREA_m2." La consulta finalmente ordena los resultados primero por "AÑO," luego por "Tramificado," "COD_COB" y "Unidad."

---CONSULTA 5. Obtención de tabla Barras y exportación a Excel con los datos filtrados para la obtención del IDBF

```
SELECT AÑO, Tramificado, COD_COB, Unidad, AREA_m2,
       (SELECT COUNT(*)
        FROM BARRAS SubConsulta
        WHERE SubConsulta.AÑO = BARRAS.AÑO
        AND SubConsulta.Tramificado = BARRAS.Tramificado
        AND SubConsulta.COD_COB = BARRAS.COD_COB) AS Cantidad_COD_COB
FROM BARRAS
WHERE Tramificado IN (1, 2, 3) AND COD_COB IN (21, 22, 23)
ORDER BY AÑO, Tramificado, COD_COB, Unidad;
```



The screenshot shows the Oracle SQL Developer interface. The main window displays the SQL query from the previous block. Below the query, the 'Resultado de la Consulta' (Query Result) window shows the data returned by the query. The data is presented in a table with the following columns: AÑO, TRAMIFICADO, COD_COB, UNIDAD, AREA_M2, and CANTIDAD_COD_COB. The results show 8 rows of data for the year 2019, all with a tramificado value of 1 and COD_COB values of 21, 22, or 23. The units are 'Cauce funcional' for COD_COB 21 and 22, and 'Corredor ribereño' for COD_COB 23. The area values range from 17478 to 23449 m², and the count for each combination is 16.

AÑO	TRAMIFICADO	COD_COB	UNIDAD	AREA_M2	CANTIDAD_COD_COB
1 01/10/1927	1	21	Cauce funcional	17478	16
2 01/10/1927	1	21	Cauce funcional	2355	16
3 01/10/1927	1	21	Cauce funcional	41714	16
4 01/10/1927	1	21	Cauce funcional	33872	16
5 01/10/1927	1	21	Cauce funcional	9184	16
6 01/10/1927	1	21	Cauce funcional	20703	16
7 01/10/1927	1	21	Cauce funcional	22343	16
8 01/10/1927	1	21	Corredor ribereño	23449	16

ANEXO III

**EVOLUCIÓN DE LAS COBERTURAS DEL CAUCE Y EL
CORREDOR RIBEREÑO, PERIODO 1927-2021**

III - 1 Áreas de coberturas del espacio fluvial del río Gállego

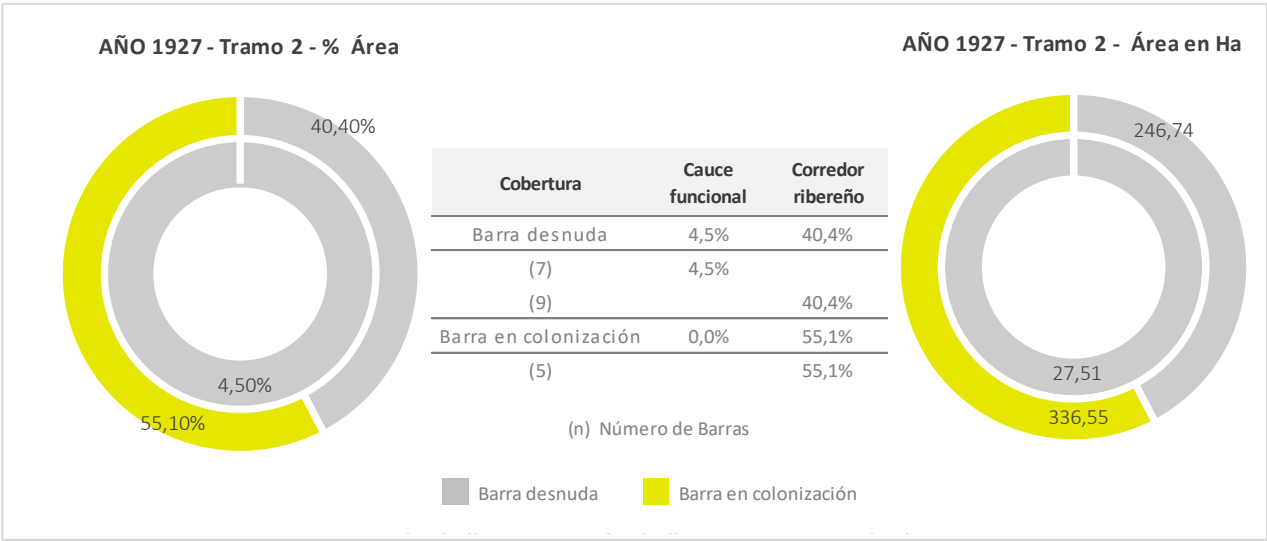
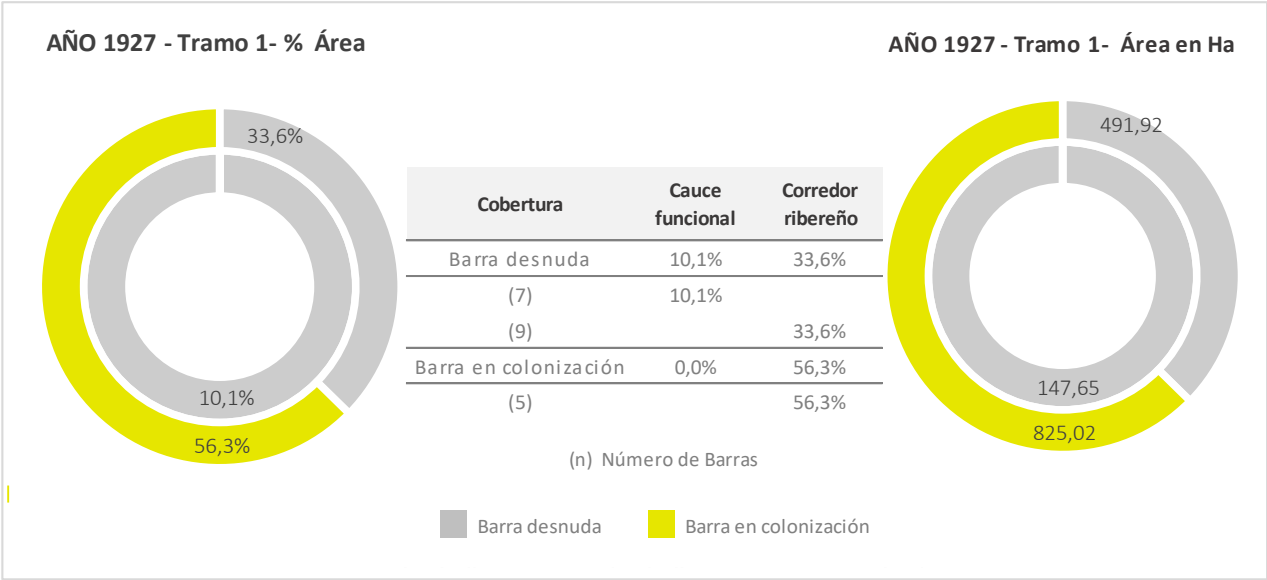


Figura 3.2

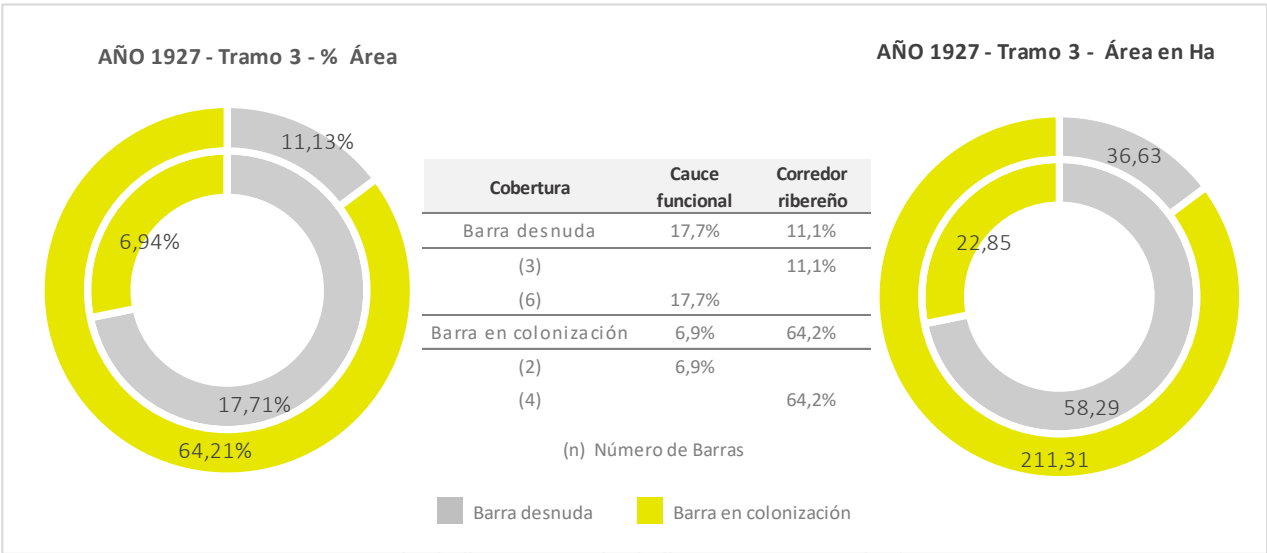


Figura 3.3

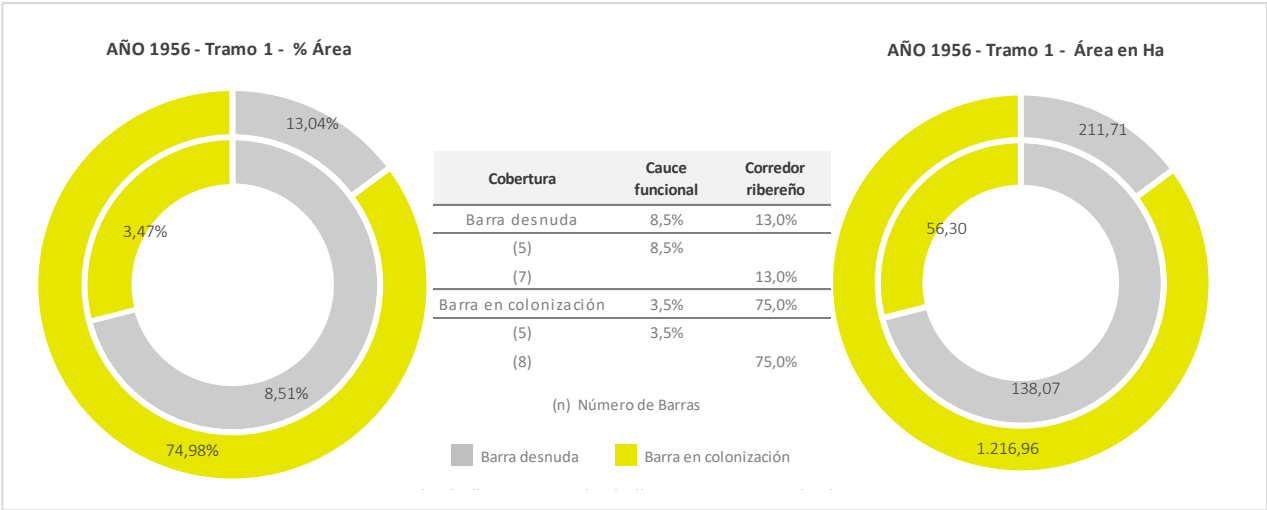


Figura 3.4

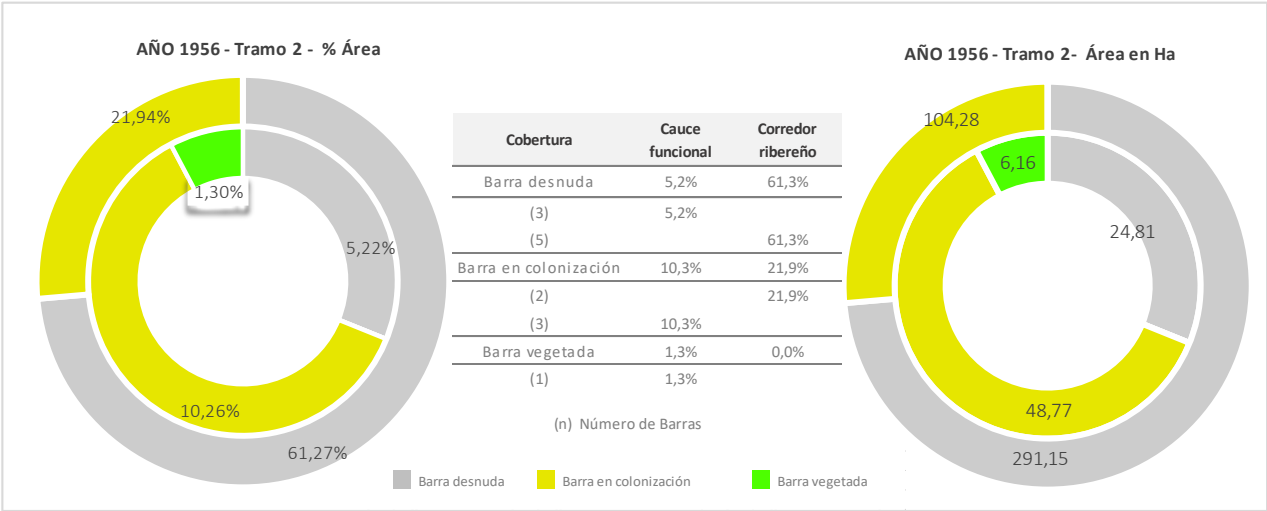


Figura 3.5

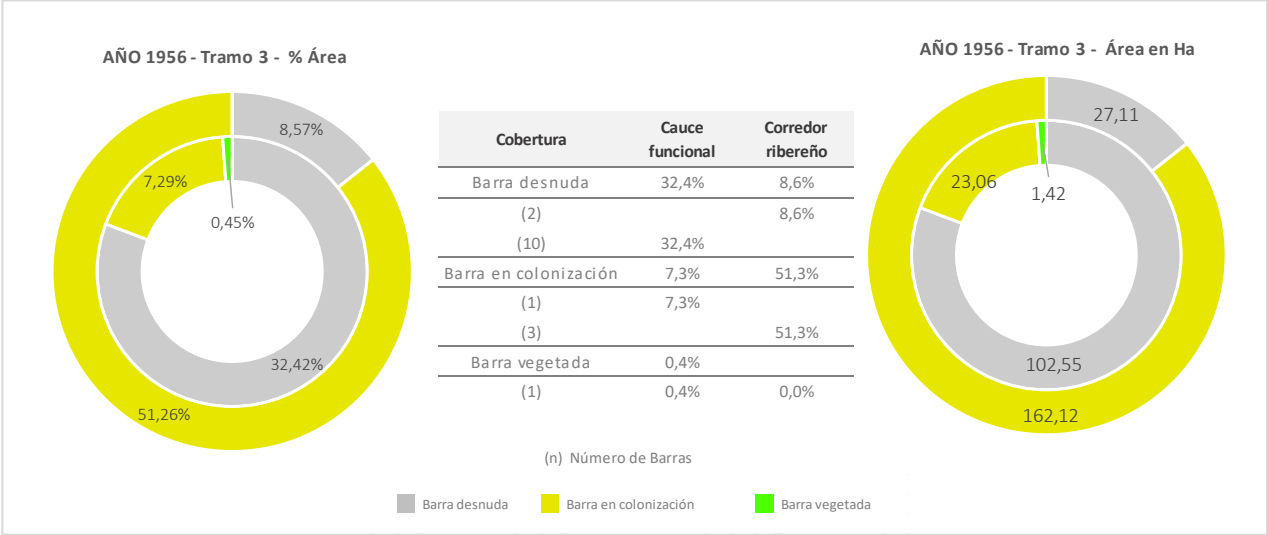


Figura 3.6

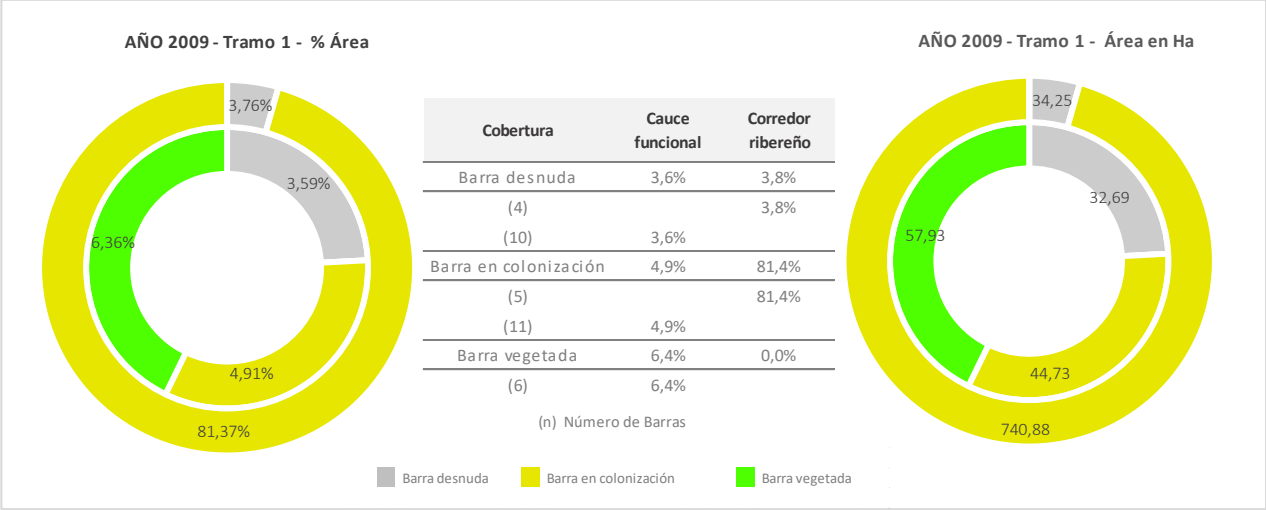


Figura 3.7

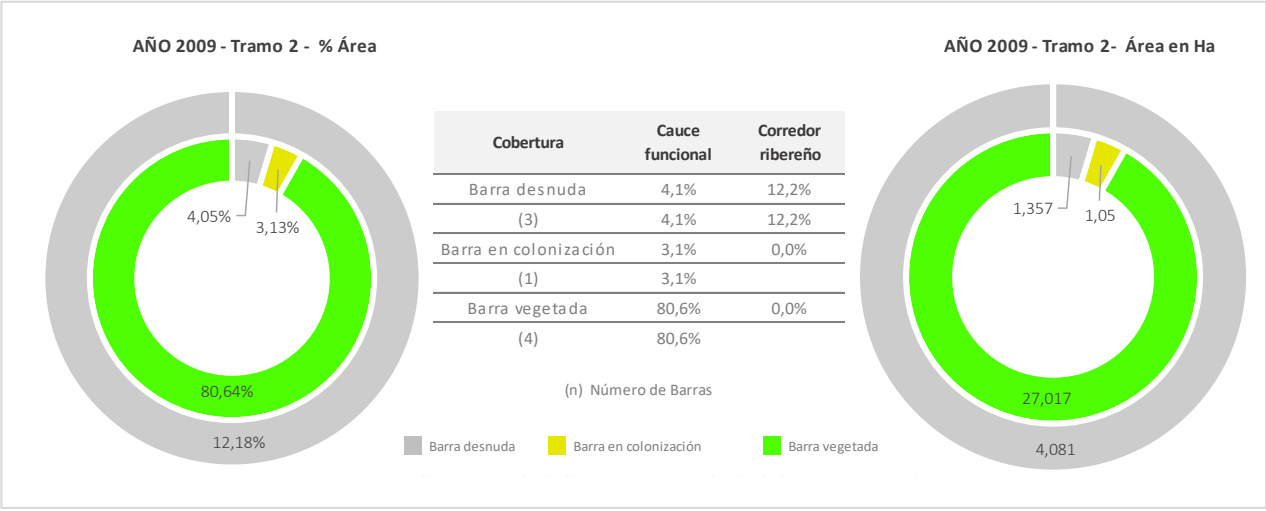


Figura 3.8

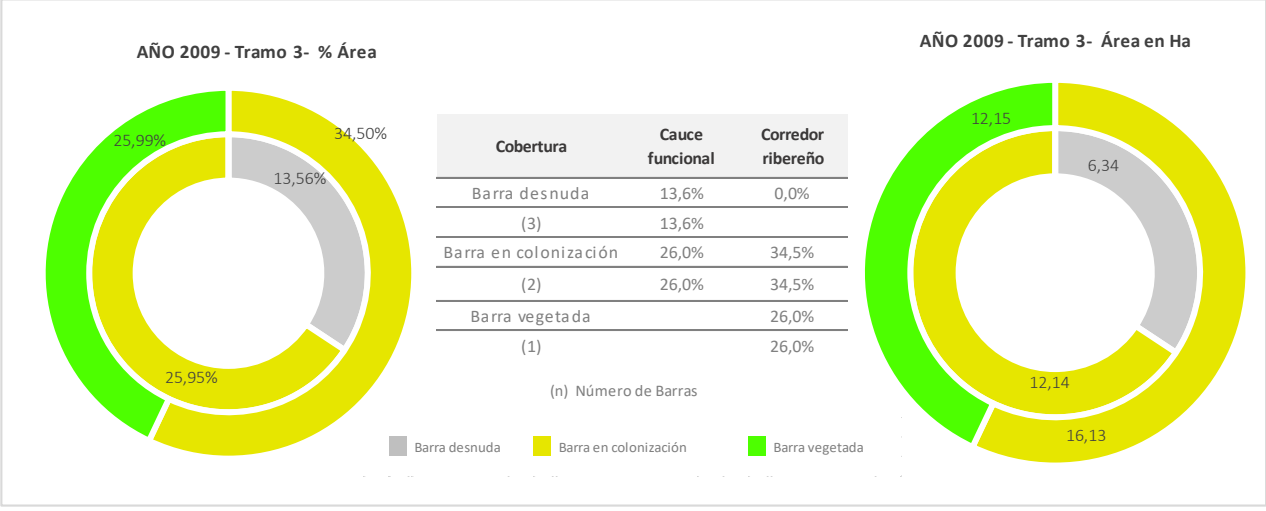


Figura 3.9

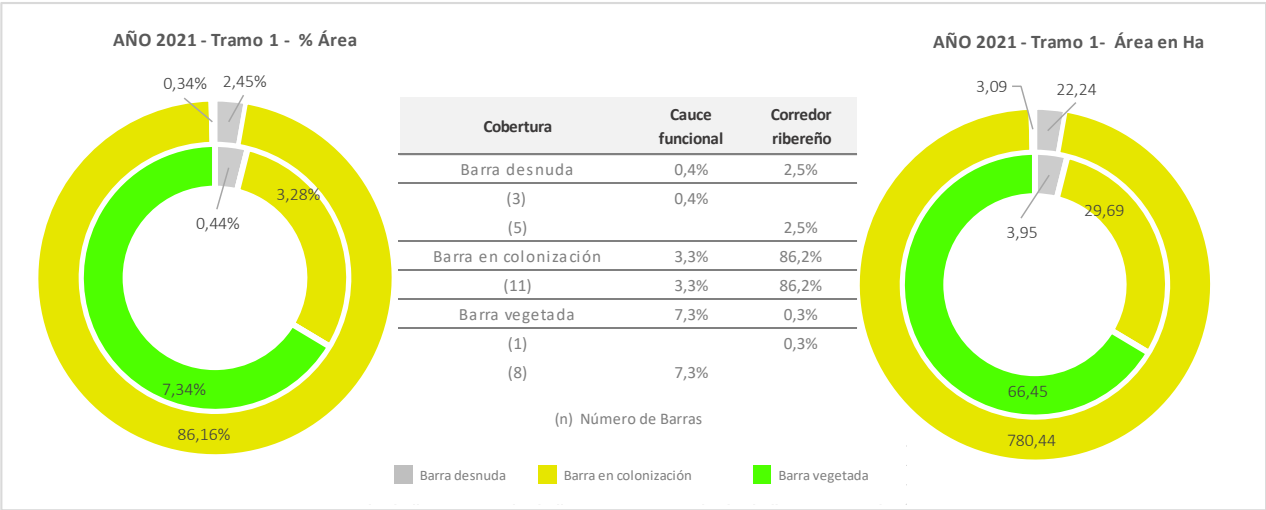


Figura 3.10

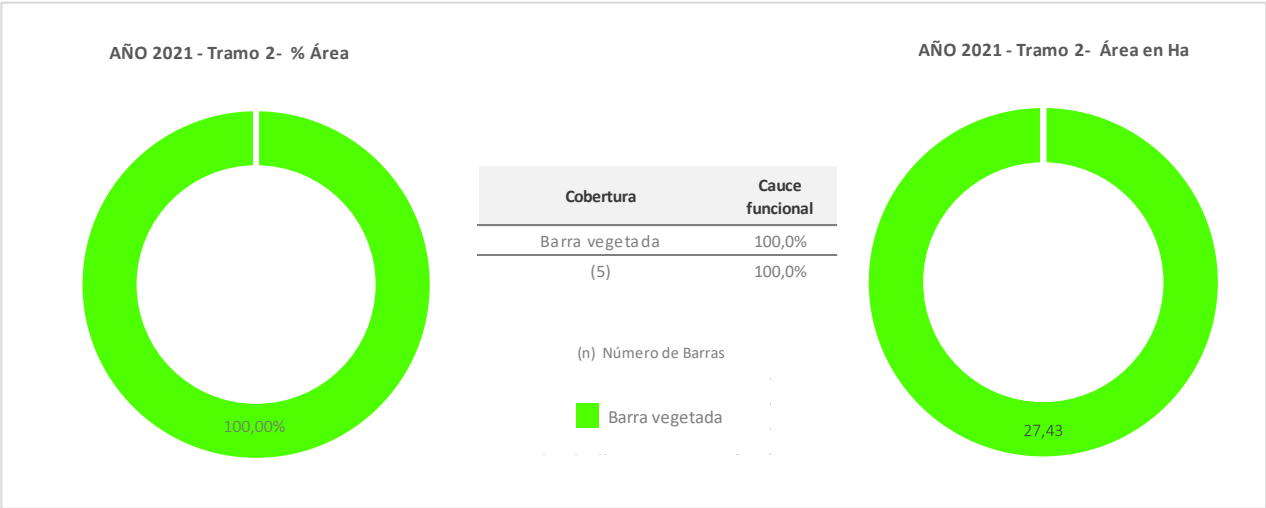


Figura 3.11

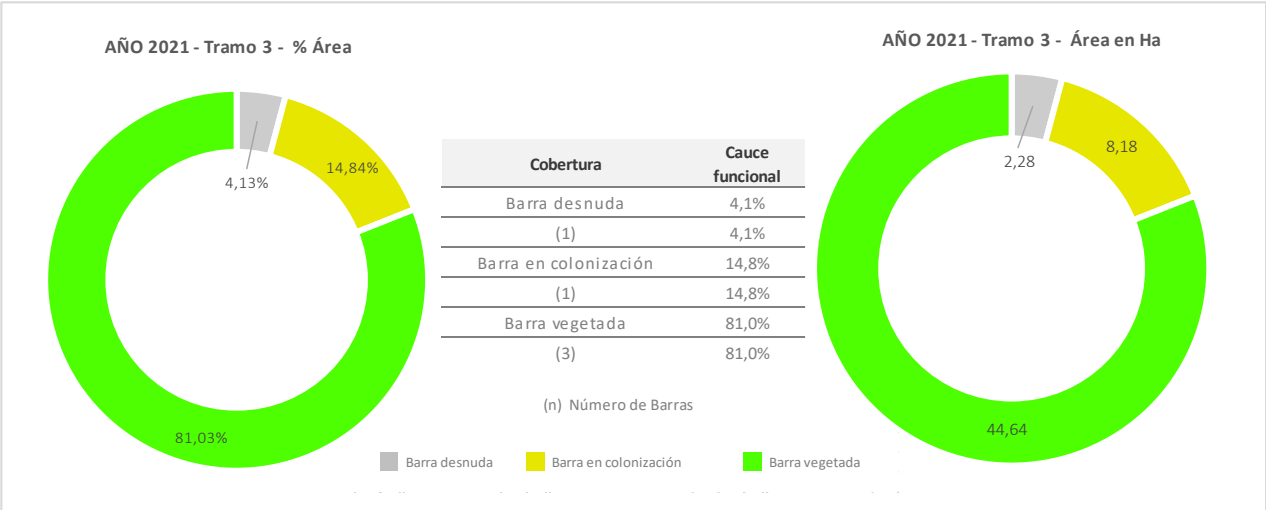
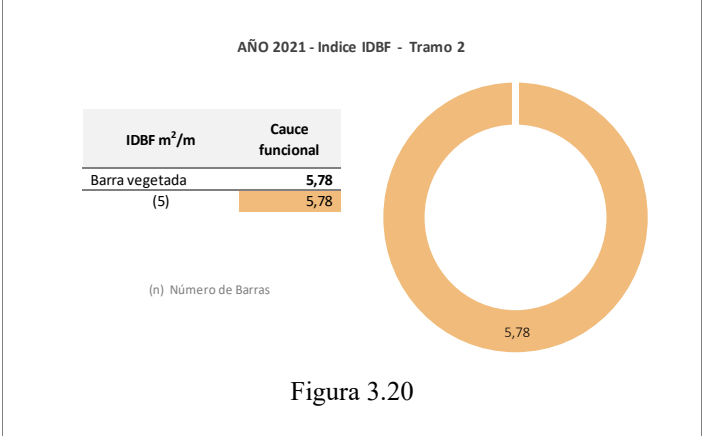
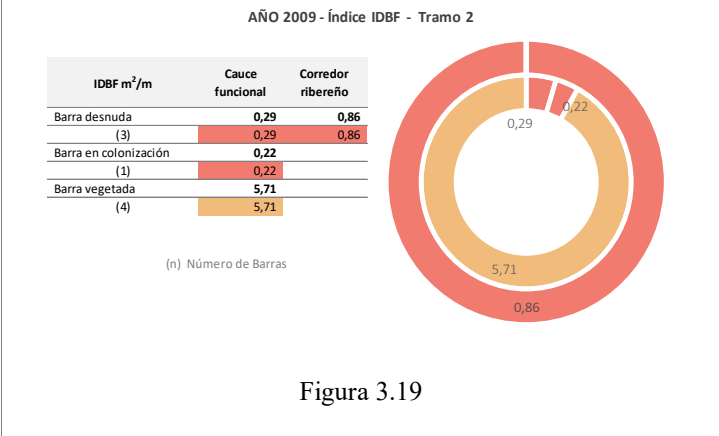
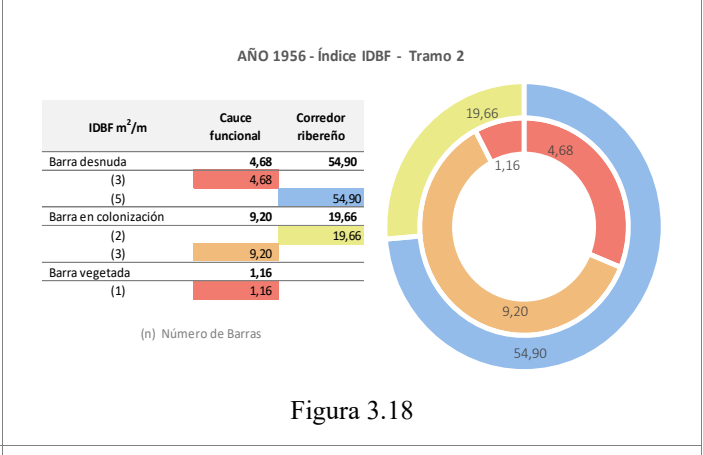
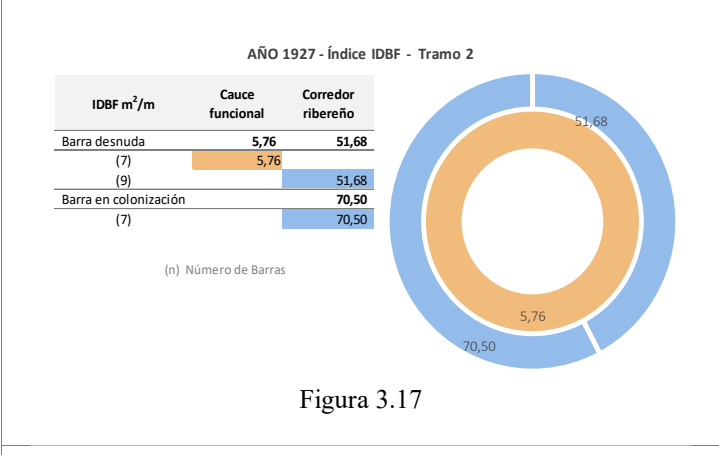
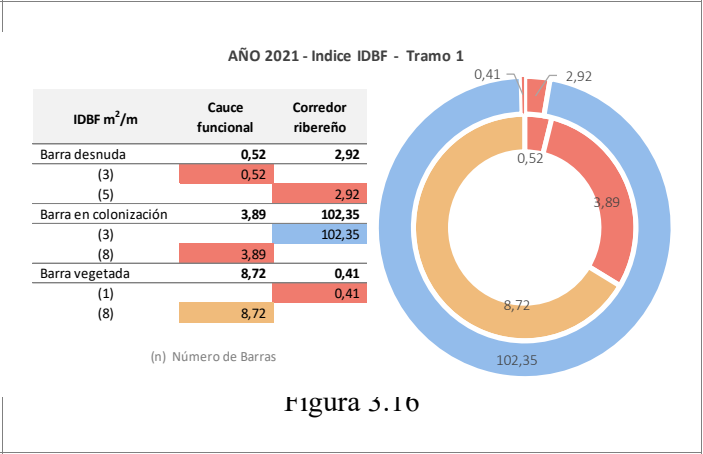
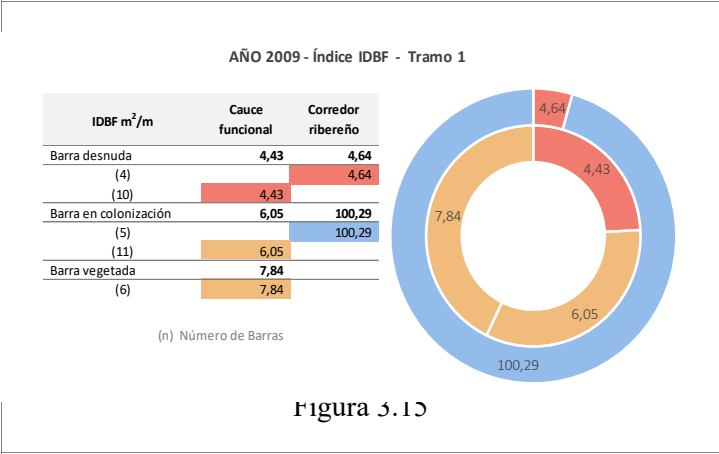
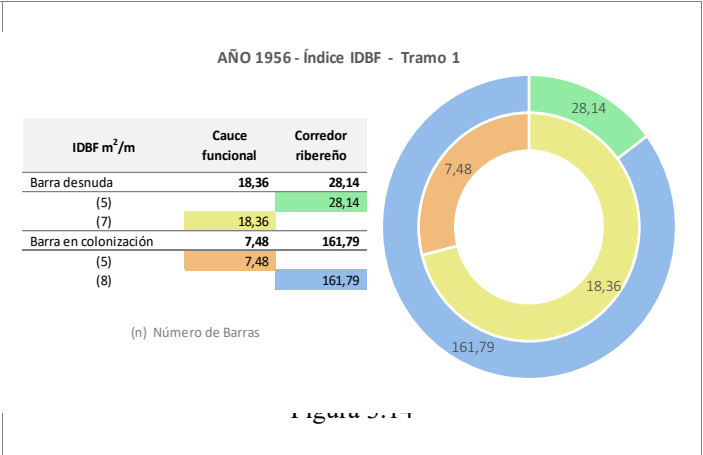
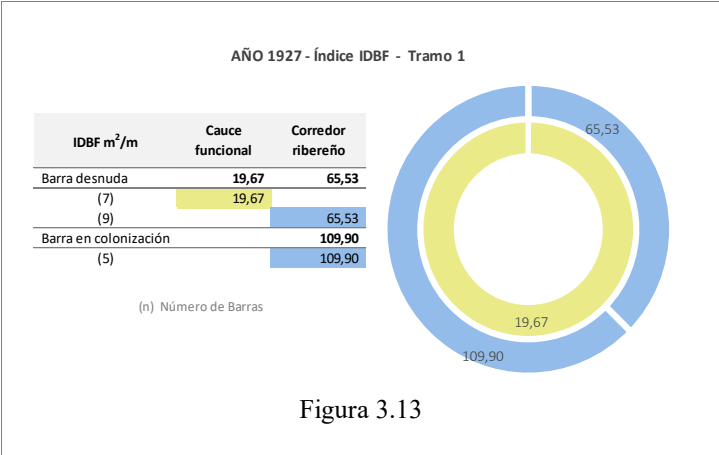


Figura 3.12

III - 2 Evolución del Índice de Barras Fluviales (IDBF)



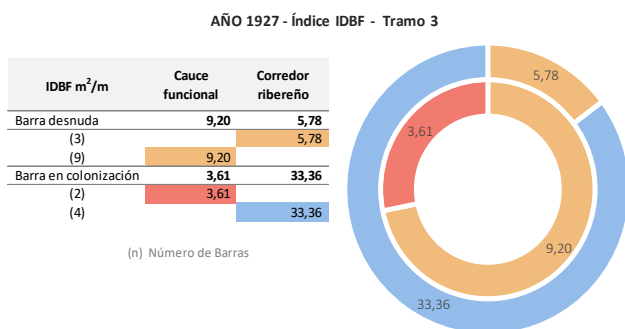


Figura 3.21

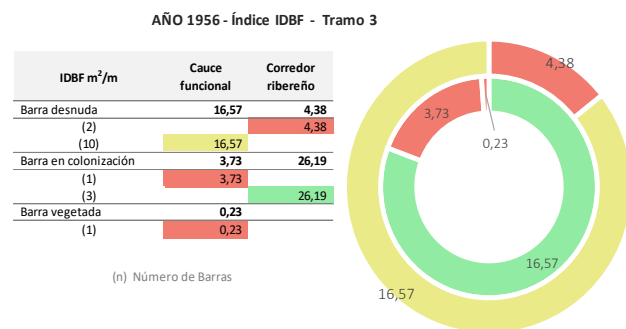


Figura 3.22

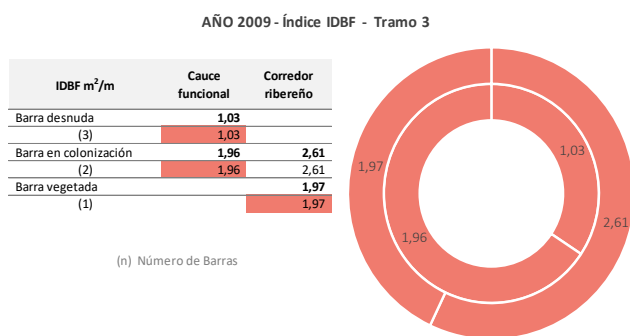


Figura 3.23

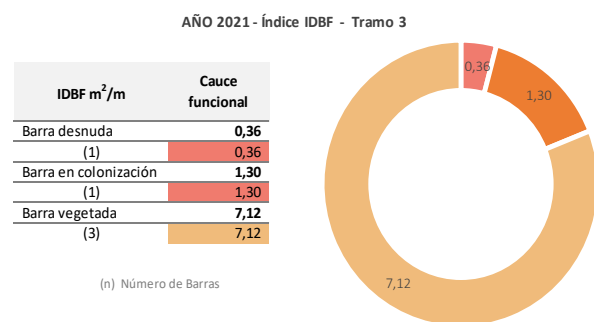


Figura 3.24

III - 3 Tablas de Cambios Específicos de Coberturas en (Hectáreas) por tramos, Periodos (1927 a 2021)

Tabla 3.1. Matriz de transición de coberturas en Tramo 1, Periodo 1927 – 2021

Tramo 1	Antes									
Después	Cauce Activo	Infraestructura	Bosque Rivera	Otras Láminas Agua	Barra Desnuda	Brazo Ciego	Barra Colonizada	Cultivos	Otras Masas Vegetadas	Total General
Otras Laminas Agua	0,343		1,796		0,043		0,549	2,895		5,628
Bosque Rivera	7,537	0,001			9,291	0,362	8,878	14,681		40,750
Área Alterada			0,028	1,262				14,567		15,857
Infraestructura	0,117			0,039	0,553			0,820		1,529
Barra Vegetada	0,094		0,310					0,354		0,758
Cauce Activo			6,683			0,096	12,030	26,174	0,523	45,507
Brazo Ciego	0,851		2,072	0,235	1,950		0,201	0,468		5,777
Otra Masa Vegetada.	0,415				1,344		1,756	1,679		5,194
Plantaciones	3,870				7,186		7,915	0,451		19,423
Cultivos	7,423	0,659	12,783	0,855	9,799	0,721	21,908			54,147
Barra Colonizada	17,780		14,250		43,962	2,660		23,693	1,757	104,102
Barra Desnuda	18,302		8,160				9,034	21,320		56,815
Total General	56,733	0,659	46,082	2,391	74,128	3,839	62,272	107,103	2,280	355,486

Elaboración propia

Tabla 3.2. Matriz de transición de coberturas en Tramo 2, Periodo 1927 - 2021

Tramo 2	Antes														
Después	Área Alterada	Área Industrial	Área Urbana	Barra Co-lonizada.	Barra Desnuda	Barra Vegetada	Bosque Rivera	Brazo Ciego	Canal secundario	Cauce Activo	Cultivos	Infraestructura	Otras Masas Vegetadas	Otras Lámi-nas Agua	Total general
Área Alterada							0,865				0,750	0,052			1,667
Área Industrial						0,017									0,017
Área Urbana											0,005				0,005
Barra Colonizada	0,263				4,211	0,656	1,711		0,396	4,187	0,251				11,675
Barra Desnuda				0,561		0,084				0,233	0,115			1,118	2,117
Barra Vegetada		0,005		2,459	0,177		2,301			1,230		0,0001	0,021		6,191
Bosque Rivera	0,035	0,025		2,390	0,828	0,622				0,717	0,161	0,005	0,299	0,349	5,431
Brazo Ciego				0,753	0,005		0,603		0,277	0,559					2,196
Cauce Activo	0,097			2,600	0,550	0,187	3,012		0,040		1,028	0,014	0,695	0,370	8,570
Cultivos			0,005				4,853					0,016			4,874
Infraestructura	0,085						0,111			0,001	0,001		0,001		0,197
Otras Masas Vegetadas	1,103			0,039	0,109		1,785			0,101	0,011	0,055		0,758	3,960
Otras Láminas Agua				1,997	1,199		0,171	0,742		0,335			1,245		5,689
Plantaciones							0,369								0,369
Total General	1,582	0,029	0,005	10,796	7,074	1,567	15,783	0,742	0,712	7,363	2,322	0,141	2,260	2,594	52,970

Elaboración propia

Tabla 3.3. Matriz de transición de coberturas en Tramo 3, Periodo 1927 - 2021

Tramo 3	Antes												
Después	Área Alterada	Barra Colonizada.	Barra Desnuda	Barra Vegetada	Bosque Ribera	Brazo Ciego	Cauce Activo	Cultivos	Infraestructura	Otra Masa Vegetada	Otras Láminas Agua	Plantaciones	Total General
Área Alterada		4,671	1,020		3,046		1,054	22,005	0,103	0,270	9,925	0,015	42,109
Área Industrial							0,008	2,902					2,910
Área Urbana			2,699		0,938	0,053	1,618	2,231	0,001			5,018	12,558
Barra Colonizada			14,723		1,804	1,267	12,879	6,269		0,932	2,982		40,856
Barra Desnuda		2,954			0,345	0,581	1,447	0,866					6,193
Barra Vegetada		2,820	2,834		1,053	1,017	1,751	0,060	0,009			0,035	9,580
Bosque Ribera		26,166	33,163	0,418		0,485	32,280	23,180	0,051	3,255		2,981	121,979
Brazo Ciego		0,196					0,546						0,742
Canal Secundario		0,415	0,013				0,243	0,041					0,712
Cauce Activo		12,665	11,492	0,129	4,543	1,158		5,391		0,651		0,775	36,802
Cultivos	23,357	21,801	0,989		20,252		1,373			0,086	3,008	0,767	71,633
Infraestructura		4,976			4,725		0,530	3,351			0,238	0,018	13,838
Otras Masas Vegetadas		5,643	5,979		7,613	0,537	2,895	0,034					22,701
Otras Láminas Agua	0,491	38,659	2,955		1,276	0,436	5,472	1,079					50,369
Plantaciones		0,172	1,148										1,320
Total General	23,849	121,139	77,015	0,547	45,595	5,534	62,094	67,410	0,164	5,194	16,152	9,610	434,302

Elaboración propia

ANEXO IV

**GRÁFICOS HIDROLÓGICOS DE DATOS DIARIOS,
MENSUALES Y TRIMESTRALES - AFORO 9123**

IV 1 - Gráficos hidrológicos de datos diarios, mensuales y trimestrales – AFORO 9123

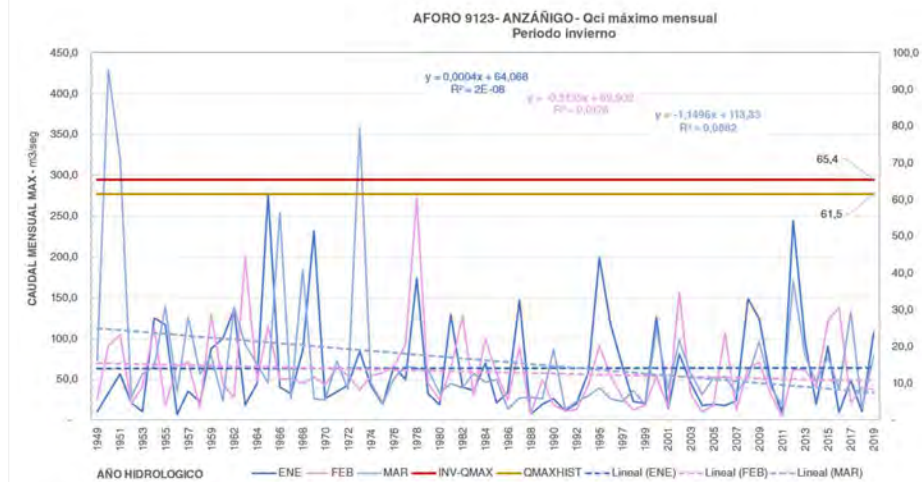


Figura.4.1 - Caudal máximo mensual – Periodo Invierno

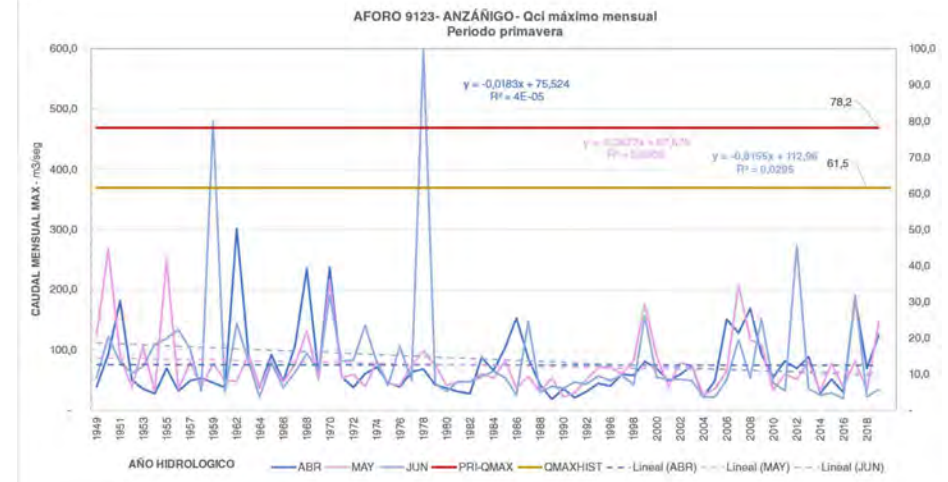


Figura.4.2 - Caudal máximo mensual – Periodo Primavera

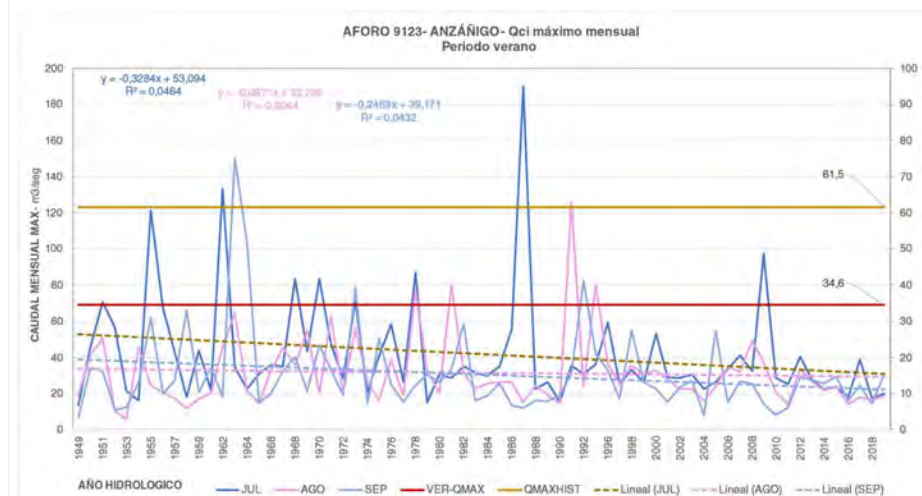


Figura.4.3 - Caudal máximo mensual – Periodo Verano

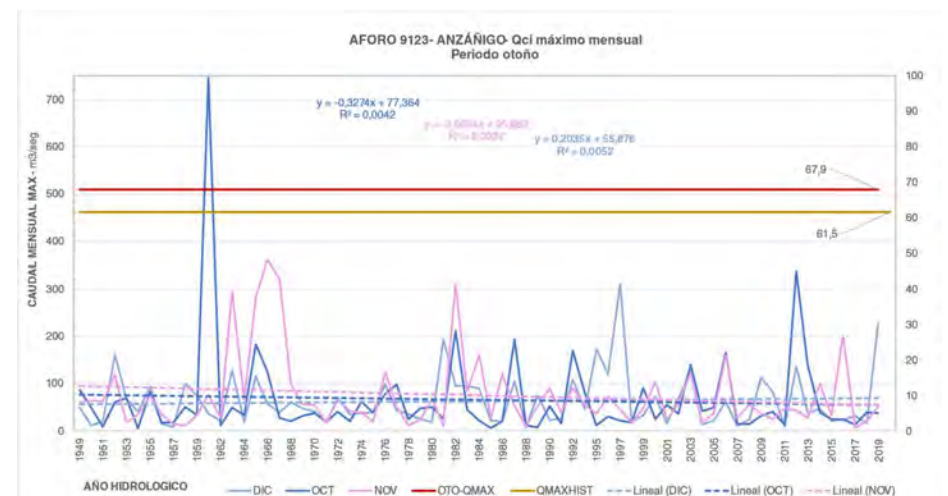


Figura.4.4 - Caudal máximo mensual – Periodo Otoño

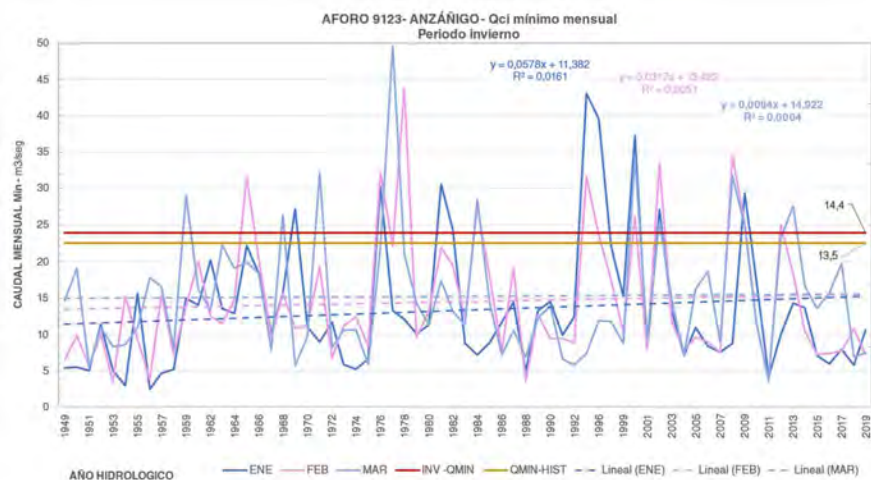


Figura.4.5 - Caudal mínimo mensual – Periodo Invierno

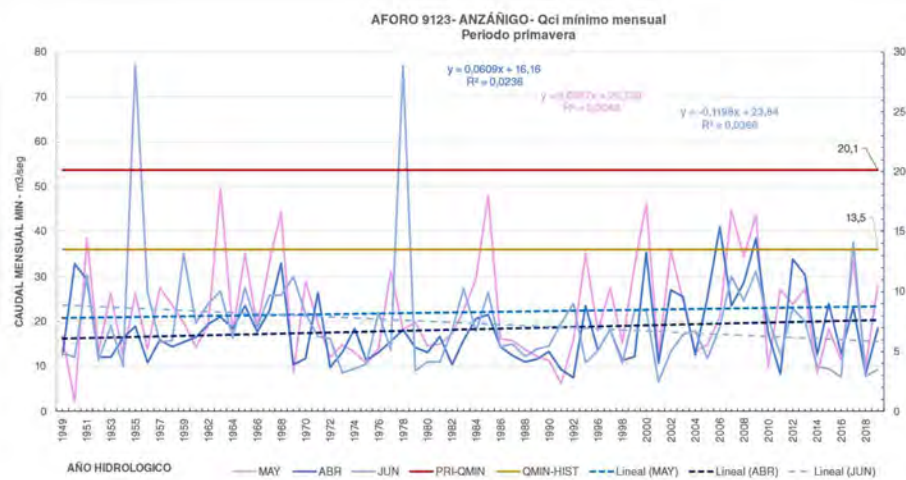


Figura.4.6 - Caudal mínimo mensual – Periodo Primavera

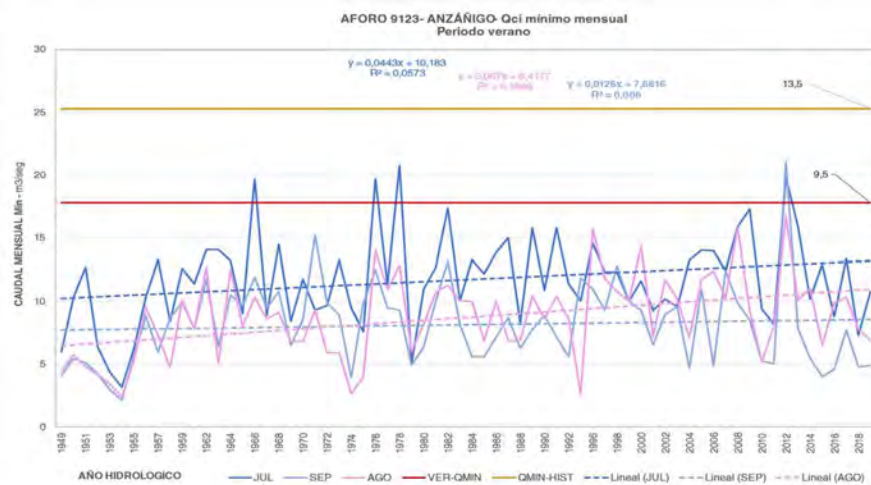


Figura.4.7 - Caudal mínimo mensual – Periodo Verano

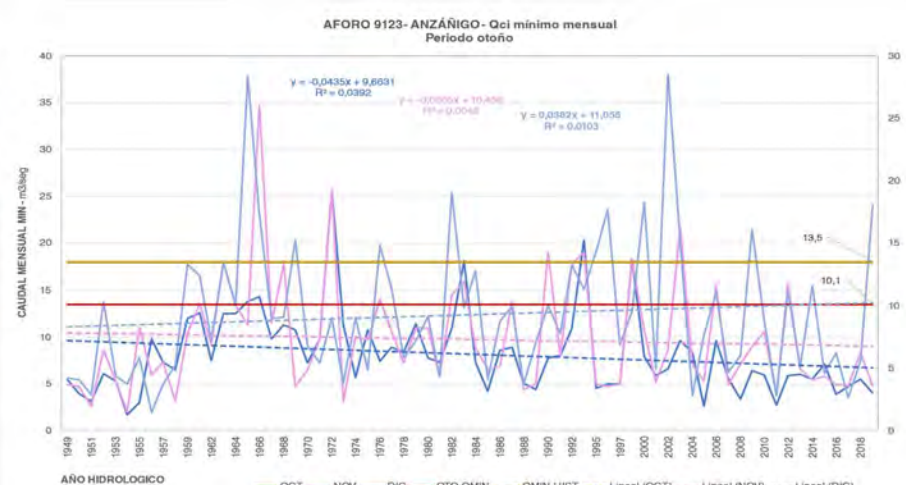


Figura.4.8 - Caudal mínimo mensual – Periodo Otoño

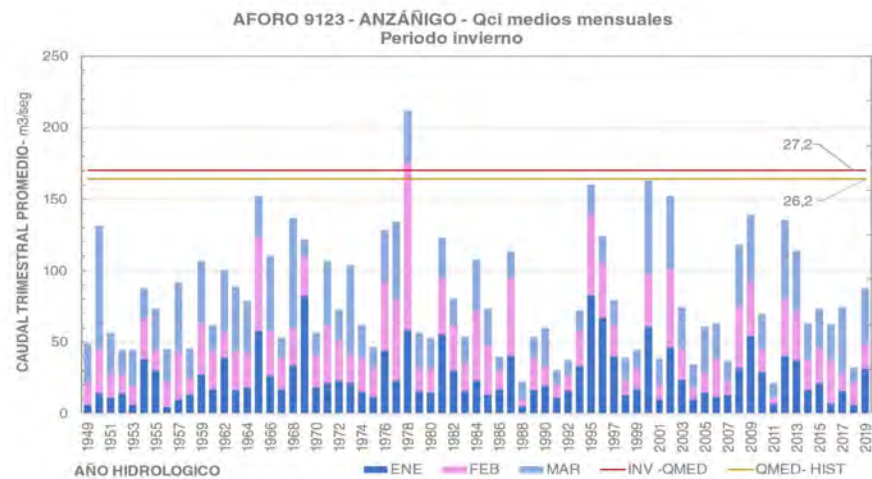


Figura.4.9 - Caudal medio mensual trimestral – Período Invierno

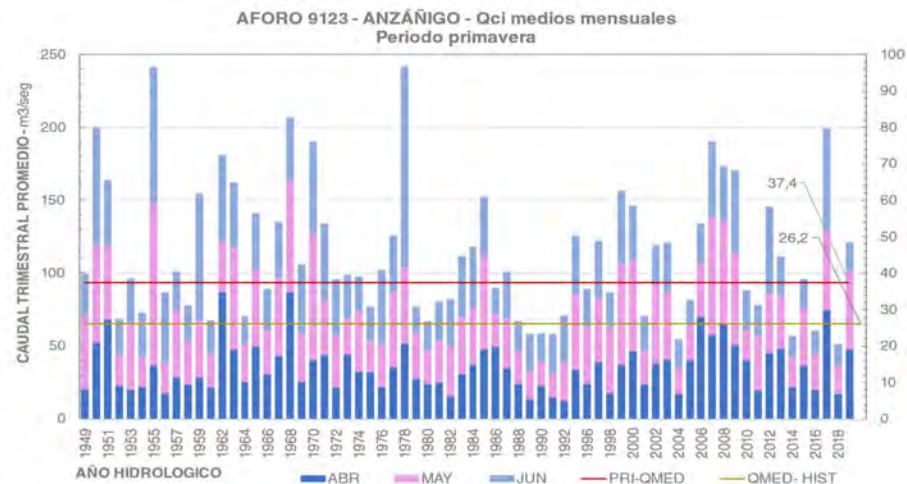


Figura.4.10 - Caudal medio mensual trimestral – Período Primavera

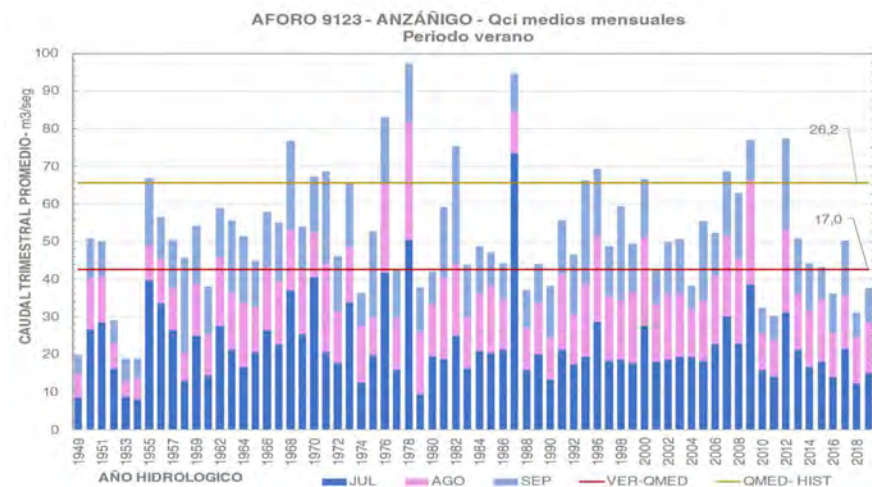


Figura.4.11 - Caudal medio mensual trimestral – Período Verano

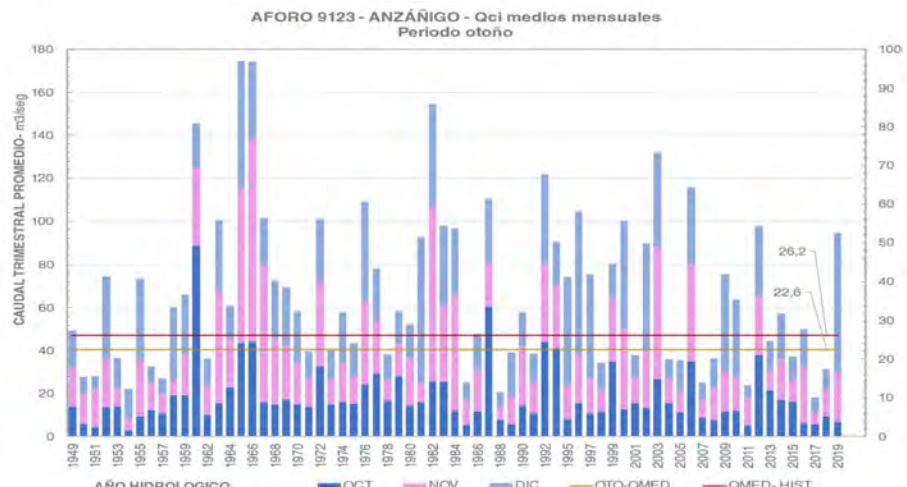


Figura.4.12 - Caudal medio mensual trimestral – Período Otoño

ANEXO V

**GRÁFICOS HIDROLÓGICOS DE DATOS DIARIOS,
MENSUALES Y TRIMESTRALES - AFORO 9059**

V. Gráficos hidrológicos de datos diarios, mensuales y trimestrales - AFORO 9059 -

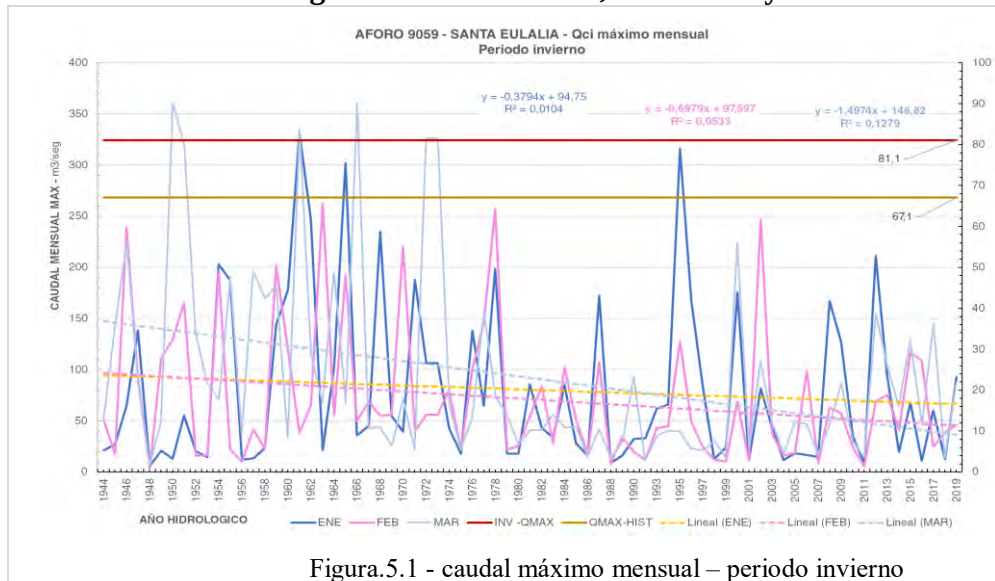


Figura.5.1 - caudal máximo mensual – periodo invierno

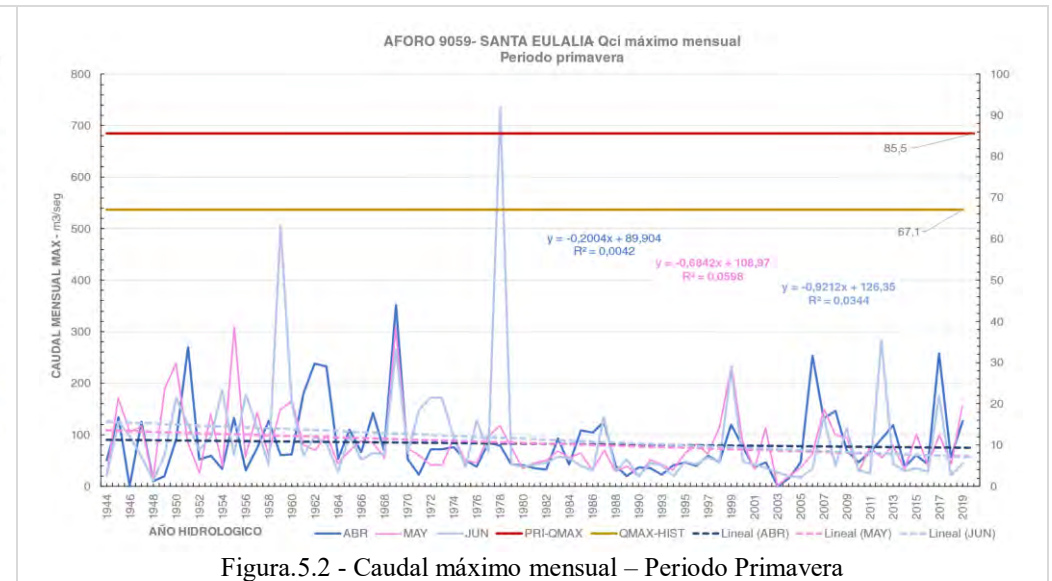


Figura.5.2 - Caudal máximo mensual – Periodo Primavera

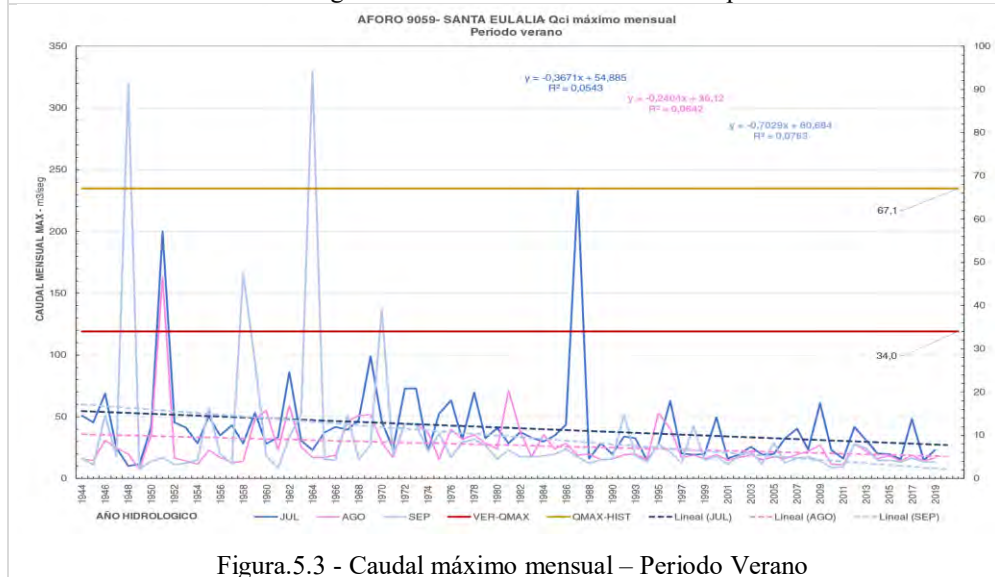


Figura.5.3 - Caudal máximo mensual – Periodo Verano

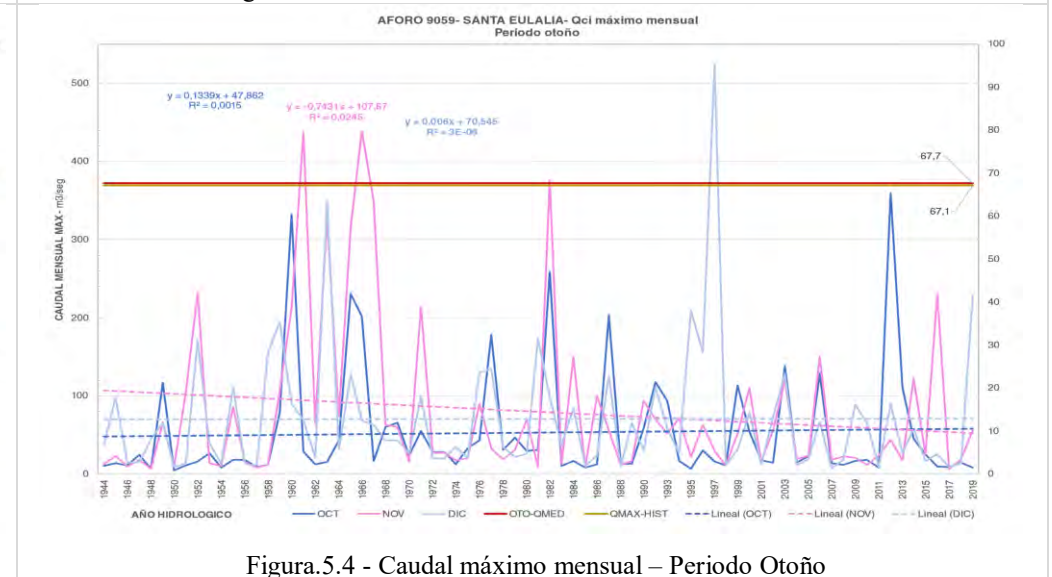


Figura.5.4 - Caudal máximo mensual – Periodo Otoño

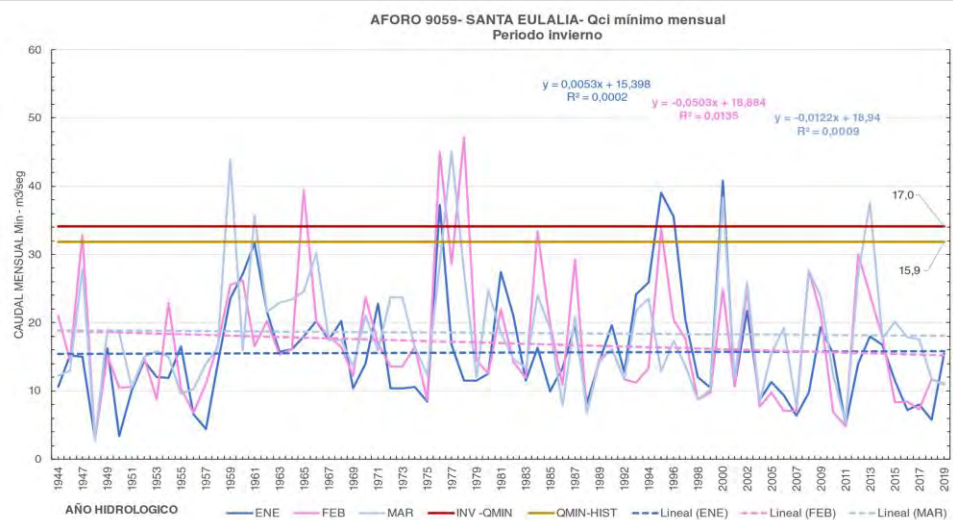


Figura.5.5 - Caudal mínimo mensual – Periodo Invierno

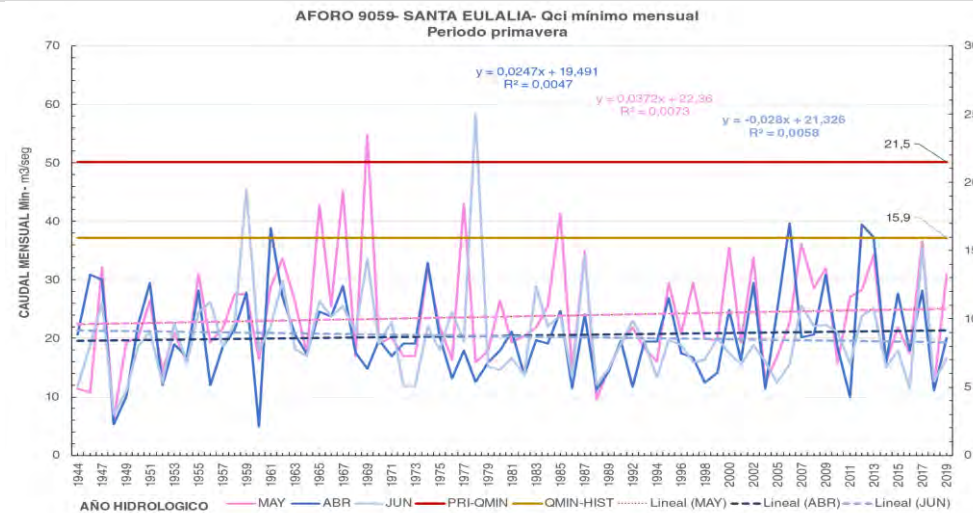


Figura.5.6 - Caudal mínimo mensual – Periodo Primavera

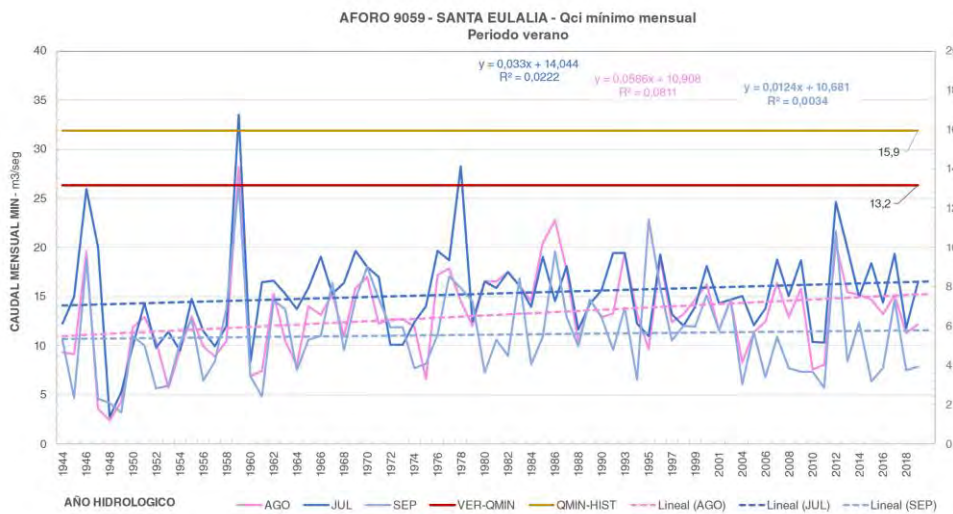


Figura.5.7 - Caudal mínimo mensual – Periodo Verano

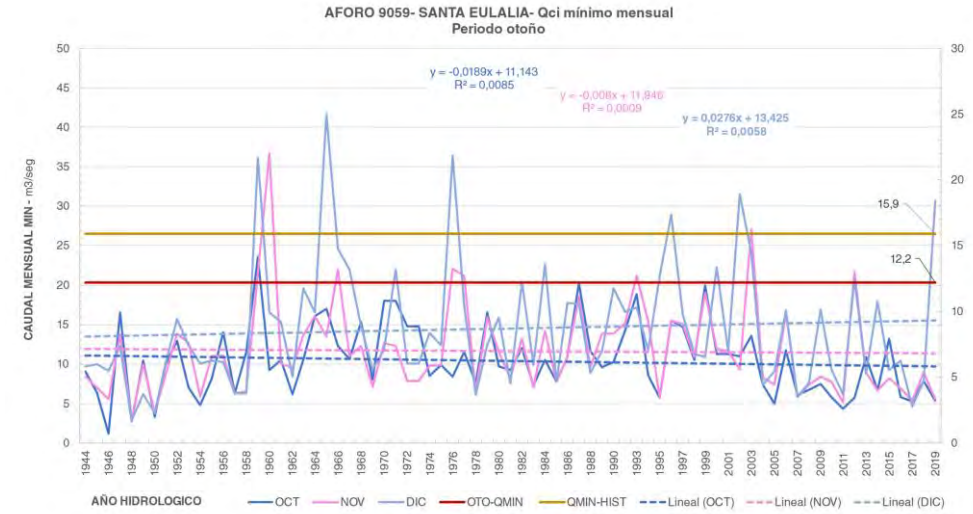


Figura.5.8 - Caudal mínimo mensual – Periodo Otoño

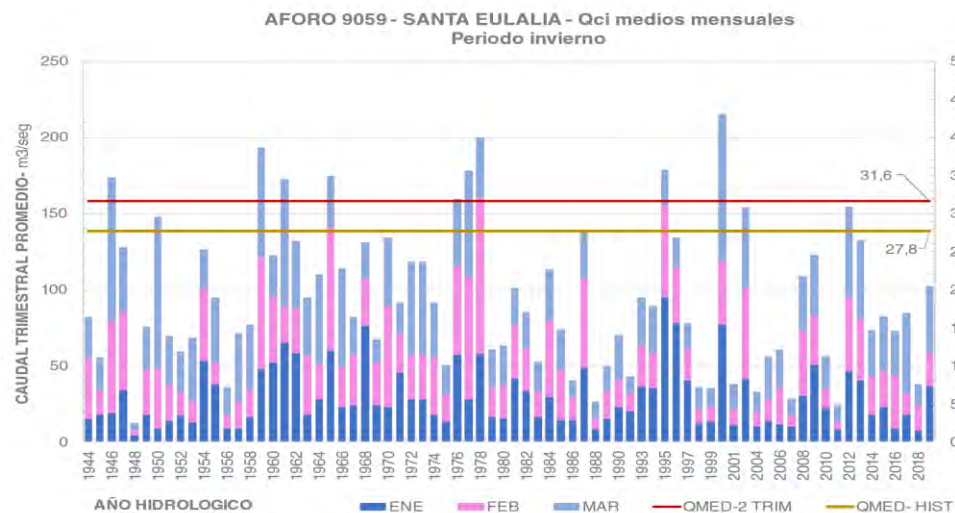


Figura.5.9 - Caudal medio mensual trimestral – Periodo Invierno

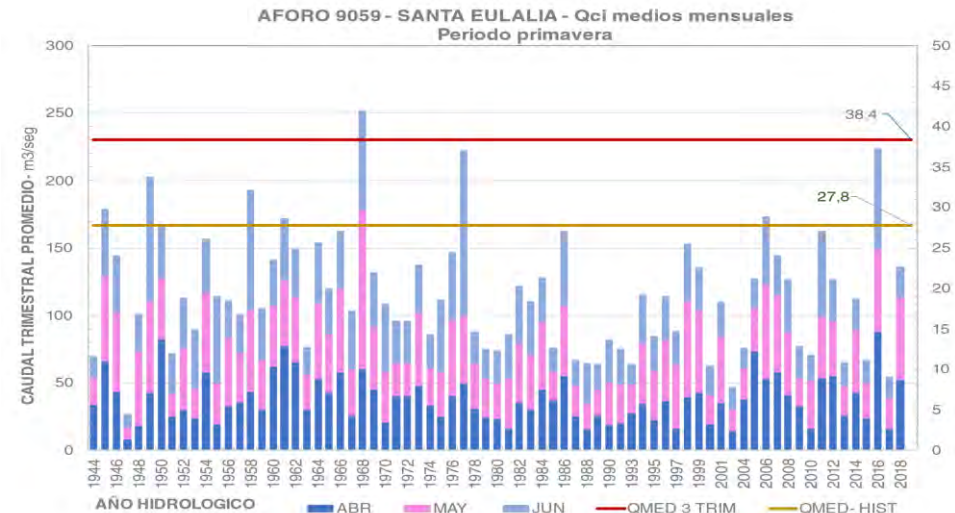


Figura.5.10 - Caudal medio mensual trimestral – Periodo Primavera

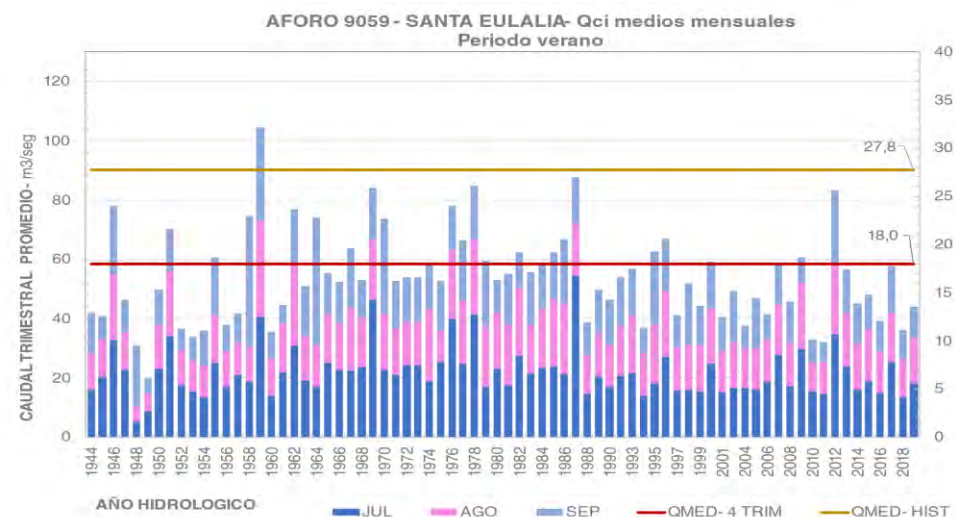


Figura.5.11 - Caudal medio mensual trimestral – Periodo Verano

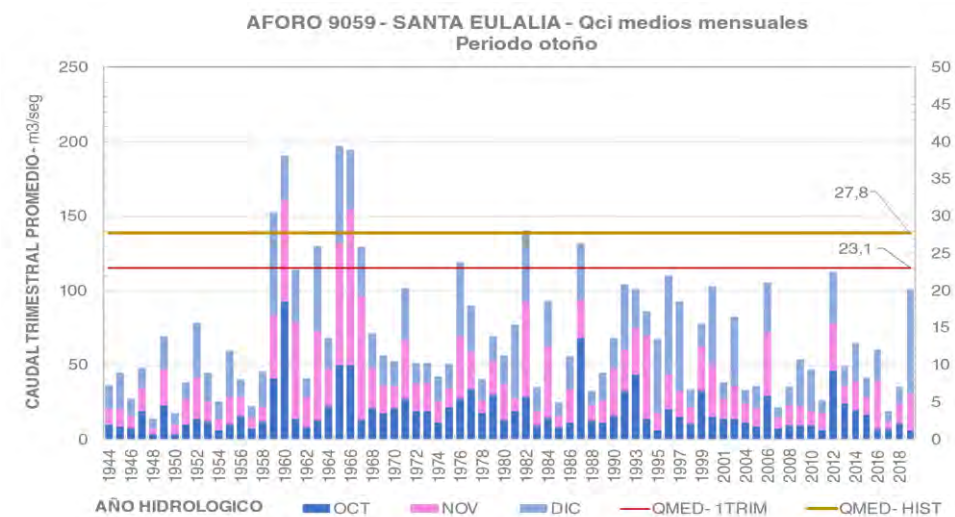


Figura.5.12 - Caudal medio mensual trimestral – Periodo Otoño

ANEXO VI

**GRÁFICOS HIDROLÓGICOS DE DATOS DIARIOS,
MENSUALES Y TRIMESTRALES - AFORO 9012**

VI. Gráficos hidrológicos de datos diarios, mensuales y trimestrales - AFORO 9012 –

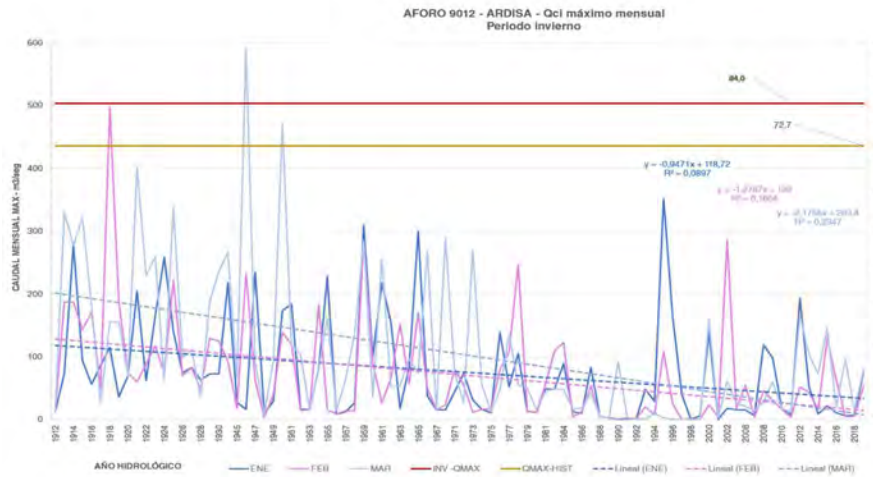


Figura.6.1 - Caudal máximo mensual – Periodo Invierno

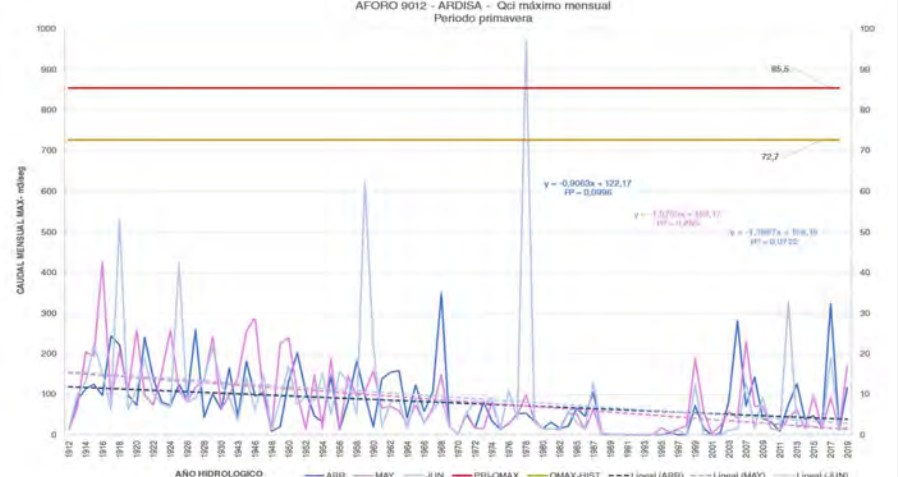


Figura.6.2 - Caudal máximo mensual – Periodo Primavera

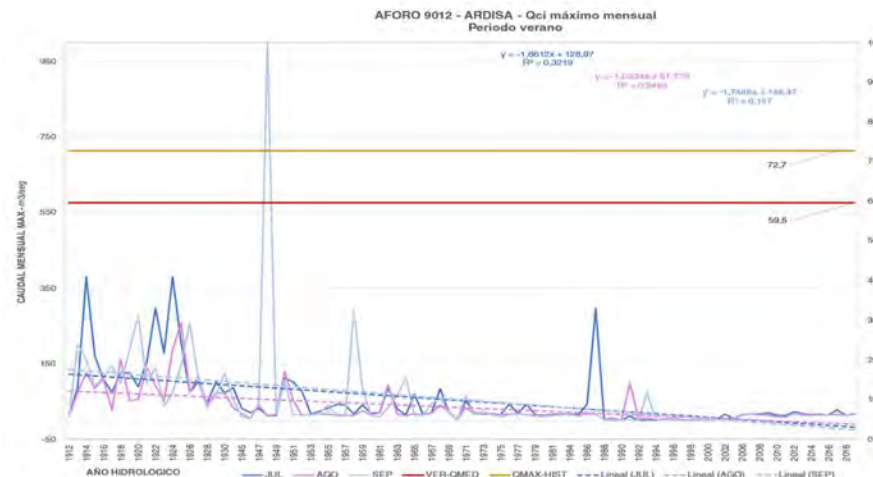


Figura.6.3 - Caudal máximo mensual – Periodo Verano

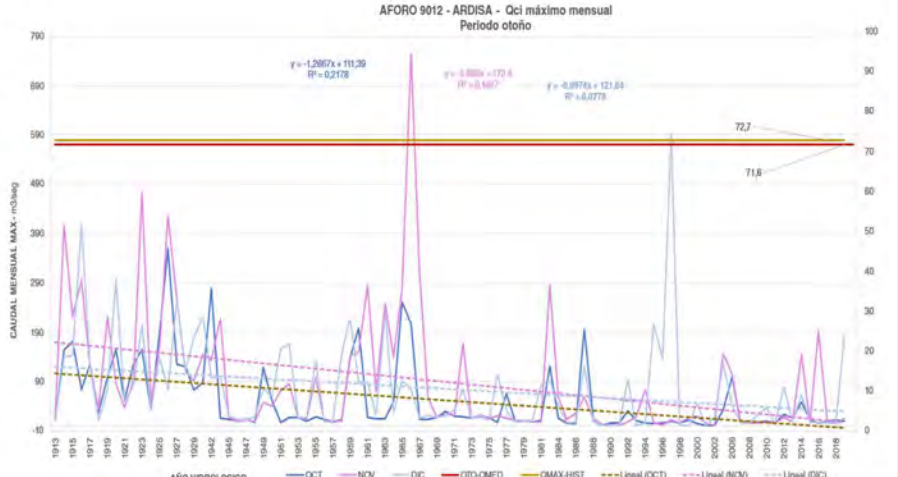


Figura. 6.4 - Caudal máximo mensual – Periodo Otoño

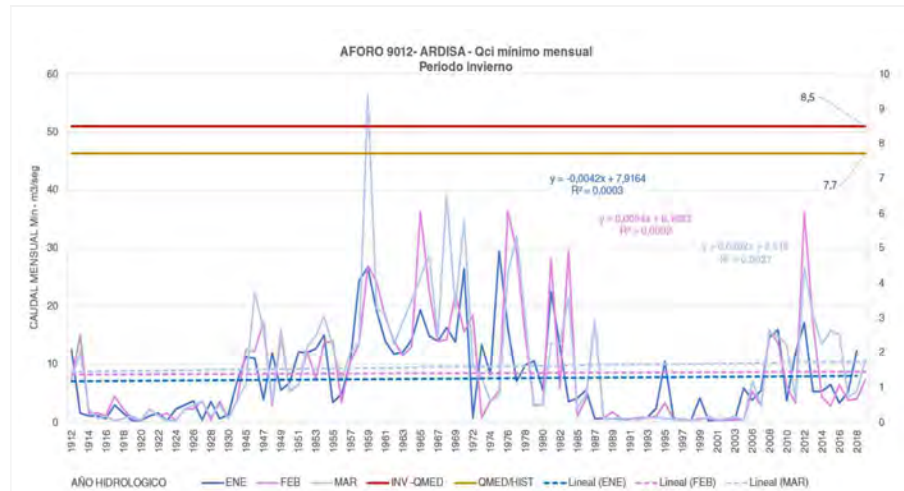


Figura.6.5 - Caudal mínimo mensual – Periodo Invierno

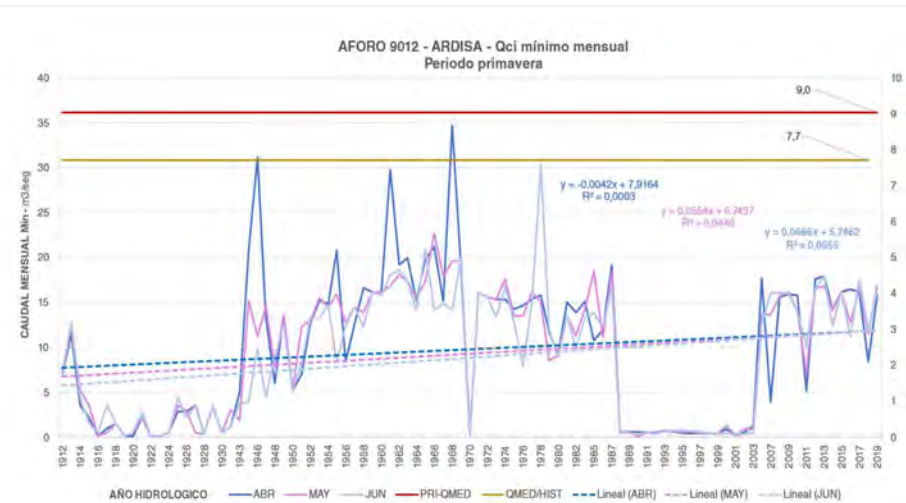


Figura.6.6 - Caudal mínimo mensual – Periodo Primavera

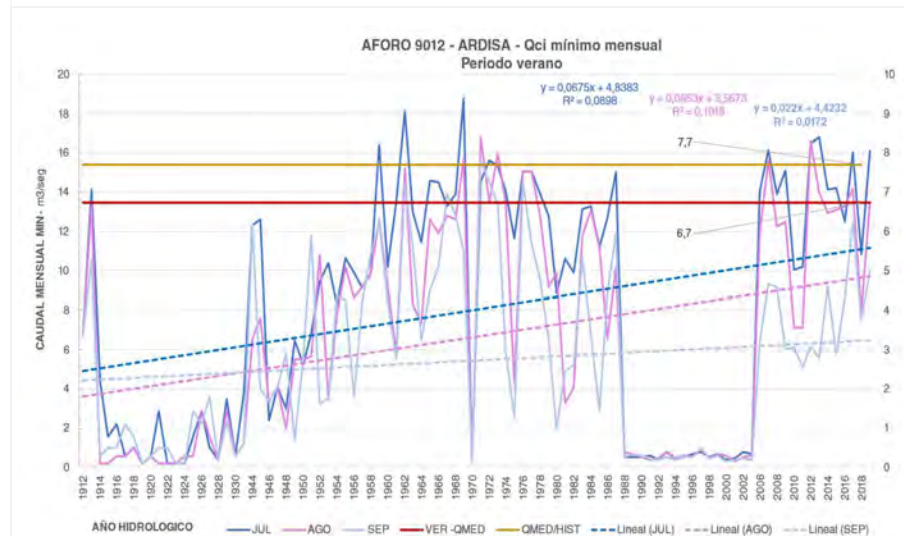


Figura.6.7 - Caudal mínimo mensual – Periodo Verano

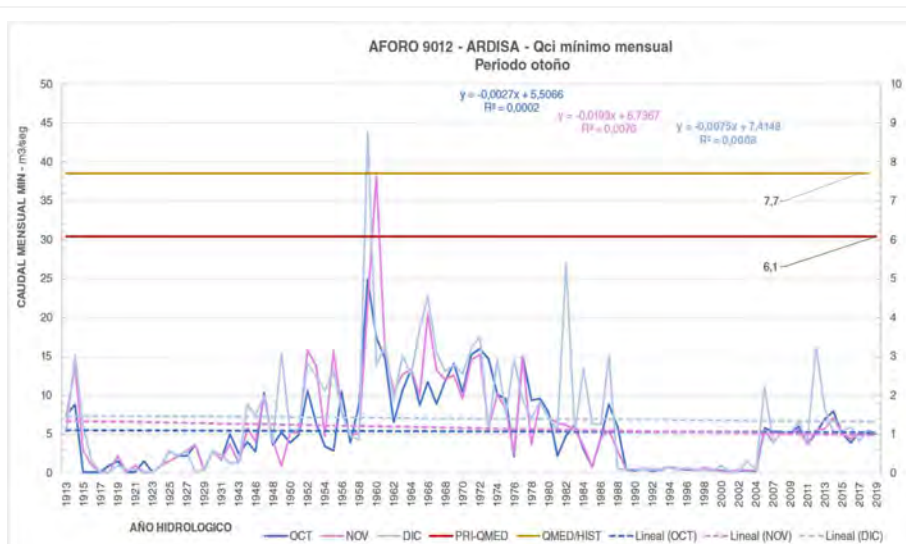


Figura.6.8 - Caudal mínimo mensual – Periodo Otoño

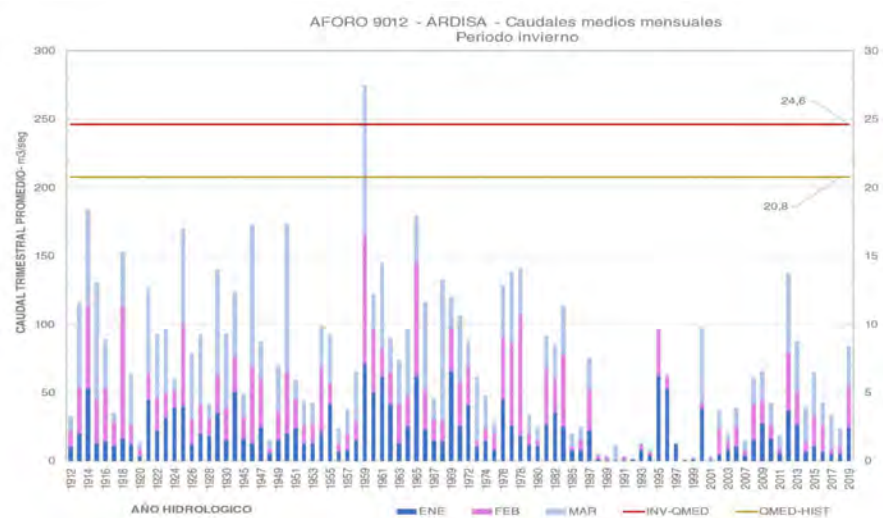


Figura.6.9 - Caudal medio mensual trimestral – Período Invierno

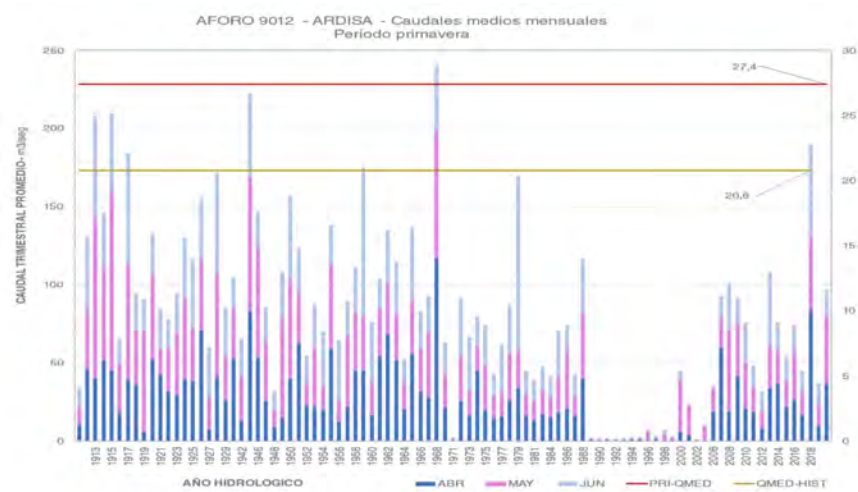


Figura.6.10 - Caudal medio mensual trimestral – Período Primavera

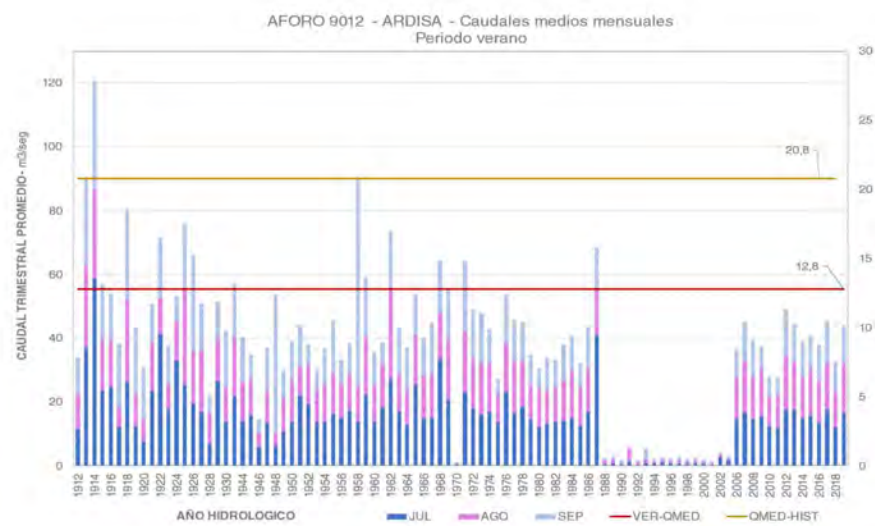


Figura.6.11 - Caudal medio mensual trimestral – Período Verano

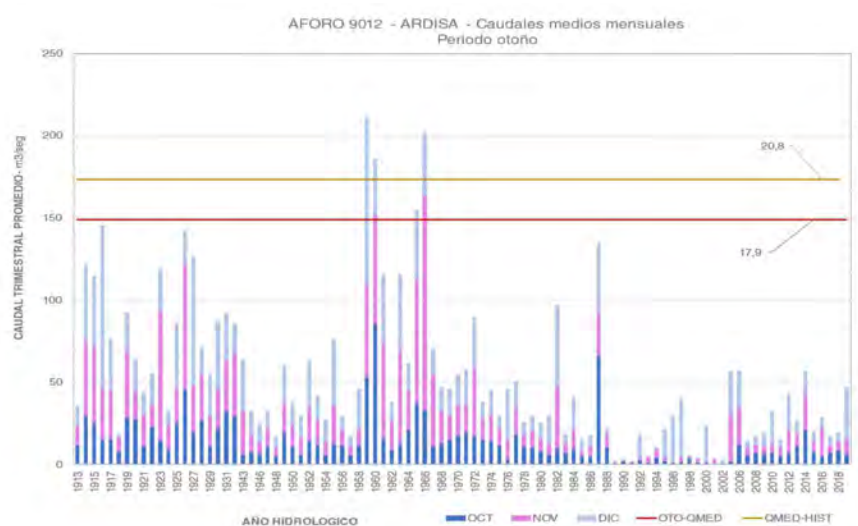


Figura.6.12 - Caudal medio mensual trimestral – Período Otoño

ANEXO VII

**GRÁFICOS HIDROLÓGICOS DE DATOS DIARIOS,
MENSUALES Y TRIMESTRALES - AFORO 9209**

Figura.7.1 - Caudal máximo mensual – Periodo Invierno

Figura.7.2 - Caudal máximo mensual – Periodo Primavera

Figura.7.3 - Caudal máximo mensual – Periodo Verano

Figura.7.4 - Caudal máximo mensual – Periodo Otoño

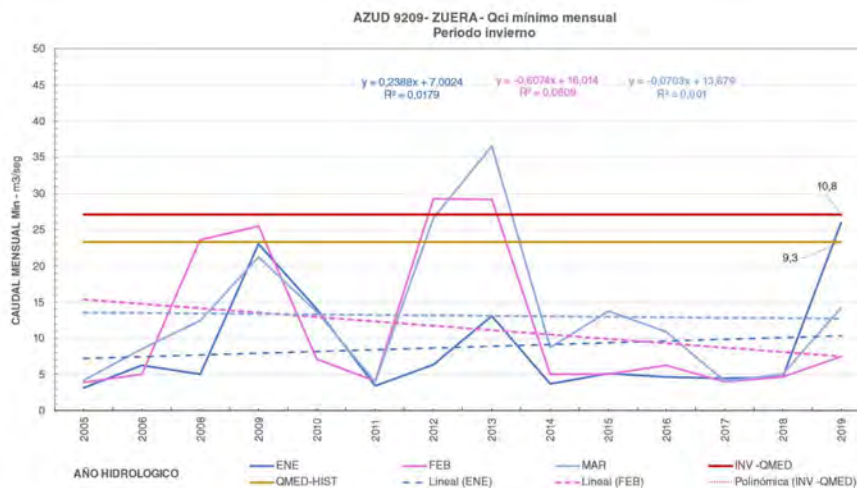


Figura.7.5 - Caudal mínimo mensual – Periodo Invierno

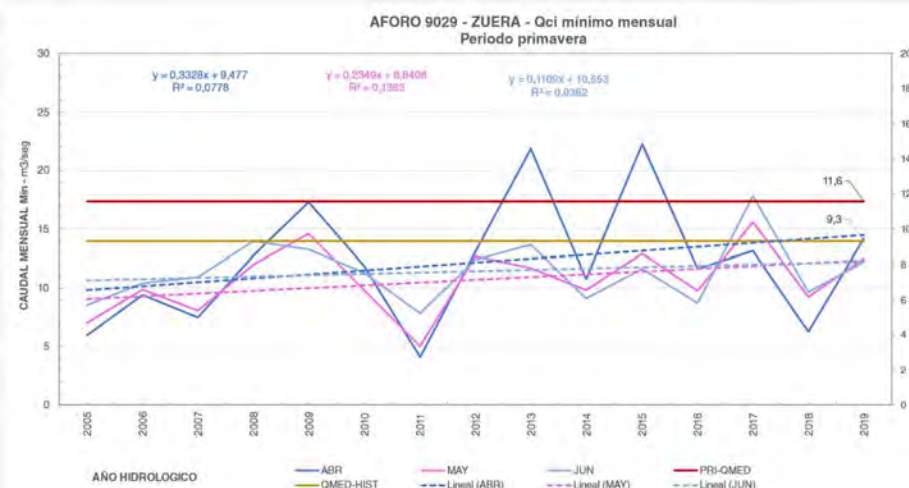


Figura.7.6 - Caudal mínimo mensual – Periodo Primavera

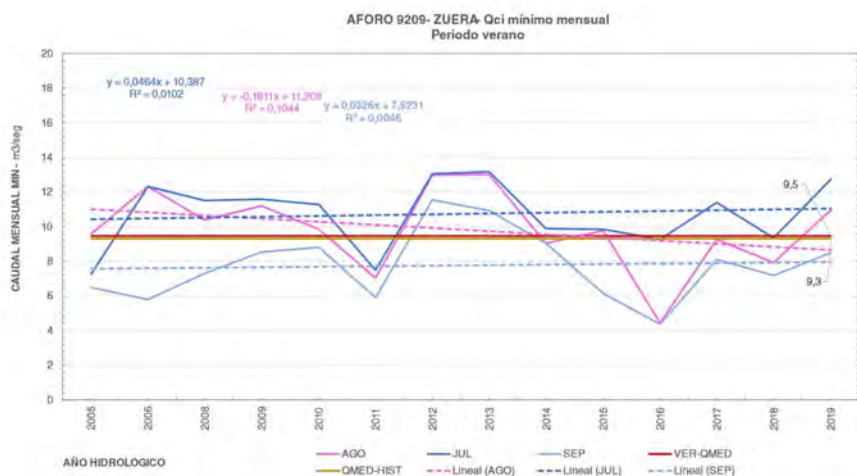


Figura.7.7 - Caudal mínimo mensual – Periodo Verano

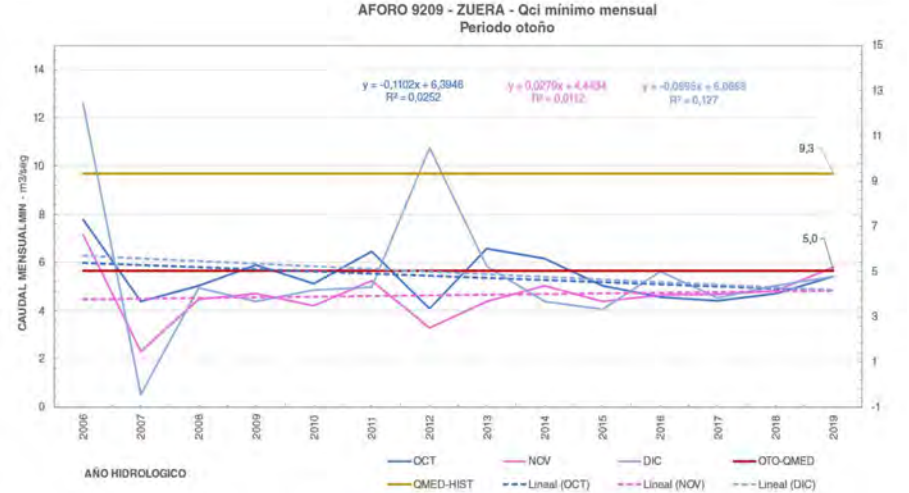


Figura.7.8 - Caudal mínimo mensual – Periodo Otoño

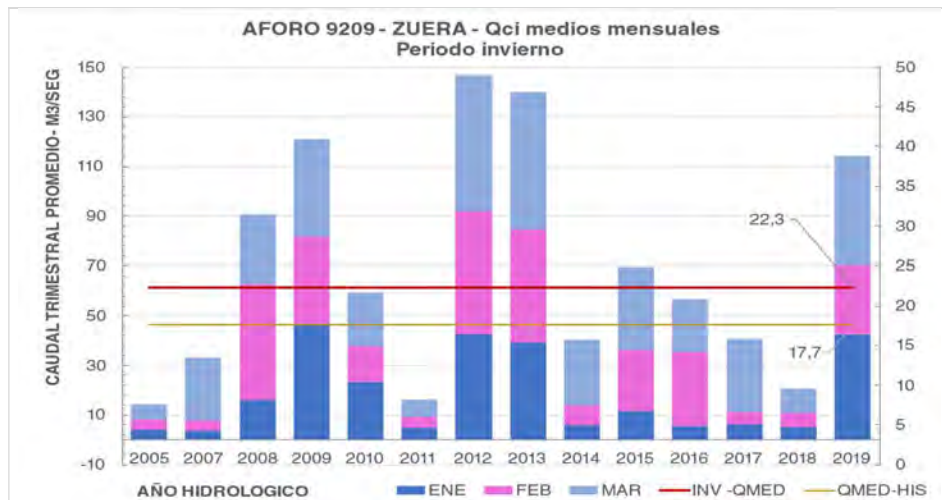


Figura.7.9 - Caudal medio mensual trimestral – Periodo Invierno

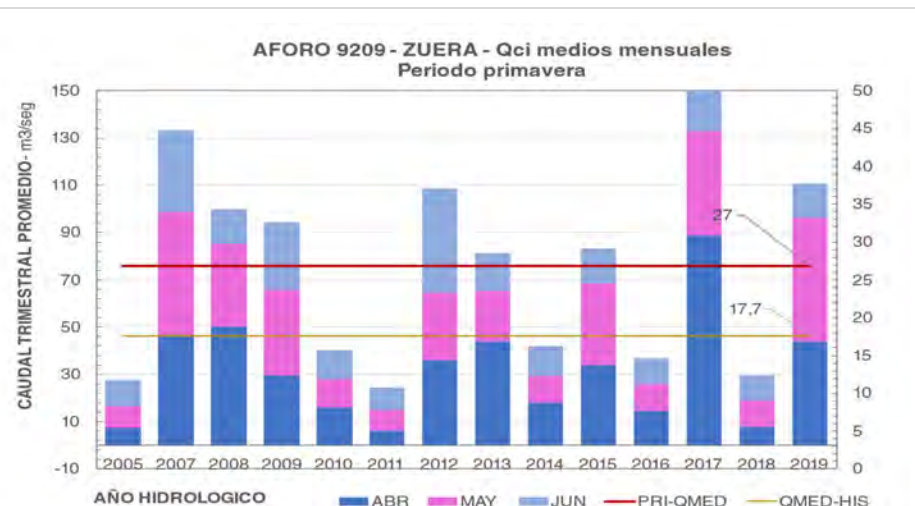


Figura.7.10 - Caudal medio mensual trimestral – Periodo Primavera

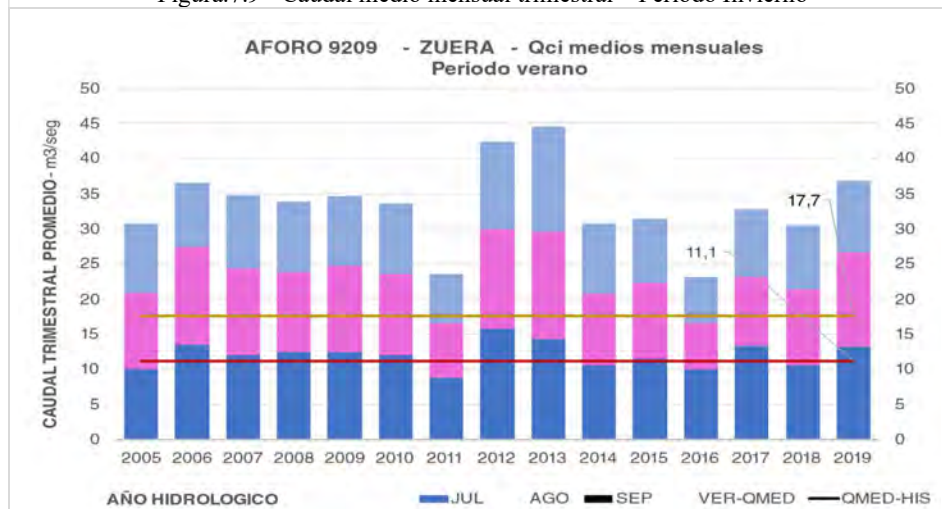


Figura.7.11 - Caudal medio mensual trimestral – Periodo Verano

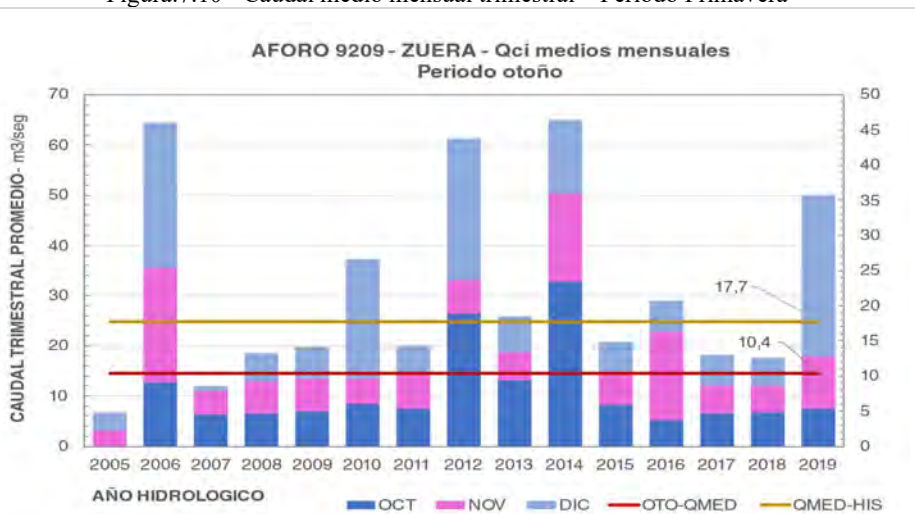


Figura.7.12 - Caudal medio mensual trimestral – Periodo Otoño