



Fondo Europeo de Desarrollo Regional
Fundo Europeu de Desenvolupament Regional



Gestión Integrada de Agua
e dos Habitats no Baixo Guadiana
Gestión Integrada del Agua
y de los Habitats en el Bajo Guadiana

POCTEP 0007-VALAGUA-5-P

Informe Técnico

Compatibilidad cuantitativa de los distintos usos del agua en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana

Producto final – Acción A1.1 | Octubre 2018

Nombre del proyecto: VALAGUA – Valorización Ambiental y Gestión Integrada del Agua y de los Hábitats en el Bajo Guadiana Transfronterizo

Código del proyecto: POCTEP 0007-VALAGUA-5-P

Información del proyecto

Localización	Portugal y España	
Fecha de inicio	05/05/2017	
Fecha de fin	30/09/2019	Prorroga hasta 31/12/2019
Presupuesto total	€ 1.008.556,12	
Contribución UE	€ 756.417,09	
Cofinanciamiento UE (%)	75%	

Información del beneficiario principal (BP)

Beneficiario principal	ADPM
Persona de contacto	María Bastidas
Dirección	Largo Vasco da Gama S/N, 7750-328 Mértola, Portugal
Teléfono	+351 286 610 000
Mail	valagua@adpm.pt
Página de internet del proyecto	www.valagua.com

Información del documento

Nombre	Compatibilidad cuantitativa de los distintos usos del agua en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana – Informe Técnico
Acción	A1.1 (Producto final)
Autor(es)	Inmaculada Pulido Calvo UHU Juan Carlos Gutiérrez Estrada UHU Rubén Fernández de Villarán UHU Víctor Sanz Fernández UHU

Equipo Técnico	Inmaculada Pulido Calvo UHU Juan Carlos Gutiérrez Estrada UHU Rubén Fernández de Villarán UHU Víctor Sanz Fernández UHU Maria José Fernández Silva CHG Alice Fialho APA André Matoso APA José Paulo Monteiro UALG Manuela Moreira da Silva UALG Luís Miguel Nunes UALG Luis Costa UALG Francisco Gonzalez Rey UALG Daniel Violante UALG Manuel Olias UHU Juan Carlos Cerón UHU Carlos Ruiz Cánovas UHU Maria Dolores Basallote UHU Juan Manuel Rosa Rodríguez UHU
Fecha	31-10-2018
Versión (nº)	1

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
2. Material y métodos.....	3
2.1. Servicios ecosistémicos en la Subcuenca Baja del Guadiana.....	3
2.2. Síntesis de bases de datos utilizadas y disponibles.....	7
2.3. Análisis de los usos consuntivos de agua mediante modelación ARIMA.....	14
2.4. Modelación del régimen de aportaciones: Redes Neuronales Artificiales.....	14
2.5. Evaluación de eventos de sequía: Índice de Precipitación Estandarizado SPI.....	17
2.6. Análisis estacional e interanual de los caudales ecológicos.....	19
3. Resultados y discusión.....	22
3.1. Sobre la disponibilidad de datos de aforo en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana.....	22
3.2. Sobre los usos de agua en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana.....	23
3.3. Sobre la modelación heurística del régimen de aportaciones en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana.....	29
3.4. Sobre la caracterización de eventos de sequía en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana.....	33
3.5. Sobre el régimen de caudales ecológicos en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana.....	34
4. Conclusiones.....	39
5. Referencias.....	41
Anexo I. Esquema hidráulico del sistema de regulación de recursos hídricos Chanza-Piedras-Huelva.....	46
Anexo II. Bases de datos.....	48
Anexo III. Análisis de frecuencias de aportaciones mensuales superiores e inferiores a los requerimientos de caudales ecológicos.....	51
Anexo IV. Fichas de zonas de interés.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Espacios naturales clasificados por la Red Natura 2000 en la Subcuenca transfronteriza del Bajo Guadiana (raya luso-española en los NUTS 3 del Algarve y Baixo Alentejo en Portugal y de Huelva en España): Guadiana, Vale do Guadiana y Sapais do Castro Marim (en Portugal), y Rivera del Chanza, Ríos Guadiana y Chanza, Andévalo Occidental, Marismas de Isla Cristina e Isla San Bruno (en Huelva, España).....</i>	4
Figura 2. <i>Esquema hidráulico del sistema de regulación Chanza-Piedras-Huelva (demanda consolidada de agua que se transfiere a la Demarcación Hidrográfica Tinto-Odiel-Piedras).....</i>	5
Figura 3. <i>Comparación de demandas de agua registradas en el año 2012 y demandas estimadas para los años 2021, 2017 y 2033 en la parte española de la Subcuenca Baja del Guadiana según el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana (no se considera la demanda consolidada que se transfiere a la Demarcación Hidrográfica Tinto-Odiel-Piedras) (PHDHG, 2016).....</i>	6
Figura 4. <i>Esquema de operación de los sistemas de información SAIH Guadiana y SNIRH (Pulido-Calvo et al., 2012).....</i>	8
Figura 5. <i>Estaciones de aforo y estaciones climáticas distribuidas en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana y utilizadas en este trabajo (color rojo=estaciones españolas; color amarillo=estaciones portuguesas).....</i>	11
Figura 6. <i>Esquema del procedimiento implementado para la calibración de las aproximaciones neuronales.....</i>	16
Figura 7. <i>Series temporales de los dos bombeos realizados desde el embalse del Andévalo [Bombeo I = Bombeo a los riegos de la Comunidad de Regantes (CCRR) Andévalo-Almendro; Bombeo II = Bombeo Palafito que distribuye el agua a la ETAP Andévalo en la Puebla de Guzmán (Huelva)]. Se muestra la estimación obtenida con el mejor modelo ARIMA, la previsión a corto plazo así como la tendencia correspondiente (línea roja).....</i>	24
Figura 8. <i>Serie temporal del bombeo total realizado desde el embalse del Chanza al Canal del Granado (Bombeo I y Bombeo II). Se muestra la estimación obtenida con el mejor modelo ARIMA, la previsión a corto plazo así como la tendencia correspondiente (línea roja).....</i>	24
Figura 9. <i>Evolución de los usos de agua desde el año hidrológico 1996/1997 al año hidrológico 2014/2015 aportados desde el Sistema Chanza-Andévalo al Canal del Granado (demanda consolidada que se transfiere a la Demarcación Hidrográfica Tinto-Odiel-Piedras) (Figura adaptada de Cornejo, 2015).....</i>	25
Figura 10. <i>Series temporales de los consumos agrícolas y urbanos de los recursos hídricos aportados desde el Sistema Beliche-Odeleite. Se muestra la estimación obtenida con el mejor modelo ARIMA, la previsión a corto plazo así como la tendencia correspondiente (línea roja).....</i>	26
Figura 11. <i>Evolución de los usos de agua desde 1998 a 2017 aportados desde el Sistema Odeleite-Beliche (no se dispone de registros de los usos agrícolas desde el año 2012 al 2015)...</i>	27
Figura 12. <i>Series temporales de los caudales medios diarios bombeados y turbinados desde el sistema de regulación Alqueva-Pedrogão (no hay datos disponibles de los caudales bombeados desde el embalse de Pedrogão en SNIRH).....</i>	29

Figura 13. <i>Aportaciones observadas y estimadas por los modelos RNAs y SIMPA en los embalses del Chanza y del Andévalo. Se indican las magnitudes de error de los modelos en el periodo de validación (cuadro rojo).....</i>	31
Figura 14. <i>Aportaciones observadas y estimadas por los modelos RNAs y SIMPA en los embalses de Beliche y Odeleite. Se indican las magnitudes de error de los modelos en el periodo de validación (cuadro rojo).....</i>	32
Figura 15. <i>Índice de Precipitación Estandarizado para una escala temporal de 12 meses en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana.....</i>	33
Figura 16. <i>Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en la Rivera de Malagón (PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Rivera de Malagón.....</i>	35
Figura 17. <i>Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en el Río Chanza en Rosal de la Frontera (Rivera de Chanza II; PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Río Chanza en Rosal de la Frontera.....</i>	36
Figura 18. <i>Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por los Planes Hidrológicos de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en la estación de aforo Pulo do Lobo en el Río Guadiana (PGRHG, 2016; PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Pulo do Lobo (No hay datos disponibles en los años hidrológicos 2000/01 y de 2009/10 a 2013/14).....</i>	37
Figura 19. <i>Distribución de las aportaciones anuales en la Rivera de Odeleite y caudal ecológico identificado por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana de la parte portuguesa (PGRHG, 2016) (No hay datos disponibles en los años hidrológicos 1993/94 y de 2010/11 a 2013/14).....</i>	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Información general de los embalses de regulación del sistema de recursos hídricos de la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana.....	4
Tabla 2. Características de las estaciones de aforo del sistema SNIRH en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana (\bar{x} = valor medio; CV = coeficiente de variación; max = valor máximo; min = valor mínimo) (ver localización en Figura 5).....	9
Tabla 3. Características de las estaciones de control de los sistemas ROEA y SAIH en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana (\bar{x} = valor medio; CV = coeficiente de variación; max = valor máximo; min = valor mínimo) (ver localización en Figura 5).....	10
Tabla 4. Características de las estaciones climáticas del sistema SNIRH en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana (\bar{x} = valor medio; CV = coeficiente de variación; max = valor máximo; min = valor mínimo) (ver localización en Figura 5).....	12
Tabla 5. Características de las estaciones climáticas la AEMET en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana (\bar{x} = valor medio; CV = coeficiente de variación; max = valor máximo; min = valor mínimo) (ver localización en Figura 5).....	13
Tabla 6. Caudales ecológicos de las masas de agua de la Subcuenca Baja del Guadiana indicadas en el Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana 2016-2021 (PHDHG, 2016).....	20
Tabla 7. Caudales ecológicos mensuales (hm^3/mes) y anuales ($hm^3/año$) en el río Guadiana aguas arriba de la confluencia del Chanza según los Planes Hidrológicos de las partes española y portuguesa de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana 2016-2021(PGRHG, 2016; PHDHG, 2016).....	20
Tabla 8. Caudales ecológicos mensuales (hm^3/mes) y anuales ($hm^3/año$) en estuario del Guadiana según el Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana 2016-2021 (PHDHG, 2016).....	21
Tabla 9. Caudales ecológicos anuales ($hm^3/año$) en el sistema Odeleite-Beliche según el Plan Hidrológico de la parte portuguesa de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana 2016-2021 (PGRHG, 2016).....	21
Tabla 10. Bondad de ajuste de los modelos ARIMA que aportan los mejores resultados en la caracterización de las series temporales de usos mensuales de agua registrados en los Sistemas Chanza-Andévalo y Odeleite-Beliche.....	28
Tabla 11. Bondad de ajuste en la fase de validación de las aproximaciones neuronales que modelan las aportaciones mensuales de algunas estaciones de aforo de España (E) y Portugal (P). Comparación con el modelo SIMPA en las aportaciones a los embalses.....	30

Compatibilidad cuantitativa de los distintos usos del agua en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana

Inmaculada Pulido Calvo, Juan Carlos Gutiérrez Estrada, Víctor Sanz Fernández,
Rubén Fernández de Villarán

*Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Huelva, e-mail: ipulido@uhu.es;
juanc@uhu.es; victor.sanz178@alu.uhu.es; ruben@dcaf.uhu.es*

INDICE

1. Introducción.....	1
2. Material y métodos.....	3
2.1. Servicios ecosistémicos en la Subcuenca Baja del Guadiana.....	3
2.2. Síntesis de bases de datos utilizadas y disponibles.....	7
2.3. Análisis de los usos consuntivos de agua mediante modelación ARIMA.....	14
2.4. Modelación del régimen de aportaciones: Redes Neuronales Artificiales.....	14
2.5. Evaluación de eventos de sequía: Índice de Precipitación Estandarizado SPI.....	17
2.6. Análisis estacional e interanual de los caudales ecológicos.....	19
3. Resultados y discusión.....	22
3.1. Sobre la disponibilidad de datos de aforo en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana.....	22
3.2. Sobre los usos de agua en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana.....	23
3.3. Sobre la modelación heurística del régimen de aportaciones en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana.....	29
3.4. Sobre la caracterización de eventos de sequía en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana.....	33
3.5. Sobre el régimen de caudales ecológicos en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana.....	34
4. Conclusiones.....	39
5. Referencias.....	41
Anexo I. Esquema hidráulico del sistema de regulación de recursos hídricos Chanza-Piedras-Huelva.....	46
Anexo II. Bases de datos.....	48
Anexo III. Análisis de frecuencias de aportaciones mensuales superiores e inferiores a los requerimientos de caudales ecológicos.....	51
Anexo IV. Fichas de zonas de interés.....	61

1. Introducción

La cuenca hidrográfica del Guadiana es una de las grandes cuencas que comparte España y Portugal y que se caracteriza por condiciones climáticas semiáridas con una significativa variabilidad estacional e interanual del régimen de precipitaciones (Do Ó, 2012; Carmona *et al.*, 2013). Esto supone en determinadas ocasiones un condicionante en la disponibilidad de los recursos hídricos que junto con la demanda de los sistemas de abastecimiento justifican la necesidad de una planificación integral del recurso agua que permita el desarrollo económico y social sin poner en riesgo los ecosistemas naturales (Global Water Partnership, 2000; Comisión Europea, 2011).

Este trabajo se va a centrar en la subcuenca hidrográfica vertiente al tramo internacional del río Guadiana, dentro de la provincia de Huelva en España y de las regiones del Baixo Alentejo y del Algarve en Portugal (Raya luso-española en los NUTS 3 del Algarve y Baixo Alentejo en Portugal y de Huelva en España —European Union, 2015; Jurado-Almonte y Pazos-García, 2018—), que cuenta con espacios naturales en ambos países de gran valor ambiental tal y como se cataloga en la Red Natura 2000 (European Commission, 2008). En esta zona también es especialmente significativa la confluencia de una cierta susceptibilidad para hacer frente a eventos moderados y severos de sequías con una demanda creciente de agua para regadíos (Guimarães *et al.*, 2012; Moura *et al.*, 2017).

Además esta Euroregión Algarve-Baixo Alentejo-Andalucía presenta pronunciadas diferencias sociales y económicas entre las zonas costeras y las zonas rurales del interior. La densidad de la población es muy superior en las zonas del litoral donde destaca una importante actividad turística. La elevada tasa de envejecimiento de las zonas del interior es uno de los problemas estructurales de más calado (Hildenbrand, 2012; Hernández-Ramírez, 2017). En las últimas décadas la Unión Europea está fomentado, con programas de cooperación transfronteriza, acciones dirigidas al bienestar económico y social de estas zonas rurales basadas en la valoración y conservación de los recursos propios inherentes a la región transfronteriza del Bajo Guadiana (PACT-A3, <http://www.pact-a3.org/euroregion.php>).

En este contexto, los planes de gestión del agua en la Subcuenca Baja del Guadiana deben intentar conseguir una asignación equilibrada de todos los usos del agua para así lograr las tres dimensiones del desarrollo sostenible: la social, la económica y la ambiental (ONU, 2015). De este modo, es fundamental la evaluación de los recursos hídricos (recursos disponibles y necesidades reales) y la caracterización del manejo de la demanda de agua a nivel de esta subcuenca, parámetros determinantes para la calibración de modelos de previsión que faciliten y apoyen la toma de decisiones sobre la compatibilización entre los diferentes usos —riegos, abastecimiento urbano e industrial, producción hidroeléctrica, ambientales— (Cabrera y Babiano, 2007; Omedas *et al.*, 2008; Pulido-Calvo *et al.*, 2012).

Para la consecución de este objetivo global, en este trabajo se han planteado los siguientes objetivos específicos: (a) Caracterización y análisis de los usos consuntivos del agua y estudio de sus tendencias futuras mediante modelos univariantes ARIMA; (b) Evaluación y modelación del régimen de aportaciones mediante Redes Neuronales Artificiales (RNAs) que faciliten y complementen el planteamiento de directrices para la gestión del agua en un contexto de integración de los aspectos sociales, económicos y ambientales; (c) Descripción y valoración de períodos registrados de sequías mediante el Índice de Precipitación Estandarizado SPI; y (d) Análisis estacional e interanual de los

caudales ecológicos a considerar e indicados por los Planes Hidrológicos Español y Portugués en la zona de estudio.

Las aproximaciones neuronales son modelos estocásticos no lineales que suelen tener mejor funcionamiento que los modelos estocásticos lineales (regresiones, modelos autoregresivos) (Ochoa-Rivera *et al.*, 2007; Pulido-Calvo y Portela, 2007; Pulido-Calvo y Gutiérrez-Estrada, 2009). Además para obtener buenos ajustes requieren de forma global de un menor número de variables independientes que los modelos conceptuales (Ochoa-Rivera *et al.*, 2007; Gastélum *et al.*, 2009) por lo que se constituyen como una metodología idónea para cuencas con pocos datos disponibles o que no son fáciles de obtener.

Este informe se corresponde con los resultados de la acción A1.1 incluida en la Actividad A.1 del Proyecto VALAGUA (VALorização Ambiental e gestão integrada da água e dos habitats no baixo GUAdiana transfronteiriço-0007_VALAGUA_5_P) del Programa INTERREG VA España-Portugal (POCTEP) 2014-2020.

2. Material y métodos

2.1. Servicios ecosistémicos en la Subcuenca Baja del Guadiana

La Eurorregión Algarve-Baixo Alentejo-Andalucía (Raya luso-española en los NUTS 3 del Algarve y Baixo Alentejo en Portugal y de Huelva en España) tiene como elemento vertebrador el río Guadiana que aporta como principales servicios de este ecosistema: (a) el suministro de agua a los núcleos urbanos y a las zonas de cultivo; (b) el servicio de apoyo para proporcionar espacios naturales de gran valor ambiental; y (c) los beneficios socioeconómicos y turísticos derivados del patrimonio natural y cultural de la zona (FAO, 2018).

Este informe incluido como resultado de la actividad A1.1 se centra fundamentalmente en un análisis exhaustivo de usos consuntivos del agua en la Subcuenca Baja del Guadiana (servicios de abastecimiento del ecosistema) y en la evaluación de los caudales mínimos necesarios para tener un buen estado ecológico en el río y sus afluentes según los Planes Hidrológicos Español y Portugués de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana (servicios de apoyo del ecosistema). Los servicios de apoyo de los ecosistemas para permitir la diversidad de las especies se analizan con más detalle en la actividad A2 del proyecto VALAGUA y los servicios culturales se evalúan en la actividad A3.

El sistema de recursos hídricos de la Subcuenca Baja del Guadiana comprende ocho espacios naturales contiguos y fronterizos clasificados por la Red Natura 2000 como: Guadiana, Vale do Guadiana y Sapais de Castro Marim (en Portugal), y Rivera del Chanza, Ríos Guadiana y Chanza, Andévalo Occidental, Marismas de Isla Cristina e Isla San Bruno (en España), en un área total aproximada de 175000 ha (Figura 1). Estos espacios naturales engloban parte de 5 municipios portugueses (Serpa y Mértola en la región Alentejo, Alcoutim, Castro Marim y Vila Real de Santo António en el Algarve) y de 10 municipios españoles (Rosal de la Frontera, Santa Bárbara de Casa, Paymogo, Puebla de Guzmán, El Almendro, El Granado, Sanlúcar de Guadiana, San Silvestre de Guzmán, Ayamonte e Isla Cristina (todos en Andalucía, Provincia de Huelva).

Este sistema de recursos hídricos incluye cuatro embalses de regulación (Figura 2). Dos de ellos en la parte española: El embalse del Chanza (inauguración 1985) situado a 400 m de la confluencia del río Chanza con el río Guadiana y el embalse del Andévalo (inauguración 2002) en el cauce de los ríos Cóbica y Malagón, afluentes por la izquierda del río Chanza. Y otros dos en la parte portuguesa: El embalse de Beliche (inauguración 1986) y el embalse de Odeleite (inauguración 1996) en los cauces de los ríos Beliche y Odeleite, respectivamente, ambos afluentes por la margen derecha del río Guadiana. La Tabla 1 muestra la información general de estos cuatro embalses.

Aguas arriba del Parque Natural do Vale do Guadiana (fuera de la zona de estudio) se encuentra el sistema de regulación constituido por los embalses de Alqueva (inauguración 2002) y Pedrogão (inauguración 2006) en el cauce principal del río Guadiana (términos municipales de Beja, Évora, Setúbal y Portalegre en Portugal y en la provincia de Badajoz en España). El embalse de Alqueva tiene una capacidad de almacenamiento de 4150 hm³ y los usos del agua son para los regadíos y el abastecimiento de núcleos urbanos del Alentejo y para producción hidroeléctrica (520 MW). La presa de Pedrogão se encuentra 23 km aguas debajo de Alqueva, tiene una capacidad de 54 hm³ y sus usos consuntivos principales son para los cultivos de zonas regables y para producción hidroeléctrica (11 MW) (Abadía y Morim de Oliveira, 2001; Frago et al., 2010).

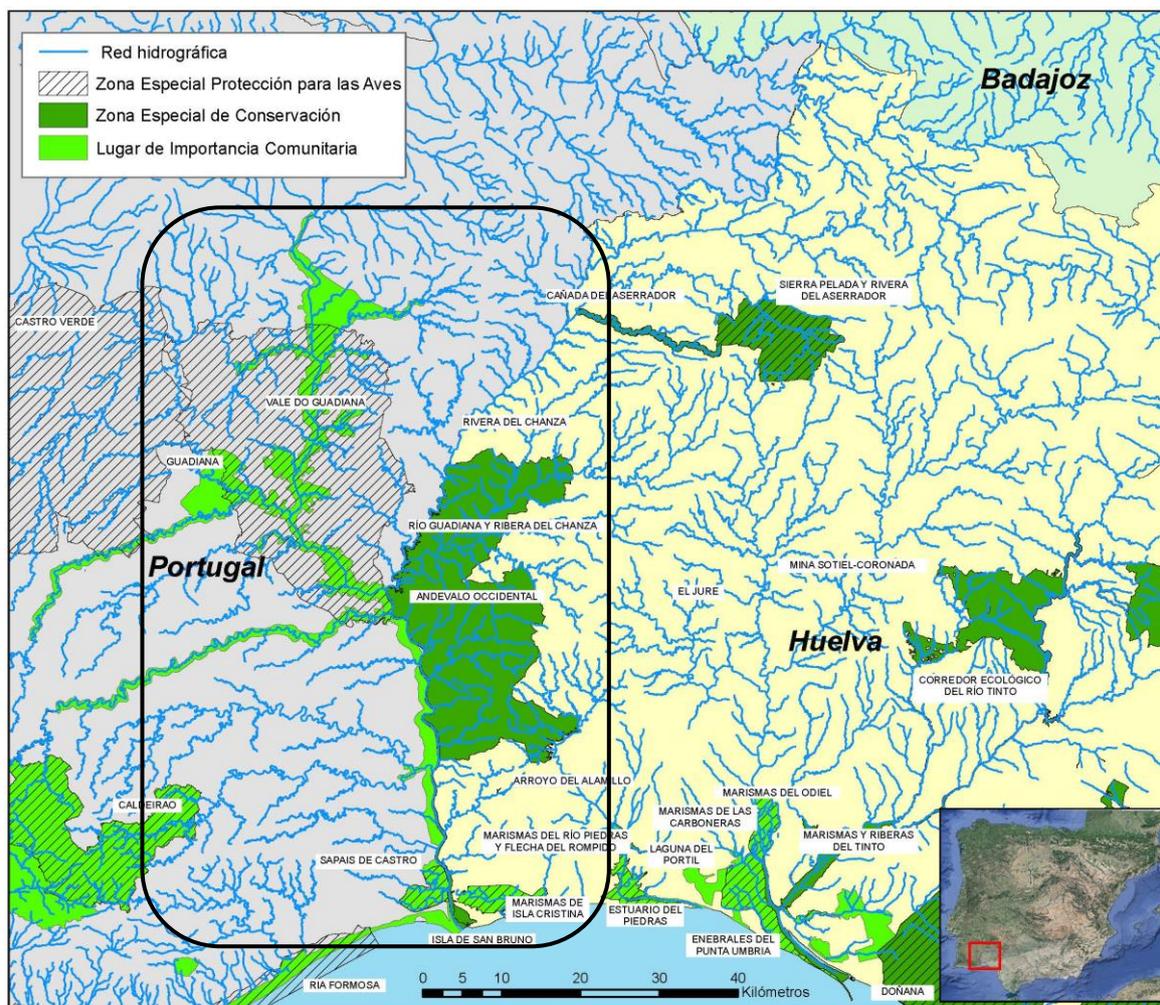


Figura 1. Espacios naturales clasificados por la Red Natura 2000 en la Subcuenca transfronteriza del Bajo Guadiana (raya luso-española en los NUTS 3 del Algarve y Baixo Alentejo en Portugal y de Huelva en España): Guadiana, Vale do Guadiana y Sapais do Castro Marim (en Portugal), y Rivera del Chanza, Ríos Guadiana y Chanza, Andévalo Occidental, Marismas de Isla Cristina e Isla San Bruno (en Huelva, España)

Tabla 1. Información general de los embalses de regulación del sistema de recursos hídricos de la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana

Parámetro	Chanza	Andévalo	Beliche	Odeleite
Capacidad (hm ³)	341	634	48	130
Término municipal	El Granado (Huelva)	Puebla de Guzmán (Huelva)	Castro Marim (Faro)	Castro Marim (Faro)
Latitud	37°33' N	37°37' N	37°16' N	37°19' N
Longitud	7°31' W	7°24' W	7°30' W	7°31' W
Denominación (Red de control)	E3-01 (SAIH Guadiana*)	E3-10 (SAIH Guadiana*)	30L/02A (SNIRH**)	30L/01A (SNIRH**)
Usos consuntivos de agua	. Riego . Abastecimiento urbano . Abastecimiento industrial . Generación hidroeléctrica	. Riego . Abastecimiento urbano . Abastecimiento industrial	. Riego . Abastecimiento urbano . Abastecimiento industrial	. Riego . Abastecimiento urbano . Abastecimiento industrial

*SAIH Guadiana = Sistema Automático de Información Hidrológica del Guadiana (<http://www.saihguadiana.com/>)

**SNIRH = Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos de Portugal (<https://snirh.apambiente.pt/>)

El embalse del Andévalo se encuentra en la cola del embalse del Chanza, están conectados (Sistema Chanza-Andévalo) y ambos se constituyen como la fuente principal de suministro de recursos hídricos de toda la provincia de Huelva (Andalucía, España). El agua regulada está destinada al abastecimiento de la ciudad de Huelva (incluido su importante núcleo industrial), de los núcleos urbanos costeros de la comarca de la Costa Occidental de Huelva y de los núcleos urbanos de la comarca del Andévalo así como del regadío de gran parte de las actuaciones agrícolas de la zona occidental de la provincia de Huelva (Jurado-Almonte, 2016). Los embalses del Chanza y del Andévalo se constituyen como cabecera del Sistema Hidráulico Chanza-Piedras-Huelva (Figura 2). El agua embalsada es conducida por el Canal del Granado (18.6 km) y el túnel de San Silvestre (9.4 km) a los embalses del Piedras y de Los Machos (Demarcación de los ríos Tinto-Piedras-Odiel). Desde aquí hay tomas para los planes de regadíos del Sur-Andévalo y del Chanza-Guadiana y parte el Canal del Piedras (39 km) que conduce el agua hasta los depósitos de regulación de la ciudad de Huelva (Anexo I).

El sistema hidráulico de los embalses de Odeleite y Beliche (Sistema Odeleite-Beliche) se destina al abastecimiento de agua de los núcleos urbanos y las zonas regables de los municipios de la comarca del Sotavento Algarvio (zona oriental del Algarve, Portugal). Actualmente sólo se efectúa captación de agua en el embalse de Beliche, a pesar de existir también una toma de agua en el embalse de Odeleite que está conectado, a través de un túnel, con el embalse de Beliche.



Figura 2. Esquema hidráulico del sistema de regulación Chanza-Piedras-Huelva (demanda consolidada de agua que se transfiere a la Demarcación Hidrográfica Tinto-Odiel-Piedras)

Los usos consuntivos de agua en esta subcuenca son mayoritariamente para regadío con aproximadamente el 78% de la demanda total (el área regada es aproximadamente de 12000 ha). Los usos urbanos e industriales son aproximadamente del 17% y 5%, respectivamente. En la parte portuguesa el 84.5% del agua consumida (123 hm³/año) es para uso agrícola, los usos urbanos (sector residencial, comercio y turismo) son del 13,6% y los usos industriales del 1.9%. En la parte española el 71.4% del agua consumida (211 hm³/año) es para uso agrícola, el 20% para usos urbanos, el 7.8% para usos industriales y el 0.8% para uso ganadero (se considera la demanda consolidada de agua de 175 hm³/año que se transfiere a la Demarcación Hidrográfica Tinto-Odiel-Piedras) (PGRHG, 2016; PHDHG, 2016).

En la Figura 3 se comparan las demandas de agua registradas en el año 2012 y las demandas estimadas para los años 2021, 2017 y 2033 en la parte española según los trabajos de elaboración del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana (PHDHG, 2016). En esta comparación no se considera la demanda consolidada que se transfiere a la Demarcación Hidrográfica Tinto-Odiel-Piedras (aproximadamente el 60% de los recursos disponibles en la Demarcación Hidrográfica Tinto-Odiel-Piedras se derivan del Sistema Chanza-Andévalo).

Destaca el aumento estimado del 100% de los usos agrícolas debido al futuro proyecto de transformación en regadíos de unas 15000 ha en la zona del Andévalo Occidental (Comunidades de Regantes del Andévalo Fronterizo –en los términos municipales de Puebla de Guzmán, Tharsis, El Almendro, Villanueva de los Castillejos y Paymogo- y del Andévalo Minero –en los términos municipales de Calañas, El Cerro del Andévalo y Villanueva de las Cruces). A esta demanda agrícola hay que añadir los usos que se transfieren a la Demarcación Hidrográfica Tinto-Odiel-Piedras (zonas regables del Sur-Andévalo, del Chanza-Guadiana y Palos de la Frontera; 125 hm³/año) y a la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (riegos de Moguer, Lucena del Puerto y Bonares; zona regable de El Fresno; 5 hm³/año).

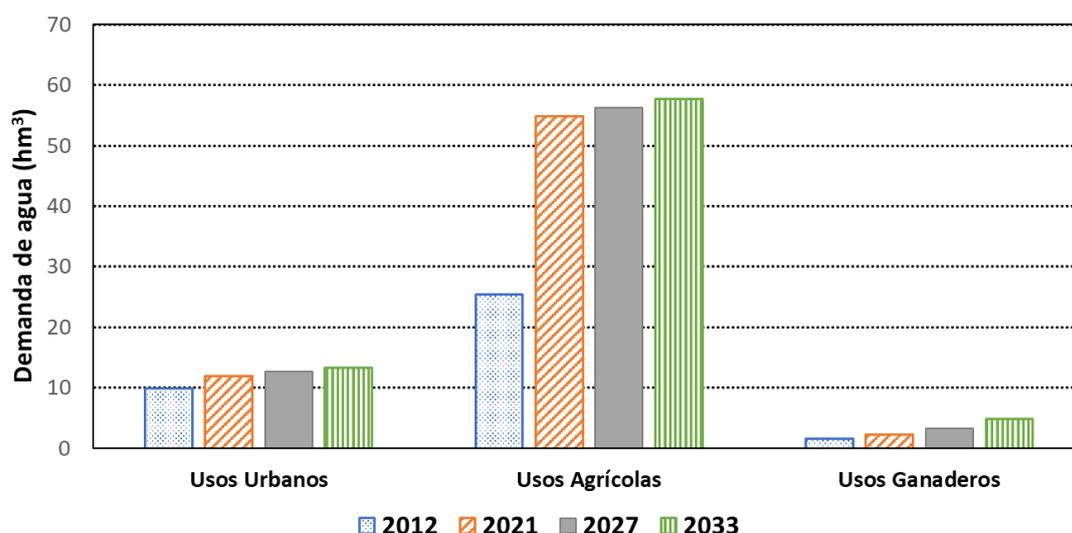


Figura 3. Comparación de demandas de agua registradas en el año 2012 y demandas estimadas para los años 2021, 2017 y 2033 en la parte española de la Subcuenca Baja del Guadiana según el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana (no se considera la demanda consolidada que se transfiere a la Demarcación Hidrográfica Tinto-Odiel-Piedras) (PHDHG, 2016)

El área de drenaje de esta subcuenca es de unos 67085 km² pertenecientes a las regiones del Algarve y Alentejo en Portugal y a la provincia de Huelva (Andalucía) en España. La precipitación media anual es de 521 mm, pero este valor medio enmascara una variabilidad significativa en el espacio y el tiempo. Se presentan rangos de precipitación de 264 a 1044 mm por año en las zonas del estuario bajo, de 302 a 805 mm en las zonas del estuario medio y alto, y de 397 a 1397 mm en la rivera del Chanza. La mayoría de la precipitación se concentra en el periodo de octubre a abril y el periodo estival se caracteriza por la ausencia de ésta. La temperatura media anual es de 18.24°C. También la variabilidad de temperaturas entre estaciones del año es muy grande. Los valores mínimos y máximos de temperaturas en el estuario bajo pueden alcanzar valores de 0°C (invierno) y 43°C (verano), en los estuarios medio y alto de -4°C (invierno) y 46°C (verano) y en la rivera del Chanza de -8°C (invierno) y 44°C (verano).

Por consiguiente, también hay una fuerte variabilidad estacional en el régimen de escorrentías en esta subcuenca. Por ejemplo, los valores medios mensuales de aportaciones de agua al embalse del Andévalo fueron de 10.48±17.12 hm³, al embalse del Chanza de 16.27±23.48 hm³, al embalse del Odeleite de 7.18±15.61 hm³ y al embalse de Beliche de 1.43±3.94 hm³. Los valores máximos mensuales de estas aportaciones fueron de 86.17 hm³ en el embalse del Andévalo, de 317.68 hm³ en el embalse del Chanza, de 100.93 hm³ en el embalse de Odeleite y de 26.68 hm³ en el embalse de Beliche.

2.2. Síntesis de bases de datos utilizadas y disponibles

La Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA) del Ministerio para la Transición Ecológica del Gobierno de España es el sistema que permite conocer la evolución de los caudales en puntos singulares de ríos así como el estado de los embalses en todo el territorio español (<https://sig.mapama.gob.es/redes-seguimiento/>). La parte española de la Cuenca del Río Guadiana tiene desde el año 2006 un sistema de adquisición de datos hidrometeorológicos en tiempo real denominado SAIH Guadiana (Sistema Automático de Información Hidrológica, <http://www.saihguadiana.com/>). Las estaciones de aforo ROEA están actualmente conectadas al SAIH. Asimismo la parte portuguesa tiene su sistema de registro de datos SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, <http://snirh.apambiente.pt/>) de la Agência Portuguesa do Ambiente.

Estos sistemas de registro de datos hidroclimáticos están compuestos de una red ramificada y distribuida por toda la cuenca. Su principal objetivo es suministrar datos de caudal y precipitación así como los niveles de los embalses y ríos. Estos datos se capturan mediante diferentes sensores que los transmiten a la red de comunicación. Los principales componentes de estos sistemas de comunicación son: (a) las estaciones de control las cuales capturan las señales de los contadores de precipitación y caudal y de los niveles de embalses y ríos; (b) las estaciones de concentración las cuales reciben y almacenan las señales enviadas desde las estaciones de control; y (c) el centro de control el cual almacena, muestra y procesa los datos registrados en las estaciones de concentración (Figura 4).

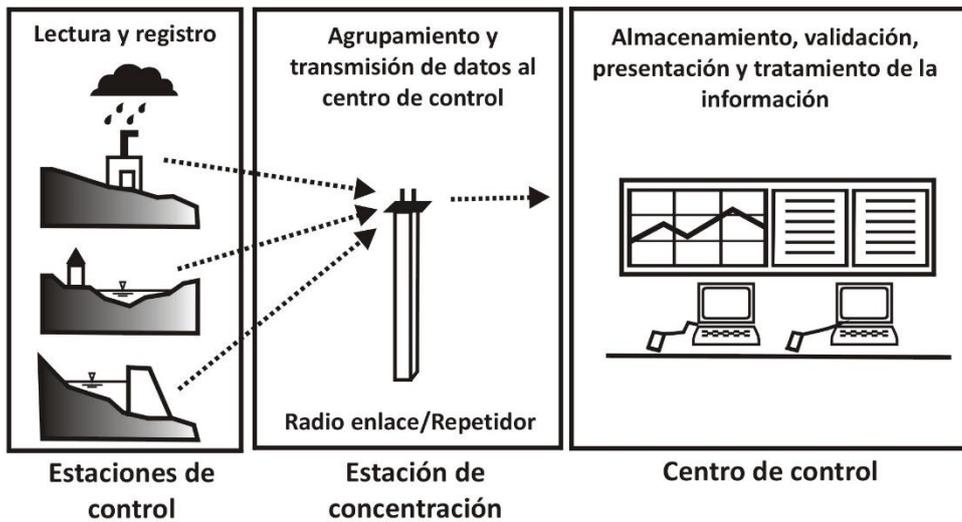


Figura 4. Esquema de operación de los sistemas de información SAIH Guadiana y SNIRH (Pulido-Calvo et al., 2012)

En las Tablas 2 y 3 se indican las estaciones de aforo de los sistemas ROEA, SAIH Guadiana y SNIRH de la Subcuenca transfronteriza del Bajo Guadiana con una longitud temporal y bondad aceptables de datos de aportaciones. En las Tablas 4 y 5 se muestran las características de las estaciones climáticas de la Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET; <http://www.aemet.es>) y del Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos de Portugal (SNIRH) distribuidas en la zona de estudio (Anexo II).

En este trabajo las variables usadas en la modelación ARIMA desarrollada incluyen datos históricos de aportaciones registradas por las estaciones de aforo de los sistemas ROEA, SAIH Guadiana y SNIRH indicadas en las Tablas 2 y 3. Las variables usadas en las aproximaciones neuronales desarrolladas incluyen estos datos históricos de aportaciones y caudales junto con datos de precipitación y temperatura del aire de las estaciones indicadas en la Tabla 4.

La Figura 5 presenta la localización de todas las estaciones de aforo y climáticas distribuidas en la sub-cuenca en estudio y utilizadas en este trabajo. Todos los datos fueron almacenados en formato mensual. Los datos de aportaciones, caudales y temperatura del aire se usaron como valores medios mensuales y los datos de precipitación como valores acumulados mensuales.

Tabla 2. Características de las estaciones de aforo del sistema SNIRH en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana (\bar{x} = valor medio; CV = coeficiente de variación; max = valor máximo; min = valor mínimo) (ver localización en Figura 5)

Estación	Tipo	Denominación	Latitud/ Longitud	Datos (\bar{x} ; CV) (max; min)	Años
Vasção	Control río	28L/02H	37°31' N 7°34' W	Caudal medio diario (3.19 m ³ /s; 4.40) (490.40 m ³ /s; 0 m ³ /s)	1960-2000 [†] 1990-2016 [‡]
Pulo do Lobo	Control río	27L/01H	37°48' N 7°37' W	Caudal medio diario (140.34 m ³ /s; 2.86) (7752.53 m ³ /s; 0 m ³ /s)	1946-2000 [†] 1990-2018 [‡]
Limas	Control río	27L/04H	37°49' N 7°37' W	Caudal medio diario (0.58 m ³ /s; 5.08) (64.62 m ³ /s; 0 m ³ /s)	1981-1995
Oeiras	Control río	28K/02H	37°39' N 7°42' W	Caudal medio diario (2.20 m ³ /s; 4.82) (237.79 m ³ /s; 0 m ³ /s)	1981-2002 [†] 1990-2018 [‡]
Monte da Ponte	Control río	27J/01H	37°50' N 7°51' W	Caudal medio diario (3.02 m ³ /s; 5.10) (390.85 m ³ /s; 0 m ³ /s)	1958-1997 [†] 1990-2018 [‡]
Tenência (Porto das Areias, Ribeira de Foupana)	Control río	29M/01H	37°21' N 7°29' W	Caudal medio diario (2.15 m ³ /s; 6.35) (694.16 m ³ /s; 0 m ³ /s)	1976-2001 [†] 1990-2012 [‡]
Monte dos Fortes (Ribeira de Odeleite)	Control río	29L/01H	37°20' N 7°37' W	Caudal medio diario (2.40 m ³ /s; 4.07) (350.43 m ³ /s; 0 m ³ /s)	1960-2001 [†] 1990-2018 [‡]
Albufeira do Odeleite	Control embalse	30L/01A	37°19' N 7°31' W	Aportación (7.14 hm ³ /mes; 2.18)* (100.93 hm ³ /mes; 0 hm ³ /mes)	1975-1990
				Volumen (99.54 hm ³ /mes; 0.23) (130 hm ³ /mes; 31.24 hm ³ /mes)	1997-2015
Albufeira do Beliche	Control embalse	30L/02A	37°16' N 7°30' W	Aportación (1.43 hm ³ /mes; 2.75)** (26.68 hm ³ /mes; 0 hm ³ /mes)	1978-1985
				Usos agrícolas (1.20 hm ³ /mes; 0.73) (3.20 hm ³ /mes; 0.4 hm ³ /mes)	2000-2012
				Usos urbanos (2.72 hm ³ /mes; 0.27) (4.55 hm ³ /mes; 1.23 hm ³ /mes)	2000-2012
				Volumen (31.11 hm ³ /mes; 0.31) (46.03 hm ³ /mes; 6.38 hm ³ /mes)	1990-2015

*Aportaciones registradas en la estación de aforo Odeleite Ponte (30M/01H)

** Aportaciones registradas en la estación de aforo Beliche Povoação (30L/01H)

†Datos de estaciones de aforo en 'Dados de Base' del Sistema SNIRH

‡Datos de estaciones de aforo en 'Boletim de Escoamento' del sistema SNIRH

Tabla 3. Características de las estaciones de control de los sistemas ROEA y SAIH en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana (\bar{x} = valor medio; CV = coeficiente de variación; max = valor máximo; min = valor mínimo) (ver localización en Figura 5)

Estación	Tipo	Denominación (Red de control)	Latitud/ Longitud	Datos (\bar{x} ; CV) (max; min)	Años
Albahacar	Control río	4173 (ROEA)	37°43' N 7°19' W	Caudal medio diario (0.46 m ³ /s; 7.35) (246.26 m ³ /s; 0 m ³ /s)	1969-2004
Chanza en Aroche	Control río	4158 (ROEA)	37°58' N 6°57' W	Caudal medio diario (0.50 m ³ /s; 3.16) (47.00 m ³ /s; 0 m ³ /s)	1960-2006
Chanza en Rosal Frontera	Control río	4176 (ROEA)	37°57' N 7°12' W	Caudal medio diario (1.26 m ³ /s; 4.12) (138.50 m ³ /s; 0 m ³ /s)	1969-2002
Cóbica	Control río	4161 (ROEA) CR3-05 (SAIH)	37°38' N 7°15' W	Caudal medio diario (0.40 m ³ /s; 12.60) (285.00 m ³ /s; 0 m ³ /s)	1969-2004 (ROEA) 2008-2010 (SAIH)
Malagón	Control río	4172 (ROEA) CR3-04 (SAIH)	37°41' N 7°16' W	Caudal medio diario (1.65 m ³ /s; 7.79) (778.08 m ³ /s; 0 m ³ /s)	1969-2004 (ROEA) 2007-2010 (SAIH)
Embalse Andévalo	Control embalse	E3-10 (SAIH)	37°37' N 7°24' W	Aportación (10.26 hm ³ /mes; 1.58) (86.17 hm ³ /mes; 0.45 hm ³ /mes)	2002-2017
				Bombeo I* (0.05 hm ³ /mes; 1.16) (0.24 hm ³ /mes; 0 hm ³ /mes)	2007-2017
				Bombeo II** (0.14 hm ³ /mes; 0.89) (0.36 hm ³ /mes; 0 hm ³ /mes)	2011-2017
				Volumen (312.14 hm ³ /mes; 0.74) (628.74 hm ³ /mes; 12.41 hm ³ /mes)	2002-2017
Embalse Chanza	Control embalse	E3-01 (SAIH)	37°33' N 7°31' W	Precipitación (41.92 mm/mes; 1.06) (218.30 mm/mes; 0 mm/mes)	2002-2017
				Aportación (21.62 hm ³ /mes; 1.99) (317.68 hm ³ /mes; 0.37 hm ³ /mes)	1996-2017
				Bombeo I (5.38 hm ³ /mes; 0.78) (14.41 hm ³ /mes; 0 hm ³ /mes)	1996-2017
				Bombeo II (9.68 hm ³ /mes; 0.68) (22.76 hm ³ /mes; 0 hm ³ /mes)	2009-2017
				Central Hidroeléctrica*** (13.07 hm ³ /mes; 0.69) (24.78 hm ³ /mes; 0.003 hm ³ /mes)	1996-2017
				Bocachanza**** (1.64 hm ³ /mes; 1.64) (10.35 hm ³ /mes; 0 hm ³ /mes)	1996-2017
				Volumen (236.11 hm ³ /mes; 0.26) (334.52 hm ³ /mes; 122.18 hm ³ /mes)	1996-2017
Azud Matavacas	Control embalse	E3-02 (SAIH)	37°28' N 7°22' W	Aportación***** (10.71 hm ³ /mes; 0.60) (28.62 hm ³ /mes; 0 hm ³ /mes)	1996-2017

*Bombeo I = Bombeo que impulsa el agua a la Comunidad de Regantes Andévalo-El Almendro

**Bombeo II = Bombeo PALAFITO que impulsa el agua a la balsa Cabeza del Pasto y después se distribuye por gravedad a la ETAP Andévalo (Puebla de Guzmán, Huelva)

***Los valores se corresponden con los meses de invierno en los que se desagua a la Central hidroeléctrica

****La estación de bombeo Bocachanza está situada aguas abajo del embalse del Chanza en la confluencia de los ríos Guadiana y Chanza. El agua impulsada por las dos estaciones de bombeo del Chanza (Bombeos I y II) y por la estación de Bocachanza es conducida por el Canal del Granado y el túnel de San Silvestre a los embalses del Piedras y de Los Machos (Demarcación de los ríos Tinto-Piedras-Odiel) (Figura 2, Anexo I)

*****El azud de Matavacas es una pequeña presa con capacidad de 0.3 hm³ que regula el agua bombeada desde el Sistema Chanza-Andévalo hacia el embalse del Piedras (Figura 2, Anexo I)

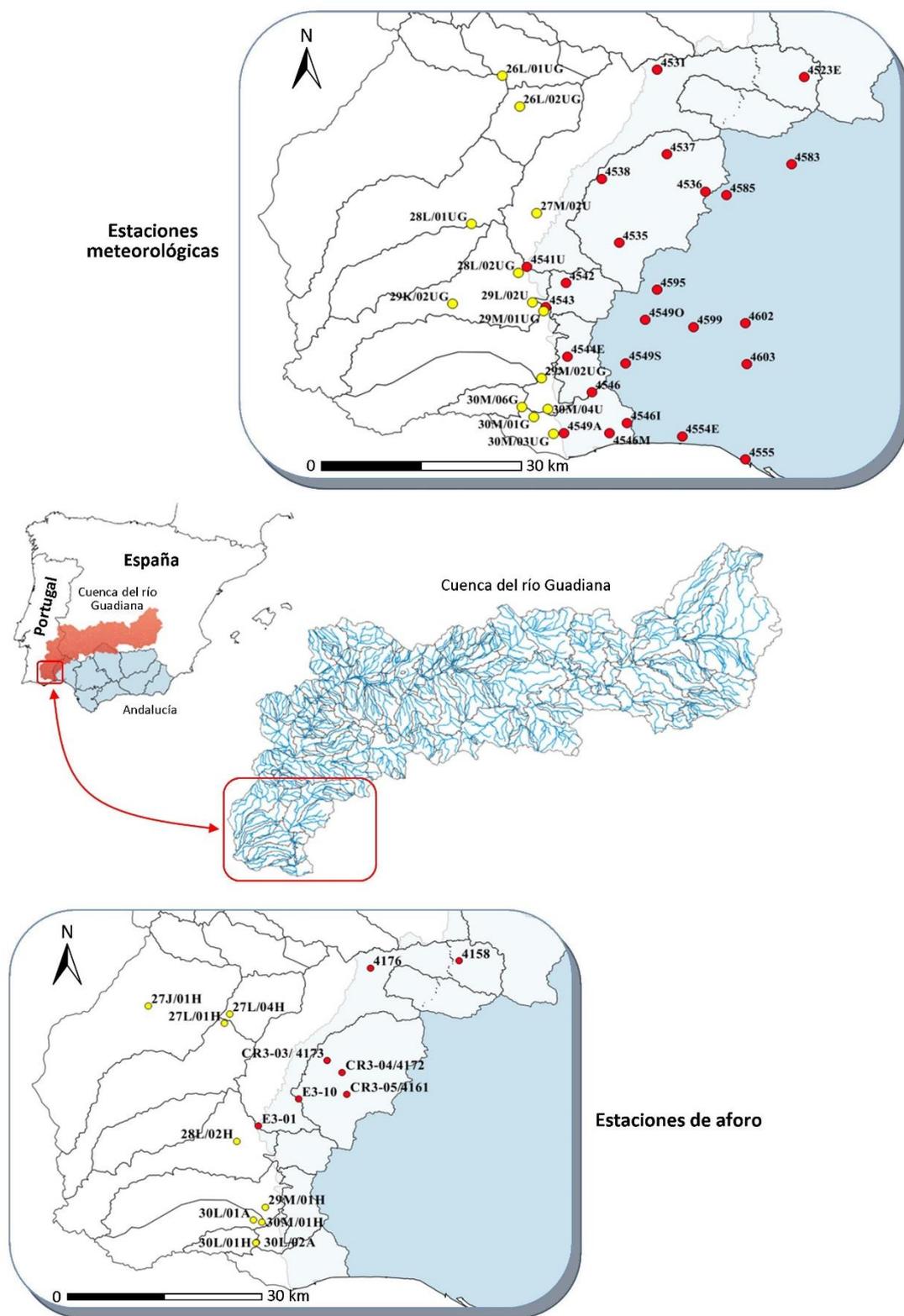


Figura 5. Estaciones de aforo y estaciones climáticas distribuidas en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana y utilizadas en este trabajo (color rojo=estaciones españolas; color amarillo=estaciones portuguesas)

Tabla 4. Características de las estaciones climáticas del sistema SNIRH en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana (\bar{x} = valor medio; CV = coeficiente de variación; max = valor máximo; min = valor mínimo) (ver localización en Figura 5)

Estación	Denominación	Latitud/ Longitud	Precipitación (\bar{x} ; CV) (max; min)	Años
Alcoutim	29M/01UG	37°27' N 7°28' W	(42.18 mm/mes; 1.31) (411.6 mm/mes; 0)	1976-2017
Azinhhal	30M/04U	37°15' N 7°27' W	(35.54 mm/mes; 1.60) (324.4 mm/mes; 0)	1981-1985
Barragem do Beliche	30M/06G	37°16' N 7°30' W	(45.89 mm/mes; 1.09) (300.4 mm/mes; 0)	2001-2016
Castro Marim	30M/03UG	37°12' N 7°26' W	(40.81 mm/mes; 1.37) (398.2 mm/mes; 0)	1981-2016
Cortes Pereiras	29L/02U	37°28' N 7°30' W	(40.84 mm/mes; 1.39) (380.7 mm/mes; 0)	1980-2001
Figueirais	30M/01G	37°14' N 7°29' W	(45.27 mm/mes; 1.26) (322.7 mm/mes; 0)	1936-1984
Mértola	28L/01UG	37°38' N 7°39' W	(35.23 mm/mes; 1.23) (301.6 mm; 0)	1932-2017
Mesquita	28L/02UG	37°32' N 7°32' W	(34.97 mm/mes; 1.34) (351.0 mm/mes; 0 mm)	1981-2016
Minas de São Domingos	27M/02U	37°39' N 7°30' W	(43.55 mm/mes; 1.10) (313.4 mm/mes; 0)	1900-1968
Santa Iria	26L/02UG	37°52' N 7°33' W	(37.04 mm/mes; 1.26) (278.3 mm/mes; 0)	1981-2017
Sapal de Odeleitte (Ex. Fonte do Penedo)	29M/02UG	37°19' N 7°28' W	(38.28 mm/mes; 1.02) (162.8 mm/mes; 0)	2002-2016
Serpa	26L/01UG	37°56' N 7°36' W	(43.98 mm/mes; 1.16) (388.7 mm/mes; 0)	1932-2011

Tabla 5. Características de las estaciones climáticas la AEMET en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana (\bar{x} = valor medio; CV = coeficiente de variación; max = valor máximo; min = valor mínimo) (ver localización en Figura 5)

Estación	Denominación	Latitud/Longitud	Precipitación (\bar{x} ; CV) (max; min)	Años
Aroche (Las Cefiñas)	4523E	37°57' N 6°51' W	(66.25 mm/mes; 1.11) (439.0 mm/mes; 0)	1968-2017
Ayamonte (Telégrafos)	4549A	37°13' N 7°24' W	(40.50 mm/mes; 1.35) (378.0 mm/mes; 0)	1949-1985
Cabezas Rubias	4536	37°43' N 7°05' W	(55.21 mm/mes; 1.21) (441.6 mm/mes; 0)	1964-2017
Cartaya (Pemares)	4554E	37°13' N 7°07' W	(50.56 mm/mes; 1.39) (459.5 mm/mes; 0)	1987-2014
Cerro Andeválo (El Cóbico)	4585	37°43' N 7°02' W	(54.59 mm/mes; 1.21) (468.5 mm/mes; 0)	1964-2017
El Almendro (La Burrilla)	4595	37°31' N 7°11' W	(56.00 mm/mes; 1.27) (470.0 mm/mes; 0)	1962-1984
El Granado	4542	37°31' N 7°25' W	(46.25 mm/mes; 1.23) (409.5 mm/mes; 0)	1964-2017
El Granado (Bocachanza)	4541U	37°33' N 7°31' W	(42.25 mm/mes; 1.22) (380.1 mm/mes; 0)	1976-2017
Gibraleón	4603	37°22' N 6°58' W	(47.96 mm/mes; 1.29) (394.7 mm/mes; 0)	1965-2012
Isla Cristina (Cañada Corcho)	4546M	37°13' N 7°17' W	(47.38 mm/mes; 1.34) (391.2 mm/mes; 0)	1989-2013
Lepe (Valdeluz)	4546I	37°14' N 7°15' W	(49.33 mm/mes; 1.40) (470.5 mm/mes; 0)	1989-2006
Paymogo	4538	37°44' N 7°20' W	(53.37 mm/mes; 1.27) (381.6 mm/mes; 0)	1952-1984
Presa de Sancho	4602	37°44' N 7°20' W	(51.46 mm/mes; 1.26) (377.5 mm/mes; 0)	1961-1992
Presa del Piedras	4549S	37°21' N 7°15' W	(43.98 mm/mes; 1.31) (407.5 mm; 0)	1972-1992
Puebla de Guzmán (Herrerías)	4535	37°36' N 7°17' W	(42.75 mm/mes; 1.20) (318.0 mm/mes; 0)	1966-2017
Punta Umbría	4555	37°10' N 6°57' W	(39.25 mm/mes; 1.38) (380.0 mm/mes; 0)	1988-2017
Rosal de la Frontera	4531	37°58' N 7°13' W	(50.28 mm/mes; 1.11) (312.0 mm/mes; 0)	1966-1982
San Bartolomé de la Torre	4599	37°26' N 7°06' W	(49.19 mm/mes; 1.27) (373.4 mm/mes; 0)	1963-1989
San Silvestre de Guzmán (Labrados)	4544E	37°22' N 7°24' W	(45.72 mm/mes; 1.30) (465.6 mm/mes; 0)	1980-2016
Sanlúcar de Guadiana	4543	37°28' N 7°28' W	(40.58 mm/mes; 1.28) (334.4 mm/mes; 0)	1961-1986
Santa Bárbara de Casa	4537	37°47' N 7°11' W	(62.31 mm/mes; 1.10) (399.0 mm/mes; 0)	1952-1981
Valdelamusa (Minas)	4583	37°47' N 6°52' W	(66.66 mm/mes; 1.17) (477.0 mm/mes; 0)	1972-1992
Villablanca	4546	37°18' N 7°20' W	(52.08 mm/mes; 1.26) (422.7 mm/mes; 0)	1964-2012
Villanueva de los Castillejos (Toril Nuevo)	4549O	37°27' N 7°13' W	(50.71 mm/mes; 1.25) (417.0 mm/mes; 0)	1972-1992

2.3. Análisis de los usos consuntivos de agua mediante modelación ARIMA

Para la evaluación de las series temporales de usos de agua registrados en cada uno de los embalses de la subcuenca baja del Guadiana se ajustaron modelos univariantes $ARIMA(p, d, q)(P, D, Q)^S$ que permiten explicar el comportamiento de la variable a estudiar a partir de observaciones pasadas de la propia variable y ajustar la estacionalidad de los datos. Donde p y P son el número de parámetros autorregresivos, d y D son el número de diferenciaciones para que la serie sea estacionaria, q y Q son el número de parámetros de medias móviles y S es la periodicidad de la serie (en este caso $S=12$) (P , Q y D se corresponden con los parámetros en la componente estacional del modelo). Con este ajuste estacional se pretende observar la tendencia-ciclo de las series de usos de agua.

La implementación de los modelos ARIMA se realizó en RStudio v3.3.2 (R Core Team, 2016). Para ello, se utilizó la función `auto.arima` propuesta por Hyndman y Khandakar (2008), la cual devuelve el mejor modelo ARIMA según el valor de los criterios AIC, AICc o BIC (Hyndman *et al.*, 2018). Esta función selecciona entre los posibles modelos dentro de las restricciones de orden proporcionadas. La significancia de los parámetros del modelo fue estudiada mediante la aplicación de la función `coefstest` (Hothorn *et al.*, 2017) la cual realiza las pruebas de Wald de coeficientes estimados, calculando los intervalos de confianza de Wald correspondientes. Adicionales paquetes incluidos en el desarrollo del script fueron 'forecast' (Hyndman *et al.*, 2018), 'lmtest' (Hothorn *et al.*, 2017), 'stats' (R Core Team, 2016) y 'tseries' (Trapletti *et al.*, 2017). El software libre R tiene la ventaja de poder programar los paquetes estadísticos según se precise, facilitando el análisis y modelización de las series temporales (Cryer y Chan, 2008).

Se usaron las funciones de autocorrelación (ACF) y de autocorrelación parcial (PACF) para comprobar que los residuos de los modelos que presentaron un buen ajuste se comportaban como un ruido blanco. La bondad del ajuste de los modelos ARIMA se evaluó mediante la aplicación de las siguientes magnitudes de error: coeficiente de correlación (R), coeficiente de determinación (r^2), coeficiente de eficiencia (E_2), error cuadrático medio (RMSE) e índice de persistencia (PI) (Legates y McCabe, 1999).

2.4. Modelación del régimen de aportaciones: Redes Neuronales Artificiales

La simulación de las aportaciones a los embalses y escorrentías de la Subcuenca Baja del Guadiana se realizó usando Redes Neuronales Artificiales (RNAs). Las RNAs son modelos matemáticos inspirados en la arquitectura neuronal de los sistemas nerviosos biológicos. Las estructuras más ampliamente estudiadas son los perceptrones multicapa (Rumelhart *et al.*, 1986). Estos modelos aprenden de forma iterativa introduciendo el conjunto de variables de entrada (variables independientes) y de salida (variable dependiente) las veces que sean necesarias hasta alcanzar un determinado nivel de error durante la fase de calibración del modelo (se denomina época a una iteración donde todo el conjunto de datos de calibración se introduce a la RNA). Este tipo de aproximaciones permiten el análisis de conjuntos complejos de datos y la determinación de relaciones no-lineales entre variables dependientes e independientes. Una detallada descripción del funcionamiento de los perceptrones multicapa puede ser encontrada en Hsu *et al.* (1995), Tsoukalas y Uhrig (1997), ASCE (2000a,b), Shrestha *et al.* (2005) y Pulido-Calvo y Portela (2007).

Un perceptrón multicapa típico de tres o cuatro capas tiene una capa de entrada, una o dos capas ocultas y una capa de salida. Los elementos de proceso en cada capa son

denominados nodos o neuronas. Una RNA con k , m , n y s nodos en las capas de entrada, primera y segunda oculta y de salida, respectivamente, tiene la notación (k,m,n,s) (Figura 6). Los parámetros asociados a cada una de las conexiones entre nodos de cada capa son llamados pesos (W_{ji}). Hay muchos métodos para la calibración o aprendizaje de las aproximaciones neuronales. En este trabajo, se ha utilizado el algoritmo de retro-propagación estándar.

El algoritmo de retro-propagación estándar se fundamenta en la propagación del error en la capa de salida hacia las conexiones entre la capa de salida y la/s capa/s ocultas y de la primera capa oculta hacia la capa de entrada. Este procedimiento se repite tras la presentación de cada conjunto de valores de calibración a lo largo de una época lo que confiere a esta estructura neuronal un cierto carácter estático. Esto se traduce en una tendencia a proporcionar resultados simplistas cuando se trabaja con series de tiempo (comportamiento *naïve*), lo que significa que la estimación proporcionada por la RNA en cada período de tiempo es sistemáticamente muy cercana a los datos observados en el período de tiempo anterior. Este comportamiento ha sido descrito en multitud de trabajos en los que se analizaron series temporales de muy diversa naturaleza (Abrahart y See, 2000; Pulido Calvo *et al.*, 2003; Gutiérrez-Estrada *et al.*, 2005; Pulido-Calvo y Portela, 2007). Por otra parte, el comportamiento *naïve* se ve favorecido por la autocorrelación y la correlación cruzada significativa por lo que es sumamente importante seleccionar adecuadamente las variables de entrada a la RNA (Gutiérrez-Estrada *et al.*, 2009).

Con el objetivo de evitar el efecto *naïve*, en este trabajo se ha modificado el esquema de calibración de las RNAs. Para ello se ha programado la aplicación ANNPI 1.0 que combina una interfaz gráfica desarrollada en Microsoft Visual Basic 6.0, la cual integra un motor de cálculo independiente implementado en R 3.4.0. Esta configuración aprovecha todo el potencial de ambas herramientas de desarrollo. De esta forma, la calibración clásica de las RNAs se lleva a cabo mediante el paquete *neuralnet* de R (Fritsch *et al.*, 2016), mientras que la evaluación de los modelos así como el control automático de la variación de los parámetros ejecutados por *neuralnet* lo realiza ANNPI.

El paquete *neuralnet* desarrollado por Fritsch *et al.* (2016) emplea un esquema clásico de calibración que consiste básicamente en que la parada del entrenamiento se realiza cuando el error global de salida de la red es igual o menor a un umbral determinado por el usuario. Típicamente, umbrales relativamente grandes proporcionan convergencias muy rápidas y niveles de ajustes muy bajos en la fase de validación como consecuencia de un entrenamiento deficiente. Por el contrario, umbrales muy pequeños implican convergencias muy lentas y desajustes en la fase de validación del modelo a causa de un efecto de sobre-entrenamiento.

Para solventar estos inconvenientes, ANNPI dirige a *neuralnet* a través de un *script* en el que el usuario determina un rango de umbrales a probar así como el nivel de decremento del umbral. En cada calibración, al final de cada época *neuralnet* comprueba si el error global es igual o inferior al umbral establecido. En caso afirmativo, el *script* genera un archivo de pesos que es recogido por ANNPI a través del cual se calcula el índice de persistencia (PI) (Kitanidis y Bras, 1980). ANNPI comprueba si el umbral de la última calibración se corresponde con el mínimo establecido por el usuario. En caso negativo establece el nuevo nivel del umbral y devuelve el control a *neuralnet*. Si por el contrario se ha alcanzado el

umbral mínimo, ANNPI selecciona la estructura neuronal donde se obtiene el mejor PI en la fase de validación y guarda la matriz de pesos (Figura 6).

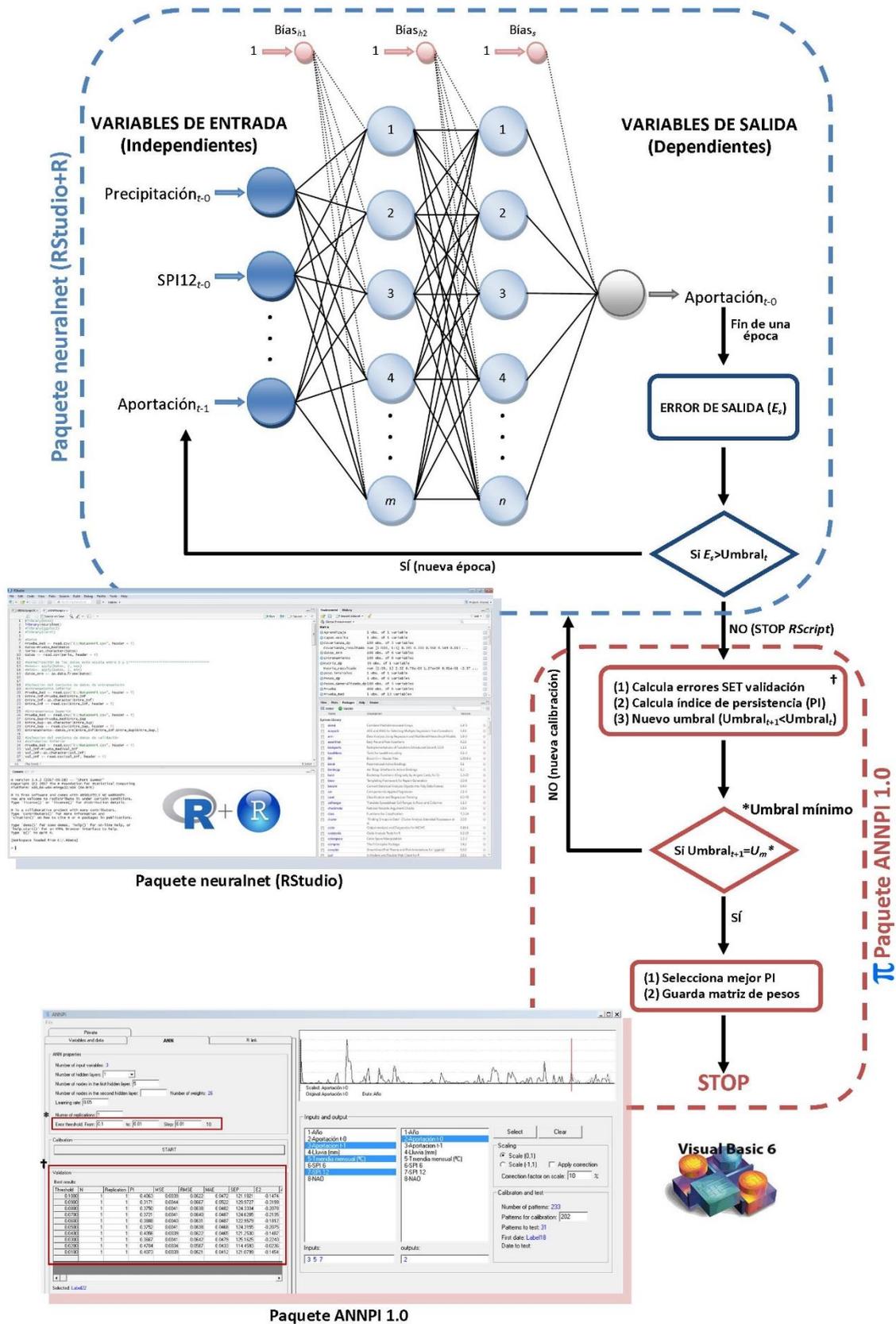


Figura 6. Esquema del procedimiento implementado para la calibración de las aproximaciones neuronales

Un problema inherente a las redes neuronales es su tendencia a encontrar mínimos locales. Para resolver este problema, una misma arquitectura de red neuronal fue entrenada 30 veces, empezando con un conjunto aleatorio de pesos (Actil y Rat, 2005). Este nivel de repetición permite seleccionar una RNA la cual está entre el 14% de las mejores distribuciones de todas las posibles RNAs con esta configuración con un nivel de confianza del 99% (Iyer y Rhinehart, 1999).

Cuatro medidas de evaluación han sido calculadas en las fases de calibración y validación de los modelos de RNAs: el coeficiente de determinación (r^2), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de eficiencia (E_2) y el índice de persistencia (PI) (Nash y Sutcliffe, 1970; Kitanidis y Bras, 1980; Legates y McCabe Jr., 1999; Pulido-Calvo y Portela, 2007).

En este trabajo se desarrollaron RNAs con un alto nivel de parsimonia, en las que el conjunto de entrada estuvo compuesto por entre 2 y 4 variables, considerándose tan sólo el efecto autoregresivo de las aportaciones a los embalses o caudales del mes inmediatamente anterior ($t-1$). También se tuvieron en cuenta la precipitación y temperatura promedios de las estaciones climáticas próximas a las estaciones de aforo así como el índice de sequía SPI de 12 meses (SPI12) (Anexo II). De esta forma, el modelo con mayor complejidad en la capa de entrada se configuró como Aportación $_{t-1}$ o Caudal $_{t-1}$, Temperatura $_t$, Precipitación $_t$, y SPI12 $_t$. La salida en todos los casos fue la Aportación $_t$ o Caudal $_t$. El número de capas ocultas probadas osciló entre 1 y 2 y el rango de variación del número de neuronas por capa estuvo comprendido entre 3 y 15 neuronas con incrementos de 2 unidades por cada estructura calibrada.

Los ajustes de las aproximaciones neuronales para las aportaciones a los embalses se compararon con las simulaciones del modelo SIMPA utilizadas en el Plan Hidrológico (PHDHG, 2016). El modelo SIMPA (Sistema Integrado para la Modelación del proceso Precipitación Aportación) es un modelo conceptual de simulación del proceso de transformación de precipitación a escorrentía con un periodo temporal mensual y una escala nacional desarrollado e implantado por el Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas de España (CEDEX) (CEDEX, 2018). Este modelo ha sido ampliamente utilizado en estudios hidrológicos (Argüelles *et al.*, 2012; Pérez-Martín *et al.*, 2014; Taguas *et al.*, 2015).

2.5. Evaluación de eventos de sequía: Índice de Precipitación Estandarizado SPI

La caracterización de la variabilidad temporal de las sequías puede ser muy útil para una planificación eficiente de los recursos hídricos de una cuenca. Para la identificación de estos eventos de sequía se suelen utilizar varios indicadores y, entre ellos, uno de los más utilizados a nivel mundial es el Índice de Precipitación Estandarizado SPI (Standardized Precipitation Index) desarrollado por McKee *et al.* (1993).

Su cálculo se realiza determinado la función de distribución de probabilidad que mejor se ajusta al registro histórico de precipitaciones mensuales de la zona en estudio. Obtenida la probabilidad acumulada se transforma a una distribución normal y la variable normalizada obtenida es el SPI (Santos *et al.*, 2017). Así los valores positivos del SPI indican una precipitación superior a la media y los valores negativos del SPI indican una precipitación inferior a la media. McKee *et al.* 1993 establecieron un sistema de referencia para poder identificar la intensidad de las sequías en función de los valores obtenidos del SPI. Los

episodios de sequía tienen lugar siempre que el SPI sea continuamente negativo y alcance una intensidad de -1.0 o inferior (OMM, 2012).

El SPI puede calcularse a distintas escalas temporales para estudiar los distintos tipos de sequía. Normalmente se determina el SPI de 1 ó 2 meses para la sequía meteorológica, el SPI de entre 1 y 6 meses para la sequía agrícola y de entre 6 y 24 meses para la sequía hidrológica (OMM, 2012).

En este trabajo el cálculo del índice SPI se realizó en Rstudio v3.3.2 (R Core Team 2016). Para ello se utilizó la librería SPEI, un paquete estadístico desarrollado en el entorno R que lleva implementado un conjunto de funciones a partir de las cuales se pueden obtener el SPI y el SPEI (índice de Precipitación-Evapotranspiración) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010; Beguería *et al.*, 2014; Beguería y Vicente-Serrano, 2017). En nuestro estudio se utilizó la función `spi` que devuelve la serie temporal del SPI. Dicha función tiene dos argumentos básicos: el primero consiste en determinar la escala temporal del SPI, en nuestro caso se obtuvieron SPIs de 6, 12 y 24 meses para estudiar la sequía hidrológica, y el segundo es la distribución de probabilidad donde se puede elegir entre ajustar a una distribución tipo Gamma o Pearson tipo III. En nuestro caso, se eligió la función Pearson III por presentar según la bibliografía mejor ajuste frente a la función tipo Gamma (Guttman, 1999; Vicente-Serrano, 2006; Santos *et al.*, 2010).

Se calculó un SPI correspondiente a toda la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana desde 1900 hasta 2017. Para ello se crearon series mensuales promedio de precipitación de la zona española y portuguesa.

La serie de precipitación que representó a la zona española tuvo una extensión temporal de 68 años (1949-2017) y fue obtenida como resultado de realizar el promedio de las series mensuales de precipitación de las siguientes estaciones: Aroche (Las Cefiñas, 4523E) (1968-2017), Ayamonte (Telégrafos, 4549A) (1949-1985), Cabezas Rubias (4536) (1964-2017), Cartaya (Pemares, 4554E) (1987-2014), Cerro Andevalo (El Cóbico, 4585) (1964-2017), El Almendro (La Burrilla, 4595) (1962-1984), El Granado (4542) (1964-2017), El Granado (Bocachanza, 4541U) (1976-2017), Gibraleón (4603) (1965-2012), Isla Cristina (Cañada Corcho, 4546M) (1989-2013), Lepe (Valdeluz, 4546I) (1989-2006), Paymogo (4538) (1952-1984), Presa de Sancho (4602) (1961-1992), Presa del Piedras (4549S) (1972-1992), Puebla de Guzmán (Herrerías, 4535) (1966-2017), Punta Umbría (4555) (1988-2017), Rosal de la Frontera (4531) (1966-1982), San Bartolomé de la Torre (4599) (1963-1989), San Silvestre de Guzmán (Labrados, 4544E) (1980-2016), Sanlúcar de Guadiana (4543) (1961-1986), Santa Bárbara de Casa (4537) (1952-1981), Valdelamusa (Minas, 4583) (1972-1992), Villablanca (4546) (1964-2012) y Villanueva de los Castillejos (Toril Nuevo, 4549O) (1972-1992). Todos estos datos fueron proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (Tabla 5).

La serie de precipitación de la zona portuguesa se calculó del mismo modo que la española, pero con una longitud temporal mayor en este caso de 117 años (1900-2017). Para su obtención se utilizaron las siguientes estaciones: Alcoutim (29M/01UG) (1976-2017), Azinhal (30M/04U) (1981-1985), Barragem do Beliche (30M/06G) (2001-2016), Castro Marim (30M/03UG) (1981-2016), Cortes Pereiras (29L/02U) (1980-2001), Figueirais (30M/01G) (1936-1984), Mértola (28L/01UG) (1932-2017), Mesquita (28L/02UG) (1981-2016), Minas de São Domingos (27M/02U) (1900-1968), Santa Iria (26L/02UG) (1981-2017), Sapal de

Odeleitte (Ex. Fonte do Penedo, 29M/02UG) (2002-2016) y Serpa (26L/01UG) (1932-2011). Todos los datos fueron adquiridos del SNIRH (Tabla 4).

Por tanto, una vez obtenidas las dos series de precipitación tanto de la parte española como portuguesa, se realizó el promedio de ambas con la intención de obtener la serie final de precipitación de toda la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana desde 1900 hasta 2017, a partir de la cual se calculó el SPI que se presenta en este estudio.

2.6. Análisis estacional e interanual de los caudales ecológicos

Se entiende como caudal ecológico el régimen de aportaciones que favorece las condiciones ambientales adecuadas en las masas de agua superficial (PHDHG, 2016). En este apartado se plantea si las aportaciones mensuales y anuales registradas en las estaciones de aforo seleccionadas -con una longitud aceptable de datos recientes- cumplen con los requerimientos de caudales ecológicos identificados en los Planes Hidrológicos Español y Portugués (PGRHG, 2016; PHDHG, 2016).

En el caso de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana de la parte española se han calculado estos requerimientos de caudales mínimos ambientales considerando una combinación de métodos hidrológicos y ecohidráulicos para las masas estratégicas de agua (aquellas en las que pueden existir conflictos significativos con los usos del agua). Los métodos ecohidráulicos incluyen caracterización física del cauce, simulación hidráulica que relaciona los valores de caudal con superficies de hábitat efectivo y curvas de preferencia de especies piscícolas seleccionadas.

Para el resto de masas tipo río no estratégicas se han definido el régimen de caudales ecológicos mínimos a partir del percentil 10 de la curva de caudales mensuales clasificados. En la Tabla 6 se muestran los requerimientos mínimos de caudales ecológicos de las masas de agua de la Subcuenca Baja del Guadiana indicadas en el Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana 2016-2021 (PHDHG, 2016).

En esta Tabla 6 se observa como las masas tipo río incluidas en la Subcuenca Baja del Guadiana se caracterizan, de forma general, por ser cursos fluviales intermitentes que presentan en régimen natural una elevada estacionalidad con periodos de ceses de caudales que oscilan entre 1 y 5 meses (de mayo a septiembre) según el régimen de precipitaciones. En estos periodos de ceses de caudales se presentan pozas desconectadas con presencia de especies piscícolas en algunos tramos o zonas localizadas.

Para el caso del tramo internacional del estuario del Guadiana se han considerado parámetros de hidrodinámica, salinidad, dinámica sedimentaria y calidad ambiental para el planteamiento de los requerimientos ambientales en régimen de caudales seco, medio y húmedo (LNEC, 2000). En la Tabla 7 se indica el régimen de caudales ecológicos a considerar en el río Guadiana aguas arriba de la confluencia del Chanza según los Planes Hidrológicos de las partes española y portuguesa de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana 2016-2021 (PGRHG, 2016; PHDHG, 2016). En la Tabla 8 se muestra el régimen de caudales ecológicos en el estuario del Guadiana según el Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana 2016-2021 (PHDHG, 2016).

Estos caudales ecológicos en el tramo internacional del estuario del Guadiana pueden ser modificados si así lo determinan los resultados de los trabajos de cooperación entre España y Portugal incluidos en el Convenio de Albufeira (BOE, 2000).

Tabla 6. Caudales ecológicos de las masas de agua de la Subcuenca Baja del Guadiana indicadas en el Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana 2016-2021 (PHDHG, 2016)

Código	Nombre	Caudales ecológicos (hm ³ /mes)											
		oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep
11979	ARROYO GRANDE I	0.006	0.006	0.008	0.008	0.008	0.007	0.007	0.007	0.005	0.005	0.005	0.005
12016	RIVERA DE LA VIGUERA	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12035	ARROYO PEDRAZA	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042
13346	RIVERA AGUAS DE MIEL	0.004	0.004	0.001	0.003	0.014	0.005	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13347	RIVERA GRANDE GOLONDRINA	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13348	RIVERA DE CHANZA I	0.008	0.018	0.009	0.013	0.014	0.005	0.071	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13350	RIVERA DE CHANZA II	0.018	0.064	0.054	0.049	0.119	0.103	0.112	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13351	RIVERA DE MALAGÓN	0.000	0.010	0.002	0.006	0.046	0.014	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13352	RIVERA COBICA	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13356	ARROYO ALBAHACAR	0.000	0.004	0.001	0.002	0.042	0.021	0.023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13357	RIVERA DE ALCALABOZA I	0.021	0.070	0.077	0.045	0.066	0.079	0.126	0.053	0.010	0.010	0.010	0.010
14130	RIVERA DE ALCALABOZA II	0.021	0.096	0.086	0.071	0.274	0.148	0.288	0.063	0.010	0.010	0.010	0.010
14140	RIVERA DE CHANZA III	0.019	0.127	0.064	0.125	0.533	0.255	0.459	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000
400015	CAÑADA DE LA CORTE	0.000	0.003	0.001	0.001	0.023	0.010	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 7. Caudales ecológicos mensuales (hm³/mes) y anuales (hm³/año) en el río Guadiana aguas arriba de la confluencia del Chanza según los Planes Hidrológicos de las partes española y portuguesa de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana 2016-2021 (PGRHG, 2016; PHDHG, 2016)

Régimen	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	AÑO
Seco	8	24	26	26	24	20	18	16	8	8	8	8	194
Medio	24	49	51	51	47	51	34	35	24	16	16	16	414
Húmedo	26	60	90	90	80	80	50	40	30	24	24	24	618

Tabla 8. Caudales ecológicos mensuales (hm^3/mes) y anuales ($hm^3/año$) en estuario del Guadiana según el Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana 2016-2021 (PHDHG, 2016)

Régimen	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	AÑO
Seco	8	24	26	26	24	20	18	16	8	8	8	8	194
Medio	25.2	51.5	53.5	53.5	49.5	52.5	35.3	36.5	25.2	17.2	17.2	17.2	434.5
Húmedo	27.2	63.0	93.5	92.5	82.5	81.5	51.5	41.5	31.5	25.2	25.2	25.2	640.3

La definición de régimen de seco, medio y húmedo se evalúa a partir de valores de precipitación acumulada de referencia de la estación pluviométrica de Portel (SNIRH 24K/01UG, 38°18'/7°42') que tiene un valor medio de precipitación de 635 mm \pm 210 mm.

En el caso del sistema de regulación Odeleite-Beliche de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana de la parte portuguesa se han calculado estos requerimientos de caudales mínimos ambientales realizando un análisis de sensibilidad asumiendo un conjunto de escenarios de consumo para este sistema hidráulico y evaluando los niveles de garantía de suministro de agua a los distintos usuarios (PGRHG, 2016). En la Tabla 9 se muestran los caudales ecológicos del sistema Odeleite-Beliche según el Plan Hidrológico de la parte portuguesa de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana 2016-2021 (PGRHG, 2016).

Tabla 9. Caudales ecológicos anuales ($hm^3/año$) en el sistema Odeleite-Beliche según el Plan Hidrológico de la parte portuguesa de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana 2016-2021 (PGRHG, 2016)

Régimen	Caudales ecológicos ($hm^3/año$)
Seco	33
Medio	33
Húmedo	31

3. Resultados y discusión

3.1. Sobre la disponibilidad de datos de aforo en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana

Del análisis y evaluación de los datos de las estaciones de aforo en la zona de estudio, en primer lugar se debe indicar la baja densidad de la red existente sobre todo en los estuarios medio y bajo del Guadiana (desde Foz de Odeleite hasta la desembocadura; Chícharo *et al.*, 2006; Moura *et al.*, 2017) donde se encuentran áreas de gran valor ambiental (espacios naturales protegidos de Sapal de Castro Marín, Pinar de Vila Real y Marismas de Ayamonte e Isla Cristina) (Figuras 1, 2 y 5).

En el cauce principal del Guadiana sólo se dispone de los datos de la estación 'Pulo do Lobo' (27L/01H) con una longitud y calidad de la serie de datos aceptable para poder ser considerada en la planificación hidrológica de la zona de estudio. La otra estación en el cauce principal es 'Guadiana en Sanlúcar' (CR3-06, 37°25'32.0"N 7°26'53.8"W) con datos disponibles desde septiembre del 2008 a noviembre del 2011 pero con un gran porcentaje de valores erróneos (caudales negativos) debido a problemas de los sensores de medida por la influencia mareal. Por tanto, la fiabilidad de esta serie de datos no hace posible su uso en la evaluación y modelación hidrológica de la zona de estudio.

La situación anterior se ve agravada por la no disponibilidad de series históricas de esorrentías desde el año hidrológico 2011/2012 en la parte española de la subcuenca a excepción de los registros de aportaciones a los embalses del Chanza y del Andévalo (Tabla 3). Por tanto, no hay datos de aforo de las aguas de transición del tramo internacional del Guadiana dentro de la provincia de Huelva desde el año 2011. Desde esta fecha no se está realizando el mantenimiento y seguimiento de las redes de control de aforos en la cuenca hidrográfica vertiente al tramo internacional del río Guadiana dentro de la provincia de Huelva desde la confluencia del río Chanza, incluida la cuenca de éste, hasta su desembocadura en el mar. Esta situación deriva de la entrada en vigor del Real Decreto 1560/2005 (BOE 2005) sobre traspaso de funciones y servicios del Estado a la Comunidad Autónoma de Andalucía en materia de recursos y aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las cuencas andaluzas vertientes al litoral atlántico (Confederaciones Hidrográficas del Guadalquivir y del Guadiana) donde se indica textualmente:

*'...se pueden singularizar las diferentes cuencas andaluzas cuyas aguas vierten al Océano Atlántico en los términos siguientes: i) las cuencas internas de Andalucía de los ríos Guadalete y Barbate e intercuencas entre el límite de los términos municipales de Tarifa y Algeciras y el límite con la cuenca del Guadalquivir; ii) las cuencas internas de Andalucía de los ríos Piedras, Odiel y Tinto y las intercuencas correspondientes de vertido directo al Atlántico y iii) **la cuenca hidrográfica vertiente al tramo internacional del río Guadiana dentro de la provincia de Huelva, desde la confluencia del río Chanza, incluida la cuenca de éste, hasta su desembocadura en el mar**'.*

*'...se acuerda la asunción por parte de la Comunidad Autónoma de Andalucía de las funciones y servicios en materia de recursos y aprovechamiento hidráulicos en las cuencas del Guadalete y Barbate, cuencas intracomunitarias gestionadas por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y en las del Tinto, Odiel, Piedras y **cuencas andaluzas vertientes a las aguas de transición del tramo internacional del río Guadiana hasta su desembocadura en el Atlántico, las cuales no afectan a otra comunidad autónoma y son gestionadas por la Confederación Hidrográfica del Guadiana**'.*

Esta situación debería revertirse mediante la adopción a corto plazo de medidas estables de cooperación y coordinación a ambos lados de la frontera entre España y Portugal que garanticen la modernización, el mantenimiento y seguimiento de las estaciones de aforo en el tramo internacional del río Guadiana. Este planteamiento puede ser factible en el marco de trabajo actual del Convenio de Albufeira (BOE, 2000) que está superando, en otros muchos aspectos clave de la planificación hidrológica, la diferente organización institucional, administrativa y territorial de ambos países en la Subcuenca del Bajo Guadiana (Do Ó, 2012; Hilderbrand, 2012; Hernández-Ramírez, 2017).

3.2. Sobre los usos de agua en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana

Se han analizado las series temporales de las captaciones mensuales de agua realizadas desde los Sistemas Chanza-Andévalo y Odeleite-Beliche localizados en la Subcuenca del Bajo Guadiana.

El embalse del Andévalo tiene dos tomas de agua: (i) Bombeo a los riegos de la Comunidad de Regantes (CCRR) Andévalo-Almendro (Bombeo I) y (ii) Bombeo Palafito que distribuye el agua a la ETAP Andévalo en la Puebla de Guzmán (Huelva) para uso urbano de los municipios del Andévalo (Bombeo II) (Tabla 3). En el caso del Bombeo a la CCRR Andévalo-Almendro se muestra una tendencia creciente de la demanda media de agua para riego desde el 2008 al 2017 en el intervalo de 0.03 a 0.10 hm³/mes (Figura 7). Las previsiones a corto plazo del mejor modelo ARIMA calibrado estiman un aumento medio de la demanda de agua del 10% anual. En el caso del Bombeo Palafito, que distribuye el agua hasta la ETAP Andévalo, se observa una tendencia creciente de la demanda media de agua para usos urbanos desde el 2014 al 2016 en el intervalo de 0.02 a 0.25 hm³/mes coincidente con el inicio de la puesta en funcionamiento de la ETAP y a partir del 2016 se mantiene un valor medio de 0.25 hm³/mes sin mostrarse en las previsiones a corto plazo del mejor modelo ARIMA un aumento de esta demanda media.

El embalse del Chanza cuenta con dos estaciones de bombeo (Bombeo I y II) que extraen el agua de la propia presa y además está la estación de bombeo Bocachanza situada aguas abajo del embalse del Chanza en la confluencia de los ríos Guadiana y Chanza (Tabla 3). El agua impulsada por estas tres estaciones de bombeo es conducida por el Canal del Granado y el túnel de San Silvestre a los embalses del Piedras y de Los Machos (Demarcación de los ríos Tinto-Piedras-Odiel). Desde aquí hay tomas para los planes de regadíos del Sur-Andévalo y del Chanza-Guadiana y parte el Canal del Piedras que conduce el agua hasta la ciudad de Huelva (PHDHTOP, 2016).

La caracterización de la serie temporal del bombeo total desde el embalse del Chanza muestra un valor medio estable de 9 hm³/mes desde el año 1997 al 2009 (Bombeo I) y un valor medio estable de 14 hm³/mes desde el año 2010 con la entrada en funcionamiento del Bombeo II (Figura 8). La estación de bombeo de Bocachanza se pone en funcionamiento cuando es necesario complementar las captaciones de los Bombeos I y II. Se ha bombeado de forma continua desde la estación de Bocachanza desde febrero de 1999 a diciembre de 2000 y desde diciembre de 2004 hasta diciembre de 2009 con valores máximos de 10 hm³/mes.

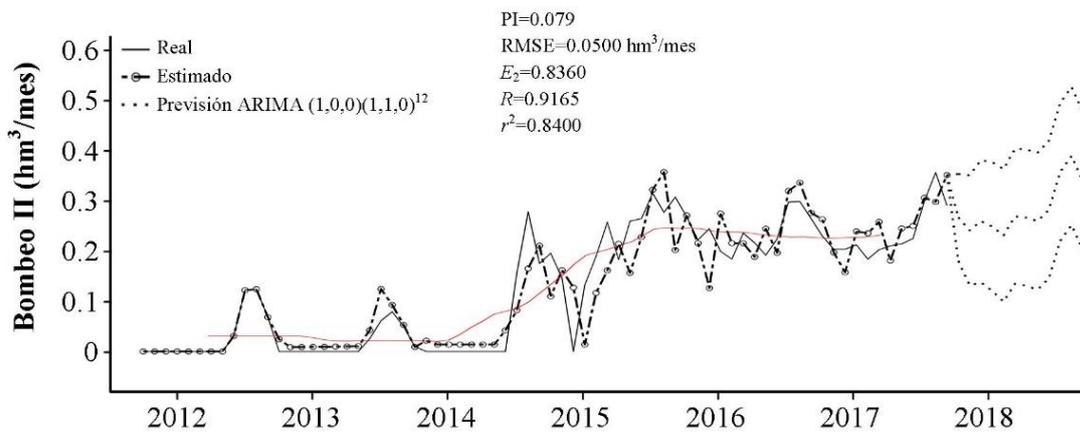
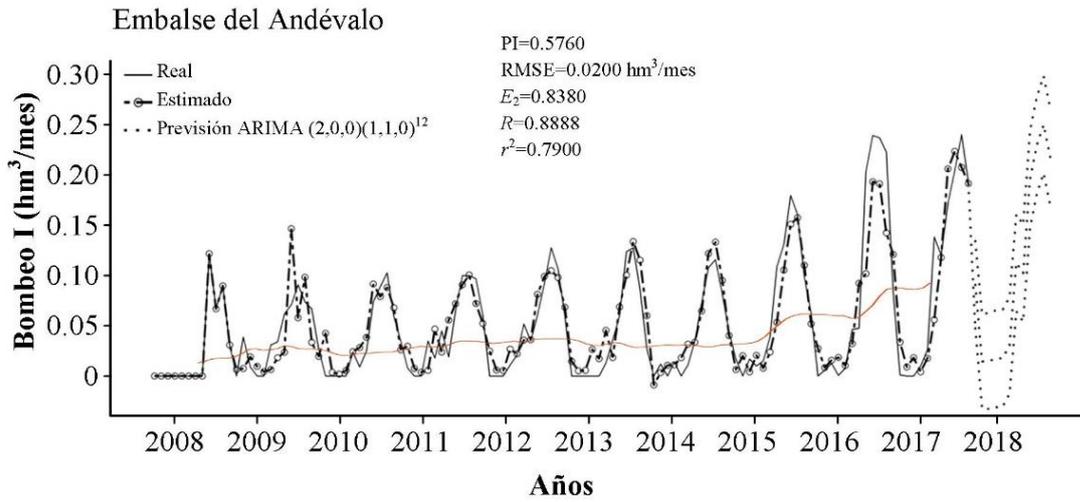


Figura 7. Series temporales de los dos bombeos realizados desde el embalse del Andévalo [Bombeo I = Bombeo a los riegos de la Comunidad de Regantes (CCRR) Andévalo-Almendro; Bombeo II = Bombeo Palafito que distribuye el agua a la ETAP Andévalo en la Puebla de Guzmán (Huelva)]. Se muestra la estimación obtenida con el mejor modelo ARIMA, la previsión a corto plazo así como la tendencia correspondiente (línea roja)

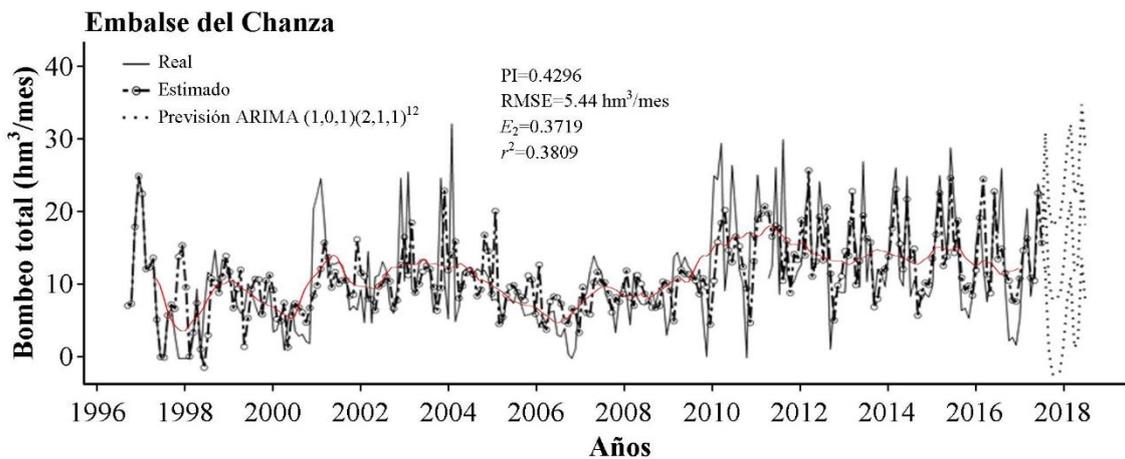


Figura 8. Serie temporal del bombeo total realizado desde el embalse del Chanza al Canal del Granado (Bombeo I y Bombeo II). Se muestra la estimación obtenida con el mejor modelo ARIMA, la previsión a corto plazo así como la tendencia correspondiente (línea roja)

El desglose por usos del volumen anual de agua que se deriva desde el Sistema Chanza-Andévalo hacia el Canal del Granado (Figura 9) refleja un aumento significativo de los usos agrícolas (de 38 hm³/año en el año hidrológico 1996-1997 a 100 hm³/año en 2014-2015), un ligero aumento de los usos urbanos (de 22 hm³/año en 1996-1997 a 39 hm³/año en 2014-2015) y una ligera disminución de los usos industriales (de 22 hm³/año en 1996-1997 a 18 hm³/año en 2014-2015) (Cornejo, 2015).

Los usos industriales del Sistema Chanza-Andévalo-Piedras se destinan principalmente al abastecimiento del Polo Industrial de Huelva. Los usos urbanos se corresponden al abastecimiento de la ciudad de Huelva y a los núcleos urbanos costeros de la comarca de la Costa Occidental de Huelva y a los núcleos urbanos de la comarca del Andévalo. Las empresas encargadas de la gestión de estos usos urbanos son EMAHSA y GIAHSA. Los usos agrícolas son de las Comunidades de Regantes de la zona occidental de la provincia de Huelva: Palos de la Frontera, Chanza y Piedras, Canal del Piedras, Piedras-Guadiana, Sur-Andévalo, Onuba, Valdemaría, El Fresno, Trisa-Sur y Andévalo-Guadiana (Cornejo, 2015).

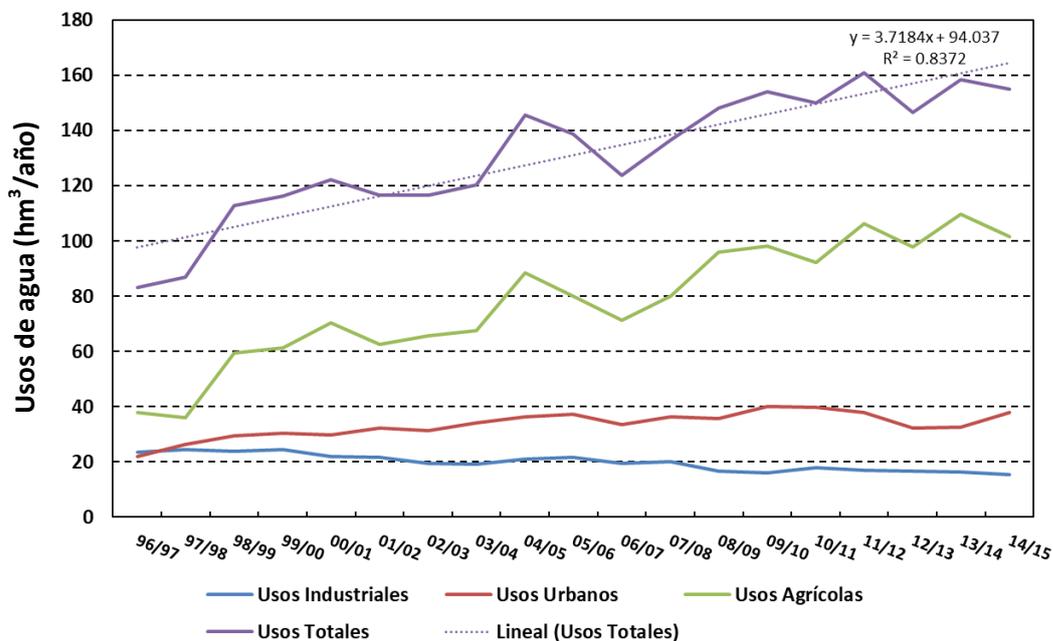


Figura 9. Evolución de los usos de agua desde el año hidrológico 1996/1997 al año hidrológico 2014/2015 aportados desde el Sistema Chanza-Andévalo al Canal del Granado (demanda consolidada que se transfiere a la Demarcación Hidrográfica Tinto-Odiel-Piedras) (Figura adaptada de Cornejo, 2015)

En el Sistema Odeleite-Beliche sólo se efectúa captación de agua desde el embalse de Beliche a pesar de existir también una toma de agua en el embalse de Odeleite (Tabla 2). El embalse de Odeleite está conectado a través de un túnel al embalse de Beliche. Para el embalse de Beliche se observa también una tendencia creciente de la demanda media de agua para riego desde el 2000 al 2012 (no se dispone de más registros históricos mensuales en el sistema SNIRH) en el intervalo de 0.8 a 1.8 hm³/mes. Para los usos municipales se muestra una estabilidad con un valor medio de 3 hm³/mes (Figura 10).

En la Figura 11 se indica la evolución anual de los usos agrícolas y urbanos de los recursos hídricos aportados desde el Sistema Odeleite-Beliche. Los usos urbanos se corresponden con el abastecimiento de los municipios de la comarca del Sotavento Algarvio (zona oriental del Algarve, Portugal). Los usos agrícolas son los contabilizados por la Associação de Regantes do Sotavento Algarvio y se componen de los consumos para el riego de cultivos y para el riego de los campos de golf y jardines urbanos. En el año 2017, el 87% de los consumos registrados por la Associação de Regantes do Sotavento Algarvio se utilizaron para las zonas de riego y el 13% para campos de golf y jardines.

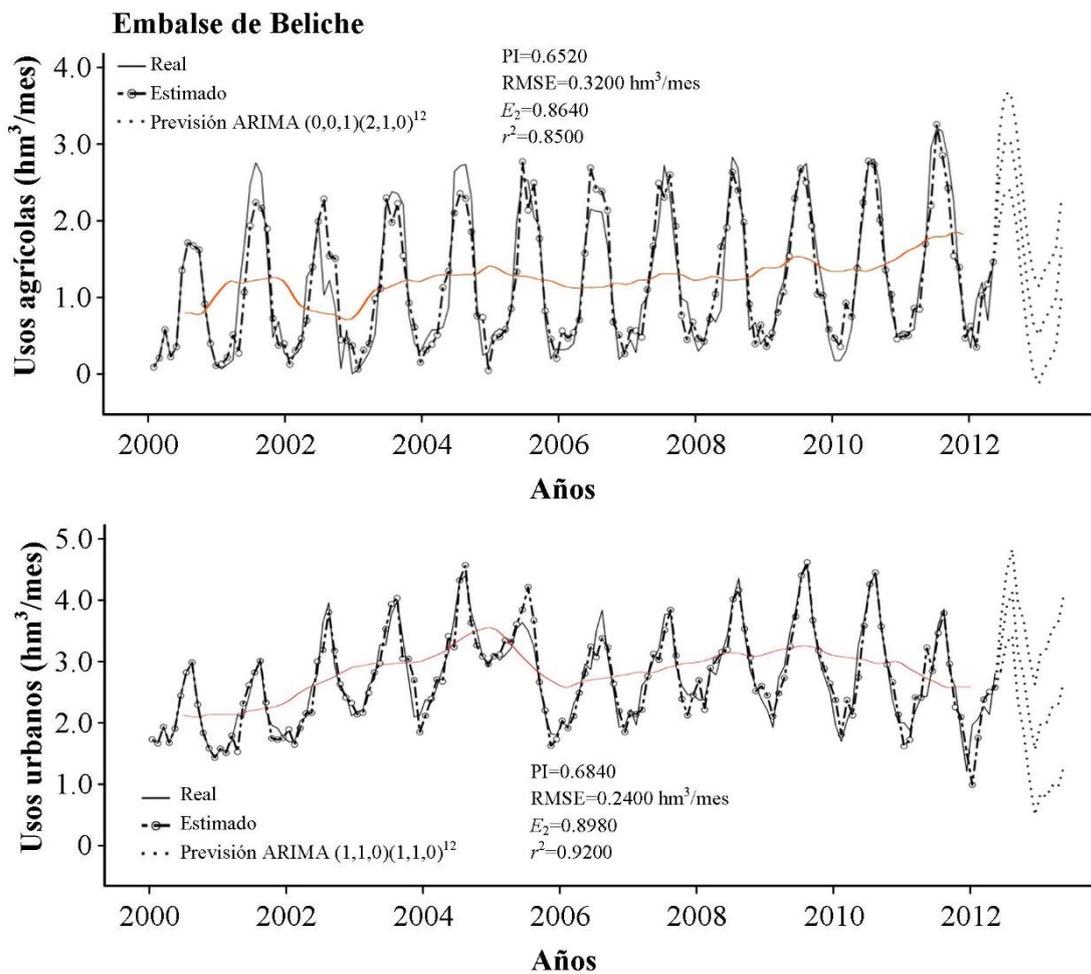


Figura 10. Series temporales de los consumos agrícolas y urbanos de los recursos hídricos aportados desde el Sistema Beliche-Odeleite. Se muestra la estimación obtenida con el mejor modelo ARIMA, la previsión a corto plazo así como la tendencia correspondiente (línea roja)

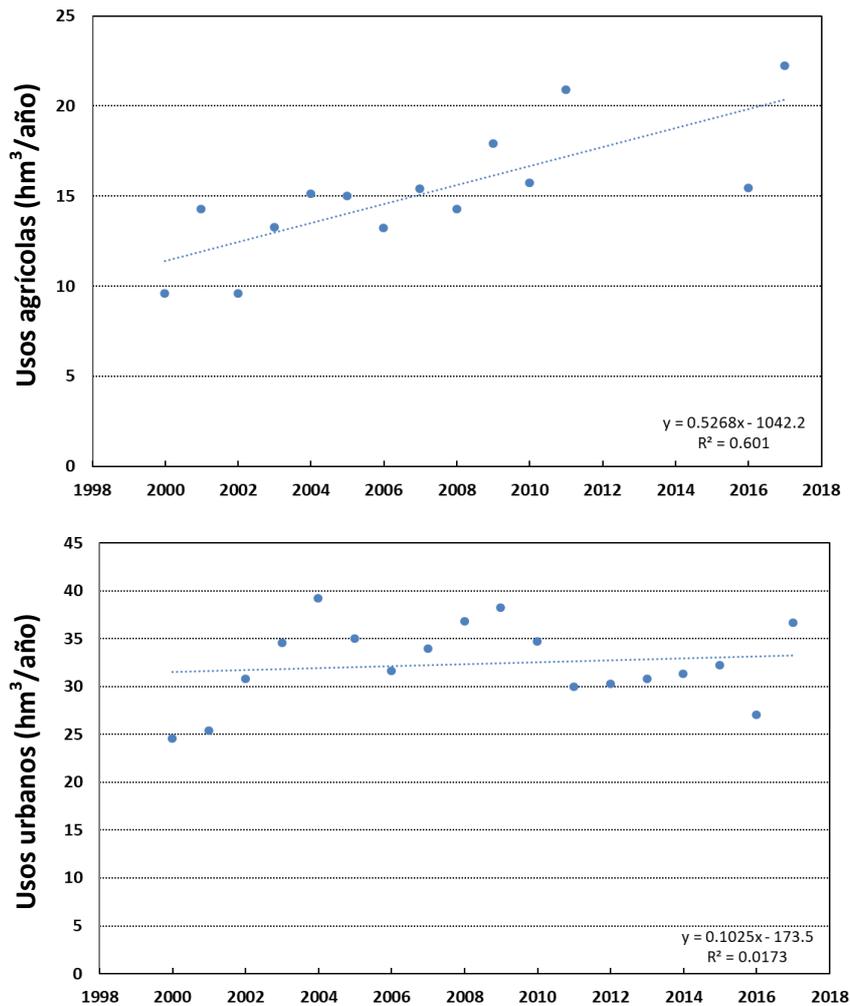


Figura 11. Evolución de los usos de agua desde 1998 a 2017 aportados desde el Sistema Odeleite-Beliche (no se dispone de registros de los usos agrícolas desde el año 2012 al 2015)

En la Tabla 10 se muestra la bondad de ajuste de los mejores modelos ARIMA para la caracterización de las series temporales de usos de agua en cada una de las captaciones realizadas en los embalses de la Subcuenca baja del Guadiana. En general, se obtienen resultados estadísticamente aceptables con coeficientes de determinación r^2 superiores a 0.55 y coeficientes de eficiencia E_2 superiores a 0.54.

Las mejores magnitudes de error se tienen en las captaciones desde los embalses del Andévalo y Beliche donde se registran de forma independiente los usos agrícolas y los usos urbanos y, por tanto, los modelos ARIMA son capaces de ajustar mejor los ciclos regulares y estacionales de cada tipo de demanda de agua. En el caso del embalse de Chanza, el agua bombeada desde las tres estaciones (Bombeo I, Bombeo II, Bocachanza) es conducida por el Canal del Granado a los embalses del Piedras y de Los Machos (Demarcación de los ríos Tinto-Piedras-Odiel) y desde aquí hay tomas para los planes de regadíos del Sur-Andévalo y del Chanza-Guadiana y parte el Canal del Piedras que conduce el agua hasta la ciudad de Huelva. Por tanto, no hay registros de bombeos mensuales diferenciados según el tipo de demanda lo que dificulta la calibración de los modelos ARIMA.

Tabla 10. Bondad de ajuste de los modelos ARIMA que aportan los mejores resultados en la caracterización de las series temporales de usos mensuales de agua registrados en los Sistemas Chanza-Andévalo y Odeleite-Beliche

Embalse	Toma	Años	Modelo	r^2	RMSE (hm ³ /mes)	E_2	PI
Andévalo	Bombeo I*	2007-2017	(200)(110) ¹²	0.84	0.02	0.838	0.576
	Bombeo II**	2011-2017	(100)(110) ¹²	0.84	0.05	0.836	0.079
Chanza	Bombeo I	1996-2017	(100)(210) ¹²	0.56	2.84	0.540	-0.002
	Bombeo II	2009-2017	(201)(210) ¹²	0.59	4.36	0.555	0.584
	Bocachanza	1996-2017	(100)(210) ¹²	0.68	1.54	0.670	-0.234
	Bombeo total	1996-2017	(101)(211) ¹²	0.38	5.44	0.372	0.429
Beliche	Usos agrícolas	2000-2012	(001)(210) ¹²	0.85	0.32	0.864	0.652
	Usos urbanos	2000-2012	(110)(110) ¹²	0.92	0.24	0.898	0.684

*Bombeo I = Bombeo que impulsa el agua a la Comunidad de Regantes Andévalo-El Almendro

**Bombeo II = Bombeo PALAFITO que impulsa el agua a la balsa Cabeza del Pasto y después se distribuye por gravedad a la ETAP Andévalo (Puebla de Guzmán, Huelva)

El sistema de regulación Alqueva-Pedrogão se divide en tres subsistemas según el origen del agua: (a) El subsistema Alqueva que realiza la captación del agua en la estación de bombeo Álamos desde el embalse Alqueva y está proyectado para distribuir el agua a 63500 ha de riego y a los núcleos urbanos e industriales de Évora, Beja, Aljustrel, Sines y Setúbal (caudal medio diario de 42 m³/s); (b) El subsistema Ardila que tiene la captación en el embalse de Pedrogão y que está diseñada para abastecer 30500 ha de riego y a los núcleos urbanos de Mértola, Serpa, Moura y Barrancos (caudal medio diario de 19 m³/s); y (c) El subsistema Pedrogão con captación en el embalse de Pedrogão y proyectado para conducir el agua para el riego de 24560 ha de zonas de cultivo (caudal medio diario de 12 m³/s). Este dimensionamiento se corresponde a un consumo de 900 a 1000 hm³/año (95% para regadíos) (Zamora-Rodríguez y Beltrán de Heredia-Alonso, 2006; Gregório-Barrona, 2015) (<http://www.fenareg.pt/wp-content/uploads/2CD-Pedro-Salema.pdf>).

En la Figura 12 se muestran los caudales medios diarios bombeados por el embalse de Alqueva y los caudales medios diarios turbinados desde los embalses de Alqueva y Pedrogão. Los caudales medios diarios turbinados desde los embalses Alqueva y Pedrogão son de 90.01 m³/s (CV = 0.94) y de 25.56 m³/s (CV = 0.74), respectivamente. En la campaña de riego 2017 se han regado desde el Sistema Alqueva-Pedrogão un total de 73272 ha con un consumo de agua de 248 hm³ (<https://regante.edia.pt/>). En el sistema SNIRH no se encuentran disponibles los registros de caudales bombeados desde Pedrogão ni el desglose por los distintos usos de las captaciones efectuadas desde el sistema de regulación Alqueva-Pedrogão.

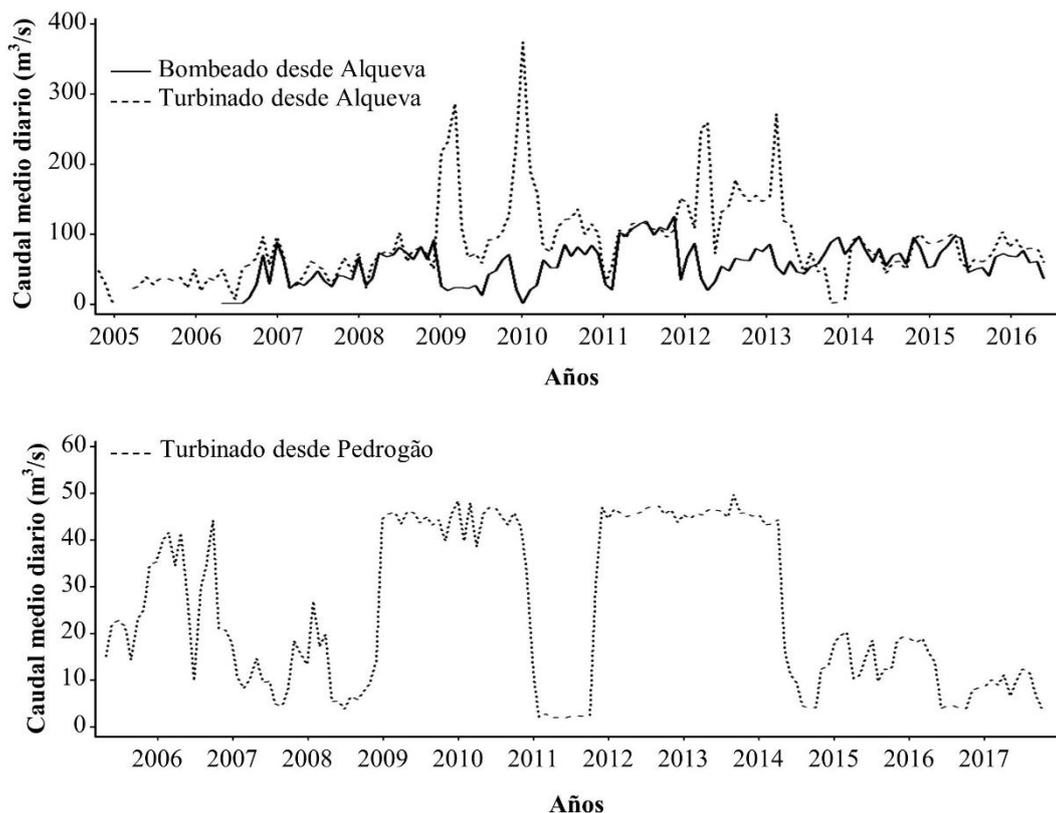


Figura 12. Series temporales de los caudales medios diarios bombeados y turbinados desde el sistema de regulación Alqueva-Pedrogão (no hay datos disponibles de los caudales bombeados desde el embalse de Pedrogão en SNIRH)

3.3. Sobre la modelación heurística del régimen de aportaciones en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana

De forma general, todos los modelos neuronales calibrados para la modelación de las aportaciones a los embalses mostraron un comportamiento adecuado en la fase de validación (Tabla 11, Figuras 13 y 14). Estos resultados son consecuencia, en parte, de la capacidad demostrada por parte de las RNAs para ajustar funciones altamente no lineales y, por otra parte, del método de entrenamiento utilizado. En todos los casos, los modelos presentaron un alto nivel de parsimonia de entrada siendo los modelos ajustados para las aportaciones a los embalses del Chanza y del Andévalo lo que requirieron un mayor número de variables de entrada (cuatro en total) para alcanzar un resultado estadísticamente aceptable.

En la parte española, el mejor resultado se obtuvo en la simulación de las aportaciones al embalse del Andévalo. La red que proporcionó los datos estimados de aportaciones al embalse tiene como variables de entrada: Precipitación_{t-0} (1); SPI12_{t-0} (2); Temperatura_{t-0} (3); Aportación real_{t-1} (4). La fase de validación de este modelo proporcionó un índice de persistencia PI cercano a 0.9 y el nivel de varianza explicada superó ampliamente el 90%. Asimismo, el índice de eficiencia E_2 del modelo indicó un adecuado ajuste entre los valores reales y los estimados por la red neuronal. Esto se tradujo en un error absoluto de tan sólo 4.8 hm³/mes. Estos resultados se comparan con los proporcionados por el modelo SIMPA para el mismo periodo de validación. En este caso, se observa un desplazamiento temporal

de la aportación simulada frente a la real y al mismo tiempo una sobreestimación de los valores en algunos periodos con grandes niveles de aportación (Figura 13). Esto conduce a un comportamiento simplista del modelo, al menos en este periodo, lo que implica índices de persistencia por debajo de 0.6 y una eficiencia sólo algo superior a 0.26.

Los resultados obtenidos en la simulación de las aportaciones al embalse del Chanza son significativamente peores para una misma estructura de entrada de la red neuronal que los alcanzados en el Andévalo. En la fase de validación, la red neuronal supera por muy poco los umbrales de aceptación del modelo, siendo el índice de persistencia ligeramente superior a 0.6. Tan sólo se consigue explicar un 65% de la varianza y la eficiencia está cercana al 0.65. No obstante, estos valores de las magnitudes de evaluación son mejores que los calculados para el modelo SIMPA en el mismo periodo de validación.

Tabla 11. Bondad de ajuste en la fase de validación de las aproximaciones neuronales que modelan las aportaciones mensuales de algunas estaciones de aforo de España (E) y Portugal (P). Comparación con el modelo SIMPA en las aportaciones a los embalses

Estación	Modelo	PI	RMSE (hm ³ /mes)	E ₂	R	r ²
Chanza (E)	SIMPA	-1.97	21.55	-1.35	0.6362	0.4049
	RNA 4/-3s-2s-1/ Lag t-1 Entradas: (1) (2) (3) (4)	0.6302	13.87	0.6451	0.8063	0.6503
Andévalo (E)	SIMPA	-0.0819	11.67	0.2610	0.7422	0.5508
	RNA 4/-5s-1/ Lag t-1 Entradas: (1) (2) (3) (4)	0.8909	4.80	0.9372	0.9579	0.9176
Albahacar (E)	RNA 3/-5s-1/ Entradas: (1) (2) (3)	0.7730	1.57	0.5916	0.7764	0.6029
Cóbica (E)	RNA 4/-5s-1/ Lag t-1 Entradas: (1) (2) (3) (4)	0.4770	2.53	0.3912	0.6261	0.3921
Malagón (E)	RNA 3/-5s-1/ Entradas: (1) (2) (3)	0.3613	7.56	0.2564	0.5244	0.2749

Odeleite (P)	SIMPA	0.1635	20.42	0.1004	0.7571	0.5731
	RNA 3/-5s-1/* Lag-1 Entradas: (1) (2) (4)	0.9174	6.31	0.9140	0.9624	0.9262
Beliche (P)	SIMPA	0.1013	2.45	0.1084	0.6661	0.4438
	RNA 2/-5s-1/* Entradas: (1) (2)	0.7836	0.2776	0.7716	0.5637	0.3177
Pulo do lobo (P)	RNA 2/-5s-1/* Entradas: (1) (2)	0.4238	1381.39	0.2761	0.3963	0.1570
Vasção (P)	RNA 2/-5s-1/* Entradas: (1) (2)	0.5422	8.18	0.6164	0.7209	0.5198

Variables de entrada: (1) Precipitación_{t-0}; (2) SPI12_{t-0}; (3) Temperatura_{t-0}; (4) Aportación o caudal real_{t-1}

*Temperatura no disponible

Comportamientos similares de los modelos neuronales son detectados para las aportaciones mensuales de los ríos Albahacar, Cóbica y Malagón. En estas subcuencas, el mejor resultado se consigue con una red neuronal que tan sólo requiere tres variables de entrada ($Precipitación_{t-0}$; $SPI12_{t-0}$; $Temperatura_{t-0}$) para el río Albahacar. En este caso, el nivel de eficiencia del modelo es marginalmente aceptable, mientras que el índice de persistencia PI indica un bajo nivel de desplazamiento entre la serie real y simulada. Por otra parte, tanto en el río Cóbica como en el Malagón, las magnitudes de evaluación de la red neuronal no superan los valores críticos en el periodo de validación.

En la parte portuguesa los resultados de las aproximaciones neuronales son similares a los obtenidos en la vertiente española. Los mejores resultados se obtienen en las simulaciones de las aportaciones realizadas a los dos embalses, mientras que las magnitudes de evaluación en el propio cauce del Guadiana (Pulo de lobo) como en la cuenca del Vasção no superan los niveles críticos. Es de destacar el ajuste del modelo de red neuronal en el embalse de Odeleite donde tanto el índice de persistencia, la eficiencia como la varianza explicada alcanzaron niveles superiores a 0.9 (Figura 14). El comportamiento de la red neuronal contrasta con la simulación del SIMPA que no consigue explicar más allá del 57% de la varianza y la eficiencia del modelo supera por muy poco un nivel de 0.1.

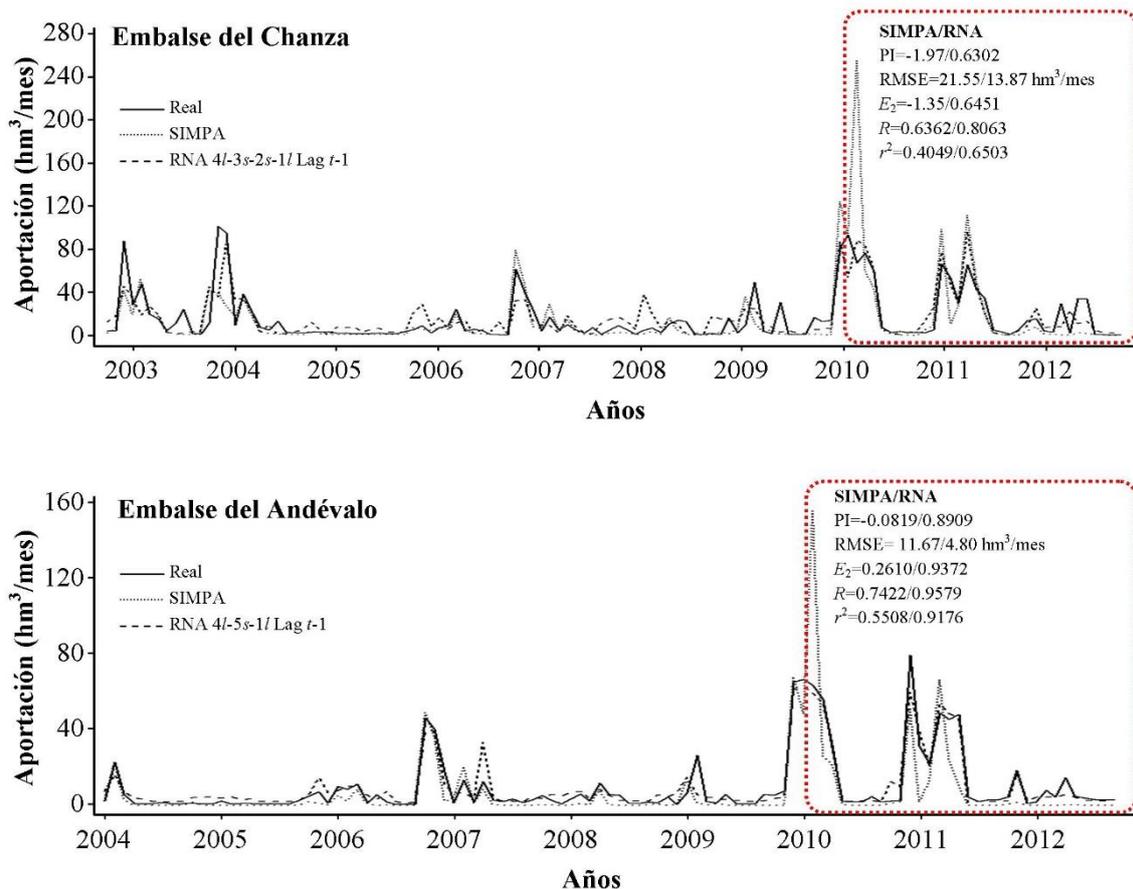


Figura 13. Aportaciones observadas y estimadas por los modelos RNAs y SIMPA en los embalses del Chanza y del Andévalo. Se indican las magnitudes de error de los modelos en el periodo de validación (cuadro rojo)

En la modelación de las aportaciones al embalse de Beliche nuevamente se repite la pauta observada. La red neuronal presenta un mejor comportamiento respecto al modelo SIMPA relativo al periodo de validación aunque en este caso la varianza explicada es estadísticamente similar a la calculada para la simulación de SIMPA. Hay que destacar sin embargo en este caso que esta red neuronal tan sólo tiene dos variables de entrada ($Precipitación_{t-0}$ y $SPI_{12,t-0}$).

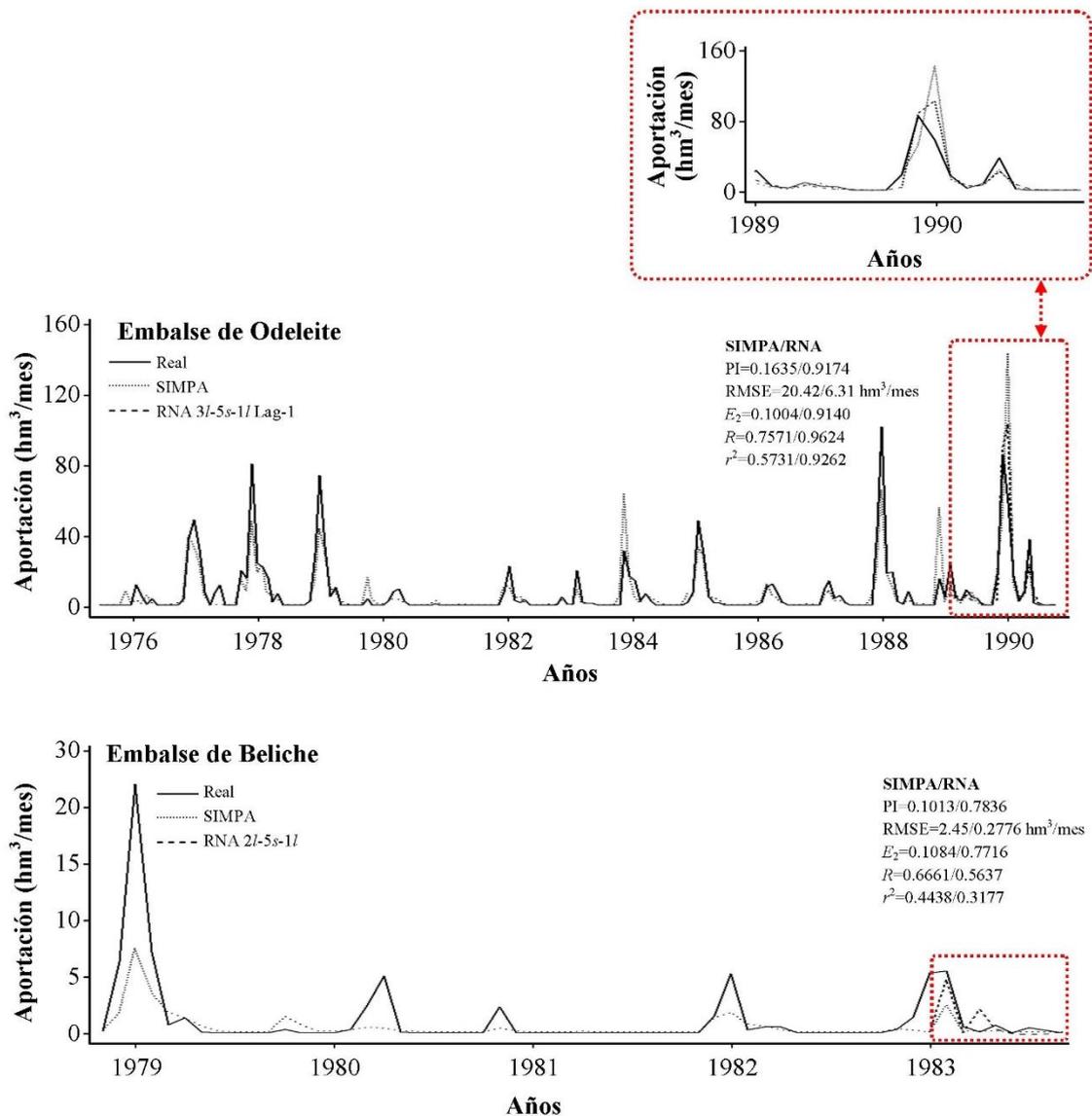


Figura 14. Aportaciones observadas y estimadas por los modelos RNAs y SIMPA en los embalses de Beliche y Odeleite. Se indican las magnitudes de error de los modelos en el periodo de validación (cuadro rojo)

Los resultados de las redes neuronales muestran, de forma general, su capacidad para ser utilizados para la simulación del régimen de aportaciones a escala local (en este caso, para la Subcuenca del Bajo Guadiana). Las mejores estimaciones de las aproximaciones neuronales (en fase de validación) en comparación con la modelación de SIMPA se deben principalmente a que éste es un modelo calibrado a gran escala (para toda España

peninsular) con resultados globalmente buenos pero que a escala local (algunas subcuencas concretas) puede presentar desviaciones significativas respecto a los datos observados (Cabezas, 2015). Por tanto, podría considerarse a nivel de planificación hidrológica de la subcuenca en estudio la modelación heurística local como una herramienta complementaria al modelo SIMPA para conseguir una mayor fiabilidad y consistencia en la caracterización de la disponibilidad de recursos hídricos.

3.4. Sobre la caracterización de eventos de sequía en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana

En la Figura 15 se muestra el SPI12 (escala temporal de 12 meses) calculado para toda la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana desde 1900 hasta 2017. Se observan cuatro períodos severos de sequía ($SPI_{12} < -1.5$; OMM, 2012): en la décadas de 1930 a 1940, de 1940 a 1950, de 1980 a 1990 y de 2000 a 2010. Analizando de forma cualitativa las frecuencias del SPI12 parecen intuirse ciclos globales de unos 30 años de predominio de eventos de sequía moderados y severos entre 1920-1950 y 1980-2010. En los periodos de 1900 a 1920 y de 1950 a 1980 en pocas ocasiones la intensidad del SPI es inferior a -1 por lo que se puede considerar una situación normal o aproximadamente normal sin episodios de sequía hidrológica. Esta periodicidad de la serie temporal del SPI debe estudiarse con profundidad en trabajos futuros mediante evaluaciones cuantitativas de análisis de frecuencias (Santos *et al.*, 2010).

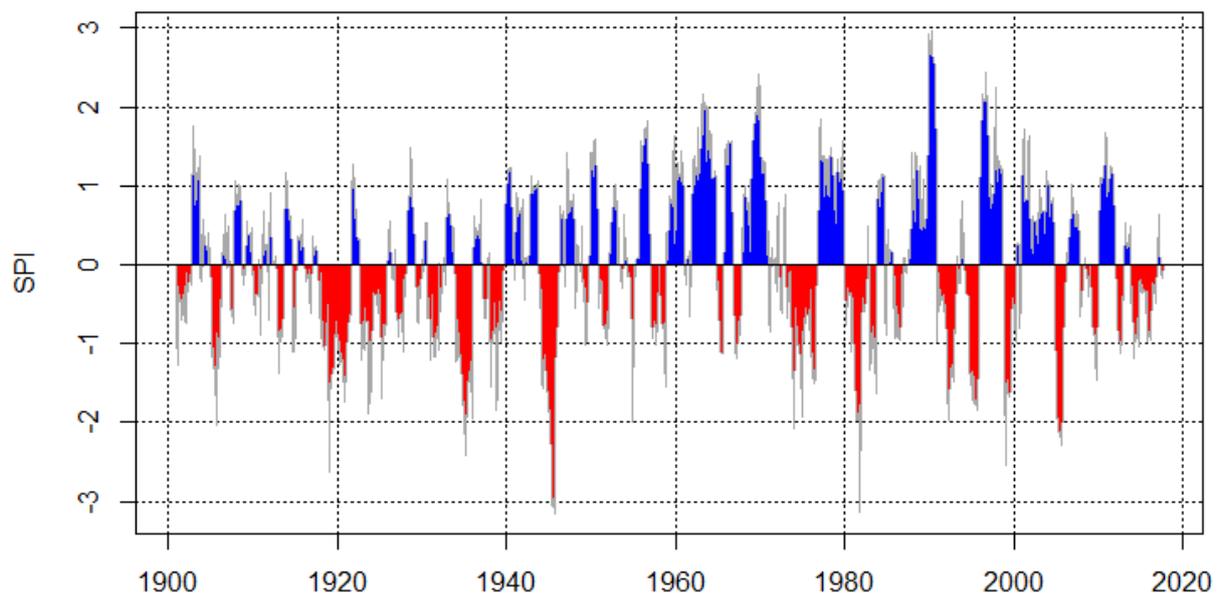


Figura 15. Índice de Precipitación Estandarizado para una escala temporal de 12 meses en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana

Este patrón de alternancia de ciclos largos de eventos de sequía moderados y severos con ciclos largos normales dificultan la planificación hidrológica de la subcuenca en estudio y sugieren la necesidad de establecer directrices de gobernanza a medio-largo plazo para garantizar la disponibilidad de recursos hídricos y la compatibilización de los diferentes usos.

3.5. Sobre el régimen de caudales ecológicos en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana

La comparación de los registros históricos disponibles de las aportaciones mensuales de las estaciones de aforo seleccionadas (con una longitud temporal y bondad aceptables de datos) con los requerimientos de caudales ambientales identificados en los Planes Hidrológicos Español y Portugués (PGRHG, 2016; PHDHG, 2016) se ha realizado mediante un análisis de la frecuencia de meses en los que no se han alcanzado los caudales ecológicos (Tablas 6, 7, 8 y 9).

En el Anexo III se presentan los resultados de estos análisis de frecuencias y las aportaciones anuales registradas para las estaciones de aforo seleccionadas: Rivera de Malagón (ROEA 4172), Cobica (ROEA 4161), Arroyo Albahacar (ROEA 4173), Río Chanza en Rosal de la Frontera (ROEA 4176), Río Chanza en Aroche (ROEA 4158), Pulo do Lobo (SNIRH 27L/01H, regímenes seco, medio y húmedo) y Rivera de Odeleite (Monte dos Fortes SNIRH 29L/01H).

Se puede observar que los requerimientos actualmente vigentes de caudales ecológicos no se han satisfecho en los meses de octubre a abril de años caracterizados por eventos de sequía severa ($SPI_{12} < -1.5$; OMM, 2012) incluso en periodos de tiempo en los que no existían elementos de regulación de las aguas superficiales. Así ocurre en los períodos de 1971-1977, 1980-1985, 1990-1995, 1998-2000 y 2005-2008 con períodos severos de sequías (Figura 15). Los meses donde se encuentra una mayor frecuencia de no cumplir con los requisitos ambientales son octubre y noviembre debido a la variabilidad estacional de las precipitaciones. En las Figuras 16, 17 y 18 se muestran, a modo de ejemplo, los resultados de estos análisis de frecuencias en las estaciones de aforo: Rivera de Malagón (ROEA 4172), Río Chanza en Rosal de la Frontera (ROEA 4176) y Pulo do Lobo (SNIRH 27L/01H, régimen medio de precipitaciones).

En general, se puede considerar que las masas de agua analizadas no presentan diferencias significativas en las frecuencias de no cumplimiento de los requerimientos ambientales en periodos de tiempo con aportaciones en régimen natural y régimen regulado. En el caso de los afluentes del río Guadiana caracterizados por tener un régimen fluvial con una elevada estacionalidad (cursos intermitentes con periodos de cese de caudales) se hace evidente que los ecosistemas acuáticos y terrestres asociados deben tener mecanismos para adaptarse a los eventos de sequía moderada y severa que se presentan con frecuencia en la zona en estudio.

En el caso de la estación de Pulo do Lobo, en el curso principal del río Guadiana, la serie temporal de aportaciones hace evidente la influencia en la última década del sistema de regulación Alqueva-Pedrogão (aguas arriba del Parque Natural do Vale do Guadiana). Pero tampoco parecen encontrarse diferencias significativas en las frecuencias de no satisfacción de los caudales ecológicos antes y después de la ejecución de este sistema de regulación (2002-2006). Se observan meses con un régimen de caudales inferior a los requerimientos ambientales vigentes y cuya ocurrencia coincide con eventos registrados de sequías moderada y severa incluidos en épocas donde la regulación de las aguas superficiales era mucho menor (Figura 18). En este sentido, se debe destacar una de las sequías más severa ocurrida en la zona de estudio en el periodo de 1944-1948 (Figura 15).

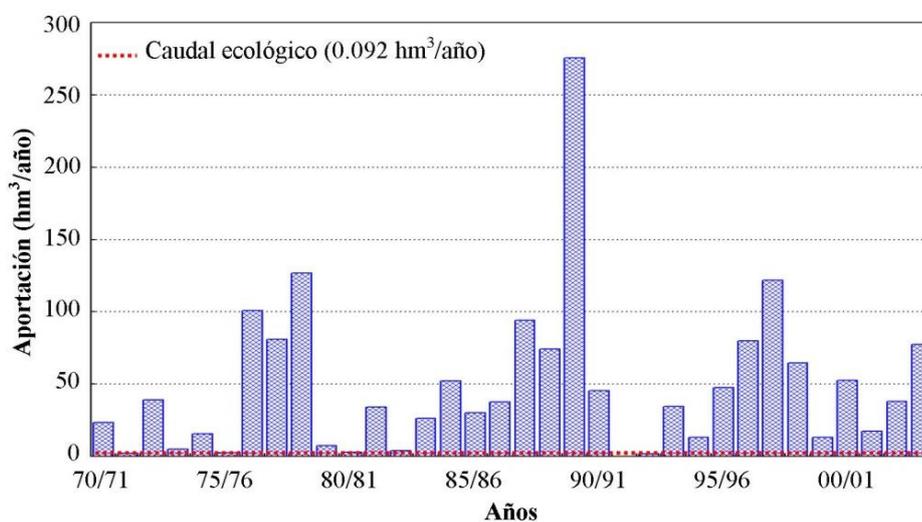
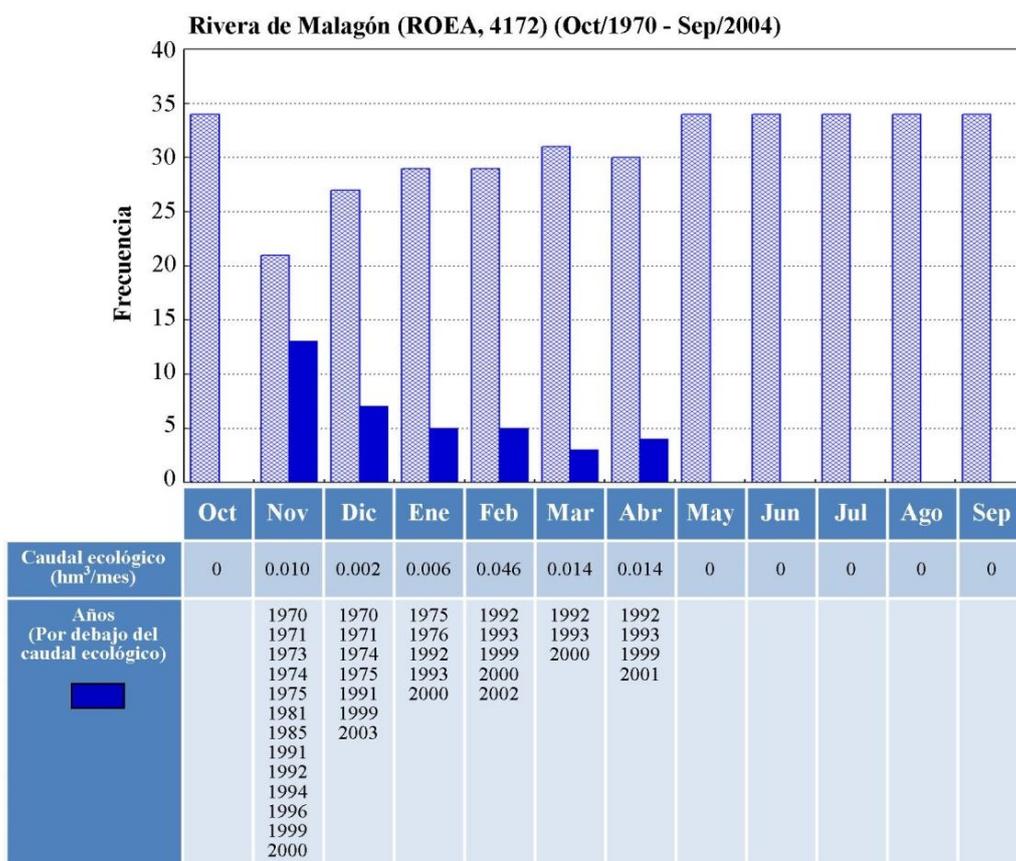


Figura 16. Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en la Rivera de Malagón (PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Rivera de Malagón

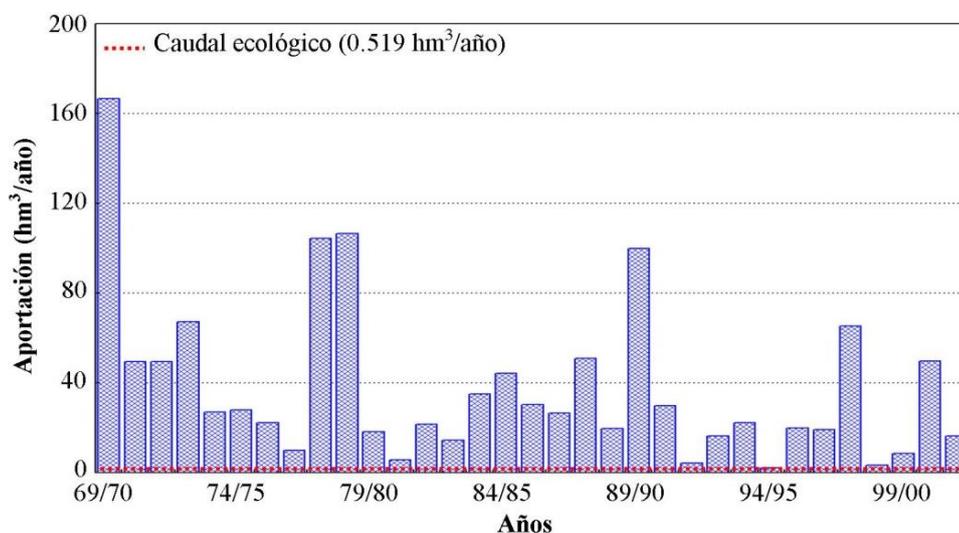
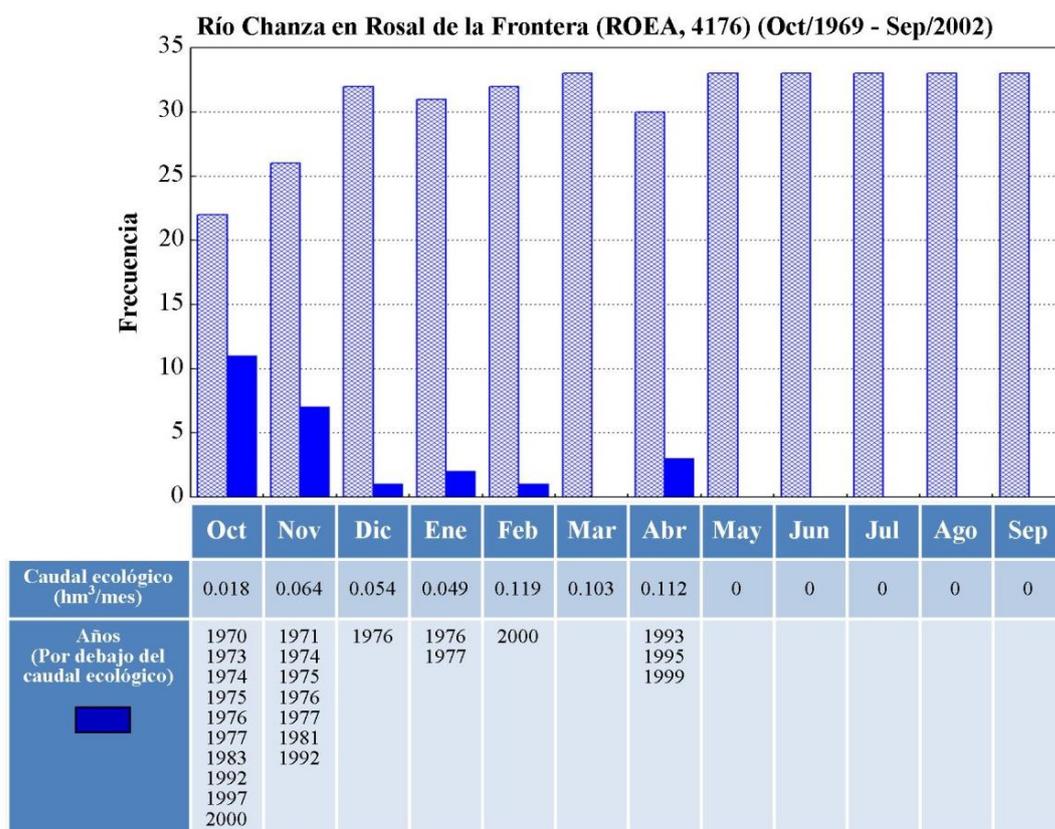


Figura 17. Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en el Río Chanza en Rosal de la Frontera (Rivera de Chanza II; PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Río Chanza en Rosal de la Frontera

**Pulo do Lobo, régimen medio (SNIRH, 27L/01H) (Oct/1946 - Nov/2000)
(Oct/2001-Sep/2009) (Oct/2014-Sep/2015)**

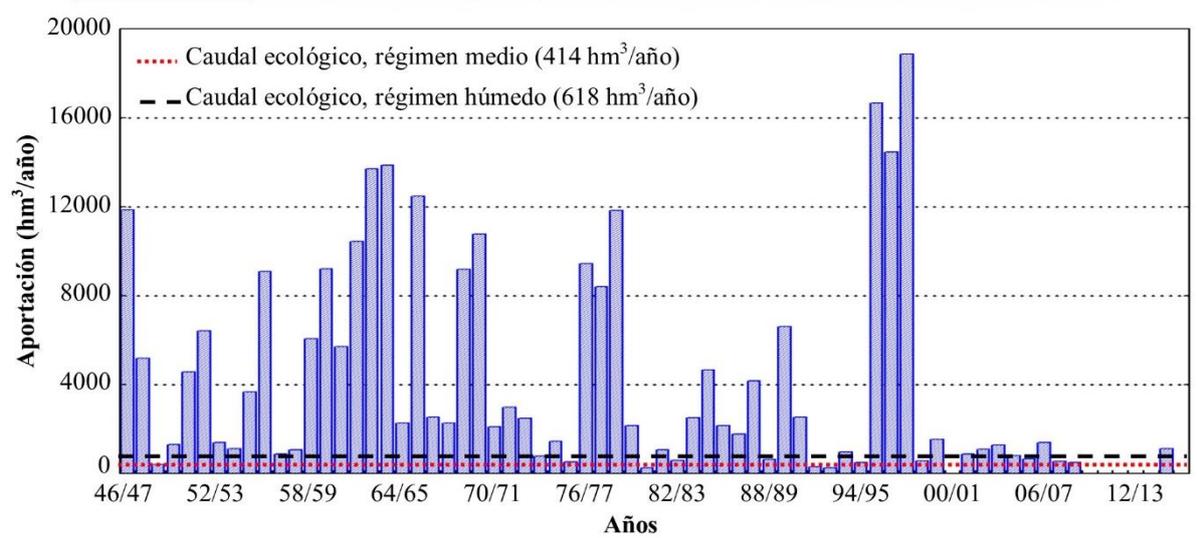
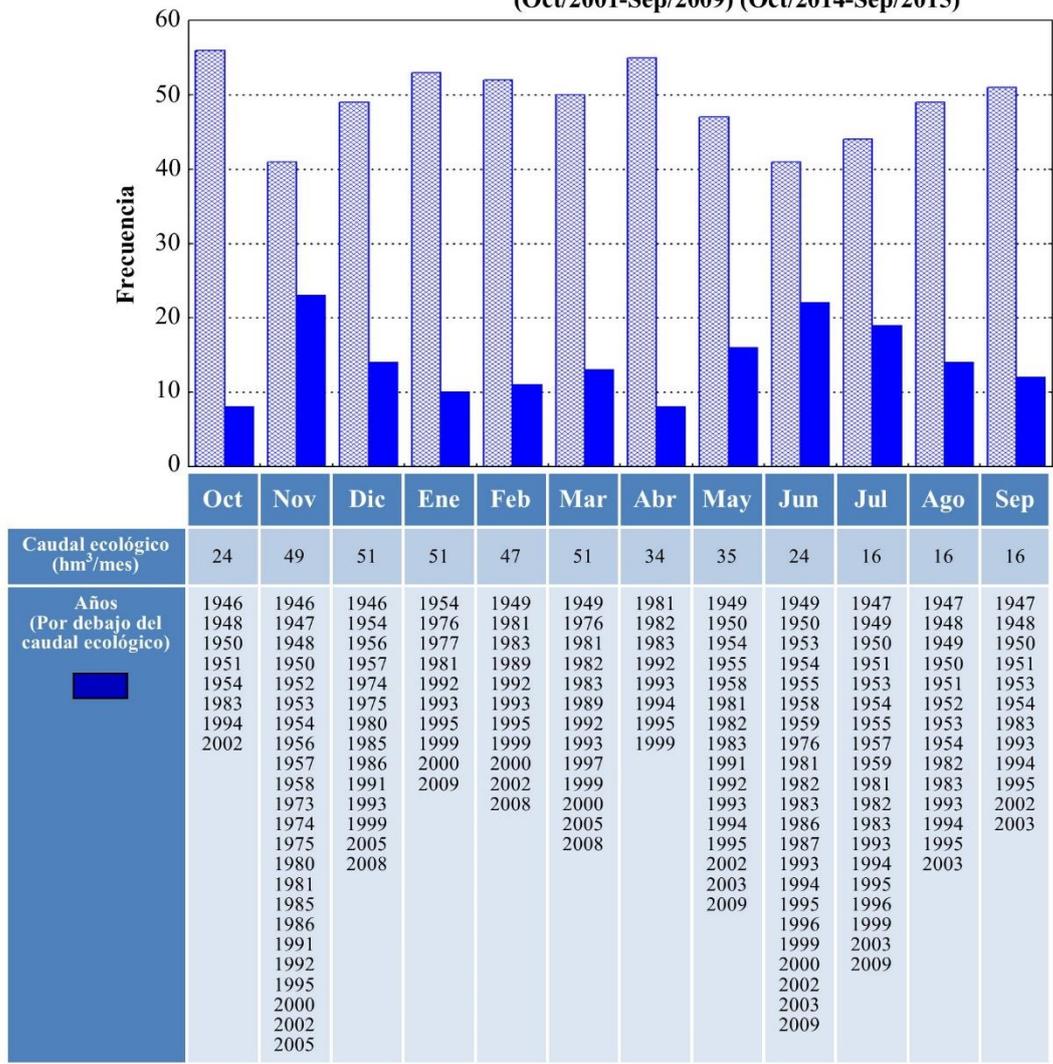


Figura 18. Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por los Planes Hidrológicos de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en la estación de aforo Pulo do Lobo en el Río Guadiana (régimen medio de precipitaciones; PGRHG, 2016; PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Pulo do Lobo (No hay datos disponibles en los años hidrológicos 2000/01 y de 2009/10 a 2013/14)

En el caso de la Rivera de Odeleite, afluente del Guadiana en el estuario medio, los resultados son similares respecto a la correlación directa entre los eventos de sequía y el no cumplimiento de los caudales ecológicos (Figura 19). En este caso no se ha podido realizar el análisis mensual de frecuencias por no estar identificados en el Plan Hidrológico los requerimientos ambientales mensuales (apartado 2.6).

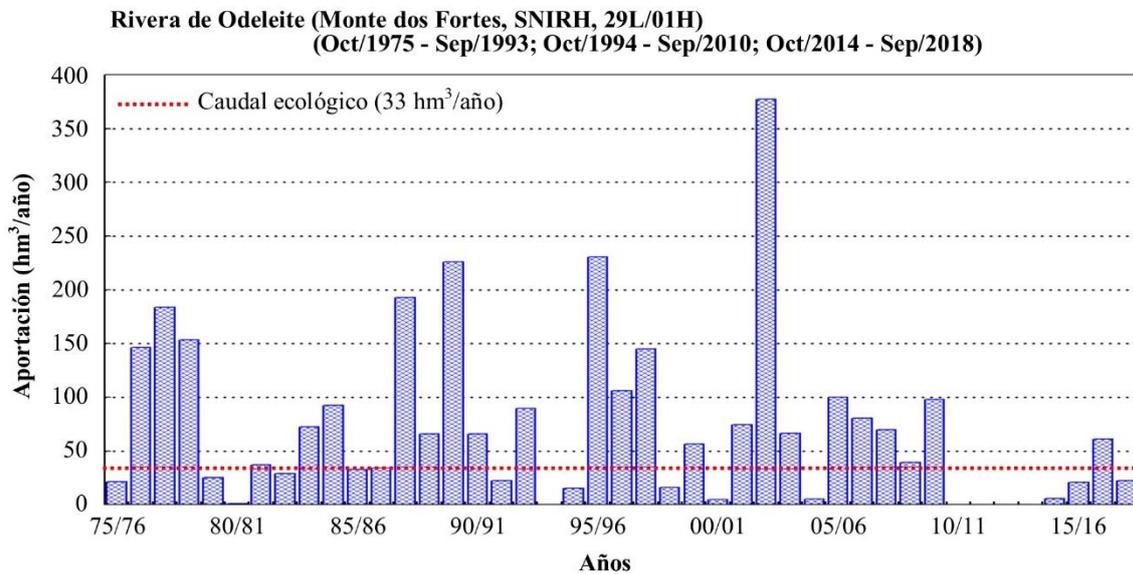


Figura 19. Distribución de las aportaciones anuales en la Rivera de Odeleite y caudal ecológico identificado por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana de la parte portuguesa (PGRHG, 2016) (No hay datos disponibles en los años hidrológicos 1993/94 y de 2010/11 a 2013/14)

Sería recomendable realizar estudios específicos en masas de agua a seleccionar de la subcuenca, tanto en espacios protegidos como en áreas asociadas, que permitan la localización y caracterización estacional e interanual de las poblaciones de especies piscícolas y su relación con el régimen existente de aportaciones. De este modo, se podrían determinar de forma más aproximada patrones temporales de requerimientos ambientales que permitan la conservación de estas comunidades biológicas (Gallart *et al.*, 2012; Parasiewicz *et al.*, 2013; Martínez-Fernández *et al.*, 2018).

4. Conclusiones

La valoración y conservación de los espacios naturales de la región transfronteriza del Bajo Guadiana requieren de medidas sociales, administrativas e institucionales de integración transnacional de los diferentes usuarios de este territorio para conseguir una economía sostenible y competitiva que promueva de forma conjunta su riqueza ambiental y su potencial turístico. Uno de los condicionantes prioritarios en esta zona, que tiene como elemento vertebrador el río Guadiana, debe ser el uso eficaz de los recursos hídricos disponibles teniendo como condicionante fundamental la capacidad de respuesta y adaptación del sistema ante eventos de sequía moderados y severos que se presentan con cierta frecuencia en el sur de la Península Ibérica.

En este sentido, en este trabajo como primer objetivo se ha planteado la evaluación exhaustiva de los registros disponibles en las estaciones de aforo distribuidas en la subcuenca para la monitorización y control de los recursos hídricos disponibles como base fundamental de cualquier planificación hidrológica. Esta prospección sugiere la necesidad de una ampliación de la red existente de sensores de medidas de aforo (caudalímetros), principalmente en la zona de los estuarios medio y bajo. Se debe cuidar la elección de estos sensores que deben estar adaptados a las características dinámicas de la zona con fuerte influencia mareal.

También es prioritario un conocimiento detallado de los usos consuntivos de los abastecimientos de agua derivados de la Subcuenca Baja del Guadiana. Para esto, se debería tener un inventario preciso y dinámico de las demandas de todos los usuarios españoles y portugueses, haciendo un especial esfuerzo en estudiar y evaluar las necesidades hídricas de los cultivos de regadío de la zona para conseguir una asignación óptima y equilibrada de las dotaciones de agua de riego.

Para la consecución de los objetivos anteriores se recomienda adoptar a corto plazo un protocolo de medidas de coordinación nacional y transnacional que garanticen las tareas de mantenimiento, modernización y seguimiento de esta red de control para tener registros históricos fiables que faciliten y apoyen la toma de decisiones sobre la compatibilización entre los diferentes usos en distintos escenarios ambientales y socioeconómicos. Se debería implementar una plataforma de monitorización avanzada que registre y almacene toda la información en una base de datos 'Big Data', que permita la incorporación de algoritmos para el procesamiento de la información (por ejemplo, para hacer predicciones sobre la disponibilidad de recursos hídricos, para el control y la regulación de los embalses y sistemas de conducción) y que pueda ser visualizada y consultada en tiempo real.

En años hidrológicos caracterizados por un régimen medio de precipitaciones, la Subcuenca Baja del Guadiana tiene un balance positivo entre los recursos disponibles y la demanda total de agua. De manera global no es una subcuenca deficitaria pero esta situación podría revertirse a medio plazo si se sigue manteniendo la tendencia creciente de la demanda de agua, principalmente de los usos destinados a zonas regables, y si se cumplen las alteraciones climáticas anunciadas para la Península Ibérica que sugieren reducciones significativas de los recursos hídricos disponibles.

A los condicionantes anteriores hay que añadir la ocurrencia de eventos moderados y severos de sequía que se repiten de forma cíclica en la zona de estudio y que podrían agravar las dificultades para garantizar el suministro de recursos hídricos a todos los usuarios. Así, se ha visto, como los requerimientos actualmente vigentes de caudales ecológicos en algunas masas de agua no se han satisfecho en los meses de octubre a abril de

años caracterizados por eventos de sequía severa incluso en periodos de tiempo en los que no existían elementos de regulación de las aguas superficiales. Por tanto, la situación actual debería considerarse como un buen punto de partida para promover un Plan Estratégico del sector del agua en la Subcuenca Transfronteriza del Bajo Guadiana que sea capaz de integrar la componente ambiental para compatibilizar de forma dinámica los ratios de los distintos usos de agua con los recursos hídricos disponibles.

La integración de la componente ambiental en la modelación hidrológica de la subcuenca debería considerar para la determinación de los caudales ecológicos la variación estacional e interanual de presencia y distribución de las poblaciones piscícolas para así conocer la relación entre el régimen de aportaciones y los atributos de los hábitats existentes sobre todo en los cursos fluviales intermitentes predominantes en la zona en estudio y en el ecosistema estuárico incluidos en Red Natura 2000.

En este trabajo también se ha planteado la caracterización del régimen de aportaciones como aspecto esencial en la modelación hidrológica integrada de la subcuenca. Los resultados ponen de manifiesto que las aproximaciones neuronales podrían ser utilizadas como una herramienta complementaria al modelo SIMPA para conseguir una mayor fiabilidad y consistencia en el análisis de la disponibilidad de recursos hídricos a escala local (en este caso, para la Subcuenca del Bajo Guadiana). Se debe resaltar que esta modelación heurística ha mostrado resultados estadísticamente satisfactorios utilizando para la calibración pocas variables independientes (precipitación, temperatura, índice de sequía a escala anual SPI12 y aportaciones pasadas) lo que le confiere un valor añadido en subcuencas con pocos datos hidroclimáticos disponibles.

5. Referencias

- Abadía, F., Morim de Oliveira, J. 2001. Presa y central de Alqueva en Portugal. *Revista de Obras Públicas* 3407, 141-165 (<http://hisagua.cedex.es/documentacion/articulo/58434>).
- Abrahart, R.J., See, L. 2000. Comparing neural network and autoregressive moving average techniques for the provision of continuous river flow forecasts in two contrasting catchments. *Hydrological Processes* 14, 2157-2172.
- Ancil, F., Rat, A., 2005. Evaluation of neural network streamflow forecasting on 47 watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering* 10(1), 85–88.
- Argüelles, A., Berbel, J., Gutiérrez-Martín, C. 2012. La evolución de la Cuenca del Guadalquivir (España). *Revista Obras Públicas* 3537, 51-64.
- ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology. 2000a. Artificial neural networks in hydrology. I. Preliminary concepts. *Journal of Hydrology Engineering* 5(2), 115–123.
- ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology. 2000b. Artificial neural networks in hydrology. II. Hydrologic applications. *Journal of Hydrology Engineering* 5(2), 124–137.
- Beguería, S., Vicente-Serrano, S.M., Reig, F., Latorre, B. 2014. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology* 34(10), 3001-3023.
- Beguería, S., Vicente-Serrano, S.M. 2017. *Package 'SPEI': Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index*. R package (<http://sac.csic.es/spei>).
- BOE (2000). *Convenio sobre cooperación para la protección y el aprovechamiento sostenible de las aguas de las cuencas hidrográficas hispano-portuguesas, hecho «ad referendum» en Albufeira el 30 de noviembre de 1998*. Boletín Oficial del Estado núm. 37, 12 de febrero de 2000, 6703-6712.
- BOE (2005). *Real Decreto 1560/2005, de 23 de diciembre, sobre traspaso de funciones y servicios del Estado a la Comunidad Autónoma de Andalucía en materia de recursos y aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las cuencas andaluzas vertientes al litoral atlántico (Confederaciones Hidrográficas del Guadalquivir y del Guadiana)*. Boletín Oficial del Estado núm. 307, 24 de diciembre de 2005, 42095-42131.
- Cabezas, F. 2015. *Análisis estructural de modelos Hidrológicos y de sistemas de recursos hídricos en zonas semiáridas*. Tesis Doctoral, Departamento de Ecología e Hidrología, Universidad de Murcia.
- Cabrera, E., Babiano, L. 2007. *La sequía en España. Directrices para mitigar su impacto*. Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente, Madrid (Spain).
- Carmona, G., Varela-Ortega, C., Bromley, J. 2013. Participatory modelling to support decision making in water management under uncertainty: Two comparative case studies in the Guadiana river basin, Spain. *Journal of Environmental Management* 128, 400-412.
- CEDEX. 2018. SIMPA. *Sistema Integrado para la Modelación del proceso Precipitación Aportación* (<http://ceh-flumen64.cedex.es/Hidrologia/pub/proyectos/simpa.htm>) (consulta en abril de 2018).

- Chícharo, L., Chícharo, M.A., Ben-Hamadou, R. 2006. Use of hydrotechnical infraestructura (Alqueva Dam) to regulate planktonic assemblages in the Guadiana estuary: Basis for sustainable water and ecosystem services management. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 70, 3-18.
- Cornejo, J.A. 2015. *Estudio de viabilidad del recrecimiento de la presa del Andévalo. Necesidad, actuaciones, valoración económica y conclusiones*. Trabajo Fin de Grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Huelva, Huelva (España).
- Cryer, J.D., Chan, K.S. 2008. *Time series analysis with applications in R*. Springer, New York (USA).
- Comisión Europea. 2011. *Una Europa que utilice eficazmente los recursos - Iniciativa emblemática con arreglo a la Estrategia Europa 2020*. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, el Consejo, el Comité Económico y Social europeo y el Comité de las Regiones, Bruselas (Bélgica).
- Do Ó, A. 2012. Drought planning and management in transboundary river basins: the case of the Iberian Guadiana. *Water Policy* 14, 784-799.
- European Commission. 2008. *Natura 2000 protecting Europe's biodiversity*. Information Press, Oxford (United Kingdom).
- European Union. 2015. *Regions in the European Union. Nomenclature of territorial units for statistics NUTS 2013/EU-28*. Eurostat, Manuals and guidelines, Luxembourg (Luxembourg).
- FAO. 2018. *Servicios ecosistémicos y biodiversidad*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (<http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/es/>).
- Fragoso, R., Bushenkov, V., Marques, C. 2010. Multi-objective water allocation in the Alqueva region. *New Medit* 3, 28-35.
- Fritsch, S., Guenther, F., Suling, M., Mueller, S.M. 2016. *Training of Neural Networks*. R package (<https://cran.r-project.org/web/packages/neuralnet/neuralnet.pdf>).
- Gallart, F., Prat, N., García-Roger, E.M., Latron, J., Rieradevall, M., Llorens, P., Barberá, G.G., Brito, D., De Girolamo, A.M., Lo Porto, A., Buffagni, A., Erba, S., Neves, R., Nikolaidis, N.P., Perrin, J.L., Querner, E.P., Quiñero, J.M., Tournoud, M.G., Tzoraki, O., Skoulikidis, N., Gómez, R., Sánchez-Montoya, M.M., Froebrich, J. 2012. A novel approach to analysing the regimes of temporary streams in relation to their controls on the composition and structure of aquatic biota. *Hydrology and Earth System Sciences* 16: 3165-3182.
- Gastélum, J.R., Valdés, J.B., Stewart, S. 2009. A Decision Support System to improve water resources management in the Conchos Basin. *Water Resources Management* 23, 1519-1548.
- Global Water Partnership, 2000. *Integrated Water Resources Management*. TAC Background Paper nº 4.
- Gregório-Barrona, A.M. 2015. *Simulação da operação do sistema Alqueva-Pedrogão para fornecimento de água e produção de energia*. Trabajo Fin de Máster, IST Técnico Lisboa, Universidad Técnica de Lisboa, Lisboa (Portugal).
- Guimarães, M.E., Mascarenhas, A., Sousa, C., Boski, T., Ponce Dentinho, T. 2012. The impact of water quality changes on the socio-economic system of the Guadiana Estuary: an assessment of management options. *Ecology and Society* 17(3), 38.

- Gutiérrez-Estrada, J.C., De Pedro-Sanz, E., López-Luque, R., Pulido-Calvo, I. 2005. Estimación a corto plazo de la temperatura del agua. Aplicación en sistemas de producción en medio acuático. *Ingeniería del Agua* 12(1), 77-92.
- Gutiérrez-Estrada, J.C., Yáñez, E., Pulido-Calvo, I., Silva, C., Plaza, F., Bórquez, C., 2009. Pacific sardine (*Sardinops sagax*, Jenyns 1842) landings prediction. A neural network ecosystemic approach. *Fisheries Research* 100, 116-125.
- Guttman, N.B. 1999. Accepting the Standardized Precipitation Index: A calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association* 35, 311-322.
- Hernández-Ramírez, J. 2017. Obstáculos a la gobernanza turística en la frontera del Bajo Guadiana. *Revista Investigaciones Turísticas* 13, 140-163.
- Hildenbrand, A. 2012. *La cooperación transfronteriza entre Andalucía-Algarve-Alentejo en el proyecto ANDALBAGUA (POCTEP 2007-2013)—El reto de lograr un desarrollo territorial coherente a ambos lados de la frontera*. I Congreso Territorial del Noroeste Ibérico, UNED, Ponferrada (Spain).
- Hothorn, T., Zeileis, A., Farebrother, R.W., Cummins, C., Millo, G., Mitchell, D. 2017. *Lmtest: Testing linear regression models*. R package (<https://CRAN.R-project.org/package=lmtest>).
- Hsu, K., Gupta, H.V., Sorooshian, S. 1995. Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process. *Water Resources Research* 31(10), 2517–2530.
- Hyndman, R., Athanasopoulos, G., Bergmeir, C., Caceres, G., Chhay, L., O'Hara-Wild, M., Petropoulos, F., Razbash, S., Wang, E., Yasmeen, F. 2018. *Package forecast: Forecasting functions for time series and linear models*. R package version 8.4 (<http://pkg.robjhyndman.com/forecast>).
- Hyndman, R.J., Khandakar, Y. 2008. Automatic time series forecasting: The forecast package for R. *Journal of Statistical Software* 26(3), 1-22.
- Iyer, M.S., Rhinehart, R.R., 1999. A method to determine the required number of neural-network training repetitions. *IEEE Transactions on Neural Networks* 10(2), 427-432.
- Jurado-Almonte, J.M. 2016. *Aguas y regadíos en la provincia de Huelva*. Consejo Económico y Social de la Provincia de Huelva, Huelva (Spain).
- Jurado-Almonte, J.M., Pazos-García, F. 2018. La frontera como recurso turístico. Posibilidades del Bajo/Baixo Guadiana. *Revista de Estudios Andaluces* 35, 1-34.
- Kitanidis, P.K., Bras, R.L. 1980. Real time forecasting with a conceptual hydrological model. 2. Applications and results. *Water Resources Research* 16(6), 1034–1044.
- Legates, D.R., McCabe, G.J. Jr. 1999. Evaluating the use of 'goodness-of-fit' measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35(1), 233–241.
- LNEC. 2000. *Estudo das condições ambientais no estuário do rio Guadiana e zonas adjacentes*. Convenio sobre Cooperación para la Protección y el Aprovechamiento Sostenible de las Aguas de las Cuencas Hidrográficas Hispano-Portuguesas (Convenio de Albufeira). Laboratorio Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Ministério das Obras Públicas, Transportes e Habitação, Lisboa (Portugal).
- Martínez-Fernández, J., Baeza-Sanz, D., Herrera-Grao, T., Gallego-Bernad, M.S., La Calle-Marcos, A. 2018. *PROYECTO Q-CLIMA. Caudales ecológicos: valoración de experiencias en*

- las cuencas españolas y propuestas adaptativas frente al cambio climático*. Fundación Nueva Cultura del Agua (<https://fnca.eu/investigacion/proyectos-de-investigacion/q-clima>).
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scale. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California, American Meteorological Society, Boston, 179-184.
- Moura, D., Gomes, A., Mendes, I., Aníbal, J. 2017. *Guadiana River Estuary. Investigating the past, present and future*. Centre for Marine and Environmental Research (CIMA), University of Algarve (Portugal).
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290.
- Ochoa-Rivera, J.C., Andreu, J., García-Bartual, R. 2007. Influence of inflows modeling on management simulation of water resources system. *Journal of Water Resources Planning and Management* 133(2), 106-115.
- Omedas, M., Benítez, C., Mora, B., Galván, R. 2008. *Los organismos de cuenca en el siglo XXI*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid (Spain).
- OMM Organización Meteorológica Mundial. 2012. *Índice normalizado de precipitación. Guía del usuario*. OMN-Nº 1090, Ginebra (Suiza).
- ONU. 2015. *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas, Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015, A/RES/70/1 (https://unctad.org/meetings/es/SessionalDocuments/ares70d1_es.pdf).
- PACT-A3. *Plan de Acción de Cooperación Transfronteriza Alentejo, Algarve, Andalucía* (<http://www.pact-a3.org/euroregion.php>).
- Parasiewicz, P., Ryan, K., Vezza, P., Comoglio, C., Ballester, T., Rogers, J.N. 2013. Use of quantitative habitat models for establishing performance metrics in river restoration planning. *Ecohydrology* 6, 668–678.
- Pérez-Martín, M.A., Estrela, T., Andreu, J., Ferrer, J. 2014. Modeling water resources and river-aquifer interaction in the Júcar river basin, Spain. *Water Resources Management* 28, 4337-4358.
- PGRHG. 2016. *Plano de Gestão de Região Hidrográfica do Guadiana (RH7)*. Agência Portuguesa do Ambiente, Portugal (<https://www.apambiente.pt>).
- PHDHG. 2016. *Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana 2016-2021*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Spain (<http://planhidrologico2015.chguadiana.es>).
- PHDHTOP. 2016. *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras 2015-2021*. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Junta de Andalucía, Spain (<http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente>).
- Pulido-Calvo, I., Gutiérrez-Estrada, J.C. 2009. Improved irrigation water demand forecasting using a soft-computing hybrid model. *Biosystems Engineering* 102, 202-218.
- Pulido-Calvo, I., Gutiérrez-Estrada, J.C., Savic, D. 2012. Heuristic modelling of the water resources management in the Guadalquivir River Basin, Southern Spain. *Water Resources Management* 26, 185-209.
- Pulido-Calvo, I., Portela, M.M. 2007. Application of neural approaches to one-step daily flow forecasting in Portuguese watersheds. *Journal of Hydrology* 332, 1-15.

- Pulido-Calvo, I., Roldán, J., López-Luque, R., Gutiérrez-Estrada, J.C. 2003. Demand forecasting for irrigation water distribution system. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129(6), 422-431.
- R Core Team. 2016. *R: a language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Version 3.3.2, Vienna (Austria).
- Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., Williams, R.J. 1986. 'Learning' representations by backpropagation errors. *Nature* 323, 533-536.
- Santos, J.F., Pulido-Calvo, I., Portela, M.M. 2010. Spatial and temporal variability of droughts in Portugal. *Water Resources Research* 46, W03503.
- Santos, J.F., Pulido-Calvo, I., Portela, M.M. 2017. *Drought modeling methods*. Handbook of drought and water scarcity. Principles of drought and water scarcity. CRC Press Taylor & Francis Group 10, 149-166.
- Shrestha, R.R., Theobald, S., Nestmann, F. 2005. Simulation of flood flow in a river system using artificial neural networks. *Hydrology and Earth System Sciences* 9(4), 313-321.
- Taguas, E.V., Gómez, J.A., Denisi, P., Mateos, L. 2015. Modelling the rainfall-runoff relationships in a large olive orchard catchment in Southern Spain. *Water Resources Management* 29, 2361-2375.
- Trapletti, A., Hornik, K., LeBaron, B. 2017. *Tseries: Time series analysis and computational finance*. R package (<https://cran.r-project.org/web/packages/tseries/>).
- Tsoukalas, L.H., Uhrig, R.E. 1997. *Fuzzy and Neural Approaches in Engineering*. Wiley Interscience, Nueva York, USA.
- Vicente-Serrano, S.M. 2006. Spatial and temporal analysis of droughts in the Iberian Peninsula (1910-2000). *Hydrological Sciences Journal* 51, 83-97.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I. 2010. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index–SPEI. *Journal of Climate* 23: 1696, DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.
- Zamora-Rodríguez, B., Beltrán de Heredia-Alonso, J.J. 2006. Calidad y aprovechamiento de las aguas del Guadiana transfronterizo extremeño-alentejano. *Revista de Estudios Extremeños* 62(3), 1189-1244.

Anexo I. Esquema hidráulico del sistema de regulación de recursos hídricos Chanza-Piedras-Huelva

La Demarcación Hidrográfica Tinto-Odiel-Piedras (TOP) tiene como principales embalses de abastecimiento y regulación el Andévalo, Chanza, Piedras y Los Machos que están conectados entre sí, mediante conducciones cerradas y abiertas, para el abastecimiento agrícola, urbano e industrial del litoral onubense y del Andévalo Occidental (Figura AI.1). Los embalses del Chanza y del Andévalo pertenecen a la Demarcación Hidrográfica del Guadiana y actualmente transfieren una demanda consolidada de 175 hm³/año a la Demarcación Hidrográfica Tinto-Odiel-Piedras (se denomina Encomienda del Chanza; PGRH, 2016; PHDHTOP, 2016).

El agua embalsada en los embalses del Chanza (inaugurado en 1987 con 341 hm³ de capacidad) y del Andévalo (2004; 634 hm³) es conducida por el canal del Granado (18.6 km) y el túnel de San Silvestre (9.4 km) a los embalses del Piedras (1968; 60 hm³) y de Los Machos (1988; 12 hm³) (Figura AI.1). Desde aquí hay tomas para los regadíos del Sur-Andévalo y del Chanza-Guadiana y parte el canal del Piedras (39 km) que conduce el agua hasta los depósitos de regulación de la ciudad de Huelva. De esta forma se abastece a los pueblos costeros de la comarca de la Costa Occidental de la provincia de Huelva, a la capital onubense y su área industrial y periurbana y, más recientemente, tras haberse concluido el Anillo Hídrico de Huelva a las zonas regables de Palos de la Frontera, Moguer, Lucena del Puerto y Bonares, además del abastecimiento industrial del puerto exterior y urbano de las localidades de Palos de la Frontera, Moguer y Mazagón (Jurado-Almonte, 2016).

El azud de Matavacas forma parte de las infraestructuras hidráulicas del sistema Chanza-Piedras-Huelva. Se trata de una pequeña presa con capacidad de 0.3 hm³, situada en la cabecera de la ribera Grande de la Golondrina (Sanlúcar de Guadiana). Regula el agua bombeada desde el embalse del Chanza y desde la central de bombeo de Bocachanza (toma adicional en la confluencia entre los ríos Guadiana y Chanza) y que le llega a través del Canal del Granado, para derivarla nuevamente hacia el embalse del Piedras.

El embalse del Andévalo es el tercero de mayor dimensión de la Comunidad Autónoma de Andalucía tras el de Iznajar (provincia de Córdoba; Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir; 981 hm³) y el del Guadalcazín (provincia de Cádiz; Demarcación Hidrográfica Guadalate-Barbate; 800 hm³) y el de mayor tamaño de la provincia de Huelva.



Figura A1.1. Esquema hidráulico del sistema de regulación Chanza-Piedras-Huelva (demanda consolidada de agua que se transfiere a la Demarcación Hidrográfica Tinto-Odiel-Piedras)

Referencias

- Jurado-Almonte, J.M. 2016. *Aguas y regadíos en la provincia de Huelva*. Consejo Económico y Social de la Provincia de Huelva, Huelva (Spain).
- PHDHG. 2016. *Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana 2016-2021*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Spain (<http://planhidrologico2015.chguadiana.es>).
- PHDHTOP. 2016. *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras 2015-2021*. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Junta de Andalucía, Spain (<http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente>).

Anexo II. Bases de datos

Estaciones de aforo

En el presente estudio se utilizaron datos hidrológicos (aportaciones y caudales) procedentes de distintas estaciones de aforo españolas y portuguesas. Dentro del ámbito español, la Confederación Hidrográfica del Guadiana (CHG, www.chguadiana.es) y la Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA, <http://ceh-flumen64.cedex.es/anuarioaforos/default.asp>) aportaron todos los datos de aportaciones y caudales de la Subcuenca española del Bajo Guadiana, mientras que toda la información hidrológica relacionada con la parte portuguesa fue adquirida del Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH, snirh.apambiente.pt/).

La CHG facilitó los datos de las estaciones de aforo: Cobica en Chanza (CR3-05), Malagón (CR3-04) y Piedras Desembocadura (CR3-07) y de los embalses del Andévalo (E3-10) y Chanza (E3-01). De las estaciones de aforo se trabajaron con datos históricos de caudal medio diario (m^3s^{-1}) con un periodo temporal diferente en cada estación: Cobica en Chanza (2008-2010), Malagón (2006-2011) y Piedras Desembocadura (2007-2010). Del embalse del Andévalo se utilizaron series mensuales históricas en hm^3 de aportaciones (2002-2017), de los dos bombeos existentes (hm^3) [bombero (2007-2017), palafito (2011-2017) y bombero total (2007-2017)] y del volumen de regulación (2002-2017). Para el embalse del Chanza se estudiaron las series mensuales históricas en hm^3 de aportaciones (1996-2017), de las tomas existentes [Bocachanza (1996-2017), bombero I (1996-2017), bombero II (2009-2017), central hidroeléctrica (2013-2017), bombero total (1996-2017)] y volumen de regulación (1996-2017).

Por otro lado, desde ROEA se tienen las series históricas mensuales de escurrentía (hm^3) y caudal medio diario (m^3s^{-1}) de las estaciones de control en río de Albahacar en Paymogo (4173) (1970-2004), Aroche (4160) (1929-2000), Chanza en Aroche (4158) (1961-2006), Chanza en Rosal de la Frontera (4176) (1969-2002), Cobica en Puebla de Guzmán (4161) (1970-2004) y Malagón en Paymogo (4172) (1970-2004).

De la zona portuguesa también se utilizaron datos de estaciones de aforo procedentes tanto de embalses como de puntos de control en río del embalse de Beliche (30L/02A) se obtuvieron las series históricas mensuales en hm^3 de los consumos agrícolas y municipales y del volumen de regulación (1990-2015). Del embalse de Odeleite (30L/01A) se tiene el volumen mensual de regulación (hm^3) (1997-2015).

Del sistema SNIRH se analizaron ocho estaciones de control en río que proporcionaron las series históricas de caudal medio diario (m^3s^{-1}) y escurrentía mensual (hm^3/mes) teniendo cada variable un periodo distinto según la estación. En el caso de los registros convencionales en 'Datos de Base' del Sistema SNIRH: Beliche (Povoação) (30L/01H) caudal medio (1978-1985) y escurrentía (1978-1985), Limas (27L/04H) caudal medio (1981-1995) y escurrentía (1981-1989), Monte da Ponte (27J/01H) caudal medio (1958-1997) y escurrentía (1958-1990), Monte dos Fortes (Riveira de Odeleite) (29L/01H) caudal medio y escurrentía (1960-2001), Odeleite (Ponte) (30M/01H) caudal medio (1975-1990) y escurrentía (1975-1990), Pulo do Lobo (27L/01H) caudal medio (1946-2001) y escurrentía (1946-2000), Tenência (Porto das Areias) caudal medio (1976-2001) y escurrentía (1976-1990) y Vasção

(28L/02H) caudal medio (1960-2000) y esorrentía (1960-1990). En el caso de los registros en 'Boletim de Escoamento' del Sistema SNIRH hay datos disponibles desde 1990 hasta la actualidad obtenidos a partir de la monitorización del nivel hidrométrico instantáneo.

Datos climáticos

La base de datos climáticos estuvo constituida por series históricas de precipitación y de temperatura disponibles para el área de estudio.

Para la zona española se construyó una serie promedio mensual de precipitación (mm) desde enero de 1949 hasta agosto de 2017, a partir de las series mensuales históricas de precipitación de las siguientes estaciones: Aroche (Las Cefiñas, 4523E) (1968-2017), Ayamonte (Telégrafos, 4549A) (1949-1985), Cabezas Rubias (4536) (1964-2017), Cartaya (Pemares, 4554E) (1987-2014), Cerro Andeválo (El Cóbico, 4585) (1964-2017), El Almendro (La Burrilla, 4595) (1962-1984), El Granado (4542) (1964-2017), El Granado (Bocachanza, 4541U) (1976-2017), Gibrleón (4603) (1965-2012), Isla Cristina (Cañada Corcho, 4546M) (1989-2013), Lepe (Valdeluz, 4546I) (1989-2006), Paymogo (4538) (1952-1984), Presa de Sancho (4602) (1961-1992), Presa del Piedras (4549S) (1972-1992), Puebla de Guzmán (Herrerías, 4535) (1966-2017), Punta Umbría (4555) (1988-2017), Rosal de la Frontera (4531) (1966-1982), San Bartolomé de la Torre (4599) (1963-1989), San Silvestre de Guzmán (Labrados, 4544E) (1980-2016), Sanlúcar de Gadiana (4543) (1961-1986), Santa Bárbara de Casa (4537) (1952-1981), Valdelamusa (Minas, 4583) (1972-1992), Villablanca (4546) (1964-2012) y Villanueva de los Castillejos (Toril Nuevo, 4549O) (1972-1992). Todos estos datos fueron proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorológica (AEMET, www.aemet.es). Por otro lado, también se utilizaron las series mensuales históricas de precipitación (mm) de los embalses del Andeválo desde 2002 a 2017 y del Chanza desde 1996-2017, aportadas por la CHG.

Para la obtención de la serie histórica promedio mensual de precipitación (mm) del área portuguesa se procedió del igual modo que en la parte española. Se obtuvo una serie de precipitación desde enero de 1900 hasta diciembre de 2017 a partir de las series mensuales de las siguientes estaciones: Alcoutim (29M/01UG) (1976-2017), Azinhal (30M/04U) (1981-1985), Barragem do Beliche (30M/06G) (2001-2016), Castro Marim (30M/03UG) (1981-2016), Cortes Pereiras (29L/02U) (1980-2001), Figueiras (30M/01G) (1936-1984), Mértola (28L/01UG) (1932-2017), Mesquita (28L/02UG) (1981-2016), Minas de São Domingos (27M/02U) (1900-1968), Santa Iria (26L/02UG) (1981-2017), Sapal de Odeleite (Ex. Fonte do Penedo, 29M/02UG) (2002-2016) y Serpa (26L/01UG) (1932-2011). Todos los datos fueron adquiridos del SNIRH.

A partir de las series históricas resultantes de precipitación de la parte española y portuguesa se obtuvo la serie histórica promedio final de precipitación (mm) para toda la zona de la Subcuenca del Bajo Gadiana desde enero de 1900 hasta diciembre de 2017.

Finalmente, las series históricas de temperatura (°C) utilizadas como variables independientes en las aproximaciones neuronales fueron para los embalses del Andeválo (E3-10) (2002-2017) y del Chanza (E3-01) (1996-2017) las adquiridas de la estación meteorológica de la AEMET El Granado (Bocachanza, 4541U) y para las riberas del Cóbica, Malagón y Albahacar las utilizadas por el modelo SIMPA para la subcuenca correspondiente proporcionadas por la CHG.

Redes Neuronales Artificiales

En el territorio español se calibraron y validaron redes neuronales para las aportaciones mensuales de los embalses del Andevaló (E3-10) (2002-2017) y Chanza (E3-01) (1996-2017), cuyos datos fueron aportados por la CHG excepto la temperatura que la proporcionó la AEMET. El SPI12 se calculó con los datos de precipitación registrados en las estaciones de aforo de ambos embalses.

También se simularon con los modelos neuronales las escorrentías mensuales en las estaciones de aforo de Albahacar en Paymogo (4173), Cobica en Puebla de Guzmán (4161) y Malagón en Paymogo (4172). Los datos mensuales de aportaciones de las estaciones se adquirieron del ROEA (1970-2004). Para estas tres estaciones de aforo la temperatura fue la misma con un periodo de 1970 hasta 2004, la cual fue tomada de los datos utilizados por el modelo SIMPA para la subcuenca donde se encuentran localizadas estas estaciones. La serie mensual de precipitación se obtuvo del promedio de precipitación mensual de las estaciones meteorológicas de Puebla de Guzmán (Herrerías 4535) y Santa Bárbara de Casa (4537) (1970-2004) de la AEMET. El SPI12 se obtuvo con los datos de precipitación de estas estaciones climáticas.

En la parte portuguesa las redes neuronales se utilizaron para la simulación de las escorrentías mensuales de las estaciones de aforo de Beliche (Povoação) (30L/01H) (1978-1985), Odeleite (Ponte) (30M/01H) (1975-1990), Pulo do Lobo (27L/01H) (1946-2000) y Vasção (28L/02H) (1960-1990). Para todas las estaciones la aportación real (hm^3/mes) fue adquirida del sistema SNIRH. Las series de precipitaciones utilizadas fueron el resultado de la combinación de series procedentes de distintas estaciones meteorológicas (datos registrados en el sistema SNIRH). Para la estaciones de Beliche (Povoação) y Odeleite (Ponte) la serie mensual de precipitación empleada fue el resultado del promedio de las series de precipitación de las estaciones de Azinhal (30M/04U), Castro Marim (30M/03UG) y Figueiras (30M/01G). Para Pulo do Lobo de la combinación de la estaciones de Minas de São Domingos (27M/02U) y Serpa (26L/01UG) y para Vasção de Mértola (28L/01UG) y Mesquita (28L/02UG). La temperatura sólo fue utilizada en la parte española ya que para la portuguesa no estaban disponibles.

Anexo III. Análisis de frecuencias de aportaciones mensuales superiores e inferiores a los requerimientos de caudales ecológicos

Figura AIII.1. Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en la Rivera de Malagón (PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Rivera de Malagón.....	52
Figura AIII.2. Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en la Rivera de Cobica (PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Cobica.....	53
Figura AIII.3. Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en el Arroyo Albahacar (PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Arroyo Albahacar.....	54
Figura AIII.4. Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en el Río Chanza en Aroche (Rivera de Chanza I; PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Río Chanza en Aroche.....	55
Figura AIII.5. Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en el Río Chanza en Rosal de la Frontera (Rivera de Chanza II; PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Río Chanza en Rosal de la Frontera.....	56
Figura AIII.6. Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por los Planes Hidrológicos de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en la estación de aforo Pulo do Lobo en el Río Guadiana (régimen seco de precipitaciones; PGRHG, 2016; PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Pulo do Lobo (No hay datos disponibles en los años hidrológicos 2000/01 y de 2009/10 a 2013/14).....	57
Figura AIII.7. Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por los Planes Hidrológicos de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en la estación de aforo Pulo do Lobo en el Río Guadiana (régimen medio de precipitaciones; PGRHG, 2016; PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Pulo do Lobo (No hay datos disponibles en los años hidrológicos 2000/01 y de 2009/10 a 2013/14).....	58
Figura AIII.8. Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por los Planes Hidrológicos de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en la estación de aforo Pulo do Lobo en el Río Guadiana (régimen húmedo de precipitaciones; PGRHG, 2016; PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Pulo do Lobo (No hay datos disponibles en los años hidrológicos 2000/01 y de 2009/10 a 2013/14).....	59
Figura AIII.9. Distribución de las aportaciones anuales en la Rivera de Odeleite y caudal ecológico identificado por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana de la parte portuguesa (PGRHG, 2016) (No hay datos disponibles en los años hidrológicos 1993/94 y de 2010/11 a 2013/14).....	60

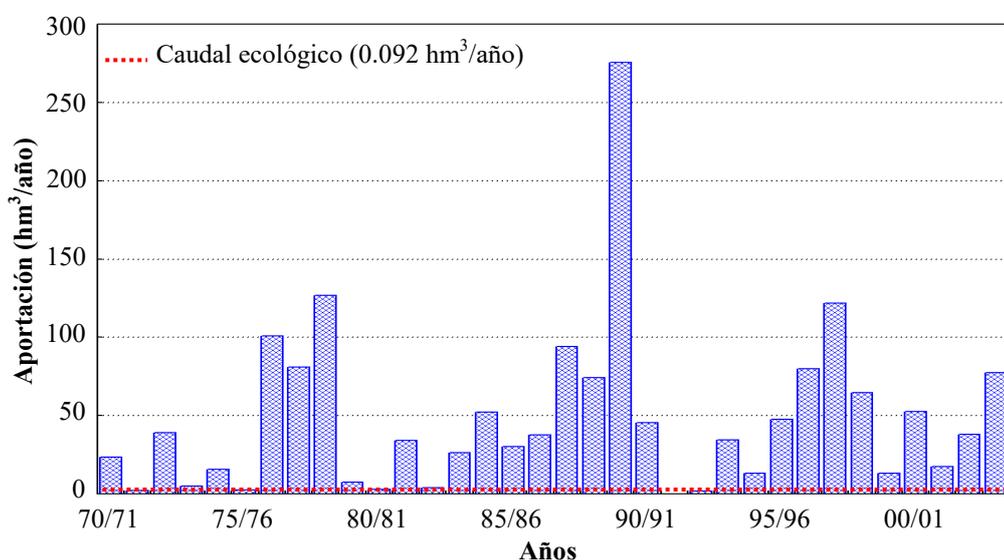
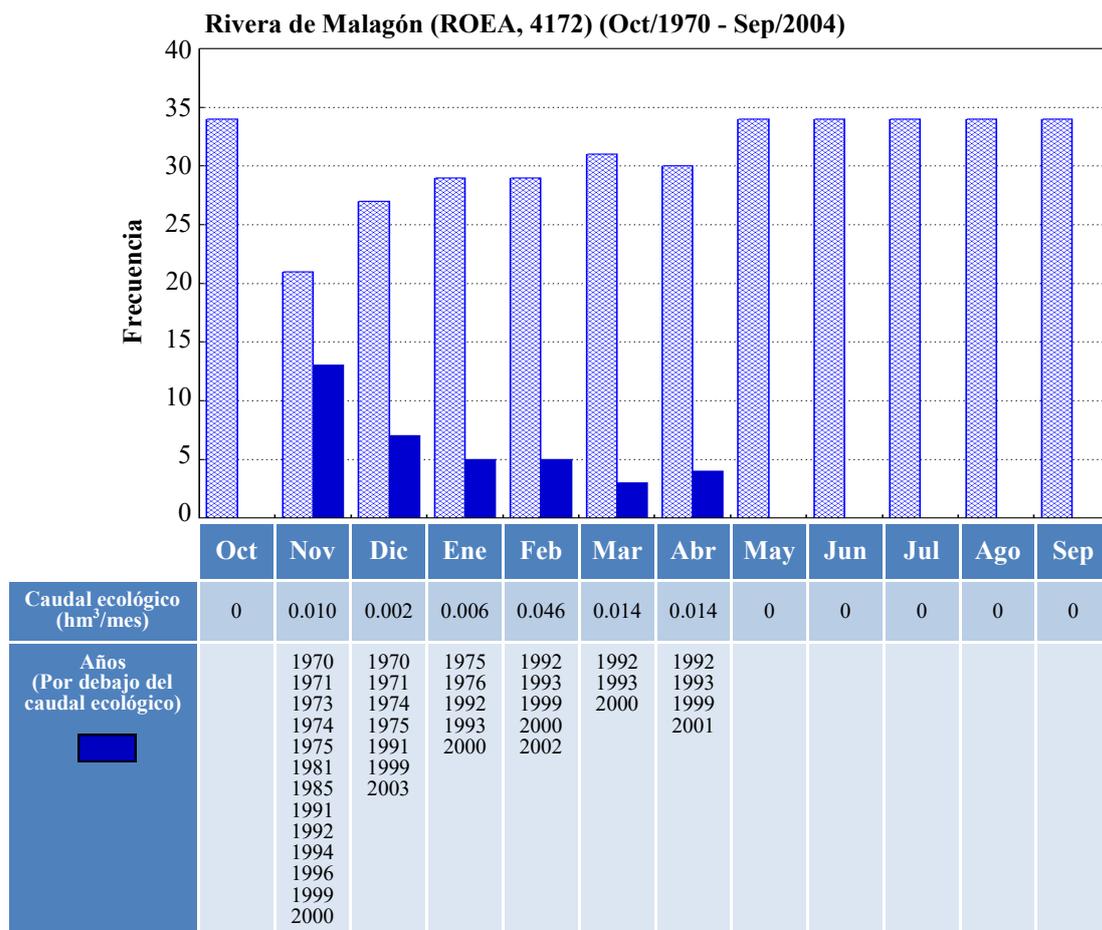


Figura AIII.1. Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en la Rivera de Malagón (PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Rivera de Malagón

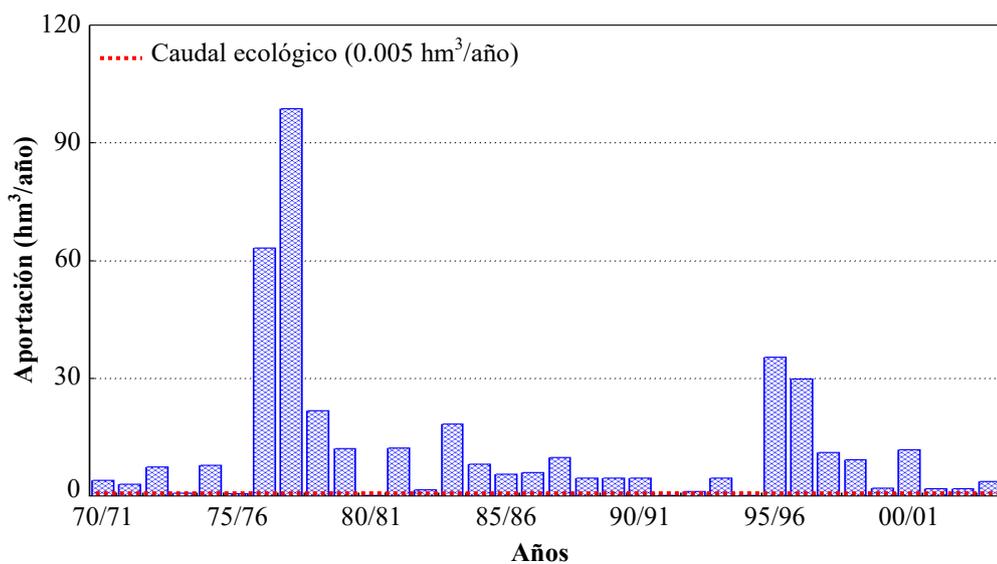
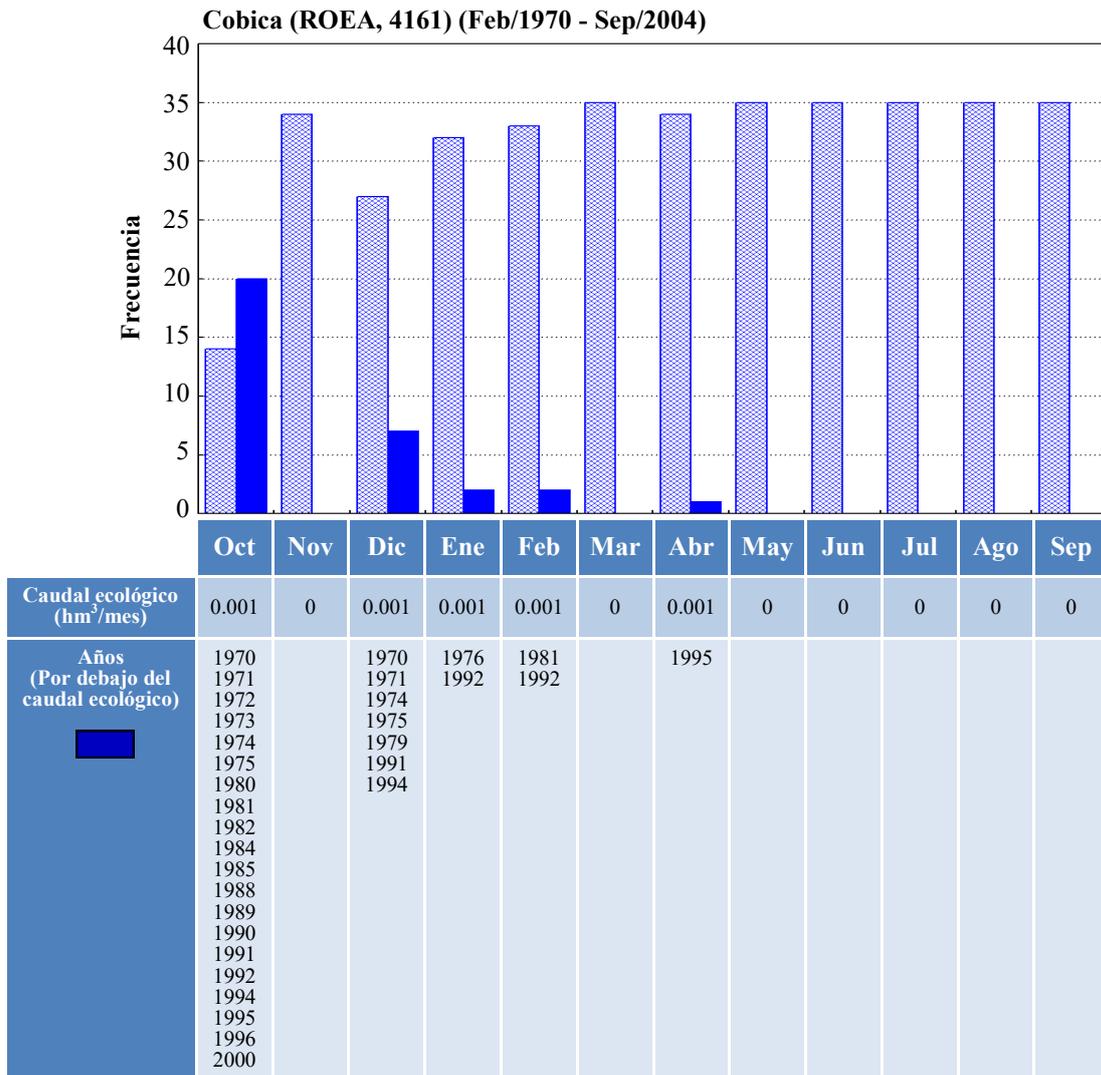


Figura AIII.2. Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en la Rivera de Cobica (PHDHG, 2016).
Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Cobica

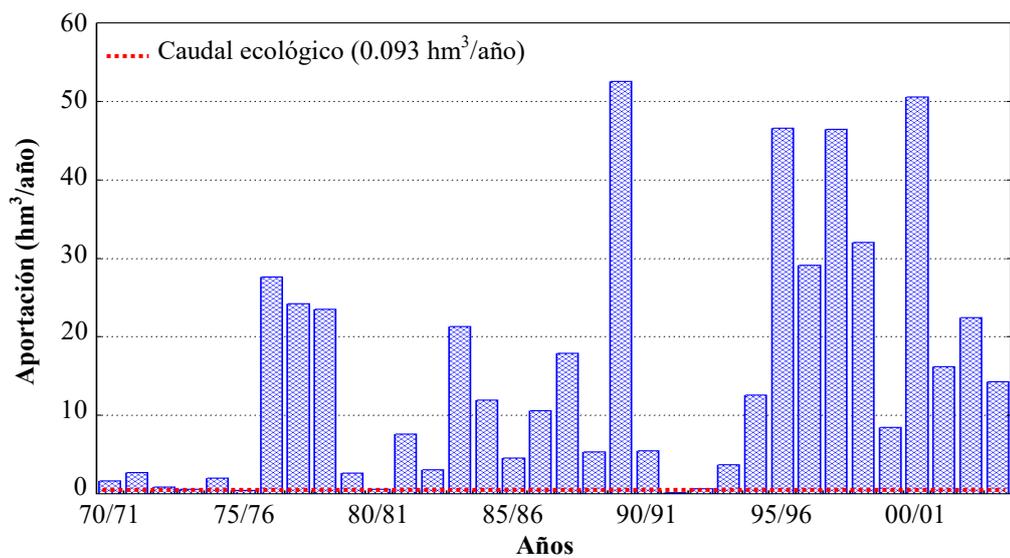
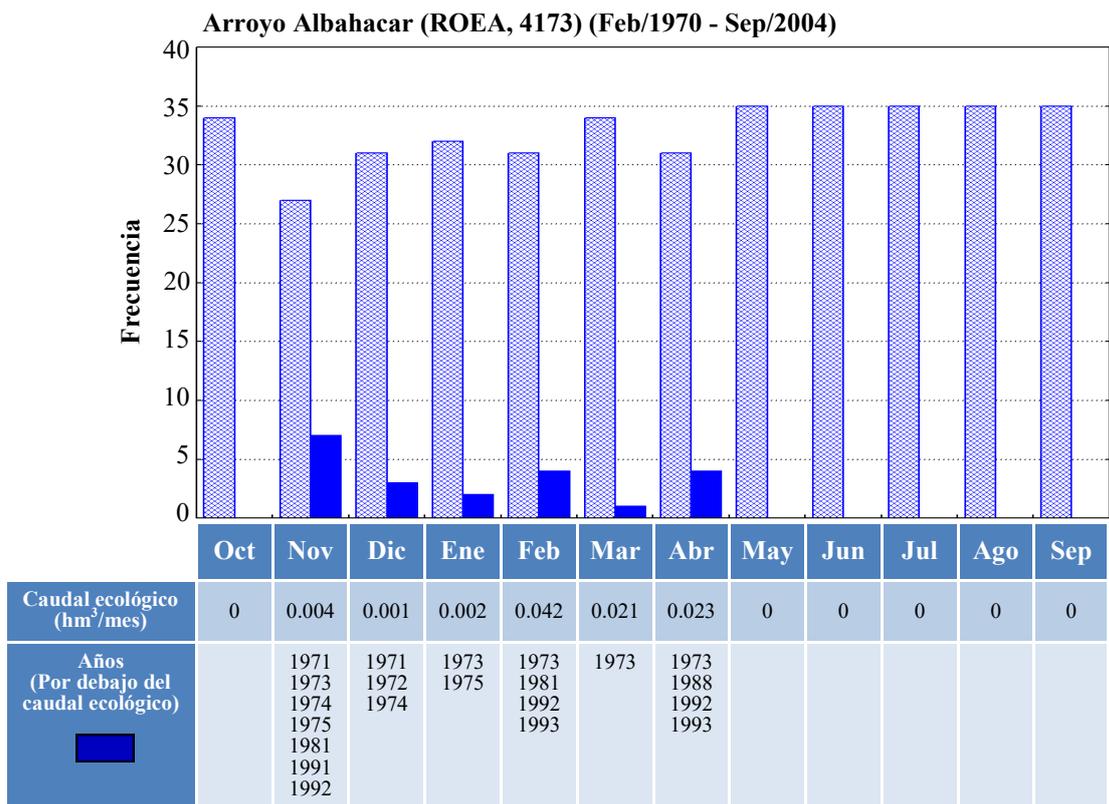


Figura AIII.3. Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en el Arroyo Albahacar (PHDHG, 2016).
Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Arroyo Albahacar

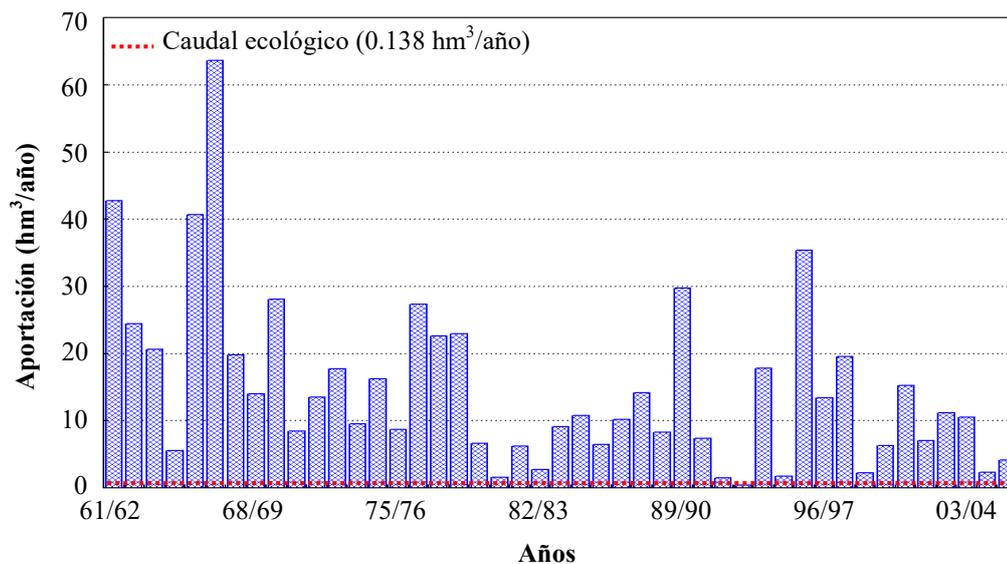
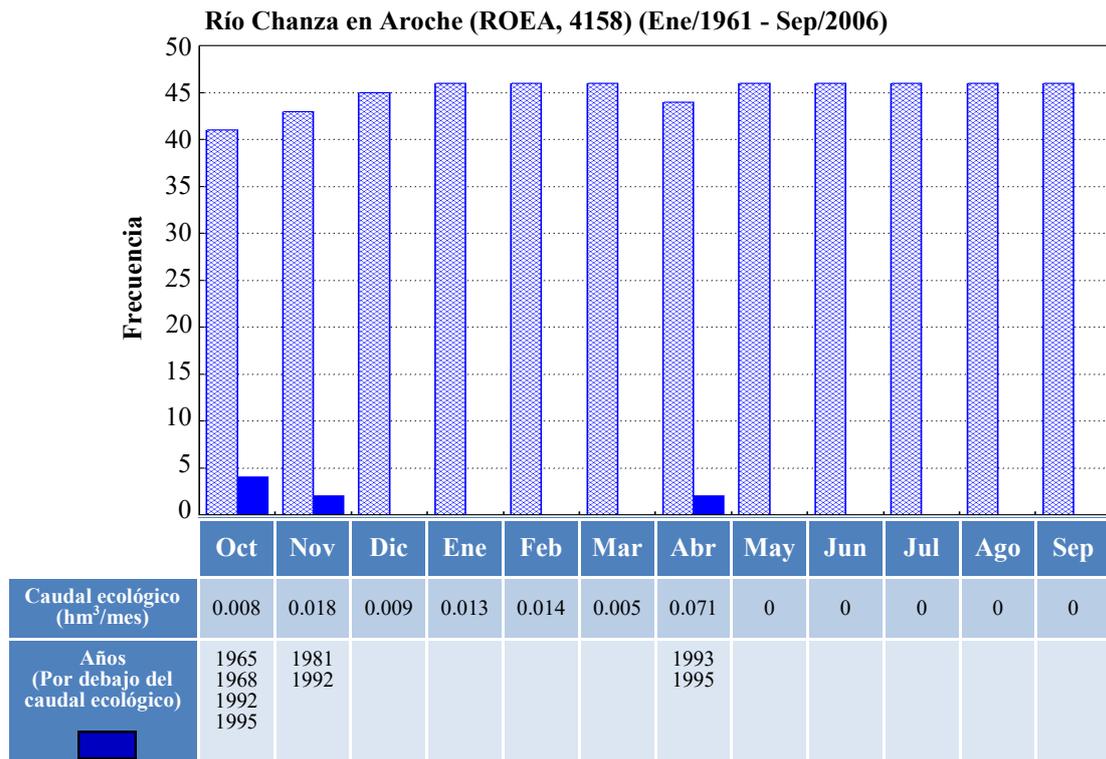


Figura AIII.4. Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en el Río Chanza en Aroche (Rivera de Chanza I; PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Río Chanza en Aroche

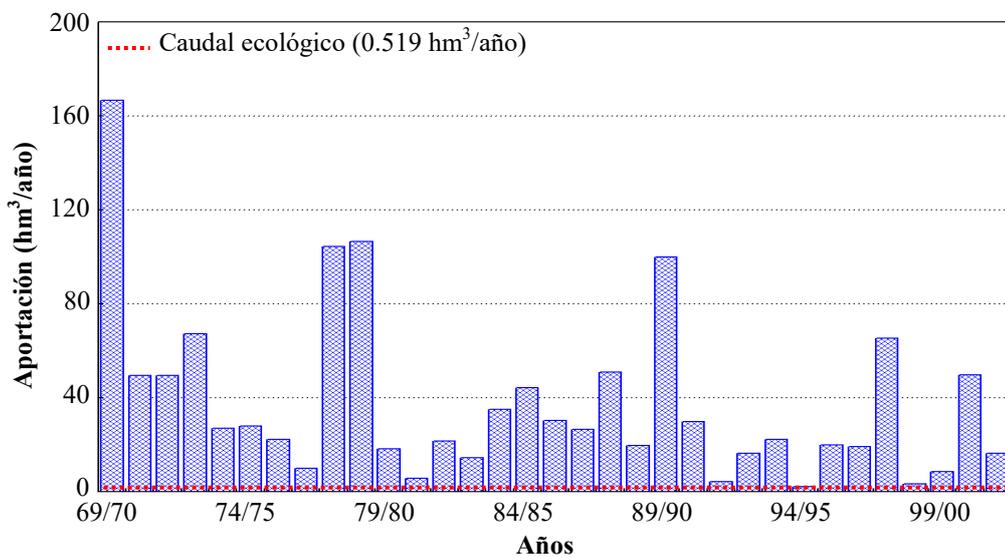
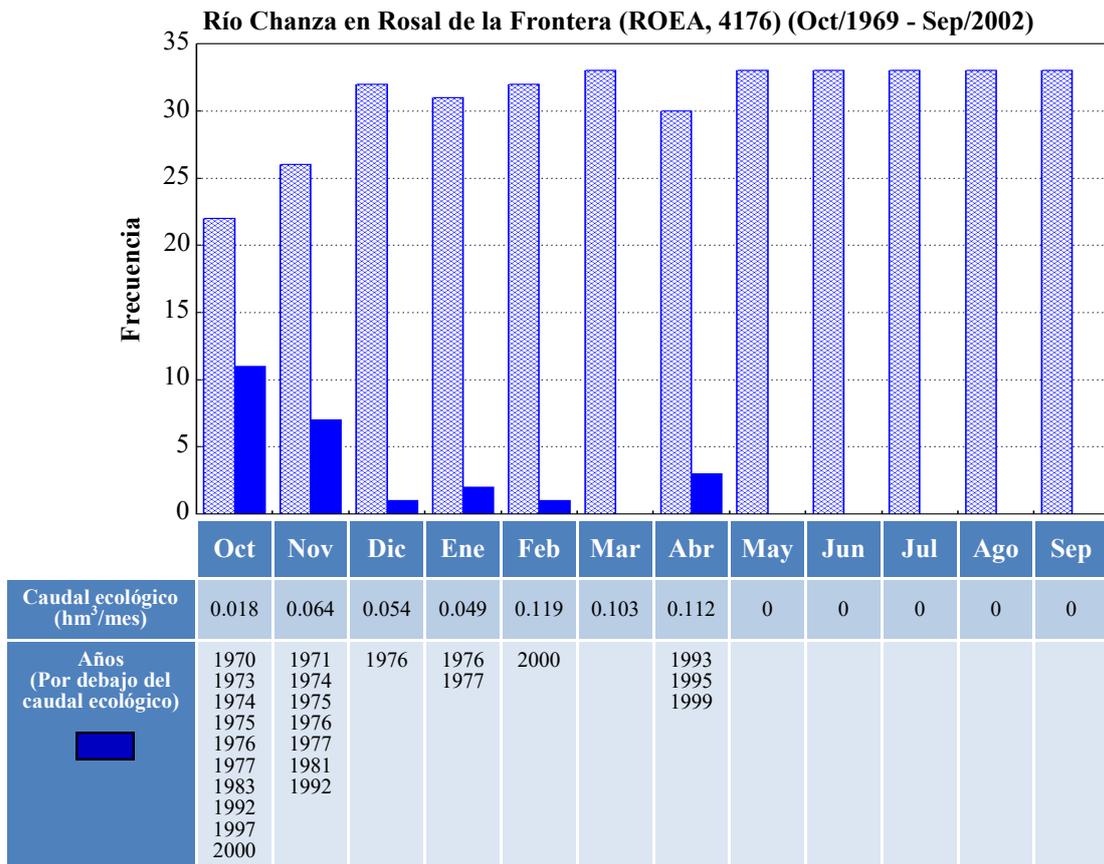


Figura AIII.5. Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en el Río Chanza en Rosal de la Frontera (Rivera de Chanza II; PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Río Chanza en Rosal de la Frontera

**Pulo do Lobo, régimen seco (SNIRH, 27L/01H) (Oct/1946 - Nov/2000)
(Oct/2001-Sep/2009) (Oct/2014-Sep/2015)**

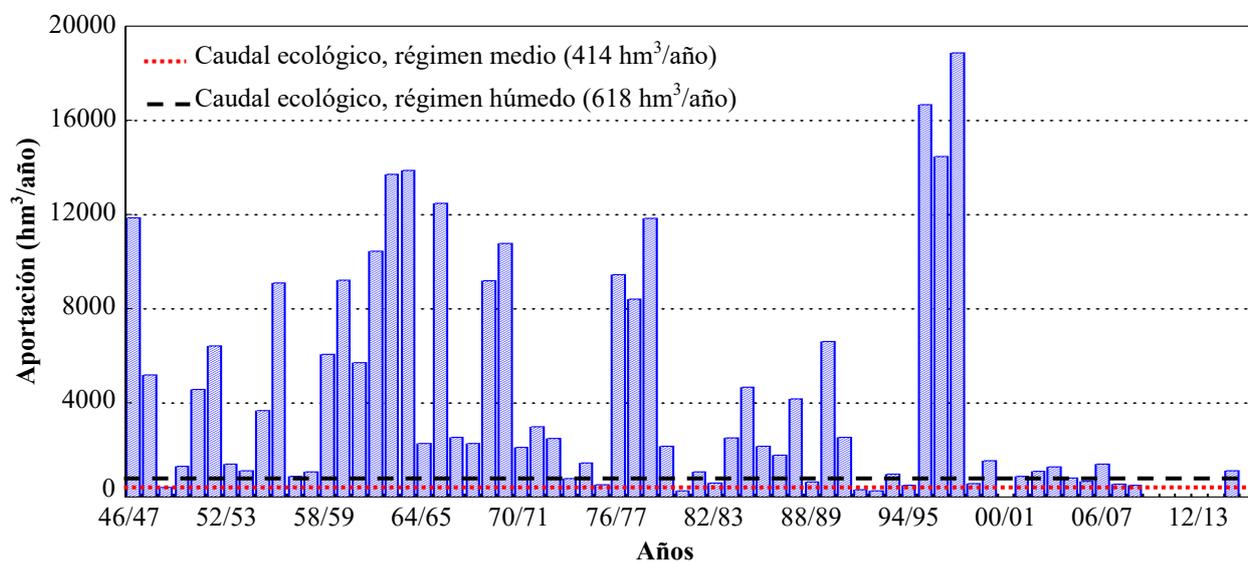
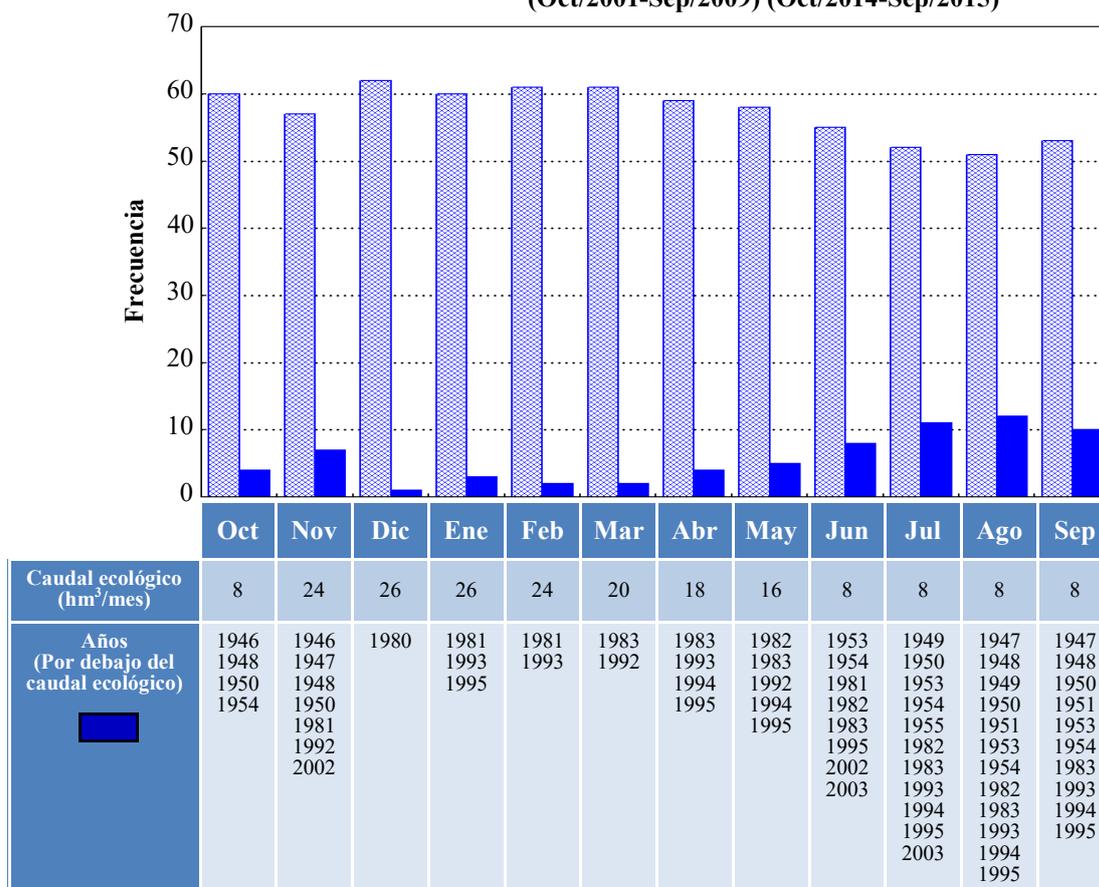


Figura AIII.6. Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por los Planes Hidrológicos de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en la estación de aforo Pulo do Lobo en el Río Guadiana (régimen seco de precipitaciones; PGRHG, 2016; PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Pulo do Lobo (No hay datos disponibles en los años hidrológicos 2000/01 y de 2009/10 a 2013/14)

**Pulo do Lobo, régimen medio (SNIRH, 27L/01H) (Oct/1946 - Nov/2000)
(Oct/2001-Sep/2009) (Oct/2014-Sep/2015)**

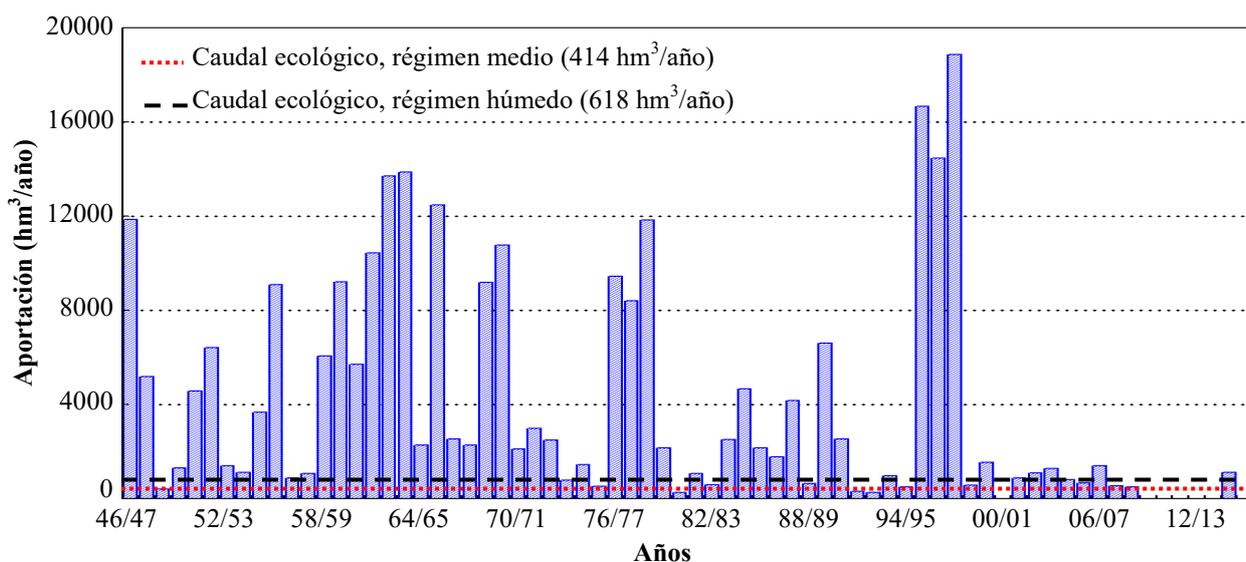
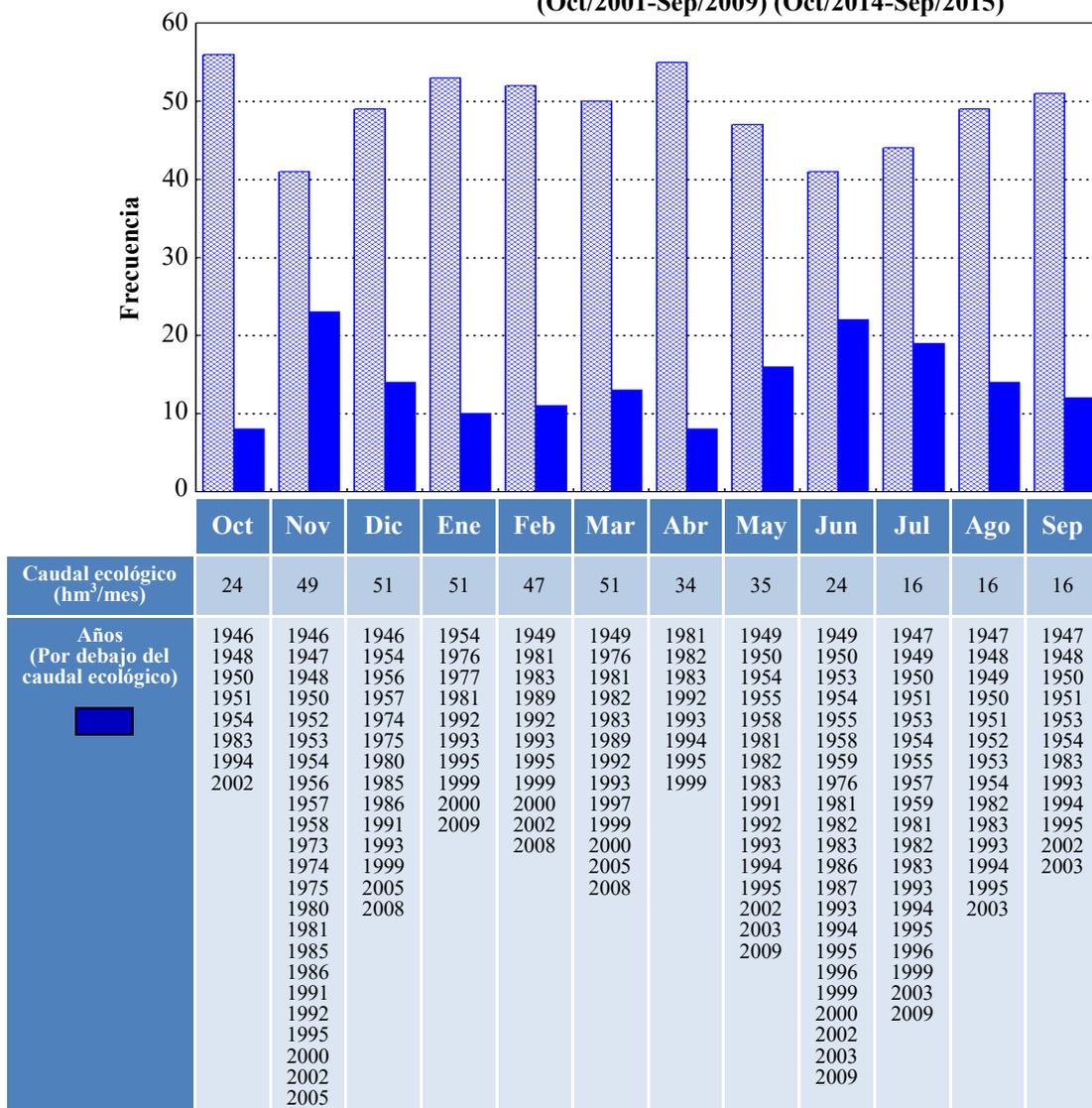


Figura AIII.7. Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por los Planes Hidrológicos de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en la estación de aforo Pulo do Lobo en el Río Guadiana (régimen medio de precipitaciones; PGRHG, 2016; PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Pulo do Lobo (No hay datos disponibles en los años hidrológicos 2000/01 y de 2009/10 a 2013/14)

**Pulo do Lobo, régimen húmedo (SNIRH, 27L/01H) (Oct/1946 - Nov/2000)
(Oct/2001-Sep/2009) (Oct/2014-Sep/2015)**

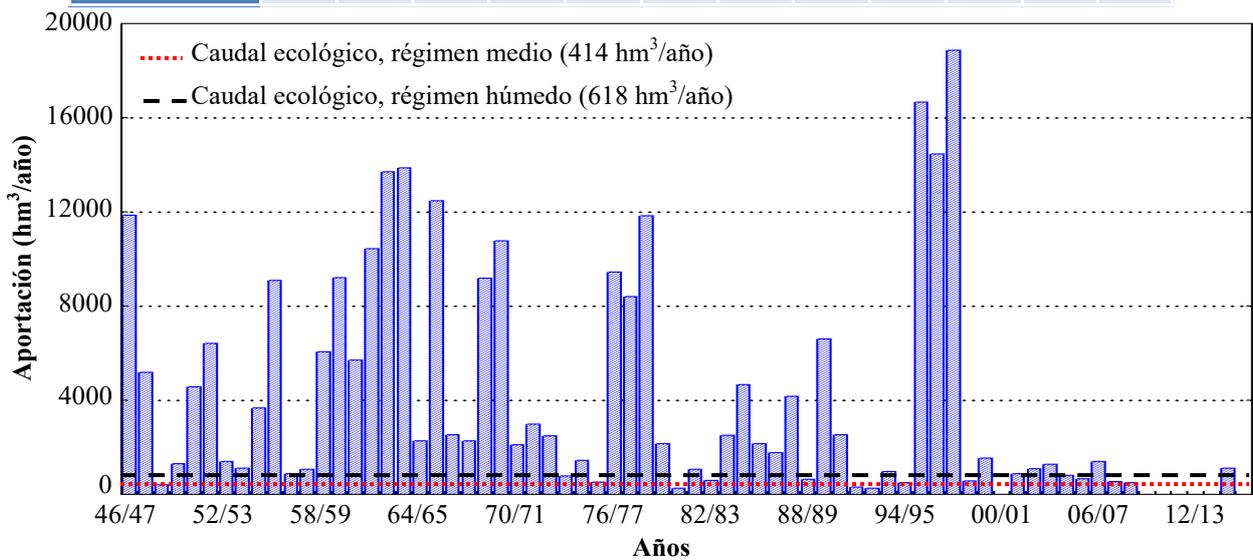
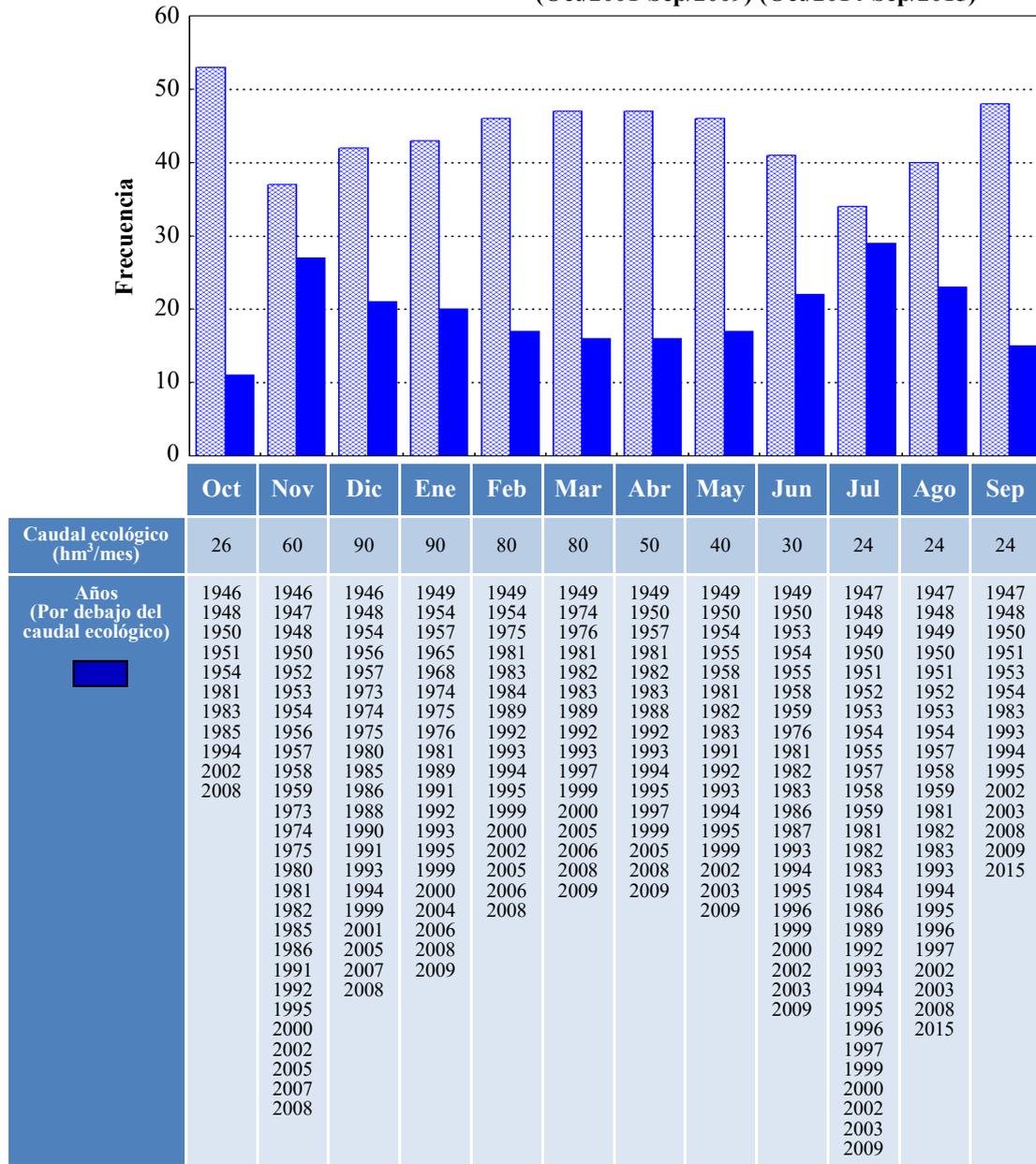


Figura AIII.8. Análisis de frecuencia de los meses en los que las aportaciones han sido superiores (azul claro) o inferiores (azul oscuro) a los requerimientos de caudales ecológicos identificados por los Planes Hidrológicos de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana en la estación de aforo Pulo do Lobo en el Río Guadiana (régimen húmedo de precipitaciones; PGRHG, 2016; PHDHG, 2016). Distribución de las aportaciones anuales en la estación de aforo Pulo do Lobo (No hay datos disponibles en los años hidrológicos 2000/01 y de 2009/10 a 2013/14)

Rivera de Odeleite (Monte dos Fortes, SNIRH, 29L/01H)
 (Oct/1975 - Sep/1993; Oct/1994 - Sep/2010; Oct/2014 - Sep/2018)

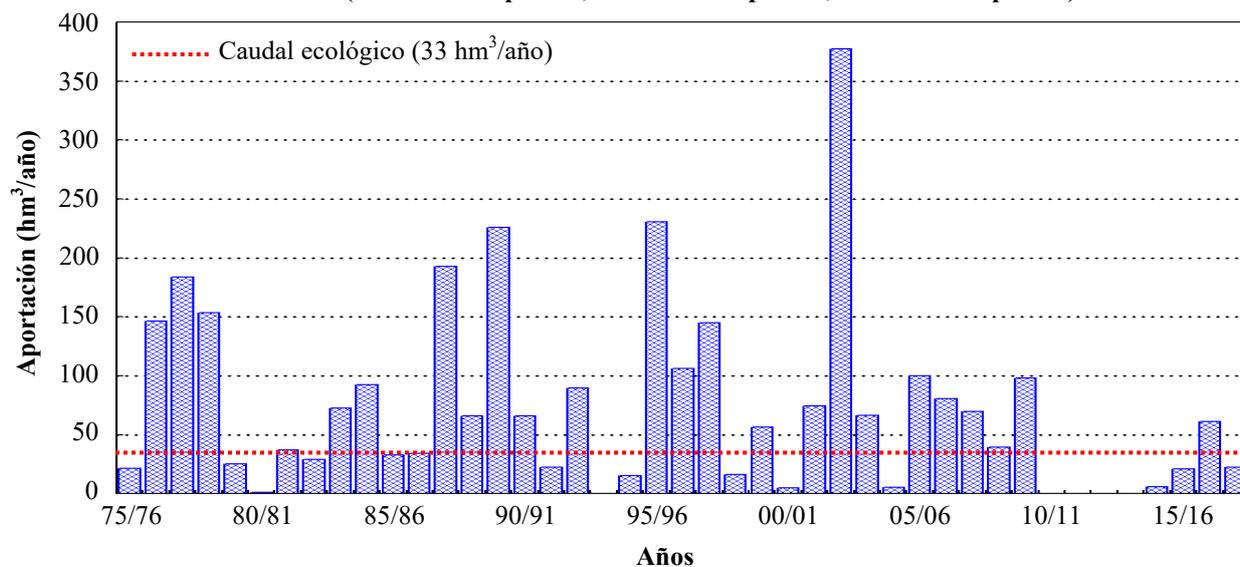


Figura AIII.9. Distribución de las aportaciones anuales en la Rivera de Odeleite y caudal ecológico identificado por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana de la parte portuguesa (PGRHG, 2016) (No hay datos disponibles en los años hidrológicos 1993/94 y de 2010/11 a 2013/14)

Anexo IV. Fichas de zonas de interés

- Embalse del Andévalo
- Embalse del Chanza
- Arroyo del Albahacar
- Rivera Cobica
- Rivera de Malagón
- Embalse de Odeleite
- Embalse de Beliche
- Ribeira do Vasção
- Pulo do Lobo
- Ribeira de Foupana
- Ribeira de Carreiras
- Arroyo Grande
- Isla Canela (Caño del Pozo)
- Sapais do Castro Marim
- Isla Canela (Caño de Franco)
- Rivera Grande de la Golondrina



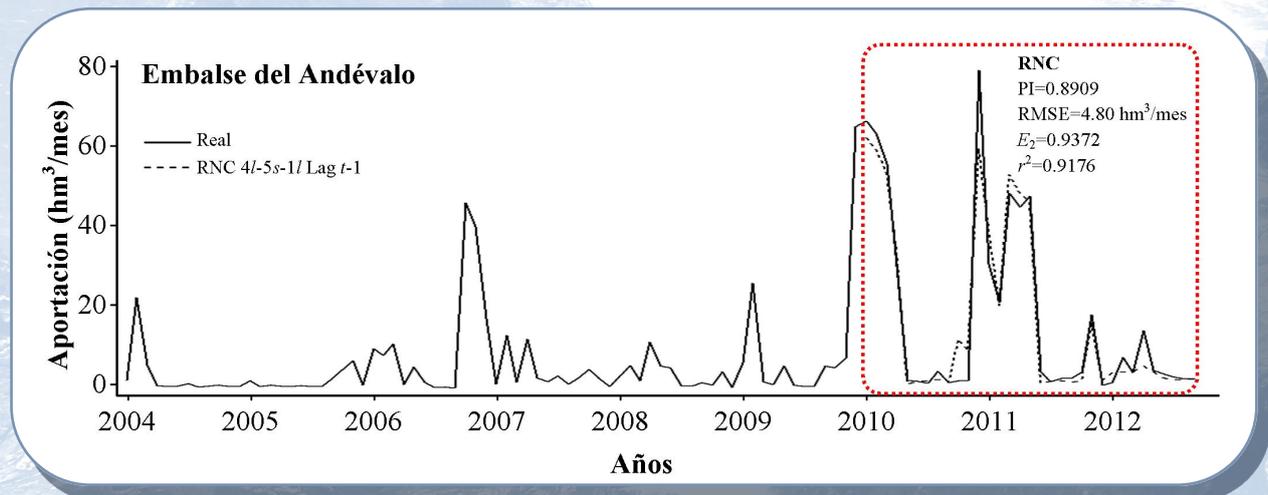
Embalse del Andévalo

País: España
Coordenadas: 37° 37'N 7° 24'W
Estación de aforo: E3-10 (SAIH)

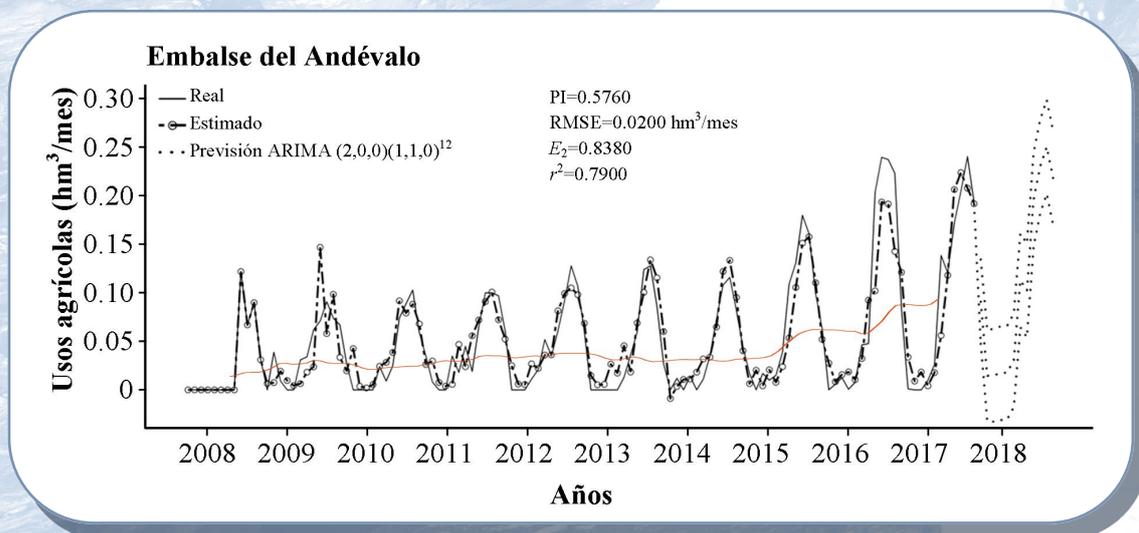
Superficie de la cuenca	738 km ²	Superficie del vaso	3630 ha
Capacidad	600 hm ³	Año construcción	2003



Vista general del embalse desde la balsa del Cabezo del Pasto (19/06/2017)



Aportación (hm³/mes) del embalse del Andévalo en el periodo 2004-2012. El cuadro rojo indica la fase de validación de un modelo de Red Neuronal Artificial (RNC). Se indican las magnitudes de evaluación del modelo: índice de persistencia (PI); error cuadrático medio (RMSE); índice de eficiencia (E_2); coeficiente de determinación (r^2)



Usos agrícolas (hm³/mes) del embalse del Andévalo en el periodo 2008-2017. La línea roja indica la tendencia de la serie. Se indica la previsión del modelo ARIMA (2,0,0)(1,1,0)¹² ± límites de confianza al 95% (líneas punteadas) así como las magnitudes de evaluación del modelo: índice de persistencia (PI); error cuadrático medio (RMSE); índice de eficiencia (E_2); coeficiente de determinación (r^2)

Embalse del Chanza

País: España
 Coordenadas: 37° 33'N 7° 31'W
 Estación de aforo: E3-01 (SAIH)

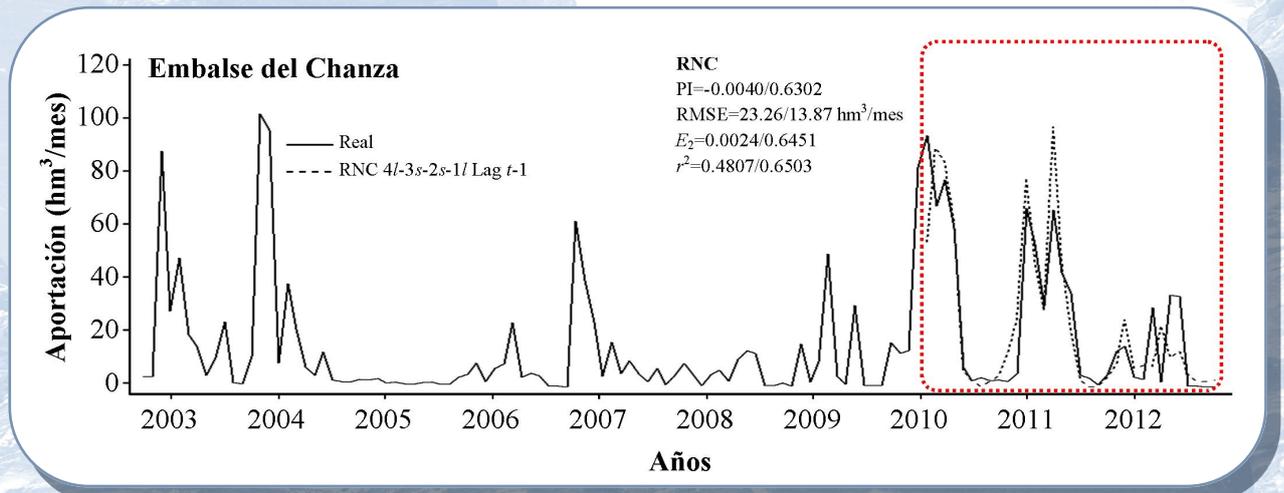
Superficie de la cuenca	1970 km ²	Superficie del vaso	2219 ha
Capacidad	341 hm ³	Año construcción	1989



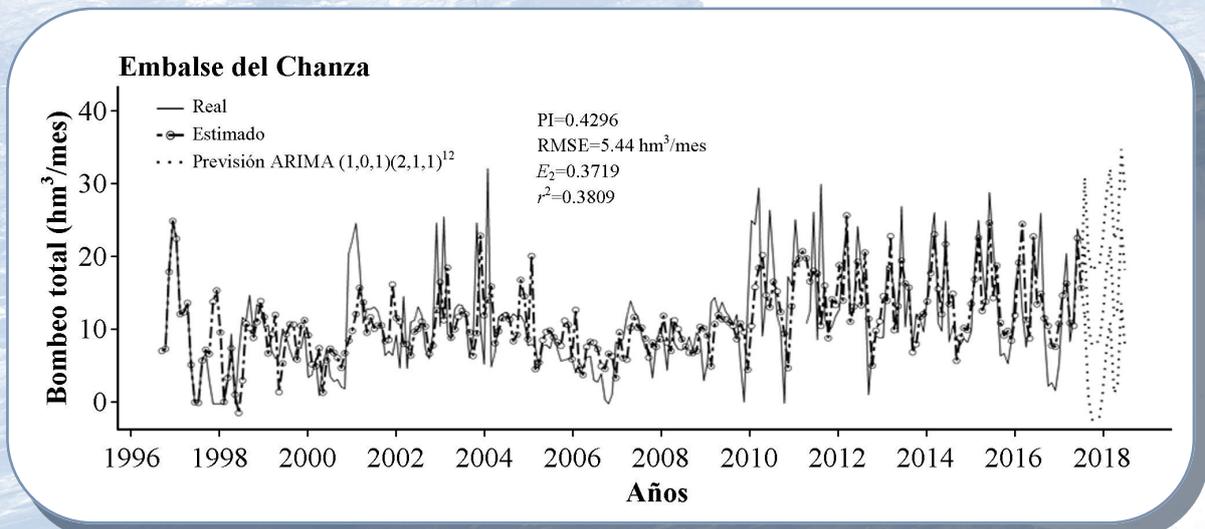
Presa del embalse del Chanza (07/03/2018)



Aguas abajo de la presa del Embalse del Chanza. Al fondo el bombeo del Bocachanza y la confluencia con el río Guadiana (07/03/2018)



Aportación (hm³/mes) del embalse del Chanza en el periodo 2003-2012. El cuadro rojo indica la fase de validación de un modelo de Red Neuronal Artificial (RNC). Se indican las magnitudes de evaluación del modelo: índice de persistencia (PI); error cuadrático medio (RMSE); índice de eficiencia (E_2); coeficiente de determinación (r^2)



Bombeo total (hm³/mes) desde el embalse del Chanza en el periodo 1996-2017. Se indica la previsión del modelo ARIMA (1,0,1)(2,1,1)¹² ± límites de confianza al 95% (líneas punteadas) así como las magnitudes de evaluación del modelo: índice de persistencia (PI); error cuadrático medio (RMSE); índice de eficiencia (E_2); coeficiente de determinación (r^2)



Arroyo del Albahacar

País: España
Coordenadas: 37° 43'N 7° 19'W
Estación de aforo: 4173 (ROEA)

Caudal máximo

246 m³/s

Caudal mínimo

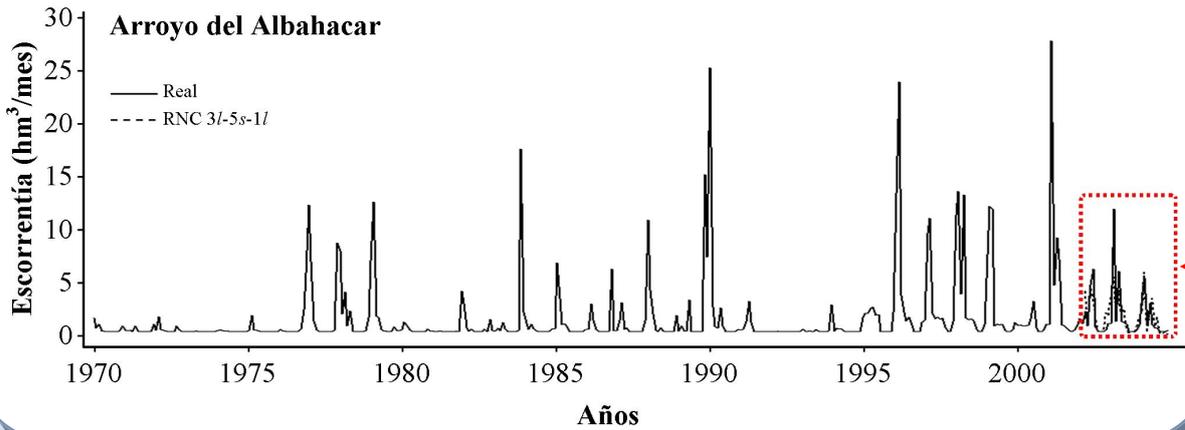
0 m³/s



Arroyo del Albahacar a su paso por la carretera provincial HU-5401 (14/03/2018)



Estación de aforo (14/03/2018)

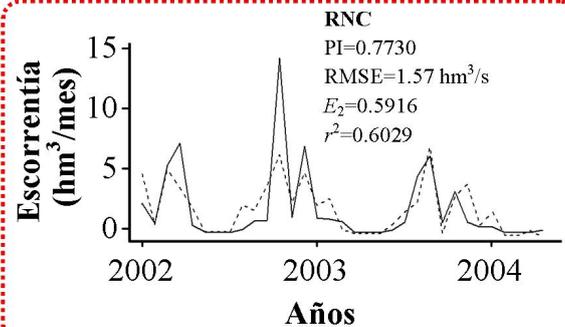


Escorrentía (hm³/mes) del arroyo del Albahacar en el periodo 1970-2004. El cuadro rojo indica la fase de validación de un modelo de Red Neuronal Artificial (RNC)



Parámetros de calidad del agua

Parámetro	14/03/2018
Temperatura	15.6 °C
Potencial redox	141 mV
Conductividad	296 µS/cm
pH	6.1
Oxígeno disuelto	5.4 mg/l



Validación del modelo de Red Neuronal. Se indican las magnitudes de evaluación del modelo: índice de persistencia (PI); error cuadrático medio (RMSE); índice de eficiencia (E₂); coeficiente de determinación (r²)

Rivera Cobica

País: España
Coordenadas: 37° 38'N 7° 15'W
Estación de aforo: 4161 (ROEA); CR3-05 (SAIH)

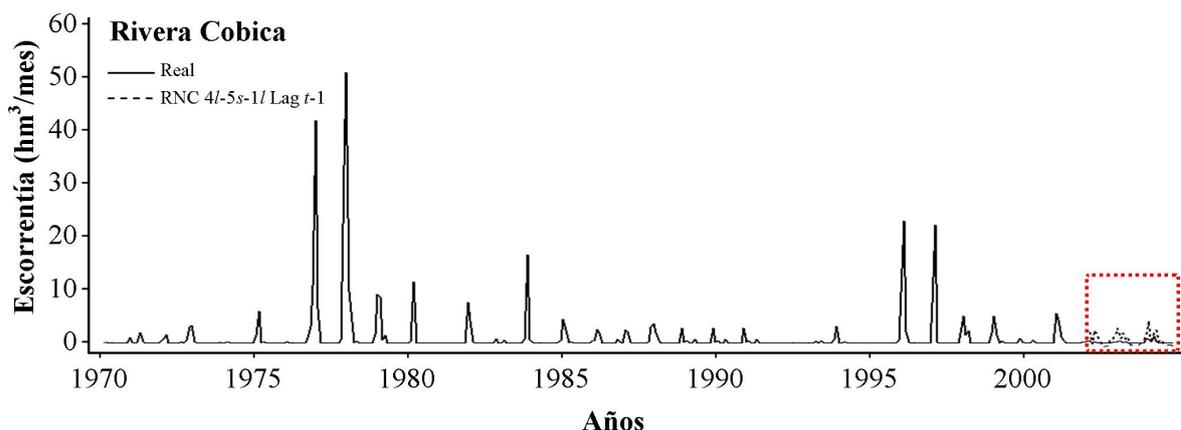
Caudal máximo	285 m ³ /s	Caudal mínimo	0 m ³ /s
---------------	-----------------------	---------------	---------------------



Rivera Cobica a su paso por la carretera provincial HU-5401 (14/03/2018)



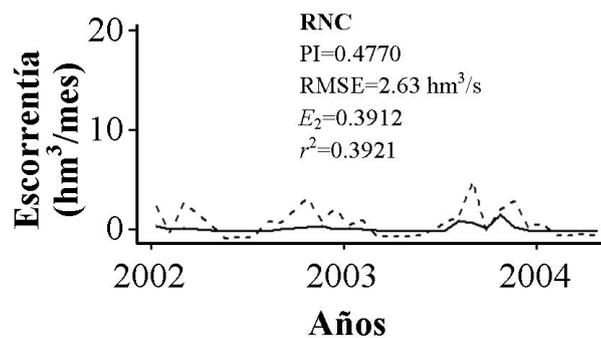
Rivera Cobica a su paso por la carretera provincial HU-5401 (12/06/2018)



Escorrentía (hm³/mes) de la Rivera Cobica en el periodo 1970-2004. El cuadro rojo indica la fase de validación de un modelo de Red Neuronal Artificial (RNC)

Parámetros de calidad del agua

Parámetro	14/03/2018	12/06/2018
Temperatura	16.6 °C	27.7 °C
Potencial redox	431 mV	549 mV
Conductividad	603 μS/cm	2330 μS/cm
pH	3.2	2.4
Oxígeno disuelto	5.9 mg/l	7.9 mg/l



Validación del modelo de Red Neuronal. Se indican las magnitudes de evaluación del modelo: índice de persistencia (PI); error cuadrático medio (RMSE); índice de eficiencia (E_2); coeficiente de determinación (r^2)



Rivera de Malagón

País: España

Coordenadas: 37° 41'N 7° 16'W

Estación de aforo: 4172 (ROEA); CR3-04 (SAIH)

Caudal máximo

778 m³/s

Caudal mínimo

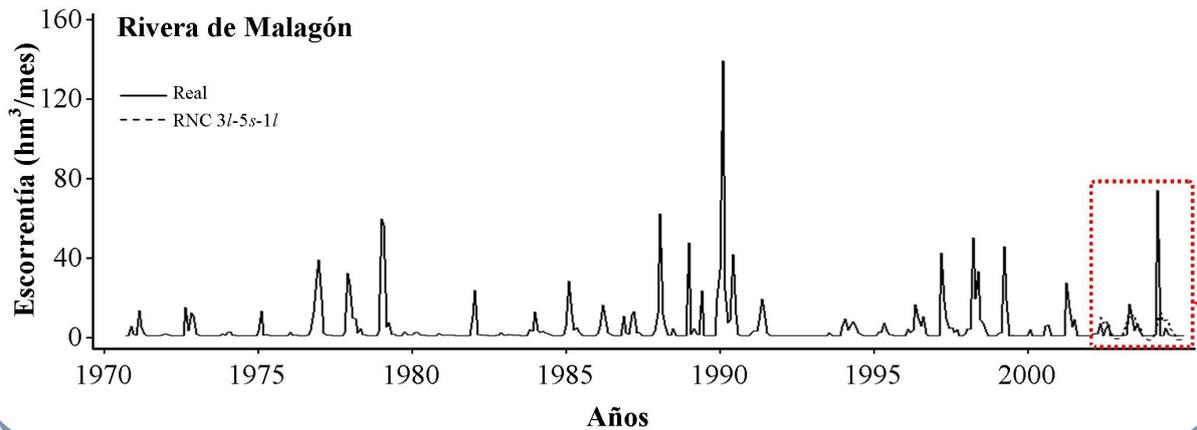
0 m³/s



Rivera del Malagón a su paso por la carretera provincial HU-5401 (14/03/2018)



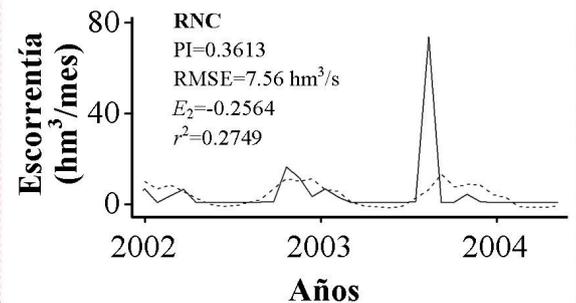
Rivera del Malagón. Puente sobre el camino vecinal entre la HU-7401 y la H-124 (12/06/2018)



Escorrentía (hm³/mes) de la Rivera de Malagón en el periodo 1970-2004. El cuadro rojo indica la fase de validación de un modelo de Red Neuronal Artificial (RNC)

Parámetros de calidad del agua

Parámetro	14/03/2018	12/06/2018
Temperatura	16.7 °C	19.5 °C
Potencial redox	144.4 mV	180 mV
Conductividad	166.5 µS/cm	221 µS/cm
pH	5.9	8.3
Oxígeno disuelto	6.4 mg/l	7.5 mg/l



Validación del modelo de Red Neuronal. Se indican las magnitudes de evaluación del modelo: índice de persistencia (PI); error cuadrático medio (RMSE); índice de eficiencia (E₂); coeficiente de determinación (r²)



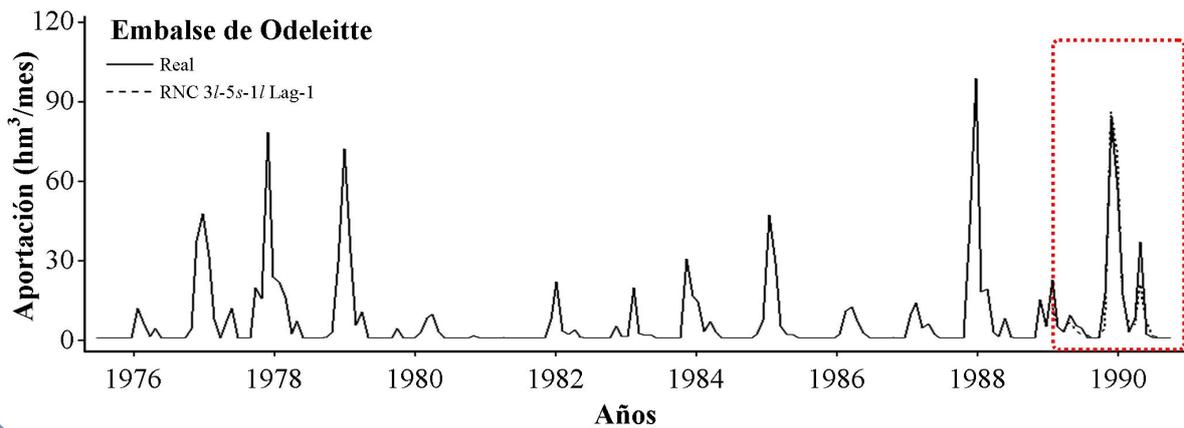
Embalse de Odeleite

País: Portugal
Coordenadas: 37° 19'N 7° 31'W
Estación de aforo: 30L/01A

Superficie de la cuenca	352 km ²	Superficie del vaso	680 ha
Capacidad	130 hm ³	Año construcción	1996



Vista general del embalse de Odeleite desde la coronación de la Presa a su paso por la carretera IC-27 (14/04/2018)

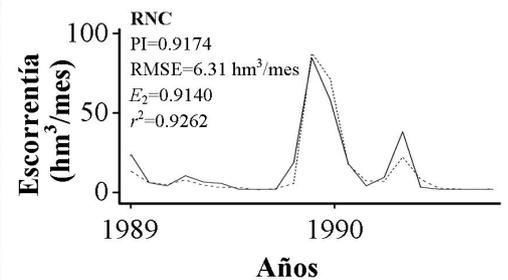


Aportación (hm³/mes) del embalse de Odeleite en el periodo 1976-1990. El cuadro rojo indica la fase de validación de un modelo de Red Neuronal Artificial (RNC). Se indican las magnitudes de evaluación del modelo: índice de persistencia (PI); error cuadrático medio (RMSE); índice de eficiencia (E₂); coeficiente de determinación (r²)



Parámetros de calidad del agua. Bajo la presa de Odeleite, en el cruce con la carretera Odeleite-Alcarias (14/04/2018)

Parámetro	14/04/2018
Temperatura	14.3 °C
Potencial redox	371 mV
Conductividad	199.7 μS/cm
pH	9.19
Oxígeno disuelto	4.5 mg/l



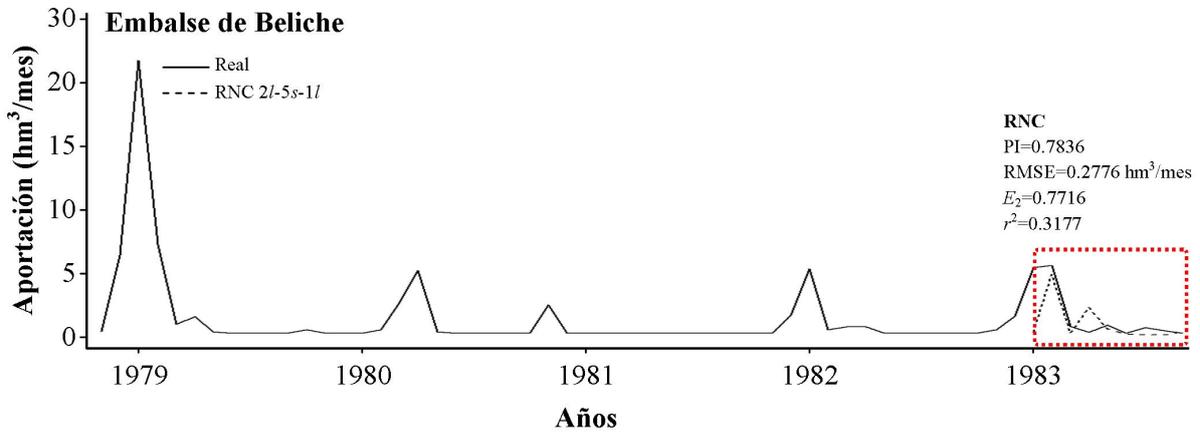
Validación del modelo de Red Neuronal. Se indican las magnitudes de evaluación del modelo: índice de persistencia (PI); error cuadrático medio (RMSE); índice de eficiencia (E₂); coeficiente de determinación (r²)



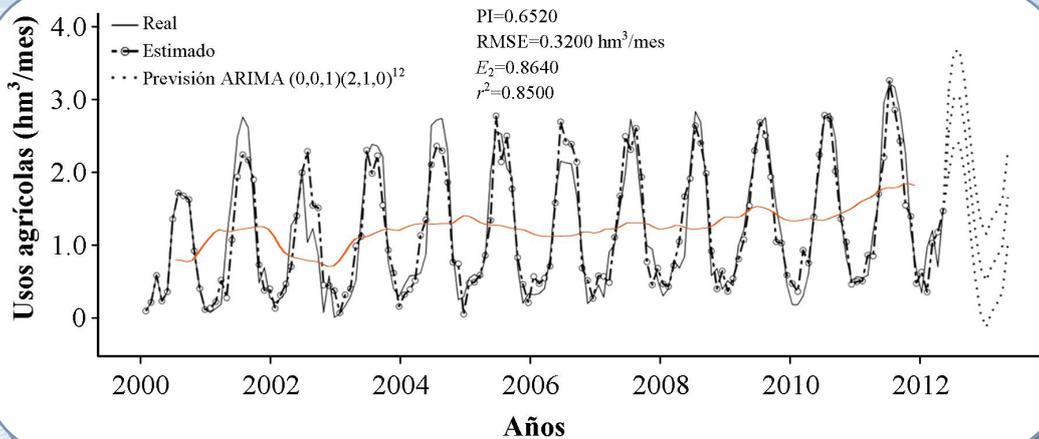
Embalse de Beliche

País: Portugal
Coordenadas: 37° 16'N 7° 30'W
Estación de aforo: 30L/02A

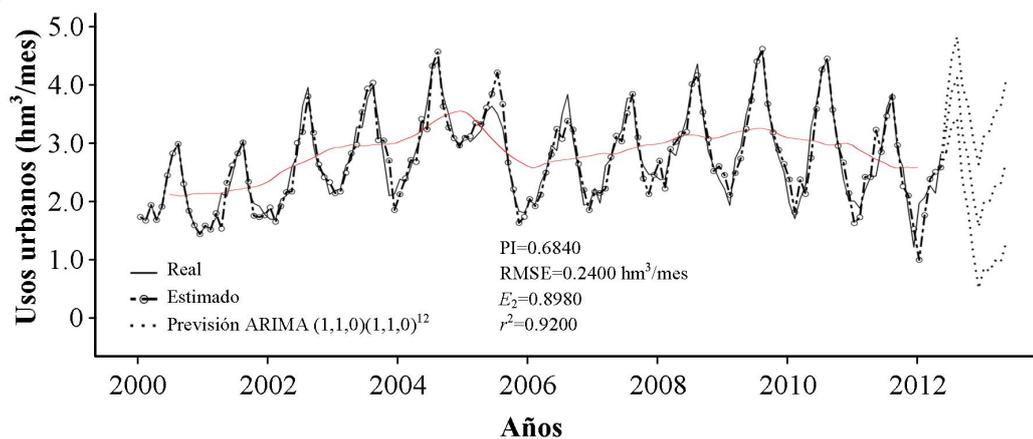
Superficie de la cuenca	117 km ²	Superficie del vaso	292 ha
Capacidad	48 hm ³	Año construcción	1986



Aportación (hm³/mes) del embalse de Beliche en el periodo 1979-1983. El cuadro rojo indica la fase de validación de un modelo de Red Neuronal Artificial (RNC). Se indican las magnitudes de evaluación del modelo: índice de persistencia (PI); error cuadrático medio (RMSE); índice de eficiencia (E_2); coeficiente de determinación (r^2)



Usos agrícolas(hm³/mes) del embalse de Beliche en el periodo 2000-2012. Se indican las magnitudes de evaluación del modelo ARIMA: índice de persistencia (PI); error cuadrático medio (RMSE); índice de eficiencia (E_2); coeficiente de determinación (r^2). La línea roja indica la tendencia general de la serie



Usos urbanos (hm³/mes) del embalse de Beliche en el periodo 2000-2012. Se indican las magnitudes de evaluación del modelo ARIMA: índice de persistencia (PI); error cuadrático medio (RMSE); índice de eficiencia (E_2); coeficiente de determinación (r^2). La línea roja indica la tendencia general de la serie



Ribeira do Vasção

País: Portugal

Coordenadas: 37° 31'N 7° 34'W

Estación de aforo: 28L/02H

Caudal máximo

490 m³/s

Caudal mínimo

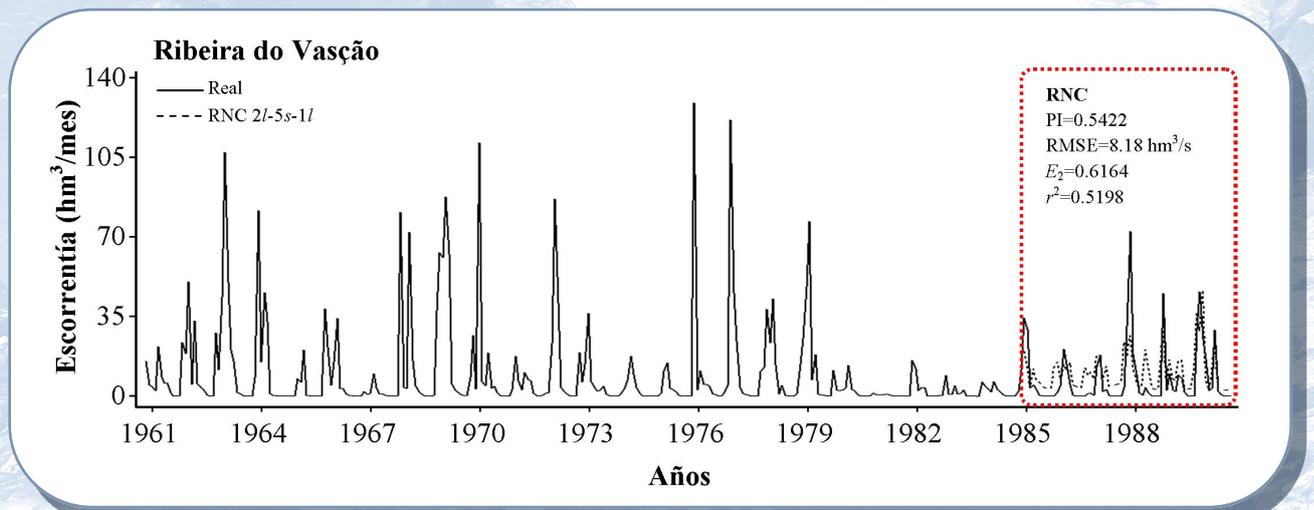
0 m³/s



Ribeira do Vasção a su paso por la carretera IC-27
(14/04/2018)



Puente sobre la Ribeira do Vasção (05/06/2018)



Escorrentía (hm³/mes) de la Ribeira de Vasção en el periodo 1961-1990. El cuadro rojo indica la fase de validación de un modelo de Red Neuronal Artificial (RNC). Se indican las magnitudes de evaluación del modelo: índice de persistencia (PI); error cuadrático medio (RMSE); índice de eficiencia (E₂); coeficiente de determinación (r²)

Parámetros de calidad del agua

Parámetro	14/04/2018	05/06/2018
Temperatura	14.4 °C	21.1 °C
Potencial redox	148.1 mV	133.0 mV
Conductividad	140.8 μS/cm	247.0 μS/cm
pH	8.7	7.6
Oxígeno disuelto	6.6 mg/l	7.4 mg/l



Toma de muestras para la evaluación puntual de la calidad del agua (05/06/2018)



Pulo do Lobo

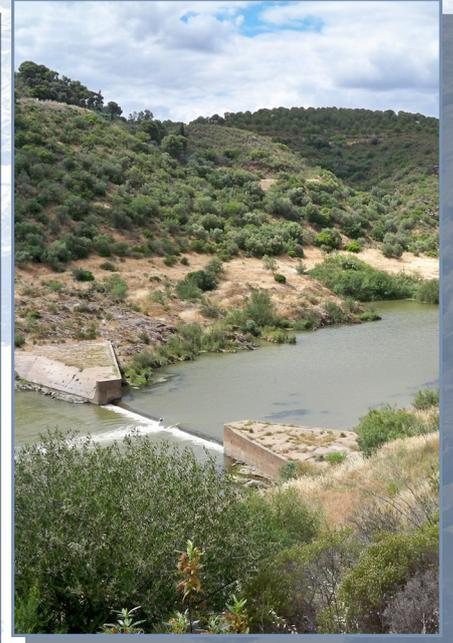
País: Portugal
Coordenadas: 37° 48'N 7° 37'W
Estación de aforo: 27L/01H

Caudal máximo

7752.5 m³/s

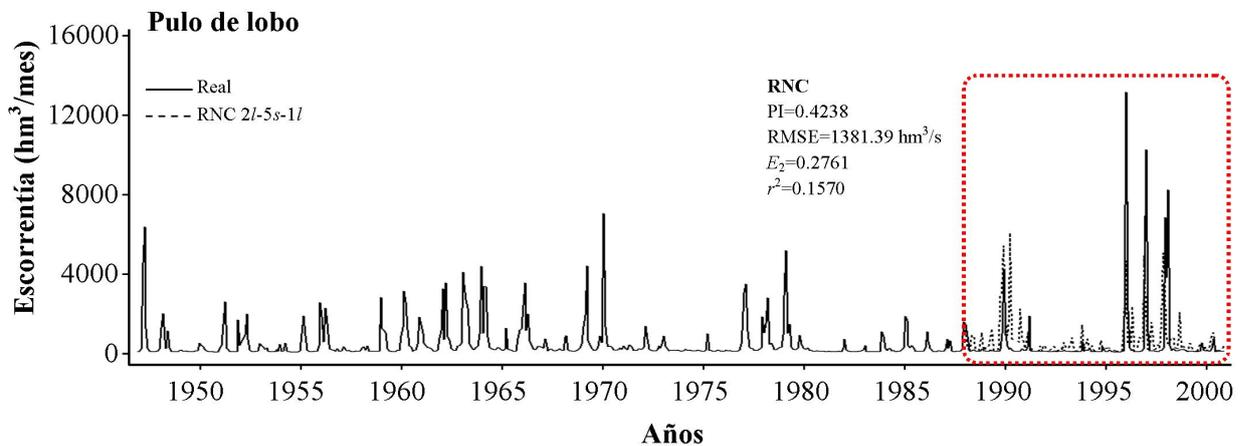
Caudal mínimo

0 m³/s



Pulo do Lobo. En el curso principal del río Guadiana desde la vertiente portuguesa (14/04/2018)

Estación de aforo desde la vertiente española (05/06/2018)



Escorrentía (hm³/mes) del Pulo de Lobo en el periodo 1946-2000. El cuadro rojo indica la fase de validación de un modelo de Red Neuronal Artificial (RNC). Se indican las magnitudes de evaluación del modelo: índice de persistencia (PI); error cuadrático medio (RMSE); índice de eficiencia (E₂); coeficiente de determinación (r²)

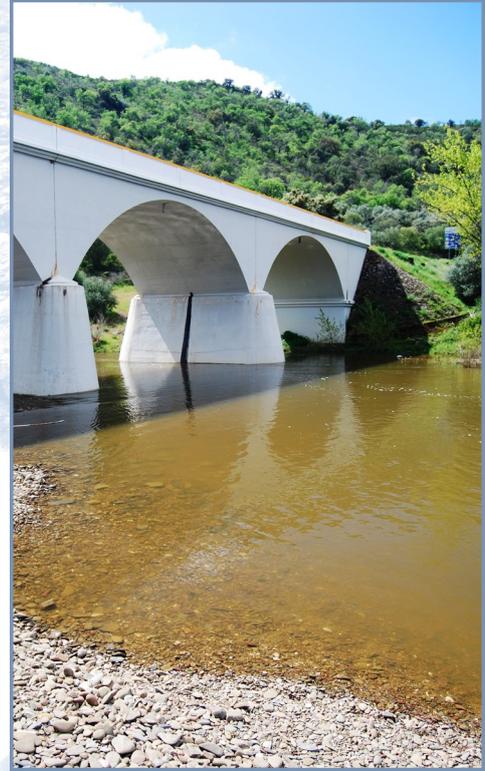
Parámetros de calidad del agua

Parámetro	14/04/2018	05/06/2018
Temperatura	16.2 °C	21.7 °C
Potencial redox	162.7 mV	194 mV
Conductividad	456 µS/cm	503 µS/cm
pH	8.1	8.3
Oxígeno disuelto	6.7 mg/l	9.5 mg/l



País: Portugal
Coordenadas: 37° 22'N 7° 31'W

Ribeira de Foupana



Parámetro	14/04/2018	05/06/2018
Temperatura	15.2 °C	20 °C
Potencial redox	163.3 mV	140 mV
Conductividad	143.8 µS/cm	243 µS/cm
pH	8.8	7.8
Oxígeno disuelto	6.6 mg/l	8.1 mg/l

Parámetros físico-químicos tomados en la Ribeira de Foupana en su cruce con la carretera N-122 (14/04/2018)

País: Portugal
Coordenadas: 37° 37'N 7° 40'W

Ribeira de Carreiras



Parámetro	14/04/2018	05/06/2018
Temperatura	16.6 °C	19.6 °C
Potencial redox	142.6 mV	132 mV
Conductividad	295 µS/cm	532 µS/cm
pH	8.4	7.9
Oxígeno disuelto	6.4mg/l	8.7 mg/l

Parámetros físico-químicos tomados en la Ribeira de Carreiras en su cruce con la carretera N-122 (14/04/2018)

País: España
Coordenadas: 37° 17'N 7° 24'W

Arroyo Grande



Parámetro	02/07/2018
Temperatura	20.6 °C
Potencial redox	140.5 mV
Conductividad	2.8 mS/cm
pH	8.5
Oxígeno disuelto	5.5 mg/l

Parámetros físico-químicos tomados en el arroyo Grande

País: España
Coordenadas: 37° 10'N 7° 22'W

Isla Canela (Caño del Pozo)



Parámetro	02/07/2018
Temperatura	30.8 °C
Potencial redox	117.5 mV
Conductividad	64.6 mS/cm
pH	8.4
Oxígeno disuelto	8.5mg/l

Parámetros físico-químicos tomados en Caño del Pozo
en su cruce con la carretera H-9021

País: Portugal
 Coordenadas: 37° 14'N 7° 26'W **Sapal de Castro Marim**



Parámetro	02/07/2018
Temperatura	27.7 °C
Potencial redox	124 mV
Conductividad	57.8 mS/cm
pH	8.2
Oxígeno disuelto	14.1 mg/l

Parámetros físico-químicos tomados en el Sapal de Castro Marim

País: España
 Coordenadas: 37° 11'N 7° 20'W **Isla Canela (Caño de Franco)**



Parámetro	02/07/2018
Temperatura	26.3°C
Potencial redox	103.0 mV
Conductividad	7.7 mS/cm
pH	8.5
Oxígeno disuelto	7.2 mg/l

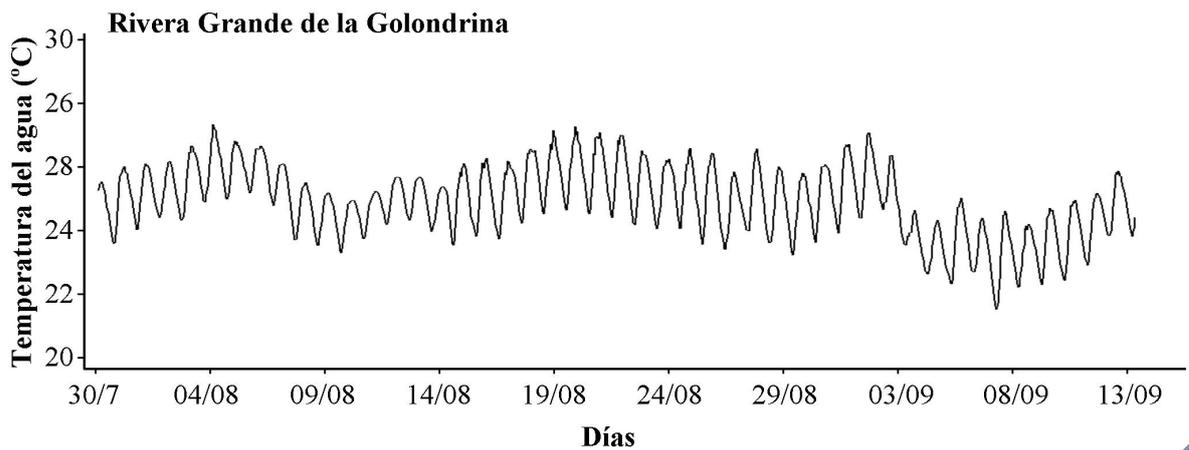
Parámetros físico-químicos tomados en Caño de Franco



País: España

Coordenadas: 37° 27'N 7° 26'W

Rivera Grande de la Golondrina



Temperatura del agua en la Rivera Grande de la Golondrina medida cada 15 minutos en el periodo comprendido entre el 30/7 y 14/9 de 2018

Parámetros físico-químicos

Parámetro	30/07/2018	14/09/2018
Temperatura	25.1 °C	25.9 °C
Potencial redox	113.1 mV	155.1 mV
Conductividad	402 µS/cm	761 µS/cm
pH	8.5	9.9
Oxígeno disuelto	6.9 mg/l	3.5 mg/l