



UNITED NATIONS
INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION



CTCN

CLIMATE TECHNOLOGY CENTRE & NETWORK

**METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN Y EVALUACIÓN DE CAUDALES
ECOLÓGICOS Y PLANES DE MANEJO DE CUENCAS EN PARAGUAY.**

APLICACIÓN A LA CUENCA PILOTO DEL RÍO TEBICUARY.

**DIRECTRICES PARA LA ELABORACIÓN DE UN PLAN DE
GESTIÓN INTEGRAL DE LA CUENCA DEL RÍO
TEBICUARY (PARAGUAY).**

4.1.2.	Modelos hidro-biológicos o de simulación de hábitat	4.4
4.2.	Definición de caudales ecológicos	4.7
4.2.1.	Caudales ambientales basados en métodos hidrológicos.....	4.7
4.2.2.	Caudales ambientales basados en modelos biológicos.....	4.10
4.2.3.	Síntesis y propuesta de caudales ecológicos en la cuenca.....	4.21
5.	USOS DEL AGUA. MODELO DE GESTIÓN	5.1
5.1.	Descripción del modelo de gestión.....	5.1
5.1.1.	Estructura e hipótesis del modelo	5.1
5.1.2.	Datos de entrada	5.2
5.1.3.	Resultados y explotación del modelo	5.3
5.1.4.	Reglas de explotación	5.4
5.2.	APLICACIÓN DEL MODELO SIMGES-TEBI.....	5.6
5.2.1.	Datos de entrada	5.6
5.2.2.	Resultados	5.9
5.2.3.	Análisis de sensibilidad.....	5.22
5.2.4.	Análisis del efecto del cambio climático	5.32
6.	RIESGOS HIDROCLIMÁTICOS. INUNDACIÓN	6.1
6.1.	Evaluación de la amenaza por inundación en la cuenca del río Tebicuary.....	6.1
6.1.1.	Implementación del modelo hidráulico.....	6.2
6.1.2.	Resultados	6.8
7.	CONCLUSIONES Y DIRECTRICES	7.1

APÉNDICE 1. CAMPAÑAS DE MEDICIÓN DE NIVELES Y CAUDALES EN LA CUENCA DEL RÍO TEBICUARY - ESTACIÓN DE ITURBE (RÍO TEBICUARY-MÍ)

APÉNDICE 2. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN

APÉNDICE 3. REGÍMENES DE CAUDALES POR SUBCUENCAS

ACRÓNIMOS

ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler

ALOS Mission: Advanced Optical Satellite Mission

ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

CRU: Climatic Research Unit

DINAC: Dirección Nacional de Aeronáutica Civil.

ETP: Evapotranspiración potencial.

GIRH: Gestión integral de recursos hídricos.

HEC-RAS: Hydrologic Engineering Center– River Analysis System

HPU: Hábitat Potencial Útil

IFIM: Instream Flow Incremental Methodology

IPCC: Intergubernamental panel for Climate Change

IPH: Instituto de Pesquisas Hidráulicas

JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency

JRC: Joint Research Center

LEM: Logistic Equilibrium Model

LEM-DW: Logistic Equilibrium Model with Diffusive Wave

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NEX-GDDP: Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections

NS: coeficiente de Nash-Sutcliffe

MADES: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

METI: Ministry of Economy, Trade, and Industry (of Japan)

MDT: Modelo Digital del Terreno.

MGB: Modelo de Grandes Bacías

PGC: Planes de Gestión de Cuencas.

RCP: Representative Concentration Pathway

SEAM: Secretaria del Ambiente

TRMM: Tropical Rainfall Measurement Mission.

TS: Time-Series

UFRGS: Universidad Federal de Rio Grande do Sul

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

En el documento de “Propuesta de un Marco General para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y Adaptación al Cambio Climático en Paraguay” se definen las pautas y líneas generales para la elaboración de Planes de Gestión de Cuencas (PGC).

Los diferentes estudios que constituyen la presente consultoría se encuentran entre los elementos más relevantes para conformar el PGC del Río Tebicuary y son imprescindibles para una correcta redacción del mismo. No obstante, tal y como se establece en el citado marco general, el Plan debe incluir otros aspectos que van más allá de los alcances previstos para estos trabajos.

Si bien el presente documento se conforma como la presentación de una serie de directrices/recomendaciones para la redacción de un PGC, en realidad sus alcances sobrepasan este punto, pudiendo considerarse como un avance del Plan para la Cuenca del río Tebicuary en aquellos temas que han sido objeto de la consultoría.

En este sentido, tiene también el objetivo de presentar de forma unificada las versiones más actualizadas de los estudios desarrollados, presentando de forma secuencial sus resultados y conclusiones, así como las recomendaciones que se pueden derivar de los mismos.

Cabe destacar que se incluyen los resultados de dos nuevos análisis relevantes, no integrados en la documentación anterior: un modelo de gestión de recursos hídricos de la cuenca del río Tebicuary y un estudio hidráulico para la caracterización de la amenaza de inundación en un tramo significativo de la cuenca. El primero de ellos resulta especialmente útil para la elaboración de un futuro PGC al permitir establecer la sensibilidad del balance hídrico del sistema ante los usos del agua más relevantes en la cuenca.

2. INFORMACIÓN DISPONIBLE. CAMPAÑAS DE CAMPO

En este capítulo se presenta la recopilación y análisis de la información disponible en la cuenca del río Tebicuary (Paraguay). Cabe mencionar que esta recopilación incluye los datos y estudios previos relacionados con la temática de la presente consultoría, así como las necesidades de información para su desarrollo y las campañas para mejorar/completar este aspecto.

2.1. Red hidrográfica

La cuenca del Río Tebicuary es la mayor cuenca hidrográfica de la Región Oriental del Paraguay, y se encuentra entre los departamentos de Paraguarí, Itapúa, Caaguazú, Guairá, Caazapá, Ñeembucú, Misiones y Cordillera (Figura 1).

La superficie de la cuenca es de aproximadamente 28,423 Km² (equivale al 6.5 % del país y 16.5 % de la Región Oriental). La longitud de su curso principal es de aproximadamente 500 Km y desemboca en el Río Paraguay en el Km 147 (a contar de la Confluencia Paraguay-Paraná), unos 40 Km aguas arriba del Puerto de Pilar.

Los afluentes más importantes en su margen derecha son el Río Tebicuary-mi, Río Pirapó, Río Negro, Arroyo Cabacúa y Arroyo Mbuyapey; mientras que en su margen izquierda está alimentado por el Arroyo Aguaray, Arroyo San Roque, Arroyo Gueyracay, Arroyo Tajy, entre otros.

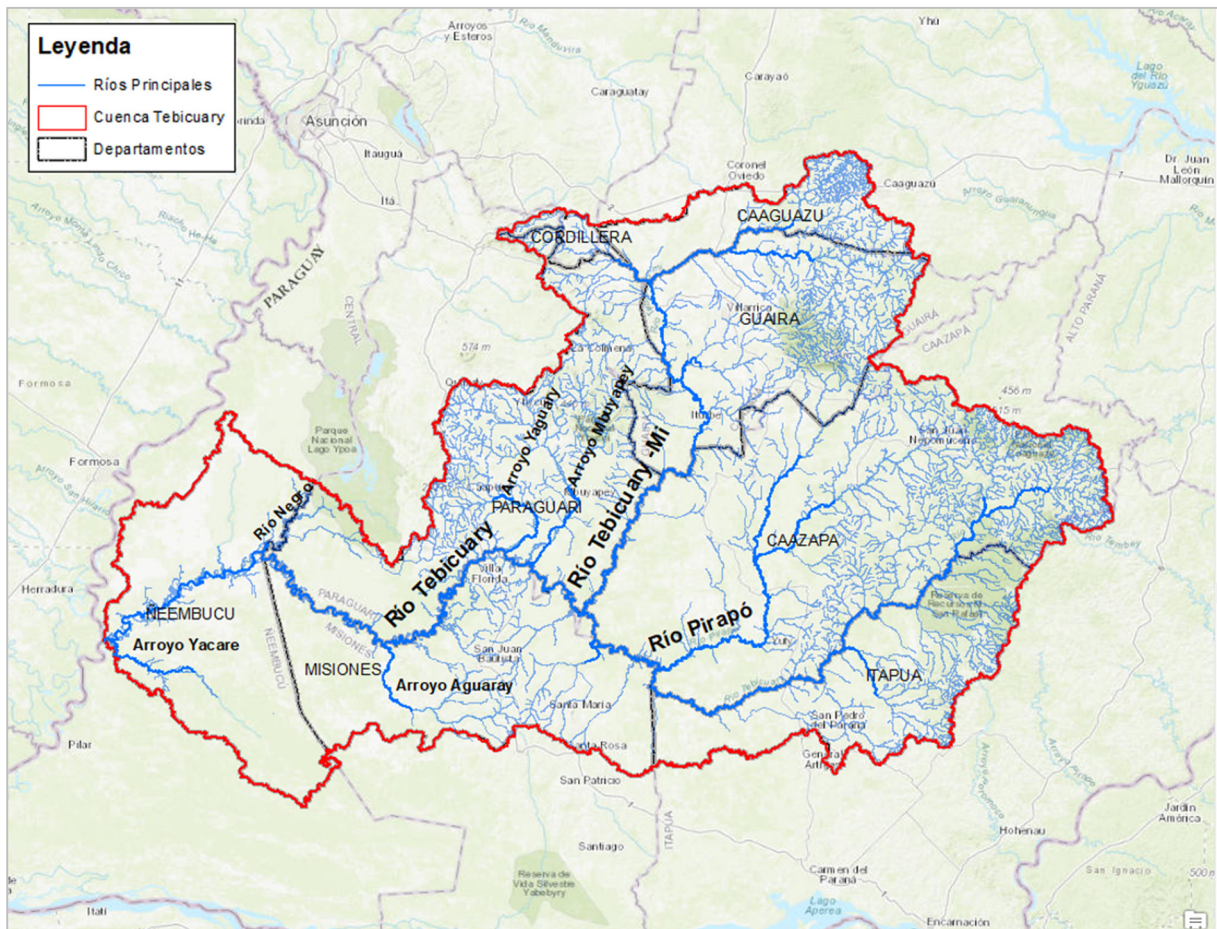


Figura 1. Localización de la cuenca del Río Tebicuary y red hidrográfica.

2.2. Topografía y definición de subcuencas. Parámetros básicos

Para la realización de este estudio se ha contado con topografía de la cuenca obtenida de dos bases de datos:

- Modelo digital del terreno (MDT) de la base de datos ASTER, publicado dentro de una iniciativa conjunta de la NASA (EEUU) y el METI (Japón) en octubre de 2011, y que cuenta con una resolución de 30 m (Figura 2).
- MDT de la ALOS Mission, realizada por la JAXA (Japón) en colaboración con la NASA (EEUU) y que cuenta con una resolución de 12.5 m (Figura 3).

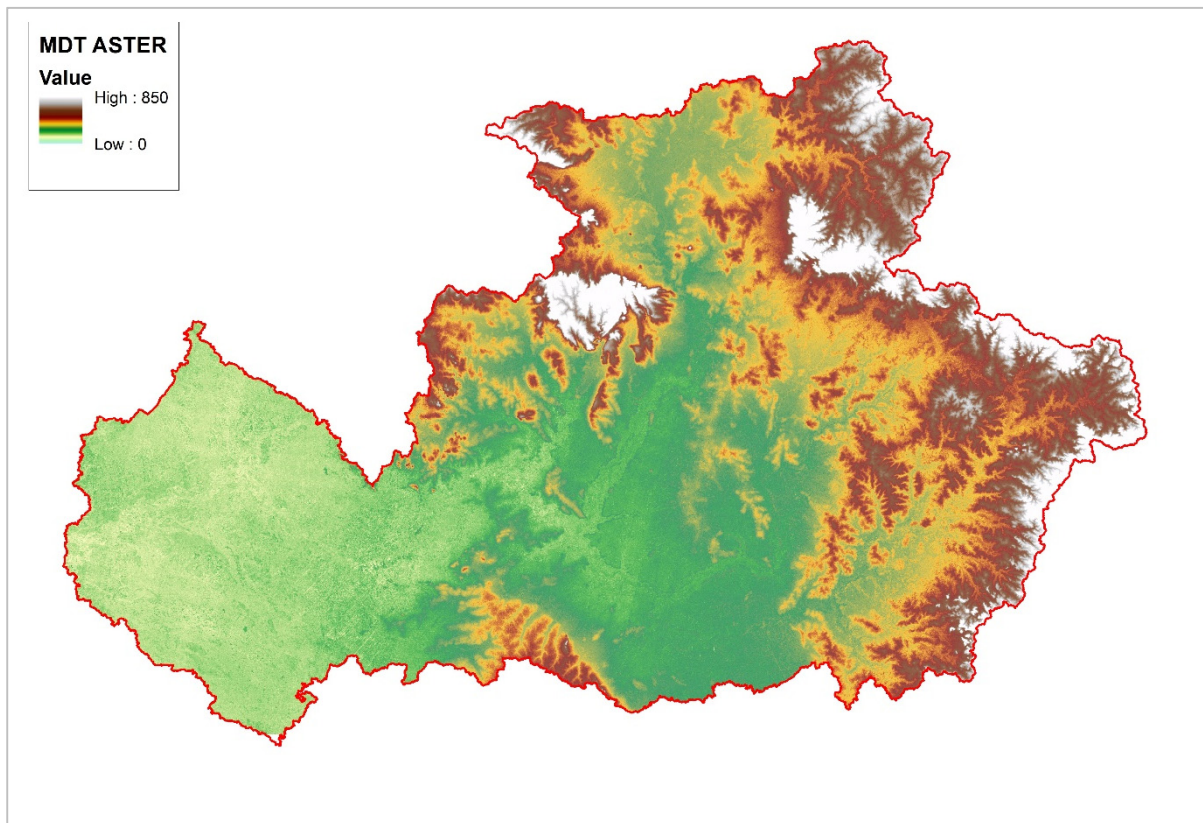


Figura 2. MDT ASTER de resolución 30 m.

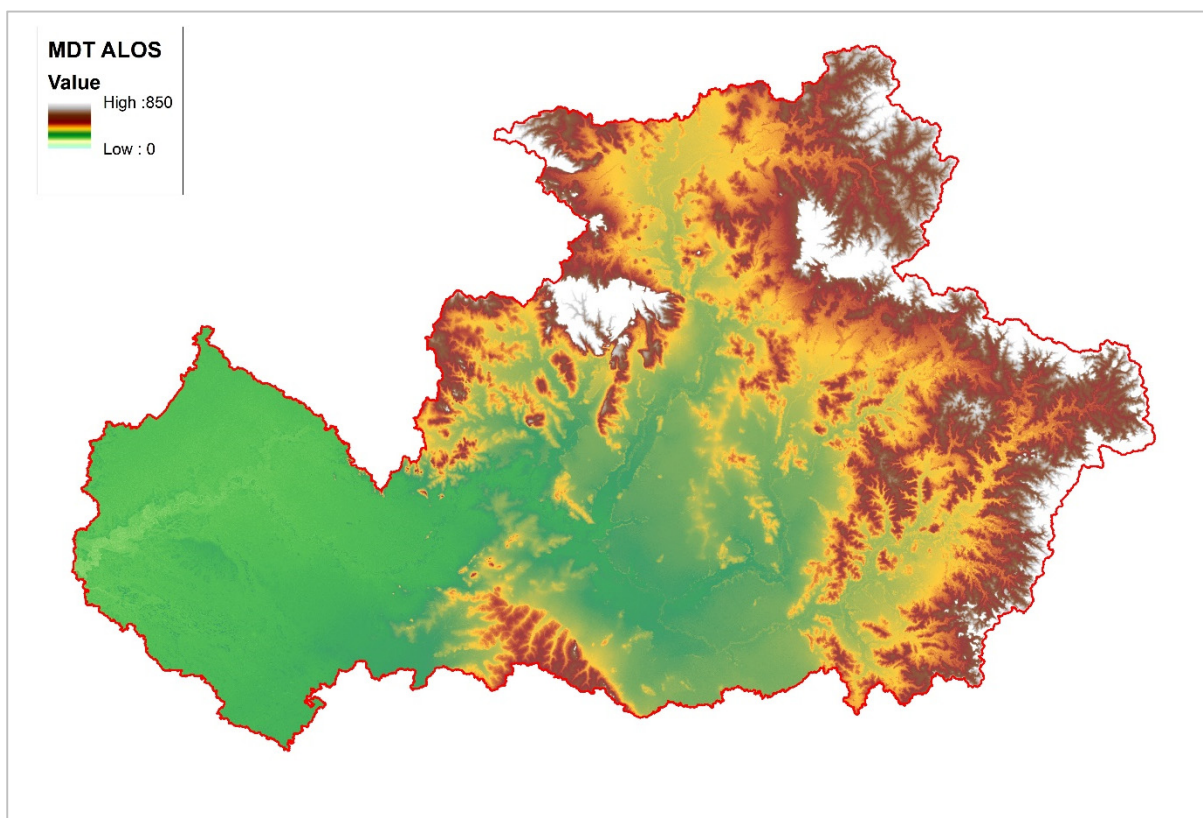


Figura 3. MDT ALOS de resolución 12.5 m.

La definición de las subcuencas se ha realizado a partir de la red hidrográfica y la topografía disponible, MDTs. Esta información ha sido importada al paquete Arc-Swat, que cuenta con algoritmos para la definición de subcuencas. Teniendo en cuenta el marco del proyecto, la información disponible y el grado de discretización necesario para elaborar una herramienta de gestión de los recursos hídricos, objetivo último del proyecto, se ha considerado adecuado dividir la cuenca del Tebicuary en nueve subcuencas, tal y como se muestra en la Figura 4.

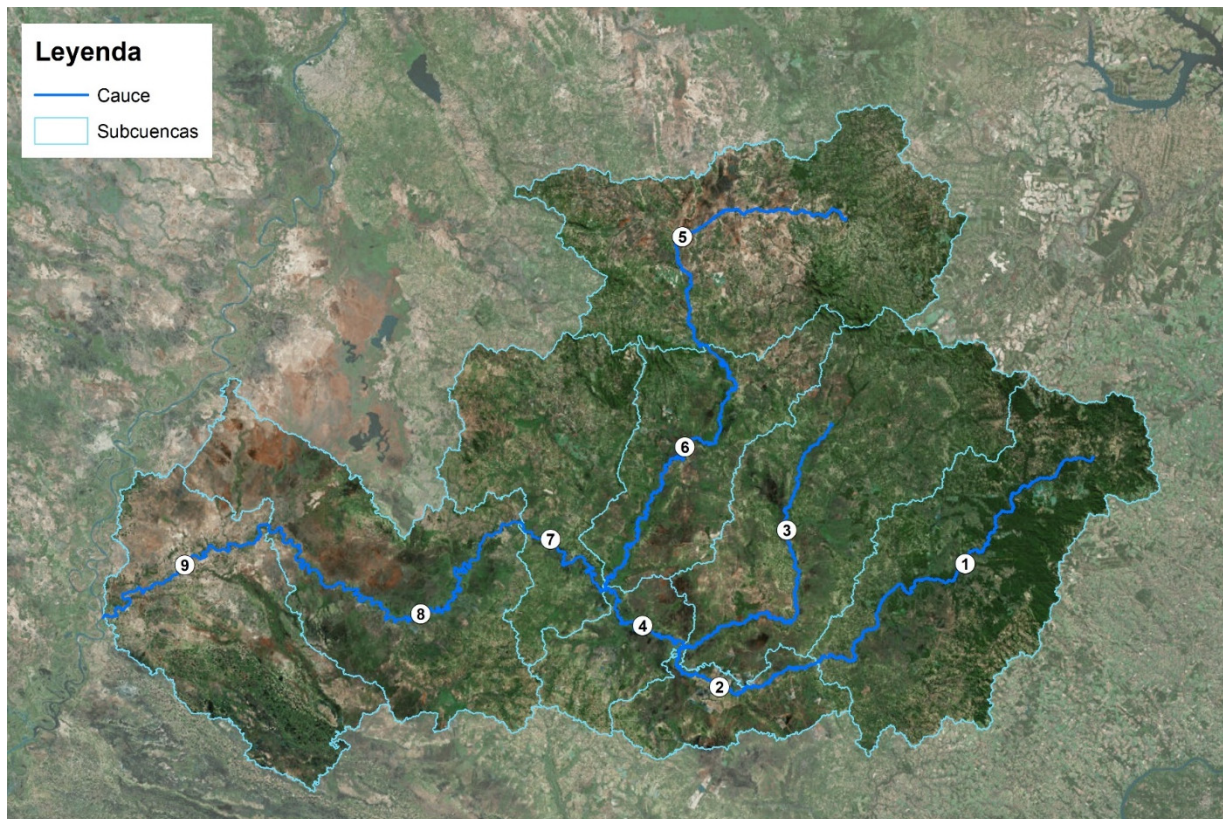


Figura 4. Subcuencas consideradas para el modelado de la cuenca del Tebicuary. Ver equivalencia de los números en el texto principal.

Reducir más esta cifra habría supuesto crear unidades de gestión muy grandes, con usos y regímenes de caudales muy diferentes, mientras que aumentarla supone multiplicar la complejidad de los modelos sin ampliar necesariamente la información que contiene, limitada por la cantidad y calidad de los datos disponibles.

Las características principales de las subcuencas generadas se recogen en la Tabla 2 y en las Figuras 5 a 7. Los números de la Figura 4 se corresponden con la siguiente hidrotoponimia (Tabla 1):

SUBCUENCA	NOMBRE EXTENSO-DESCRIPCIÓN
SC-1	Alto Tebicuary I (hasta Yuty aprox.)
SC-2	Alto Tebicuary II (hasta confluencia del Pirapó)
SC-3	Cuenca del Pirapó
SC-4	Medio Tebicuary I
SC-5	Alto Tebicuary Mi (hasta Iturbe aprox.)
SC-6	Bajo Tebicuary Mi
SC-7	Medio Tebicuary II (hasta Villa Florida)
SC-8	Bajo Tebicuary I
SC-9	Bajo Tebicuary II

Tabla 1. Hidrotoponimia utilizada en cada subcuenca.

En primer lugar, se observa que las subcuencas consideradas oscilan entre 1000 y 5000 km² si bien las principales, considerando la n^o 2 y 4 como unidades de transición, tienen en torno a 4000 km². Posiblemente el rasgo más característico de la cuenca en conjunto (28,423.37 km²) sea la alta sinuosidad, que tiene un valor medio de 2.1 y llega a valer 2.73 en la subcuenca n^o 6, el bajo Tebicuary Mi. Las pendientes también son extremadamente bajas, llegando a ser casi despreciables en el tramo final del Alto Tebicuary (SC-6), antes de la confluencia con el Pirapó (que es también la subcuenca de menor pendiente). Las anchuras medias del cauce se han obtenido promediando valores en una decena de puntos representativos de cada tramo, a partir de las fotos aéreas, y deben tomarse de forma orientativa. La longitud del valle es un parámetro cuya magnitud también puede variar en función del criterio de cálculo, y que en este caso se ha obtenido de dividir la longitud del cauce principal entre la sinuosidad; la anchura media se deriva de dividir el área entre dicha longitud. Estas dos dimensiones representativas tendrán importancia a la hora de plantear el modelado hidrológico de la cuenca, como se verá más adelante.

SUBCUENCA n°	SC-1	SC-2	SC-3	SC-4	SC-5
Anchura media del cauce (m)	25	60	30	80	35
Pendiente media cauce (%)	0.034	0.001	0.029	0.046	0.031
Longitud del cauce (km)	249.3	103.7	204.7	65.6	164.3
Sinuosidad (adim.)	2.09	2.14	2.25	2.09	1.82
Área de la subcuenca (km²)	4410.8	1104.2	3957.3	1014.2	4814.9
Longitud del valle (km)	119.4	48.5	91.1	31.5	90.4
Area trib. total (km²)	4410.8	5515.0	3957.3	10,486.5	4814.9
Anchura media valle (km)	36.9	22.8	43.5	32.2	53.2

SUBCUENCA n°	SC-6	SC-7	SC-8	SC-9
Anchura media del cauce (m)	65	150	155	220
Pendiente media cauce (%)	0.016	0.052	0.056	0.070
Longitud del cauce (km)	176.1	57.8	186.8	88.6
Sinuosidad (adim.)	2.73	1.71	1.95	1.50
Área de la subcuenca (km²)	2351.5	2727.0	4086.2	3957.3
Longitud del valle (km)	64.6	33.9	95.9	59.0
Area trib. total (km²)	7166.4	20,379.9	24,466.1	28,423.4
Anchura media valle (km)	36.4	80.5	42.6	67.0

Tabla 2. Características principales de cada subcuencas.

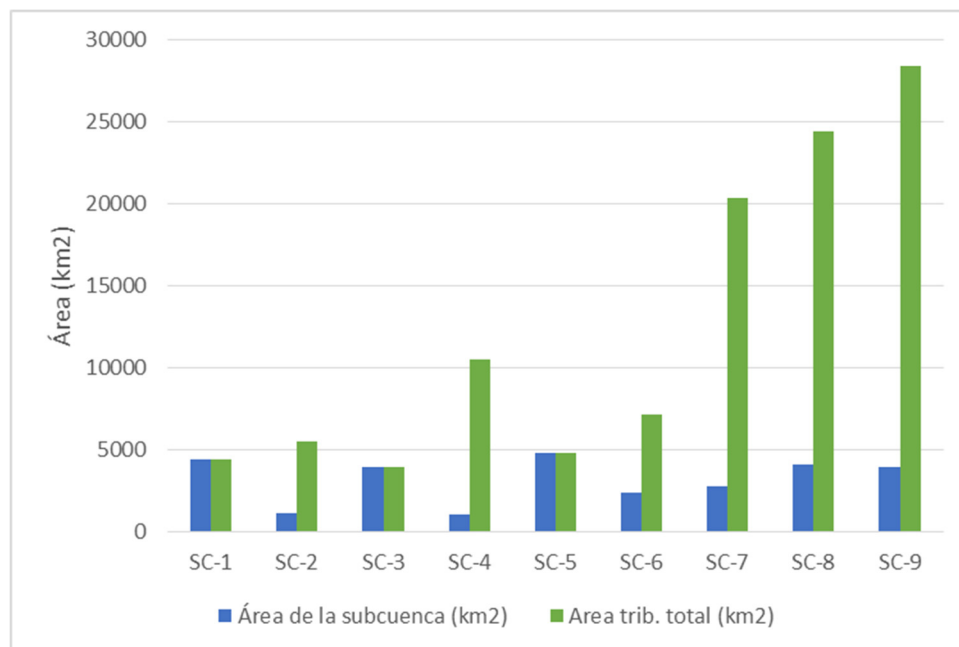


Figura 5. Representación del área y área total acumulada de cada subcuenca.

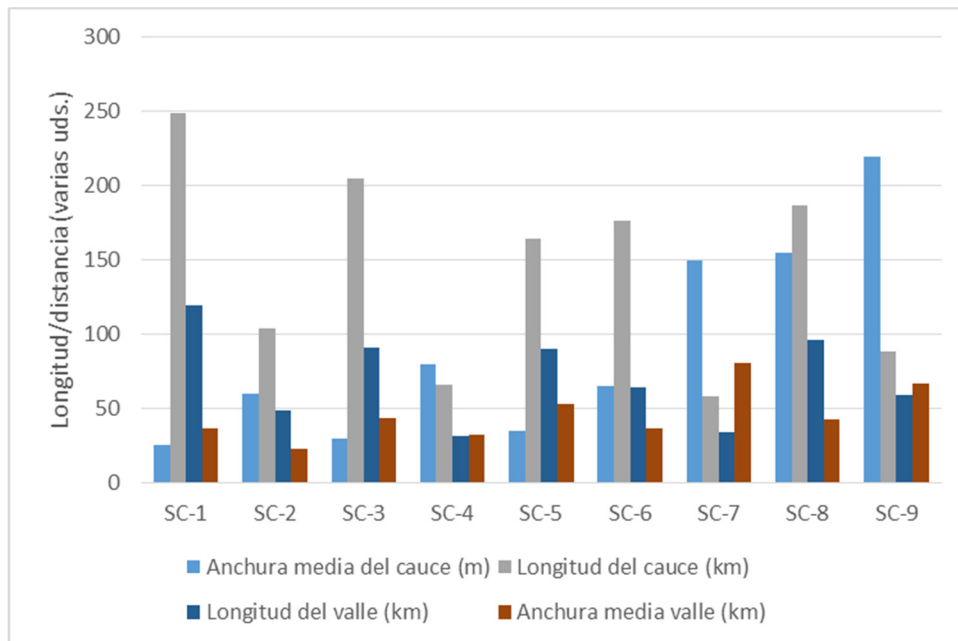


Figura 6. Distancias y longitudes características de las subcuencas consideradas.

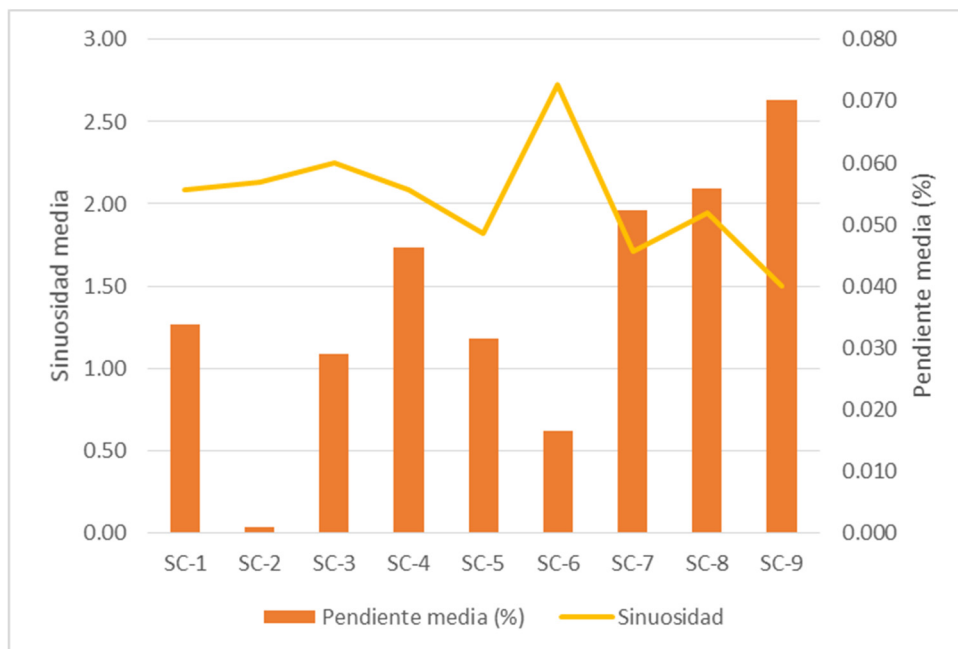


Figura 7. Pendiente media y sinuosidad de las subcuencas.

2.3. Datos de precipitación y ETP

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES) ha proporcionado los datos instrumentales de precipitación disponibles para este proyecto, que son los correspondientes a los siguientes pluviómetros situados dentro de la cuenca o en sus inmediaciones (ver localización en la Figura 8):

Nº	Nombre	Long.	Lat.	Elevación	Inicio	Fin
1	Villarrica	-56.438	-25.754	163	1982	2016
2	Coronel Oviedo	-56.378	-25.484	159	2002	2016
3	Caazapa	-56.355	-26.175	142	2000	2016
4	San Juan	-57.134	-26.670	131	1982	2016
5	Paraguari	-57.146	-25.627	116	2008	2016
6	Quiindy	-57.217	-25.967	181	1998	2004
7	Quyquyho	-56.983	-26.217	141	2010	2017

Tabla 3. Características de los pluviómetros disponibles.

Los datos son diarios y, en general (salvo los pluviómetros 6 y 7), cubren un periodo suficientemente amplio. El problema es la cobertura espacial de la cuenca, ya que no existe información de precipitaciones en los extremos este y oeste; la cuenca del Tebicuary Mi (SC-5 y SC-6) está muy bien representada.

Como complemento a esta información instrumental, se dispone de la base de datos Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM), con resolución espacial de 0.25° (aproximadamente 25 km, ver Figura 8) y temporal de 3 horas. Estos datos proceden de calibrar la información recogida por varios sensores remotos montados sobre un satélite en órbita no polar (el primero en incluir un radar de precipitación por microondas), financiado conjuntamente por la NASA (EEUU) y JAXA (su equivalente japonés). El periodo de cobertura es de 1998 a 2014 (17 años) y los datos originales han sido convertidos a diarios. La base de datos TRMM es de libre acceso y se puede descargar en: <https://trmm.gsfc.nasa.gov/>.

Los datos instrumentales poseen precisión y fiabilidad, así como buena resolución temporal (1 día); sin embargo, tienen baja resolución espacial y las series, aunque largas en algunos casos, no siempre se solapan. Por el contrario, los datos TRMM presentan buena resolución temporal (3 h) y espacial (25 km), pero su calidad está pendiente de evaluar. Además, las series no son muy largas (17 años) pero tienen todas las mismas fechas (1998-2014).

Ante estas circunstancias, se ha optado para este proyecto con emplear las series TRMM, pero previamente calibradas con los datos de los pluviómetros. De esta forma, se pueden aprovechar las ventajas que ofrece cada una de estas fuentes de información.

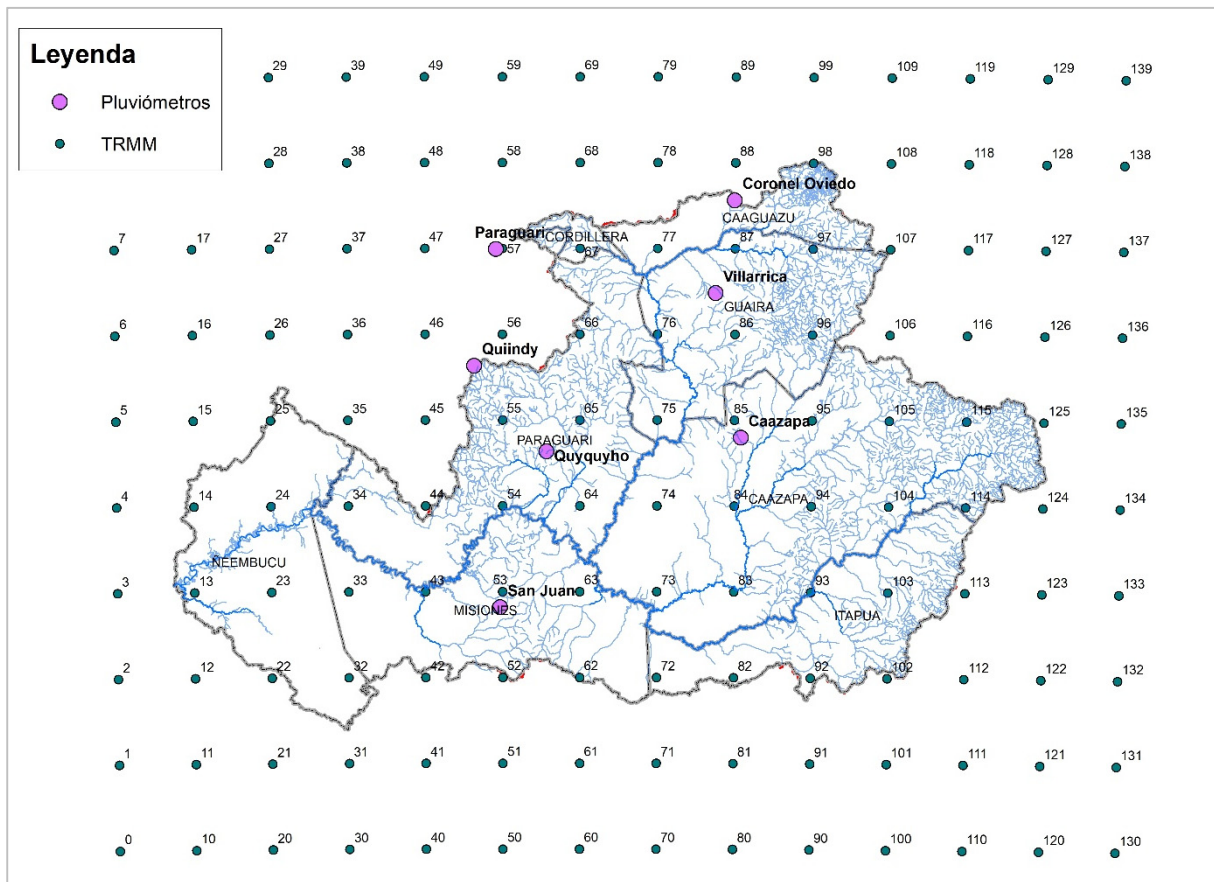


Figura 8. Situación de los pluviómetros empleados para este estudio, y de los puntos de la base de datos TRMM.

En cuanto a los datos de evapotranspiración potencial (ETP), estos han sido proporcionados por la Unidad de Investigación sobre el Clima de la Universidad de East Anglia (University of East Anglia Climatic Research Unit; Harris, I.C.; Jones, P.D. (2017): CRU TS4.01: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 4.01 of high-resolution gridded data of month-by-month variation in climate (Jan. 1901- Dec. 2016). Centre for Environmental Data Analysis, 04 December 2017). Estos datos son de libre acceso y se pueden descargar en: <http://www.cru.uea.ac.uk/>.

En concreto, se han descargado las series mensuales de ETP de la base CRU TS4.01 en la zona de estudio, con una resolución espacial de 0.5° (Figura 9). Aunque la serie abarca un periodo de más de 100 años, se ha extraído la información del periodo 1998-2014, que es la que se utilizará para las simulaciones hidrológicas. Posteriormente, los datos mensuales se han pasado a escala diaria (asumiendo un valor constante para cada mes), que es el paso de tiempo elegido para el modelo hidrológico.

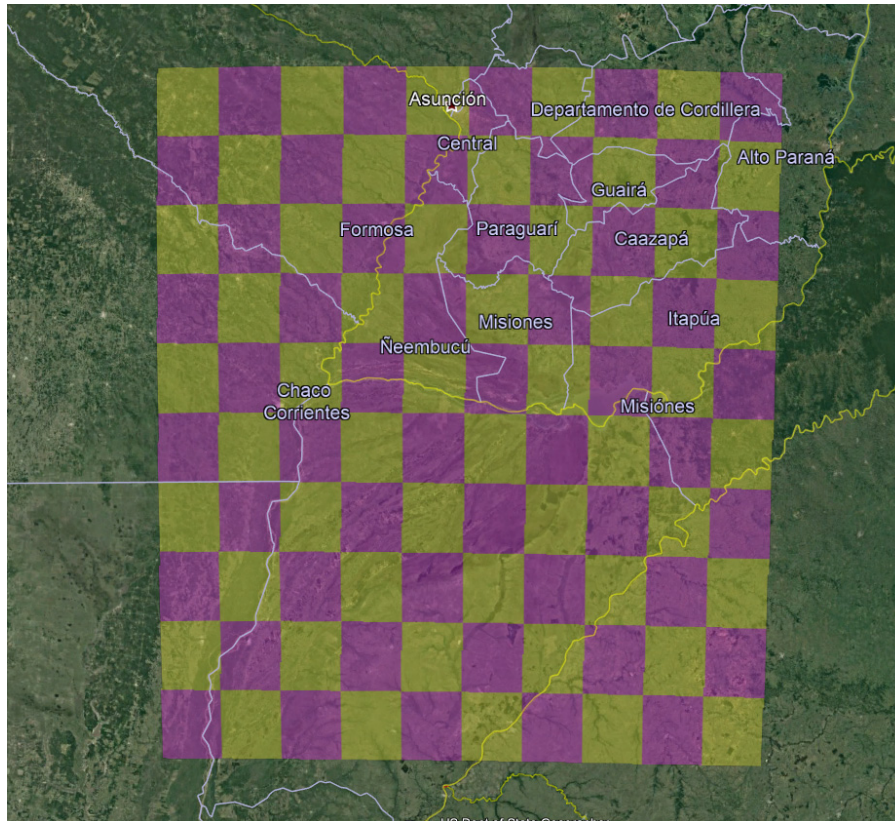


Figura 9. Rejilla de datos de evapotranspiración potencial CRU TS4.01 con resolución espacial de 0.5°, en la zona de estudio. Imagen de fondo: Google Earth.

2.4. Datos de caudales y secciones topográficas

En cuanto a la disponibilidad de datos hidrológicos, ésta resulta bastante escasa: únicamente existen tres estaciones de aforo en la cuenca del río Tebicuary (Villa Florida, Iturbe y Yuty) cuya localización se presenta en la Figura 10, y únicamente una de ellas, la estación de Villa Florida, dispone de una serie histórica de registros de más de 5 años.

En dicha estación, localizada en la cuenca media-baja del río, se dispone de datos diarios de caudales en dos periodos históricos, 1974-2002 y 2013-2017 (ver Figura 11), que han sido proporcionados por el MADES. En cuanto a las estaciones de Iturbe y Yuti, situadas en la cuenca alta del río, se dispone de datos diarios de niveles en el periodo 2016-2017 que se han obtenido de la página web de la DINAC (Dirección Nacional de Aeronáutica Civil).

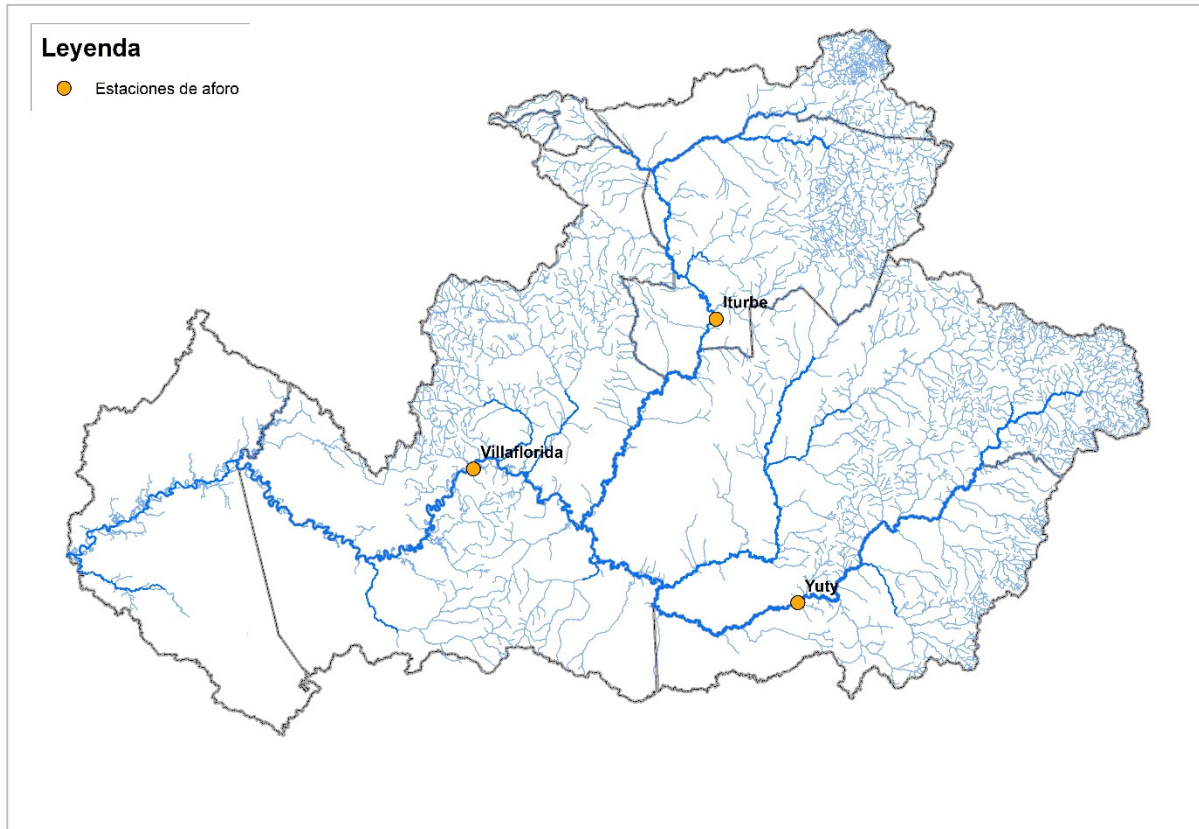


Figura 10. Localización de las estaciones de aforo de la cuenca del río Tebicuary.

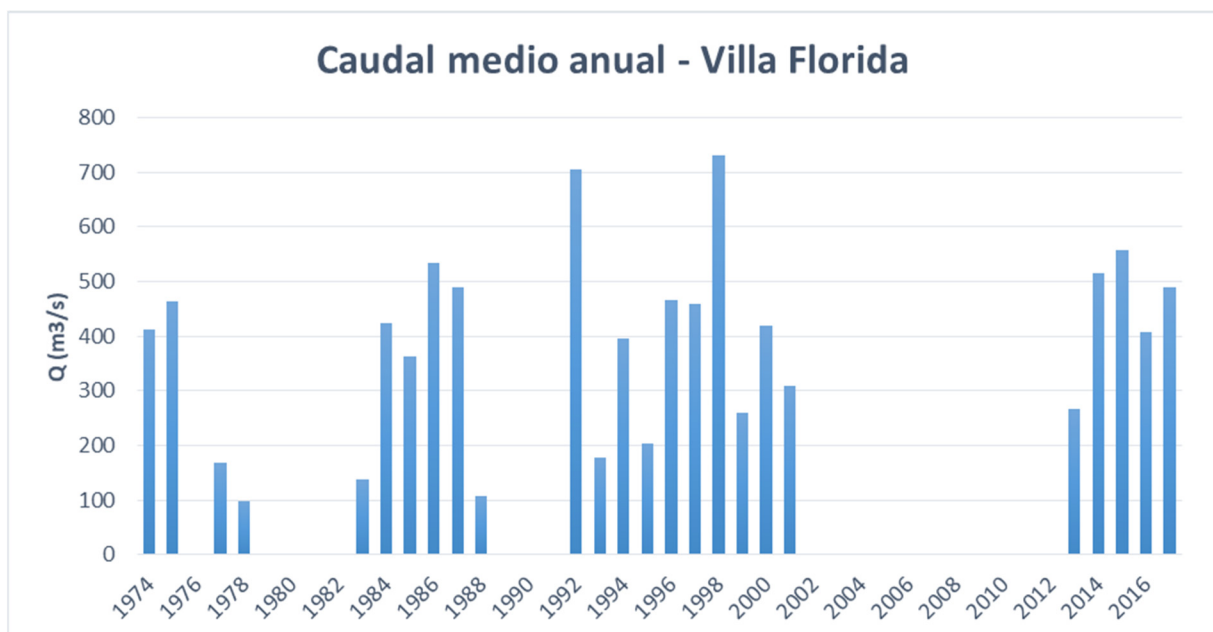


Figura 11. Caudal medio anual. Estación de aforo de Villa Florida. Periodos 1974-2002 y 2013-2017.

En cuanto a las secciones topográficas se dispone de las mismas en las estaciones de Villa Florida e Iturbe. En Villa Florida los datos de la sección se han obtenido de siguiente artículo (Conservación del caudal ambiental en la cuenca del río Tebicuary, Autores: Mongelós, S.; Wehrle, A.; Ferrira, F.; Idoyaga, R.; Caballero Gonzalo Céspedes Juan; Fariña, D).

La sección de medición se encuentra 500 m aguas abajo del puente en un tramo relativamente recto y con un ancho entre 135 m y 200 m, las profundidades varían con el nivel del río y el punto de la sección transversal.

En las siguientes figuras se presenta la localización de la sección de medición y las secciones que se obtuvieron.



Figura 12. Ubicación de la sección de medición en Villa Florida.

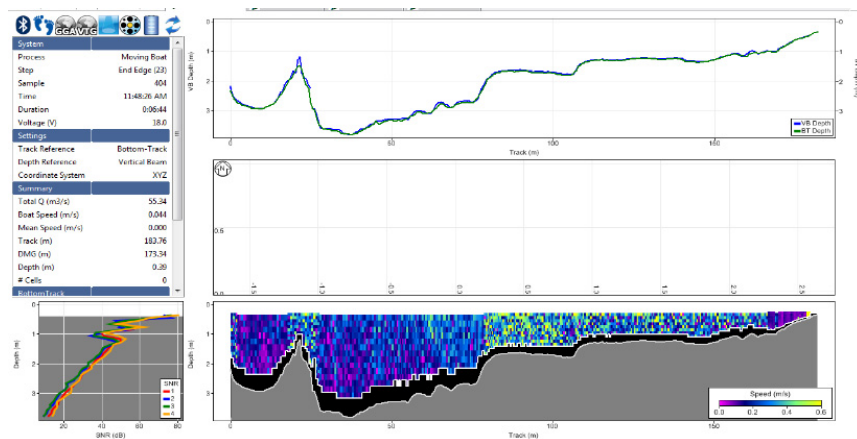


Figura 13. Sección transversal medida en Villa Florida con un equipo ADCP SONTEK.

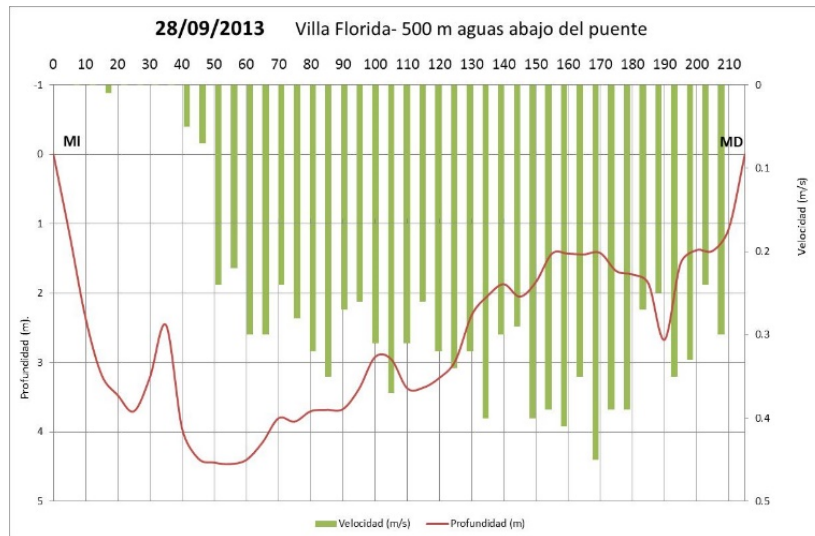


Figura 14. Sección Transversal medida en Villa Florida cada 5 m con el equipo QLINER OTT.

La obtención de la sección topográfica en la estación de Iturbe se ha realizado en la primera fase de las campañas de campo llevadas a cabo para este proyecto, tal y como se describe con mayor detalle en el apartado 2.7 y en el Apéndice 1.

2.5. Datos geológicos, edafológicos y de usos del suelo

Se cuenta con mapas en formato digital de los usos y tipos del suelo de la cuenca del río Tebicuary que han sido proporcionados por el MADES (ver Figura 15 y Figura 16, respectivamente).

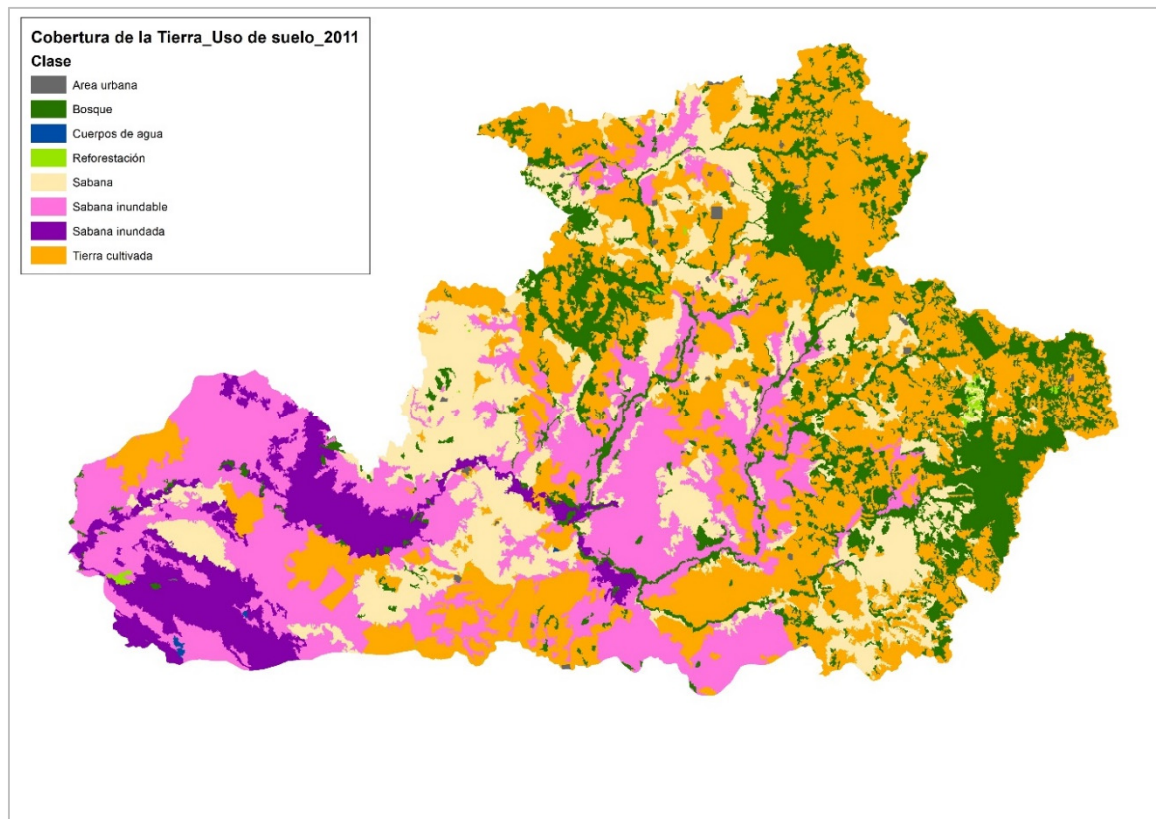


Figura 15. Mapa de usos del suelo de la cuenca del río Tebicuary.

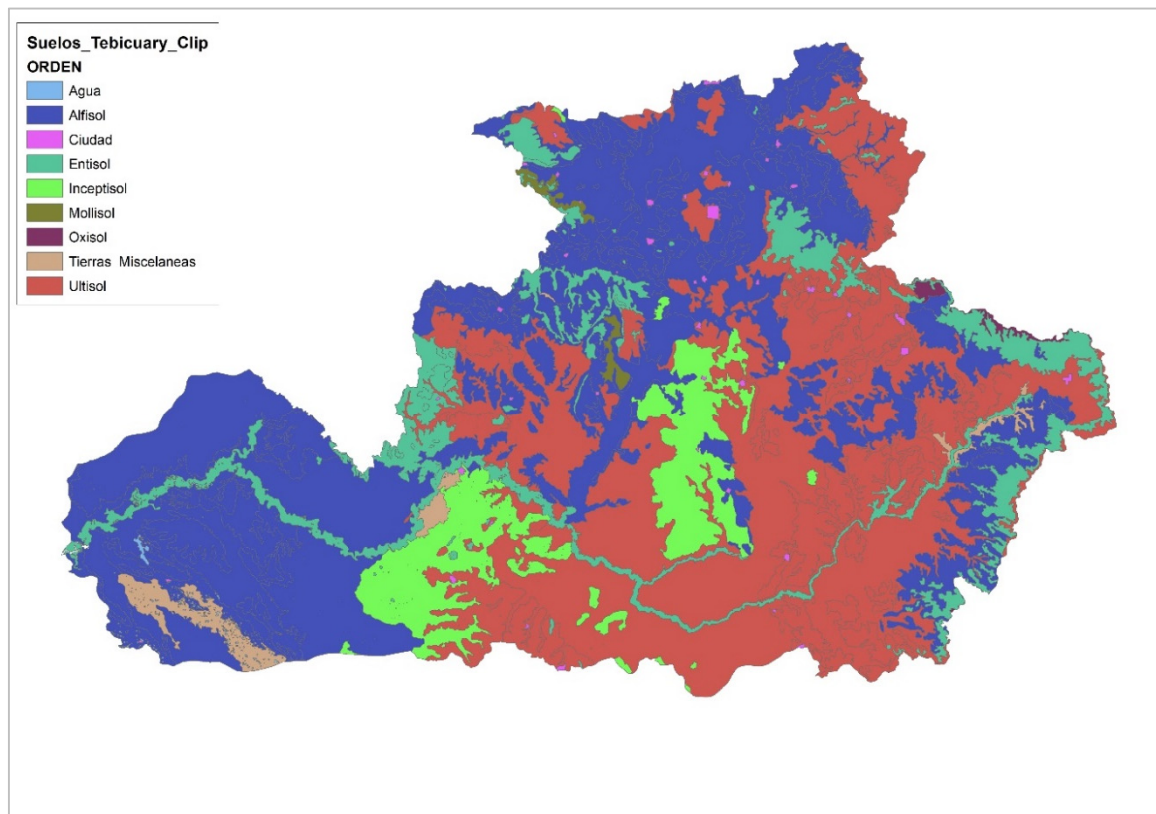


Figura 16. Mapa de tipos de suelo de la cuenca del río Tebicuary.

Además se ha combinado toda la información disponible sobre las áreas de cultivo de arroz. Esta información ha sido proporcionada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES) e incluye la localización de áreas de cultivo de arroz, identificadas por mes de siembra y consumos mensuales de agua en la mayoría de los casos, así como la localización de los reservorios correspondientes.

En la Figura 17 se presenta la localización de las diferentes áreas de cultivo de arroz y sus reservorios asociados y en las Tablas 4 y 5 los valores de las superficies tanto de cultivo de arroz como de reservorios, además de los consumos de agua por mes divididos por subcuencas.

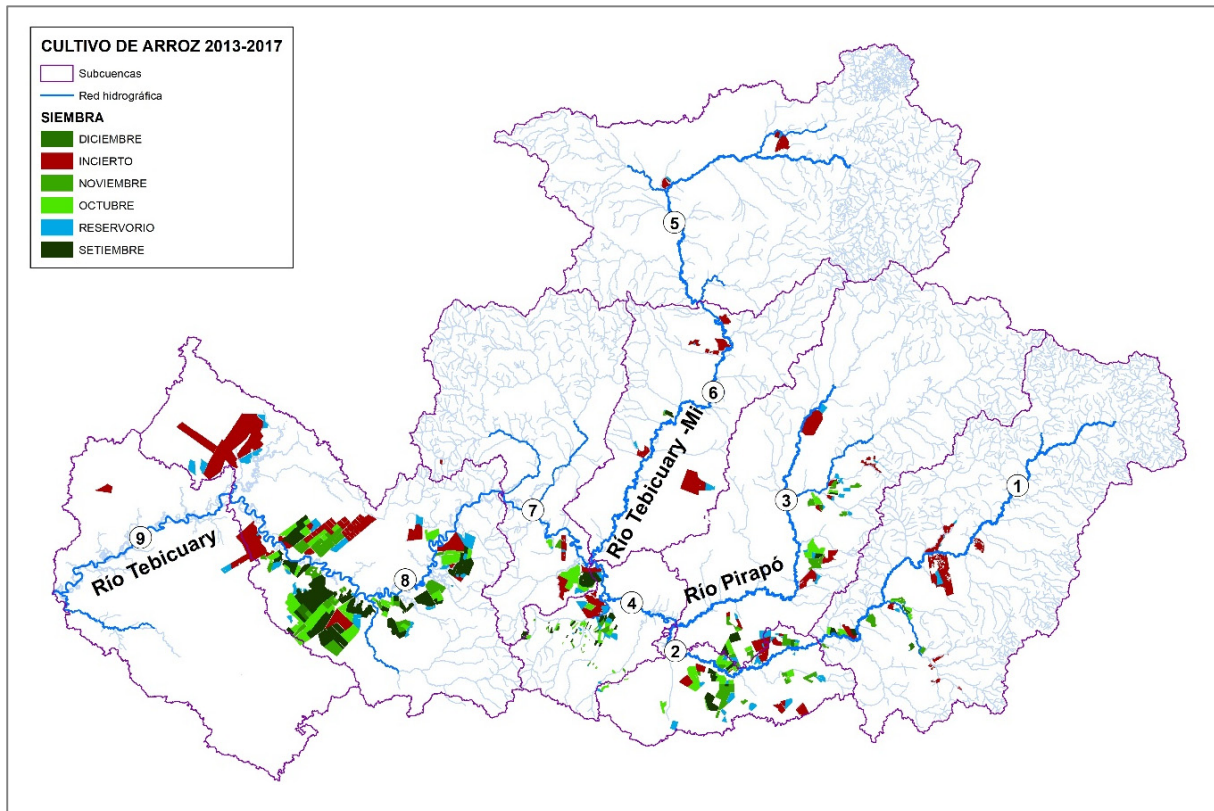


Figura 17. Áreas de cultivo de arroz, identificadas por mes de siembra y consumos mensuales de agua (2013-2017) y reservorios asociados.

	Cultivo de arroz (Ha)	Reservorios (Ha)
SC-1	8,326.45	642.7
SC-2	12,238.25	2,884.5
SC-3	11,998.92	2,046.96
SC-4	5,897.66	1,613.2
SC-5	1,413.53	139.25
SC-6	4,889.1	470.21
SC-7	5,812.32	365.07
SC-8	70,090.14	7,115.98
TOTAL	120,666.37	15,277.87

Tabla 4. Superficie de cultivo de arroz y reservorios por subcuencas.

	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abril
SC-1	0.094	0.481	0.921	1.26	1.109	0.79	0.442	0.1
SC-2	0.436	2.435	4.838	5.414	4.293	3.071	1.211	0.046
SC-3	0.221	1.343	3.016	3.636	2.819	2.139	0.923	0.027
SC-4	0.749	2.837	2.454	2.362	1.913	0.558	0.165	0.034
SC-5	0	0	0	0	0	0	0	0
SC-6	0.034	0.122	0.09	0.101	0.075	0.018	0.01	0
SC-7	0.796	3.361	3.82	3.141	2.653	1.06	0.078	0
SC-8	6.726	27.115	29.708	29.837	23.428	10.641	3.391	0
Total	9.056	37.694	44.847	45.751	36.29	18.277	6.22	0.207
Factor demanda mensual	0.05	0.19	0.23	0.23	0.18	0.09	0.03	0

Tabla 5. Consumo mensual por subcuencas (m³/s) y reparto de la demanda por meses en tanto por uno.

2.6. Datos de fauna piscícola

Se dispone de un listado de fauna piscícola existente dentro la cuenca del río Tebicuary y sus principales características (ver Tabla 8) y además se cuenta con la estadística pesquera comercial en los ríos Ayolas y Pilar durante el periodo 2012-2016, de la cual se presentan los datos del año 2016 a modo de ejemplo (Tabla 6) y el resumen de todo el periodo en la Tabla 7 y Figura 18.

Especies	Año 2016	
	Ayolas	Pilar
Surubí pintado	11,907	281,120
Surubí atigrado	19,883	28,618
Dorado	57,886	89,623
Pacú	5,843	6,532
Boga	69,977	20,147
Sábalo y/o Carimbatá	212,868	91,256
Bagre Amarillo	84,193	118,921
Bagre	---0---	128,952
Salmon	5,160	40
Manguruyú	1,836	60,147
Tres Puntos	273	2,689
Pico de Pato	462	2,314
Corvina	221	199,215
Moncholo	19,883	28,618

Tabla 6. Estadística pesquera comercial (cantidad de peces) del año 2016 en los ríos Ayolas y Pilar.

CANTIDAD POR PECES POR PIEZAS AÑO					
AÑOS	SURUBÍ PINTADO	SURUBÍ ATIGRADO	DORADO	PACÚ	BOGA
2012	39,617	40,85	24,863	7,960	108,082
2013	44,236	3,590	38,522	8,078	50,412
2014	36,146	10,759	39,133	10,096	67,603
2015	35,162	5,294	42,107	6,636	95,492
2016	36,628	6,063	32,780	4,125	60,083

Tabla 7. Resumen de la estadística pesquera comercial en Ayolas y Pilar (Periodo 2012-2016).

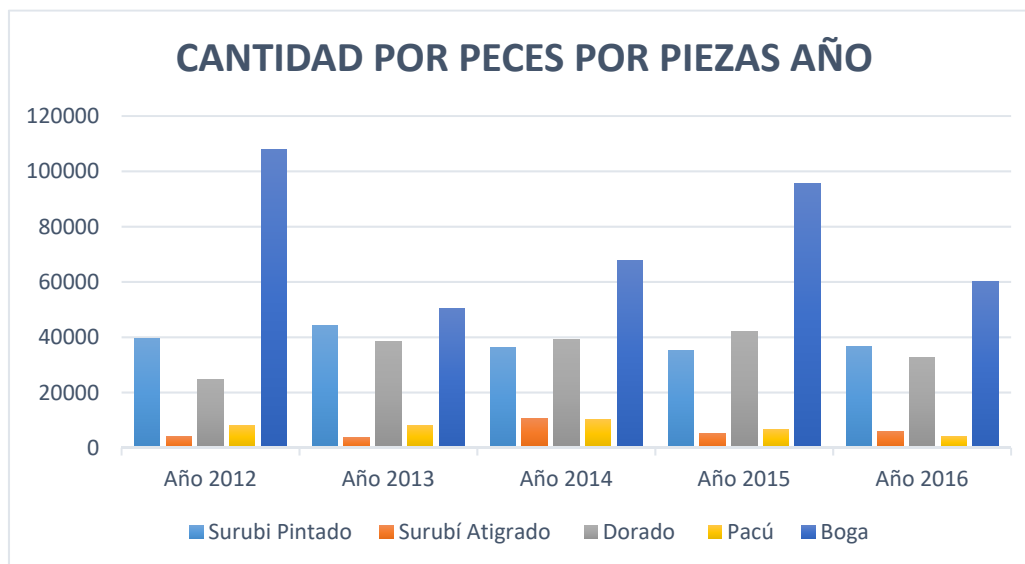


Figura 18. Resumen de la estadística pesquera comercial en Ayolas y Pilar (Periodo 2012-2016).

Género	Especies	Nombre común	Periodo reproducción	Longevidad	Alimentación adulto	Hábitat	Madurez sexual macho	Madurez sexual hembra
Pseudoplatystoma	<i>P. corruscans</i> y <i>P. fasciatum</i>	Surubí pintado y Surubí atrigado	diciembre - febrero. En aguas altas	10-11 años	Piscívoro	Migran a zonas altas de cuenca para reproducirse	3-5 años	5-8 años
Paulicea	<i>Paulicea</i> spp.	Manguruyú; Zungaru jahu	-	-	Piscívoro	Ríos fangosos. Migran a zonas altas de cuenca para reproducirse	10 kg	10 kg
Luciopimelodus	<i>Luciopimelodus pati</i>	Patí	verano y primavera	12 años	Piscívoro/Omnívoro	Aguas profundas, turbias y de corrientes moderadas	-	-
Salminus	<i>S. brasiliensis</i> = <i>S. maxillosus</i>	Dorado	diciembre-enero	9 años	Piscívoro/Cangrejos	Predominantemente lenticos (ponds). En oct-nov migran a zonas altas de cuenca para reproducirse	2 años	3 años
Leporinus(hay varias spp)	<i>Leporinus obtusidens</i>	Boga	diciembre - marzo	-	Omnívoro	Adultos en ríos medios y grandes. También hábitats lénticos. Zonas húmedas para reproducción	16 cm	21 cm
Brycon	<i>B. orbignyanus</i>	Salmón del Paraná	octubre - enero	-	Omnívoro	-	24 cm	32 cm
Piaractus	<i>P. mesopotamicus</i>	Pacú	oct-marzo, en cuenca alta y oct-nov en llanuras de inundación	25 años	Omnívoro	Migrador en la cuenca. Se desplaza para reproducción y alimentación	-	35 - 44 cm
Oxydoras	<i>kneri</i>	Armado chancho	octubre - enero	-	Omnívoro	Migrador en la cuenca. Se desplaza para reproducción y alimentación	-	-
Pterodoras	<i>granulosus</i>	Armado	enero - marzo	-	Omnívoro	Migrador en la cuenca. Se desplaza para reproducción y alimentación	24 cm	25 cm
Prochilodus	<i>lineatus</i>	Carimbatá	noviembre - enero	-	Iliófago (sedimentos)	Migrador aguas arriba para la reproducción. Fecundación en el cauce. Puesta en llanura. Los juveniles pueden estar hasta 2 años en las planicies	21 cm - 2 años	24-30cm - 2 años
Hemisorubim	<i>platyrhynchos</i>	Tres puntos	-	-	Piscívoro/Bentívoro	-	24 cm	31 cm
Ageneiosus	<i>brevifilis</i>	Solalinde	noviembre - enero	-	Piscívoro/Cangrejos	Backwaters y ríos con corriente de baja velocidad	-	-
Sorubim	<i>lima</i>	Pico de pato	octubre - diciembre	-	Piscívoro/Cangrejos	Bentónico, principalmente en márgenes de ríos y lagos. Juveniles en zonas con vegetación acuática densa	22 cm	23 cm

Plagioscion	<i>ternetzi</i>	Corvina	octubre - diciembre	-	Piscívoro	-	-	-
Itheringichthys	<i>labrosus</i>	Juru pito	septiembre-diciembre	-	Moluscos y Artrópodos	Aguas claras y de poca velocidad y profundidad con vegetación abundante. Migrador de corta distancia antes de su reproducción	13 cm	12 cm
Luciopimelodus	<i>maculatos</i>	Bagre amarillo	noviembre - enero	12 años	Omnívoro, preferentemente piscívoro	Ríos turbios de aguas profundas y velocidad moderada	-	-
Pimelodus	<i>albicans</i>	Moncholo	noviembre - enero	-	Omnívoro	Ríos turbios de aguas profundas y velocidad moderada	-	-
Pygocentrus	<i>nattereri</i>	Piraña	septiembre - enero	10-12 años	Omnívoro	Oportunista, ubícuo. Los juveniles pasan a zonas inundadas	13 cm	14 cm
Serrasalmus	<i>rhombeus</i>	Piraña	septiembre - enero	-	Carnívoro	Oportunista, ubícuo. Los juveniles pasan a zonas inundadas	-	-
Hoplias	<i>malabaricus</i>	Tarey	noviembre - enero	-	Carnívoro	Ubícuo, prefiriendo aguas poco profundas, cálidas, cenagosas y con abundante vegetación	17 cm - 1 año	17 cm - 1 año

Tabla 8. Listado de especies de peces en la cuenca del río Tebicuary y sus principales características.

2.7. Campañas de campo

Durante el transcurso de esta consultoría se han llevado a cabo una serie de trabajos de campo que han consistido en tres campañas de medición de caudales y niveles durante un periodo de tres meses en la estación ubicada en la ciudad de Iturbe sobre el río Tebicuary-mí (Tabla 9).

Campaña	Mes Previsto año: 2018	Fecha de realización
1	Julio	06-07-18
2	Agosto	05-09-18
3	Setiembre	30-09-18

Tabla 9. Campañas realizadas.

Las mediciones de caudal se realizaron con un equipo "Acoustic Doppler Current Profiler" (ADCP) por sus siglas en inglés o "perfilador de corriente Doppler acústico", el cual es un instrumento que calcula las componentes de la velocidad del agua en diferentes capas de la columna de la misma, en las 3 direcciones así como también la topografía del fondo y el área de la sección. Para su determinación, se basa en el efecto Doppler, transmitiendo sonidos a una frecuencia fija y escuchando los ecos retornados por los reflectores en el agua. Estos reflectores son pequeñas partículas microscópicas de sedimentos o plancton presentes naturalmente en el agua, que se mueven a una velocidad igual que la misma.

Además se instaló una estación automática para registrar los niveles del río durante el periodo de medición la cual se referenció a la regla ya existente en el sitio. Para esto se colocó un sensor que registra los niveles del agua midiendo la presión absoluta y la temperatura sobre el sensor, donde además otro sensor ubicado fuera del agua mide la presión atmosférica con lo que se obtiene la presión diferencial sobre el sensor y con esta el nivel del agua sobre el mismo.

A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos mientras que la síntesis de todos los trabajos realizados en el transcurso de las campañas de campo junto con la información recopilada referente a la estación hidrométrica y las precipitaciones ocurridas en la cuenca en el periodo de trabajo se detallan en el Apéndice 1.

2.7.1. Levantamiento batimétrico

Se han levantado tres secciones batimétricas, la sección 1: aguas arriba del puente, la sección 2: inmediatamente aguas abajo del puente, y la sección 3: aguas abajo del puente.

En la Figura 19 se presenta la localización de las tres secciones de medición y en la Figura 20 se presentan las secciones levantadas identificando los puntos de mayor profundidad en cada sección, en los tres casos referidos al cero de la regla así como los niveles del P.A en la margen de cada sección. Es importante notar que la sección 1 de aguas arriba presenta la mayor profundidad.



Figura 19. Ubicación de las secciones levantadas en la estación de Iturbe.

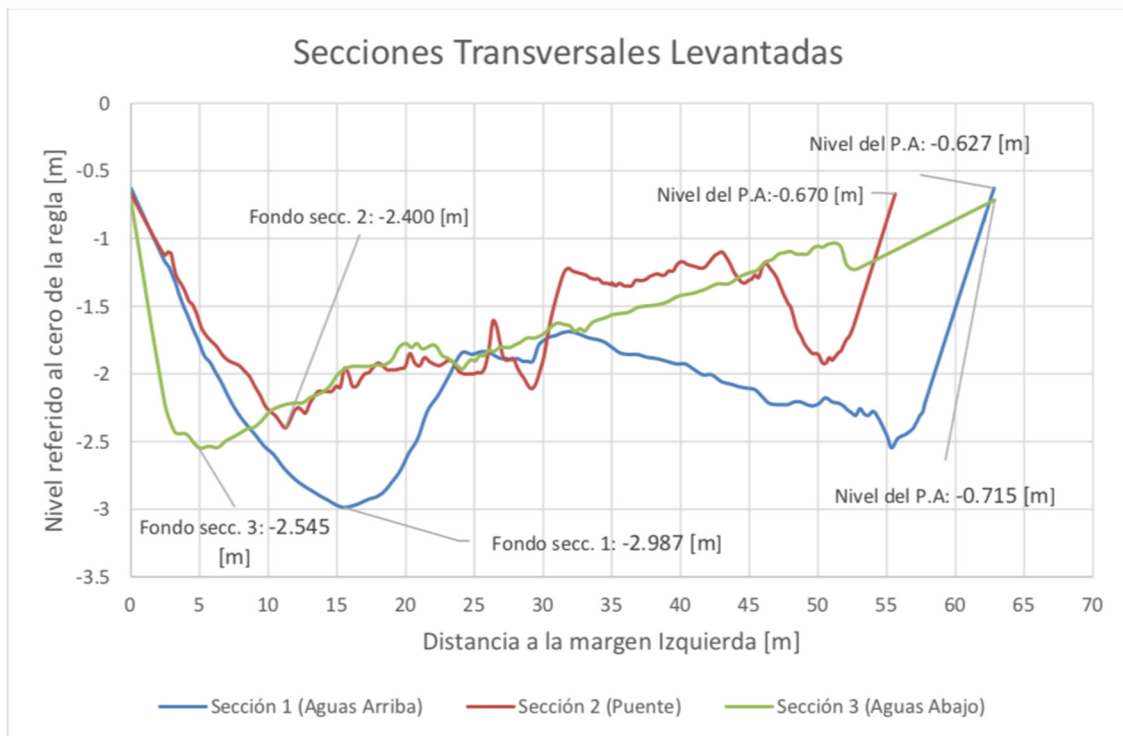


Figura 20. Secciones levantadas en la estación de Iturbe.

2.7.2. Datos de nivel obtenidos durante las campañas de medición

El equipo registro los datos de nivel desde el 6 de julio hasta el 11 de setiembre. Se recopilaron también datos de precipitación de 2 estaciones meteorológicas de la zona con lo cual se pudo realizar una comparación visual de las precipitaciones y los niveles (Figura 21).

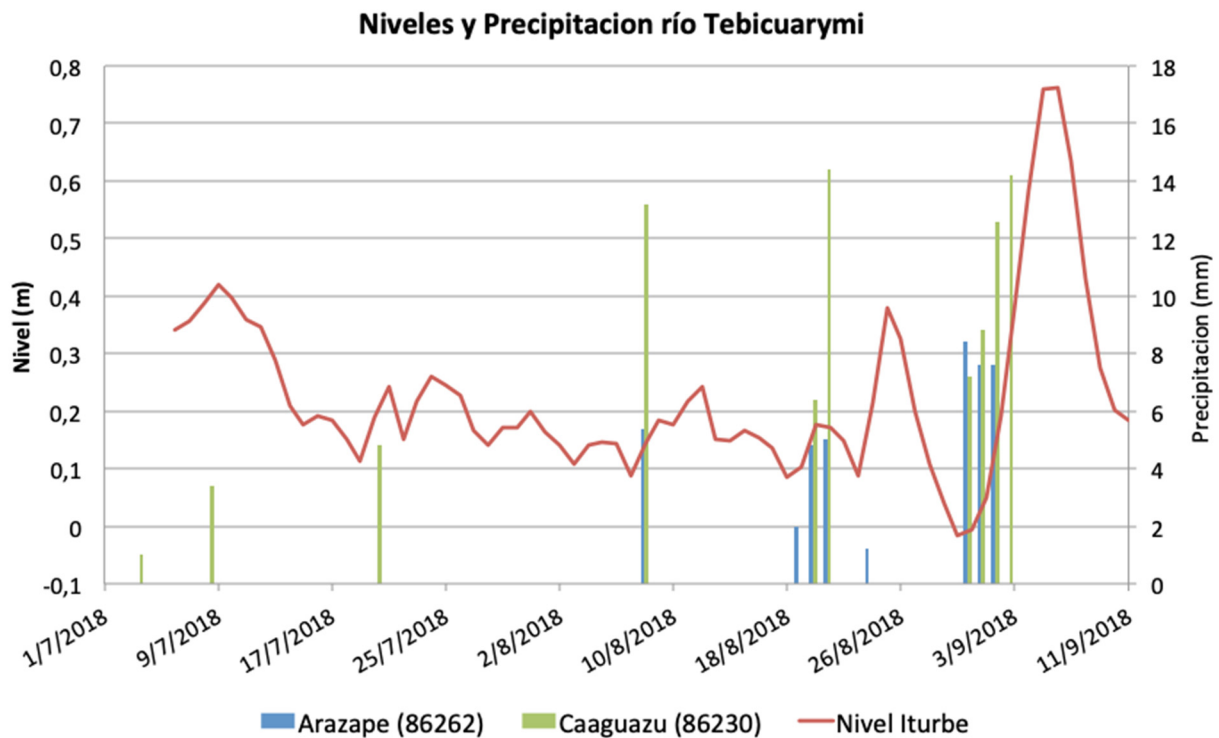


Figura 21. Niveles en la estación Iturbe y precipitación en la zona.

Considerando las mediciones anteriores recopiladas se tiene en ella que el nivel mínimo medido fue de 0.56 m (nivel mínimo medible por el equipo debido al nivel donde fue colocado) y el nivel máximo medido en ese periodo fue de 4.79. En las campañas realizadas en el año 2018 si se pudieron medir los niveles bajos del río obteniéndose valores negativos a finales de agosto de -0.01 m. Considerando ambos periodos tenemos que los niveles del río en la estación Iturbe varían desde -0.01 m hasta 4.79 m.

2.7.3. Determinación de curva altura caudal resultado general de las mediciones

En la Tabla 10 se presenta el resumen general de las mediciones realizadas durante el servicio.

Fecha	Nivel (m)	Caudal (m ³ /s)	Área (m ²)	Vel. Prom. (m/s)	Vel. Máx. (m/s)	Prof. Máx. (m)
06-07-18	0.33	25.95	51.32	0.51	1.43	1.73
05-09-18	0.72	45.59	75.77	0.61	1.64	1.94
30-09-18	3.67	252.28	352.1	0.72	1.73	4.84

Tabla 10. Resumen general de las mediciones realizadas.

Además de estas mediciones se recopiló una medición de caudal realizada por la SEAM el 25 de abril del 2017 con una altura del agua de 4.55 m y un caudal de 359.65 (m³/s). Con estas mediciones de caudal se realiza la determinación de la curva altura caudal de la estación.

Se graficaron en base a la sección obtenida en la medición de caudal con el nivel de 4.55 metros las secciones referenciales para los otros niveles de caudal medidos en esta campaña. Se observa que no existe un cambio abrupto de sección hasta los 4 metros donde si luego aparece un pequeño valle de inundación en la margen izquierda.

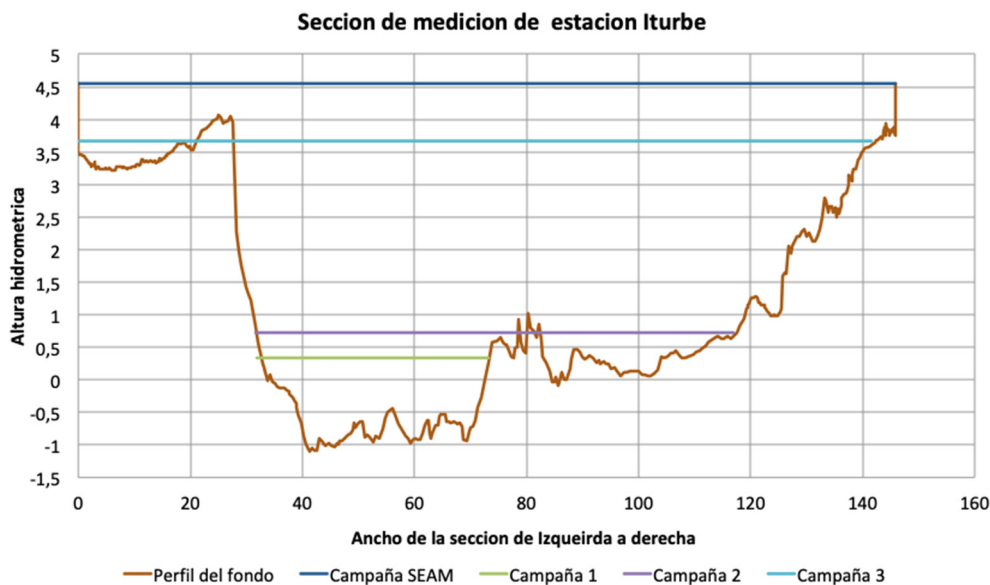


Figura 22. Sección de medición de caudales.

Graficando los puntos con los valores de nivel en el eje de abscisas y los caudales en el de ordenadas y determinando la curva de tendencia, se observa en la gráfica que se obtiene para los puntos una curva polinómica de segundo orden con un $R^2=0.996$. En el grafico 8 se observa que se deben realizar mediciones para mejorar la curva en el tramo comprendido entre los 1 a 3.5 metros donde considerando el grafico 8 se observa que no existe cambios abruptos en la sección, por lo que la primera aproximación de la curva realizada con las mediciones actuales puede considerarse valida.

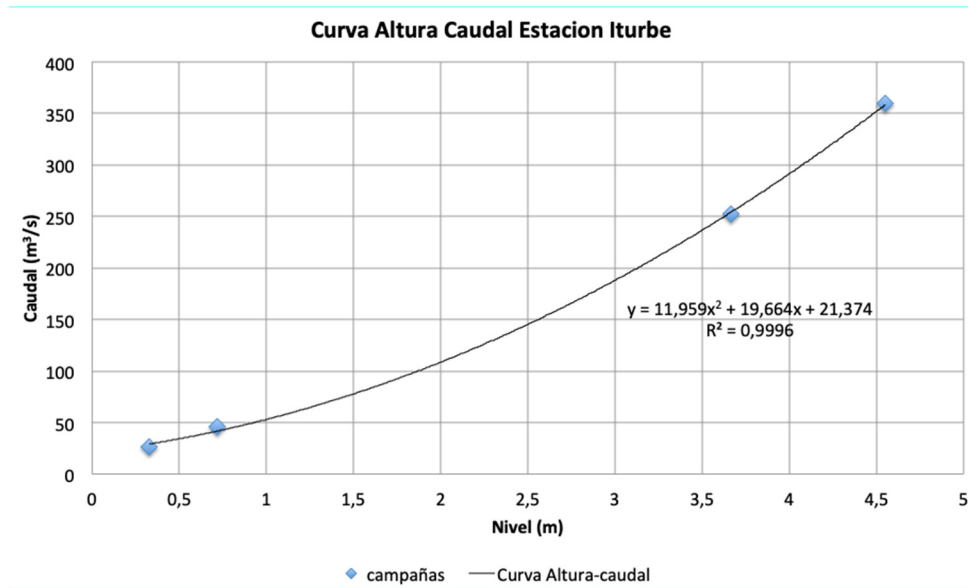


Figura 23. Curva Altura Caudal de la estación Iturbe.

Finalmente la curva que relaciona las alturas con los caudales obtenidas es una curva polinómica de segundo orden la cual tiene una validez entre las alturas 0.30 a 4.6 metros, siendo la misma

$$Q = 11.96h^2 + 19.66h + 21.37$$

Con la altura (h) en metros y el caudal (Q) en m³/s.

3. RECURSOS HÍDRICOS. HIDROLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO

En este capítulo se presenta la metodología y resultados de los estudios hidrológicos desarrollados en la cuenca del Tebicuary.

En este proceso, en primer lugar se ha realizado la calibración de los datos de precipitación, combinando la información de los pluviómetros con la del proyecto TRMM. A continuación se ha definido el efecto del cambio climático en la cuenca del Tebicuary, utilizando para ello la base de datos Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP) generando series de precipitación para el periodo 2041-2070 y distintos escenarios de cambio climático. Finalmente se ha caracterizado el régimen hidrológico de la cuenca tanto para la situación actual como para los escenarios de cambio climático.

Cabe destacar que la elección del modelo hidrológico es clave tanto para el cálculo de los caudales ambientales, ya que todos los métodos de cálculo de caudales ambientales requieren como dato de entrada series diarias de caudales suficientemente largas, en cada punto de análisis y para los denominados métodos hidrológicos, éste es el único dato necesario. Por lo tanto, para conseguir resultados de caudales ambientales fiables, el mayor esfuerzo debe centrarse en realizar un buen modelo hidrológico de la cuenca, calibrado con los datos de aforo disponibles; la calidad del modelo hidrológico se trasladará de forma directa a las estimaciones de caudales ambientales. Además dicho modelo es también clave para incorporar sus resultados posteriormente a un modelo de gestión de los recursos hídricos de la cuenca, que permita establecer un conjunto de reglas de explotación para armonizar la conservación del ecosistema fluvial (y por tanto los servicios ecosistémicos asociados) con los usos consuntivos.

3.1. Calibración de los datos de precipitación

En este apartado se presenta la metodología y resultados de la calibración de los datos procedentes del proyecto TRMM con los datos instrumentales de los 7 pluviómetros de la cuenca. Las características de los datos de precipitación empleados se detallan en el apartado 2.3.

3.1.1. Calibración de los datos TRMM

Una primera comparación de ambas fuentes de información a escala diaria (Figura 24) arroja coeficientes de correlación bajos ($\rho^2 < 0.3$), lo que puede inducir a poner en duda la validez de las series de satélite. Sin embargo, tras una observación más detallada, se aprecia que existe un cierto retraso, de entre 1 y 2 días, entre la serie TRMM y la instrumental.

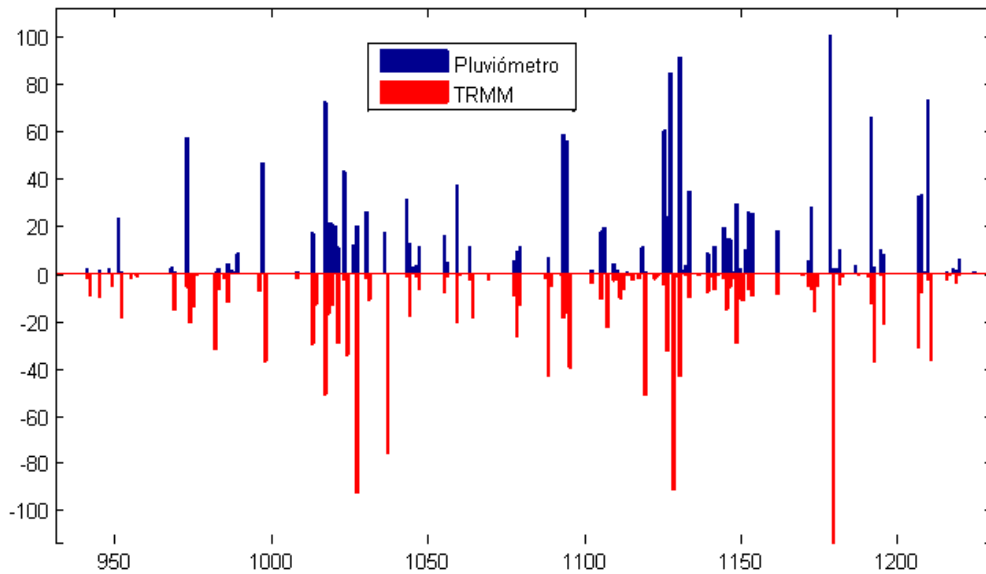


Figura 24. Comparación a escala diaria de un año de datos del pluviómetro nº1 con el punto TRMM más cercano. Precipitación en mm por día.

Comparando los mismos datos a escala mensual (Figura 25, arriba y abajo a la izquierda), donde desaparece el problema del desfase diario, se aprecia la gran coincidencia entre ambas fuentes. En el Apéndice 2 se presentan todas las gráficas para el resto de pluviómetros.

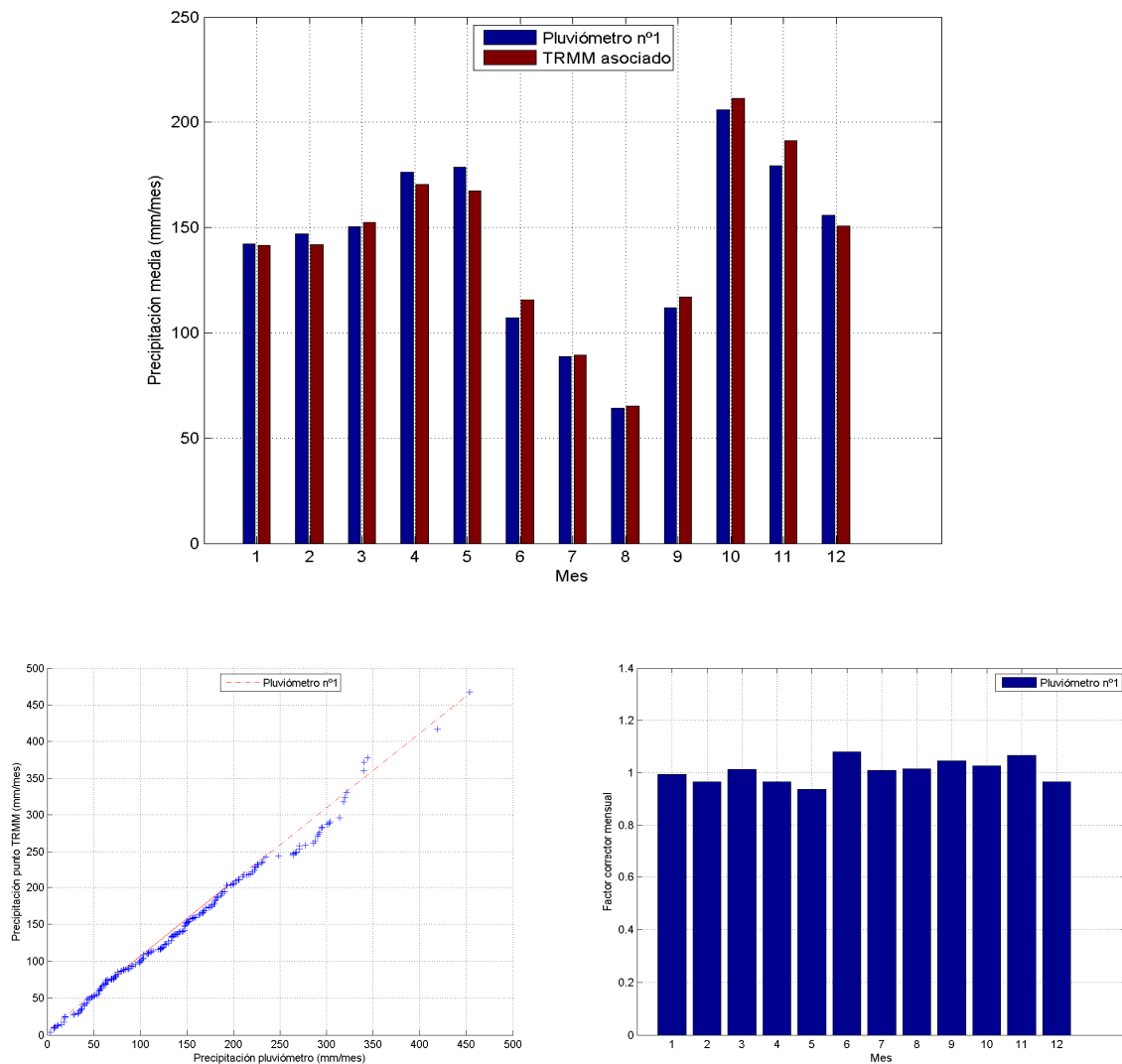


Figura 25. Comparación de datos de precipitación TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 1, a escala mensual. Arriba: valores medios mensuales por meses. Abajo izda: QQ-plot de ambas series. Abajo dcha: factores correctores a escala mensual.

Por tanto, el procedimiento para calibrar el modelo TRMM constará de los siguientes pasos:

1. Se seleccionan los puntos TRMM más cercanos a cada uno de los 7 pluviómetros (7 puntos de control).
2. Se adelanta un 1 día de la señal TRMM en todos los puntos (no sólo en los de control).
3. Se calcula en cada punto de control el valor medio mensual de la precipitación TRMM y de la instrumental. Se obtienen factores de corrección mensuales del TRMM, para que las medias coincidan.

4. Una vez obtenidos los 12 factores mensuales de corrección por cada punto de control, se promedian todos los factores para obtener un único factor de corrección mensual para todos los puntos TRMM de la cuenca.
5. Se aplican dichos factores a los datos diarios de los 140 puntos TRMM.

El hecho de no considerar un desfase fraccionario que maximice la correlación diaria (se ha adoptado un valor redondo de 1 día), y el de no interpolar series de la rejilla TRMM para obtener las series asociadas a los puntos donde hay pluviómetro, se deben a que ambos procedimientos modifican notablemente la proporción días con lluvia, que sin embargo es correcto en las series originales TRMM, por lo que se ha preferido preservarlo. Por otra parte, se han promediado sin más los factores mensuales procedentes de los siete puntos de control, porque no se ha detectado ningún patrón espacial que justifique emplear otros métodos más complejos de extrapolación.

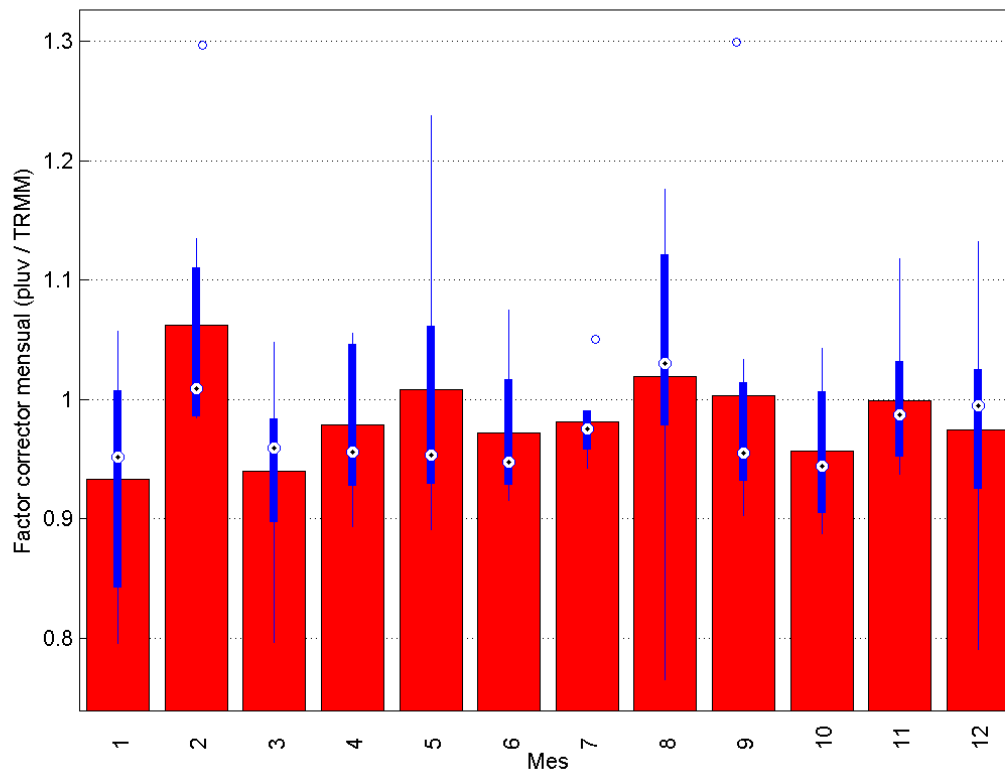


Figura 26. Variabilidad (líneas azules) y valores medios de los factores correctores mensuales de la precipitación.

La variabilidad de los factores correctores mensuales obtenidos, junto con los valores medios, se muestra en la Figura 26; se observa que los valores resultantes se encuentran siempre entre 0.9 y 1.1 (variaciones máx. de $\pm 10\%$ con respecto a los valores medidos por los pluviómetros). Las correcciones más importantes se producen en los meses de enero y febrero.

3.1.2. Resultados de precipitaciones por subcuencas

En el conjunto de la cuenca del río Tebicuary, el valor mediano de la precipitación anual es de 1577 mm, y los valores medios para años secos (probabilidad de superación 90%) y húmedos (probabilidad de superación 10%) oscilan entre 1290 mm y 2130 mm (Tabla 11). Por subcuencas, los resultados muestran un descenso de la precipitación media desde el sureste de la cuenca hasta el oeste-noroeste (Figura 27).

	Año seco (perc. 10%)	Año mediano (perc. 50%)	Año húmedo (perc. 90%)
SC-1	1342	1658	2235
SC-2	1350	1641	2253
SC-3	1307	1620	2215
SC-4	1324	1580	2157
SC-5	1236	1613	2146
SC-6	1324	1598	2089
SC-7	1320	1552	2090
SC-8	1314	1499	2045
SC-9	1193	1469	2009
Media	<i>1290</i>	<i>1577</i>	<i>2130</i>

Tabla 11. Precipitación media anual (mm) en las subcuencas consideradas para distintos tipos de año hidrológico.

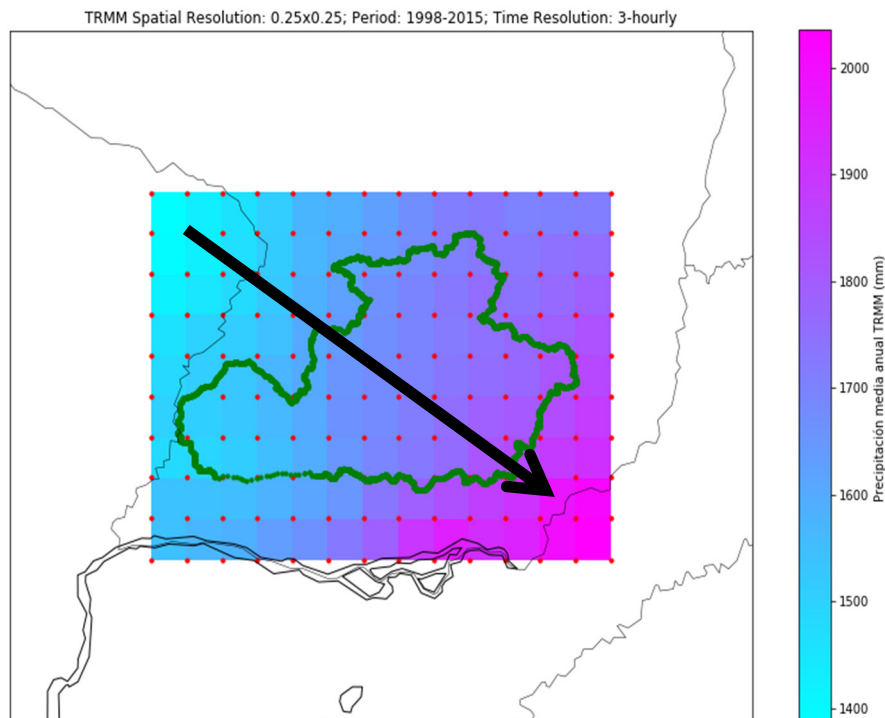


Figura 27. Gradiente de la precipitación media anual en la cuenca.

En la Figura 28 se presentan los valores de precipitación mensual para los tres tipos de años hidrológicos. Los meses más lluviosos son octubre y abril, mientras que los más secos

en términos meteorológicos (que no hidrológicos, como se verá más adelante), son julio y agosto. Se pueden encontrar gráficas similares para cada subcuenca en Apéndice 2.

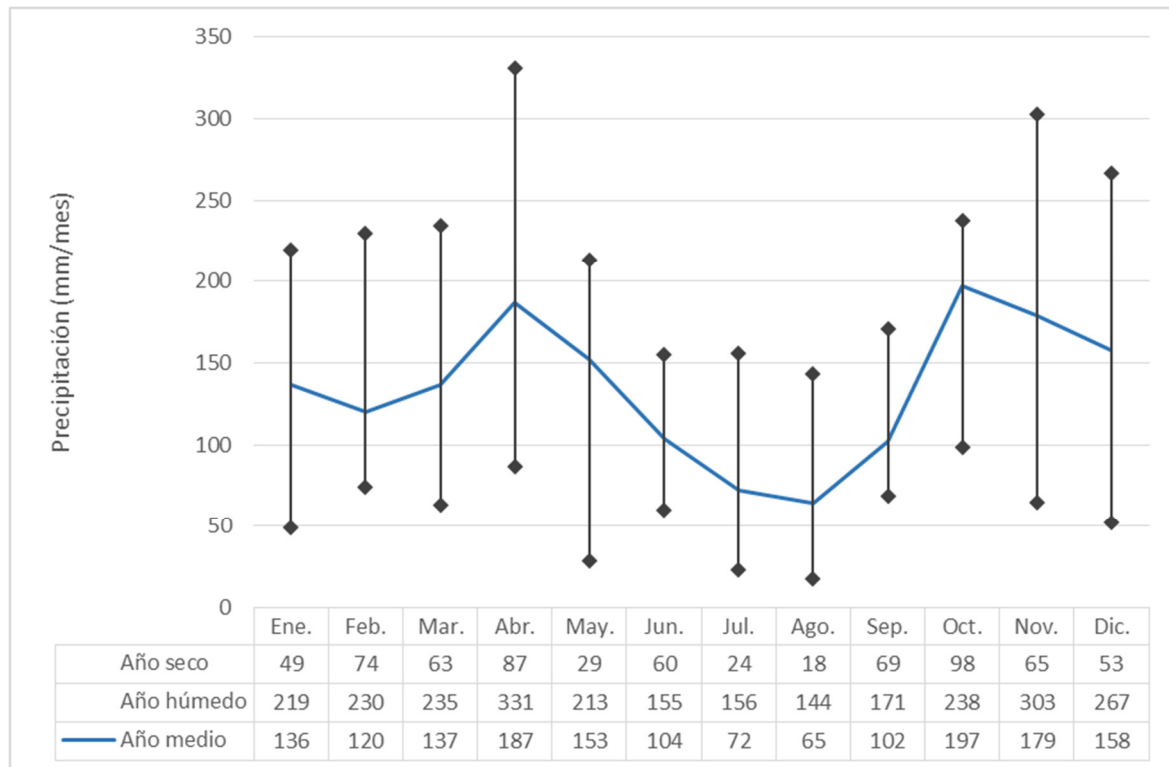


Figura 28. Rangos de valores de la precipitación media mensual para diferentes categorías de años hidrológicos en el conjunto de la cuenca del Tebicuary.

3.1.3. Evapotranspiración potencial por subcuencas

Las evapotranspiraciones potenciales (ETPs) derivada de la base de datos CGIAR-CSI, promediada en las subcuencas definidas en el área de estudio, se presentan en la Tabla 12. El valor promedio anual es de unos 1560 mm, y presentan una variación pequeña entre unos años y otros, como también puede verse en la Figura 29, donde se muestran los valores mensuales con sus percentiles del 10% y 90%. Los meses donde la atmósfera presenta una mayor capacidad de extraer energía del sistema se sitúan alrededor del cambio de año, entre noviembre y marzo, cuando la ETP es tres veces mayor por término medio que en los meses más fríos, de mayo a agosto.

	Año seco (perc. 10%)	Año mediano (perc. 50%)	Año húmedo (perc. 90%)
SC-1	1586	1616	1669
SC-2	1521	1549	1597
SC-3	1553	1582	1632
SC-4	1499	1526	1572
SC-5	1538	1564	1614
SC-6	1521	1546	1595
SC-7	1504	1527	1576
SC-8	1521	1542	1591
SC-9	1510	1531	1580
Media	<i>1534</i>	<i>1560</i>	<i>1610</i>

Tabla 12. ETP media anual en las subcuencas consideradas para distintos tipos de año hidrológico.

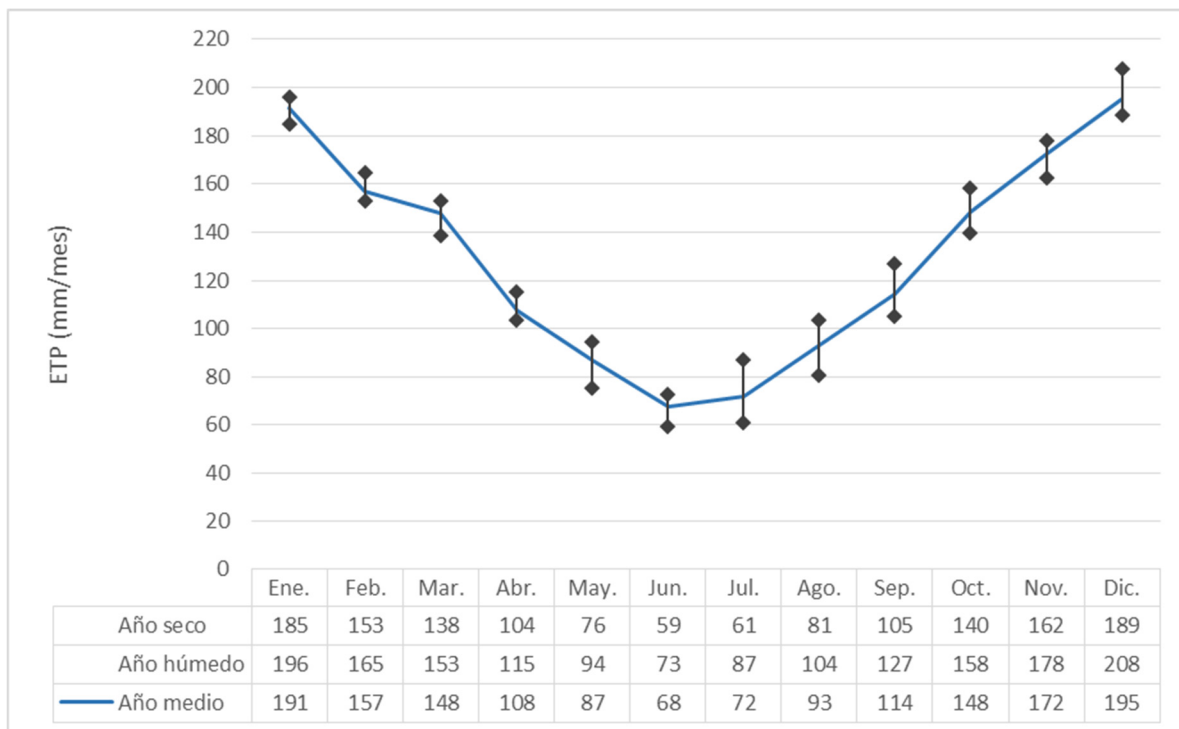


Figura 29. Rangos de valores de la ETP media mensual para diferentes categorías de años hidrológicos en el conjunto de la cuenca del Tebicuary.

Finalmente, en la Figura 30 se muestra la variabilidad de la ETP diaria por subcuencas, donde se aprecia cómo las cuencas de cabecera (1, 2, 3 y 4) tienden a tener valores máximos de ETP algo más altos que el resto.

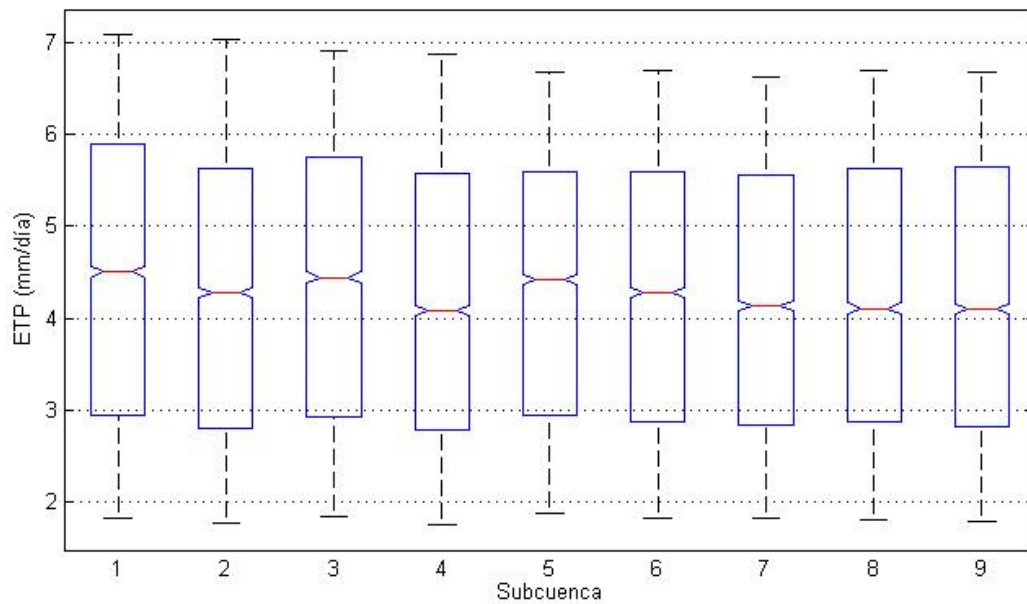


Figura 30. Variabilidad interanual (periodo 1998-2014) de la ETP por subcuencas. Las barras gruesas representan los datos situados entre los percentiles 25 y 75%. Las prolongaciones en línea discontinua son el rango del resto de los valores.

Combinando estos datos de ETP con los datos de precipitación media presentados en el apartado previo, se pueden obtener los coeficientes de aridez (ETP/P) medios por subcuencas (Tabla 13).

	Año seco (perc. 10%)	Año mediano (perc. 50%)	Año húmedo (perc. 90%)
SC-1	1.18	0.97	0.75
SC-2	1.13	0.94	0.71
SC-3	1.19	0.98	0.74
SC-4	1.13	0.97	0.73
SC-5	1.24	0.97	0.75
SC-6	1.15	0.97	0.76
SC-7	1.14	0.98	0.75
SC-8	1.16	1.03	0.78
SC-9	1.27	1.04	0.79
Media	1.19	0.99	0.76

Tabla 13. Índices de aridez (ETP/P) medios anuales por subcuencas para distintos tipos de año hidrológico.

3.2. Análisis del efecto del cambio climático en la cuenca

3.2.1. Metodología

Para determinar el efecto del cambio climático en la cuenca del Tebicuary se emplearán los resultados de la base de datos Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP) para generar series de precipitación para el periodo 2041-2070 y para distintos escenarios de cambio climático.

La base de datos NEX-GDDP, desarrollada por la NASA, contiene el downscaling estadístico de las proyecciones climáticas para 21 modelos globales del CMIP5 con una resolución temporal diaria y espacial de 25X25 km (Figura 31).

El método *quantile mapping* de corrección de sesgo (Piani, C., 2010¹) se utilizará para regionalizar la base de datos NEX-GDPP a la zona de estudio, corrigiendo a su vez el número de días de lluvia. Por otro lado el método de ensemble REA (Reliability Ensemble Averaging; Tebaldi, C. and Knutti, R., 2007²) es empleado para penalizar aquellos modelos estadísticamente más alejados de las series observadas.

Por otra parte, las funciones de distribución de las series de precipitación simuladas para el futuro son corregidas aplicando la diferencia calculada entre las series observadas y las simuladas en el periodo de referencia. Esto se hace para cada uno de los 12 meses de años. Por lo tanto, si bien se utiliza la información de muchos modelos, se les otorgarán pesos diferentes en función de su capacidad para reproducir las condiciones reales de esta cuenca, y se modificarán sus resultados para que reflejen en la medida de lo posible las condiciones locales.

¹ Piani, C., Haerter, J.O., Coppola, E. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe (2010) *Theoretical and Applied Climatology*, 99 (1-2), pp. 187-192.

² Tebaldi, C., Knutti, R. The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections (2007) *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365 (1857), pp. 2053-2075.

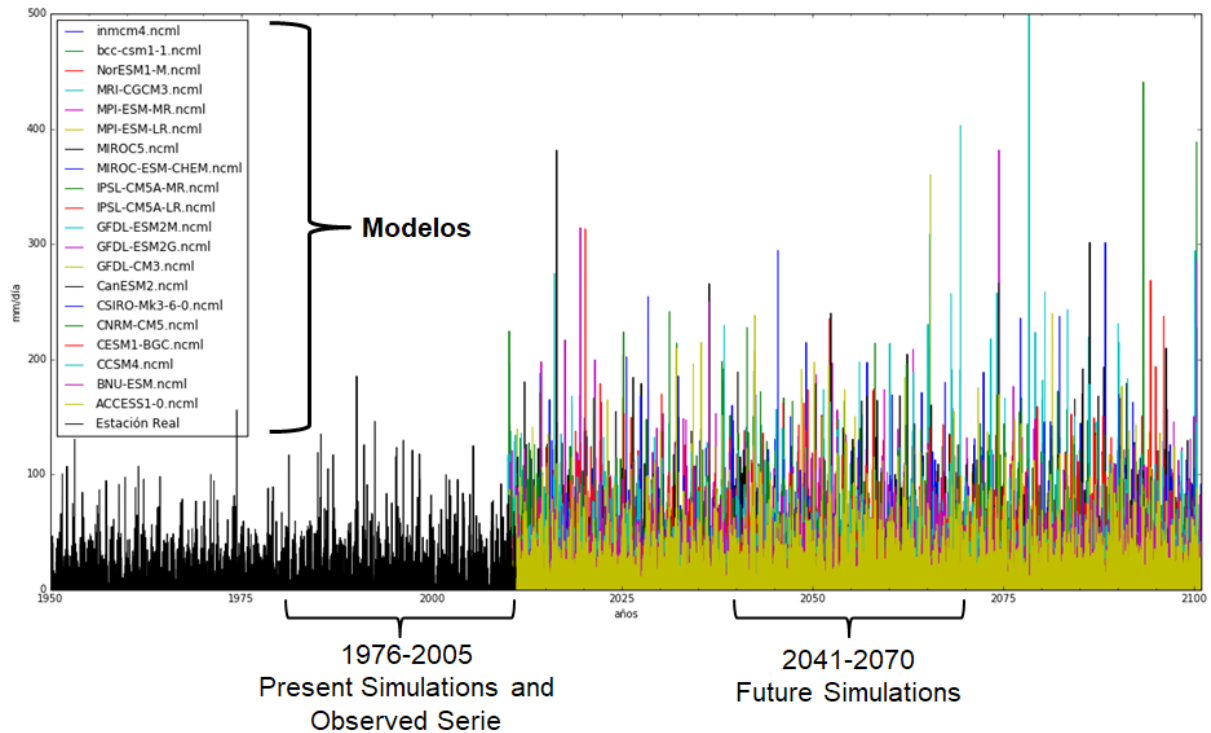


Figura 31. Ejemplo de serie observada y conjunto de simulaciones futuras.

Además de la intensidad de precipitación, el número de días de lluvia también es corregido mediante procesos aleatorios. El peso asignado a cada uno de los modelos, en función de cuánto es capaz de reproducir la serie de referencia, viene dado por la siguiente expresión:

$$W_i \cong \frac{\sqrt{E((M_P - S_P)^2)}}{\sum_{M=1}^{21} \sqrt{E((M_P - S_P)^2)}} \quad \begin{array}{l} M_P = \text{Serie precip. (NEX - GDDP) Presente} \\ S_P = \text{Serie precip. Presente} \end{array}$$

Para el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5), la comunidad científica ha definido un grupo nuevo de escenarios, denominados "trayectorias de concentración representativas" (RCP, por sus siglas en inglés). Estos escenarios se centran en las emisiones antropogénicas y no incluyen cambios en impulsores naturales.

Los RCP representan el forzamiento radiativo total calculado para el año 2100 respecto al año 1750 (por ejemplo el RCP 2.6 significa 2.6 W/m²). Se podría decir que el RCP 2.6 representa un escenario de mitigación, el RCP 4.5 y RCP 6.0 son escenarios de estabilización y el RC P8.5 corresponde a un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI.

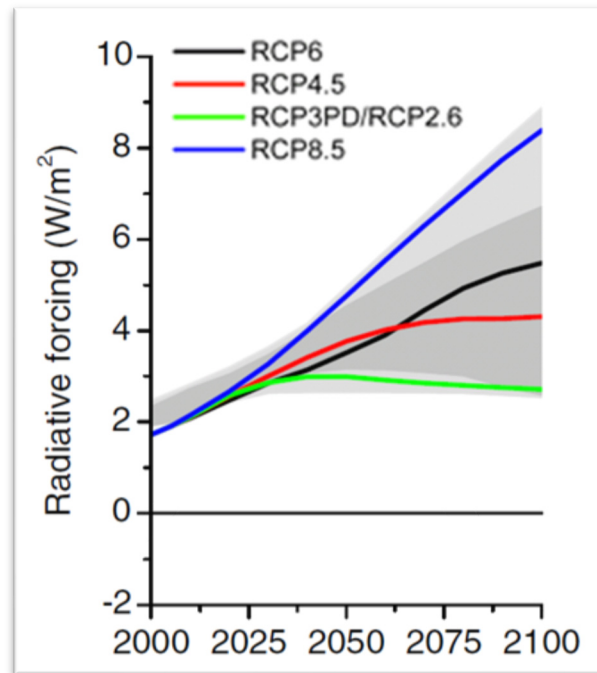


Figura 32. Evolución prevista según el AR5 del IPCC del forzamiento radiativo según las trayectorias de concentración representativas o RCPs.

El forzamiento radiativo se define como la variación, expresada en $W \cdot m^{-2}$, del flujo radiativo (el descendente menos el ascendente) en la tropopausa o en la parte superior de la atmósfera, debida a una variación del causante externo del cambio climático, como por ejemplo una variación de la concentración del CO_2 equivalente o de la radiación solar. Las fuentes principales, positivas y negativas, de dicho forzamiento se presentan de forma simplificada en la Figura 33. Para este trabajo se han considerado dos RCP de cálculo, la 4.5 y 8.5, considerándose la primera como un escenario moderadamente optimista y la segunda como uno pesimista.

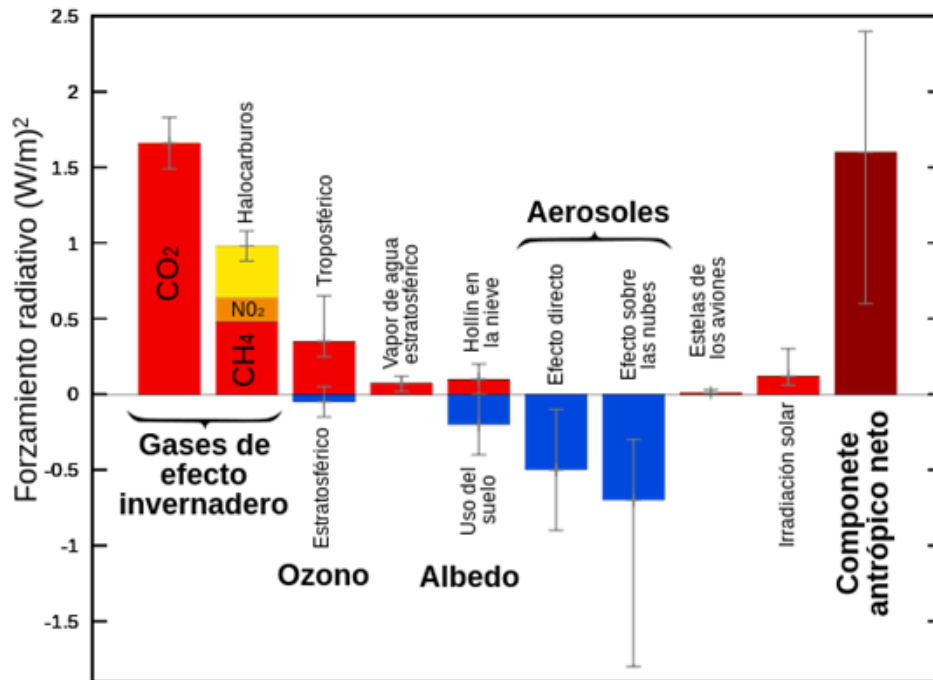


Figura 33. Fuentes del forzamiento radiativo. Fuente: IPCC AR5.

3.2.2. Resultados para el horizonte 2040-2070

Los porcentajes de cambio en la precipitación media anual para el periodo 2041-2070 se presentan gráficamente en la Figura 34 y, por subcuencas, en la Tabla 14.

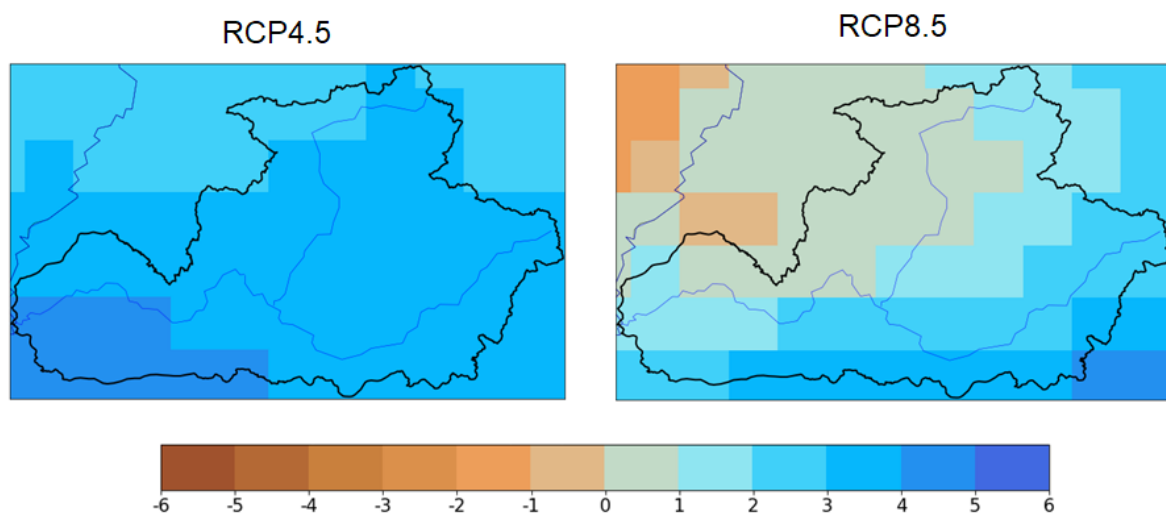


Figura 34. Porcentaje de cambio en la precipitación media anual en el área de estudio para el periodo 2041-2070.

	RCP 4.5		RCP 8.5	
	P (mm)	% Cambio	P (mm)	% Cambio
SC-1	1704	2.8%	1696	2.3%
SC-2	1692	3.1%	1670	1.8%
SC-3	1660	2.5%	1652	2.0%
SC-4	1634	3.4%	1615	2.2%
SC-5	1654	2.5%	1623	0.6%
SC-6	1648	3.1%	1606	0.5%
SC-7	1597	2.9%	1583	2.0%
SC-8	1552	3.5%	1523	1.6%
SC-9	1528	4.0%	1486	1.2%
CUENCA	1628	3.2%	1601	1.5%

Tabla 14. Cambios en la precipitación media anual para el periodo 2041-2070, por subcuencas.

De la misma forma, los resultados de variación en el número de días de lluvia se muestra espacialmente en la Figura 35 para las dos RCPs elegidas. Finalmente, la Tabla 15 incluye la variación en la ETP del modelo hidrológico.

Se observa que en términos generales la precipitación experimentará un aumento moderado en la cuenca, sobre todo en la zona sureste y especialmente para la RCP 8.5. Sin embargo, la nueva precipitación se producirá en un número menor de días al año, lo que hace pensar en tormentas más cortas o menos frecuentes, y de mayor intensidad. En cuanto a la ETP, se detecta también un aumento derivado de unas temperaturas más altas, que es más significativo en el RCP 8.5. El efecto en los caudales de estos efectos combinados se analizará en el capítulo siguiente.

	RCP 4.5		RCP 8.5	
	ETP (mm)	% Cambio	ETP (mm)	% Cambio
SC-1	1626	1.2%	1678	3.8%
SC-2	1572	1.4%	1614	4.2%
SC-3	1582	1.6%	1664	5.2%
SC-4	1526	1.5%	1611	5.6%
SC-5	1564	1.9%	1662	6.3%
SC-6	1546	1.8%	1636	5.8%
SC-7	1527	1.4%	1611	5.5%
SC-8	1542	1.2%	1622	5.2%
SC-9	1531	0.6%	1605	4.8%
CUENCA	1560	1.5%	1639	5.1%

Tabla 15. Cambios en la ETP media anual para el periodo 2041-2070, por subcuencas.

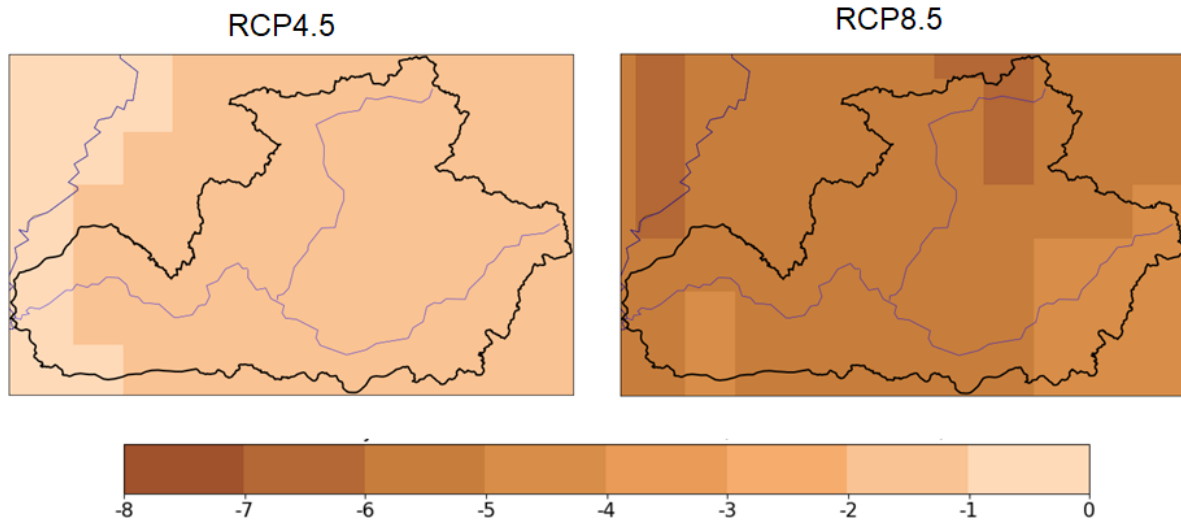


Figura 35. Porcentaje de cambio en el número de días de lluvia para el periodo 2041-2070.

3.3. Caracterización del régimen hidrológico de la cuenca

3.3.1. Selección y descripción del modelo hidrológico de la cuenca del río Tebicuary

Como se ha visto en el apartado de información disponible, la cuenca del río Tebicuary tiene algunos rasgos característicos, en especial la baja pendiente y la alta sinuosidad, que condicionan la propagación de los hidrogramas a lo largo de la misma.

A escala diaria, la evolución del caudal en los puntos medios y bajos de la cuenca está dominada por los procesos difusivos de propagación de las ondas, tanto o más que por los procesos hidrológicos convencionales, que están presentes pero se manifiestan de forma poco reconocible (no se aprecian los típicos ascensos rápidos de caudal y los descensos exponenciales de las curvas de recesión clásicas). En Villa Florida, la única estación con datos suficientes para realizar una calibración formal, existen aproximadamente 12 días de desfase entre los valores pico de precipitación media en la cuenca y el pico de caudal, como se puede observar en la Figura 36; es de esperar que otras subcuencas experimenten un fenómeno similar, aunque con otros desfases. Teniendo en cuenta que el orden de magnitud de la distancia que debe recorrer el flujo desde el centro de gravedad de la cuenca hasta Villa Florida es de unos 200 km (100 km en línea recta, que equivalen al doble aproximadamente debido a la sinuosidad del cauce), la velocidad media de propagación de los hidrogramas es de 16.7 km/día (0.19 m/s o 0.69 km/h).

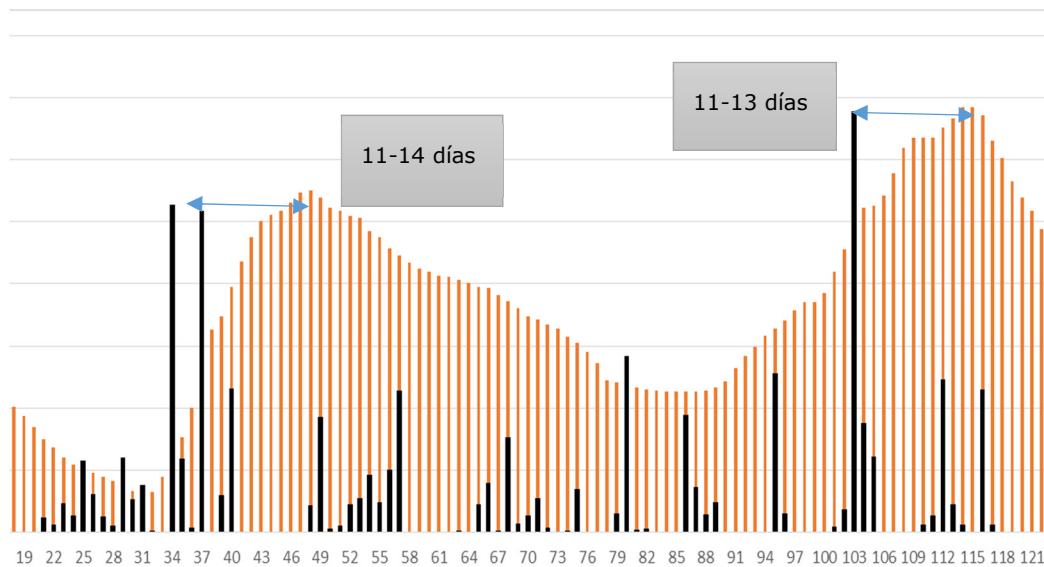


Figura 36. Evolución de la precipitación media en la cuenca (barras negras) y los caudales (barras naranjas) en Villa Florida durante un periodo de 100 días. La escala vertical está distorsionada y es diferente en ambas señales, con el objetivo de resaltar el desfase temporal.

La mayor parte de los modelos hidrológicos no son aptos para simular esta combinación de procesos físicos, que son propios de tramos medios y bajos de grandes ríos. Los paquetes más extendidos para el análisis hidrológico (por ejemplo HEC-HMS, SWAT, MIKE-SHE, VIC, etc.) así como los modelos hidrológicos agregados (PDM, IHACRES, GR4J, NAM, por nombrar algunos) no permiten propagar de forma exacta los hidrogramas (aunque sí aportan algunas soluciones aproximadas, que en muchos casos resultan aceptables), y por tanto requiere de otro modelo externo para realizar esta tarea.

A la vista de esta situación, el Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS) ha desarrollado el Modelo de Grandes Bacias (MBG) precisamente para resolver este problema, que es común en los ríos de Brasil. Por otra parte, Yamazaki et al.³ (2011) propusieron el modelo CaMa-Flood, acoplado al modelo VIC, para realizar la propagación de las ondas en los cauces.

Para este estudio, se ha optado por construir un modelo hidrológico *ad hoc* de la cuenca del río Tebicuary, combinando un modelo hidrológico agregado, el denominado modelo de equilibrio logístico o LEM (por sus siglas en inglés), con un modelo de propagación basado en la ecuación de onda difusiva (ecuación de Hayami). El motivo de esta decisión es reducir al máximo los parámetros necesarios para reproducir los rasgos principales del

³ Yamazaki, D., S. Kanae, H. Kim, and T. Oki (2011), A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model, *Water Resour. Res.*, 47, W04501, doi: 10.1029/2010WR009726.

comportamiento de la cuenca, y a ser posible conseguir que dichos parámetros tengan un sentido físico y puedan extrapolarse con ciertas garantías a subcuencas donde no hay datos de aforos, que son mayoría en el Tebicuary. Estos criterios no son cumplidos por el modelo brasileño MGB, que requiere de un alto número de parámetros difíciles de establecer a priori, ni por el modelo de Yamazaki et al., que sólo se ha utilizado, con resultados diversos, para cuencas mucho más extensas.

El modelo propuesto, que se denomina LEM-DW (Logistic Equilibrium Model with Diffusive Wave), es un modelo agregado conceptual que se basa en discretizar la cuenca completa en un conjunto de elementos o unidades hidrológicas (subcuencas) dispuestas en forma de árbol, según la topología de la red. Cada una de estas unidades se caracteriza por un cauce principal y un área tributaria lateral simétrica con respecto al cauce principal, de forma rectangular (Figura 37). El territorio asociado, a través de múltiples cauces de orden menor, genera escorrentía que se incorpora como un caudal lateral homogéneo (q_L) por unidad de longitud del valle del cauce principal. Se asume que las cuencas laterales, de tamaño un orden de magnitud inferior, se incorporan al eje principal sin efectos de propagación en cauce significativos, de tal forma que el enrutamiento (routing) puede realizarse con métodos convencionales (desfase constante o Muskingum-Cunge). Todos los efectos de propagación se producen a lo largo del eje principal, y por tanto q_L se puede obtener mediante un modelo agregado convencional, en este caso el LEM (aunque podría acoplarse cualquier otro como PDM, NAM, GR4J, IHACRES, etc.).

Este planteamiento separa en sendos submodelos acoplados los procesos hidrológicos clásicos (dinámica del suelo y enrutamiento simple), por un lado, y los procesos de naturaleza hidráulica (solución de onda difusiva), por otro. Las unidades hidrológicas asimilables a este esquema conceptual deben cumplir a priori una serie de requisitos:

- La cuenca tributaria al eje principal debe ser de un tamaño relativamente grande ($>103 \text{ km}^2$) y con pendiente baja, para que los efectos de propagación sean relevantes.
- Las cuencas que vierten al eje principal deben cumplir en conjunto las condiciones opuestas: deben tener un tamaño de orden de magnitud menor que la cuenca en conjunto ($<103 \text{ km}^2$) y los efectos de propagación deben poder representarse con un modelo de enrutamiento simple (de los que incorporan los modelos agregados).
- Es recomendable, en términos generales, que la relación de aspecto (longitud/anchura medias) de la cuenca modelada sea mayor de 1.5-2. Este criterio es una versión simplificada del criterio anterior.
- Es conveniente, aunque no necesario, que la cuenca sea lo más simétrica posible con respecto al eje principal.

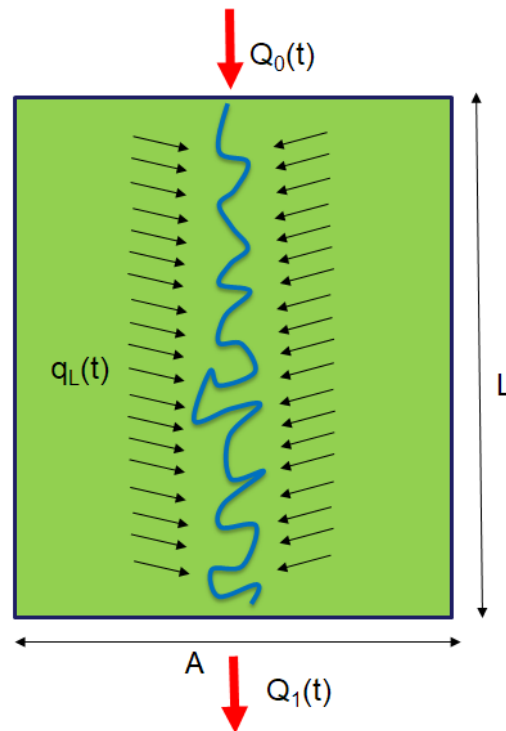


Figura 37. Esquema conceptual del elemento básico del modelo hidrológico LEM-DW.

El modelo de equilibrio logístico o LEM (Prieto et al. 2013) es un modelo hidrológico agregado basado en dos hipótesis fundamentales:

1. Las cuencas, bajo condiciones climáticas y de usos del suelo estacionarias, tienden a un coeficiente de escorrentía de equilibrio, gobernado por una expresión de tipo Budyko.
2. En condiciones reales (no estacionarias), las cuencas persiguen el equilibrio siguiendo una ley de crecimiento limitado (ecuación logística).

El modelo queda finalmente recogido en la siguiente ecuación fundamental:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = k \cdot P(t - \tau) \cdot Q(t) \cdot \left(1 - \frac{Q(t)}{Q_{eq}(t - \tau)}\right)$$

Donde $Q(t)$ es la serie de caudales resultado y Q_{eq} es el caudal de equilibrio derivado de multiplicar el coeficiente de escorrentía de equilibrio (C_{eq}) por la precipitación instantánea:

$$Q_{eq}(t) = P(t) \cdot C_{eq}(t) = P(t) \cdot e^{-a \cdot \hat{\psi}(t; \alpha)}$$

La variable $\hat{\psi}$ es el índice de aridez dinámico, que resulta de dividir las series de ETP y P suavizadas (variables con * en las fórmulas):

$$\hat{\psi}(t; \alpha) = \frac{ETP^*(t; \alpha)}{P^*(t; \alpha)}$$

El modelo tiene cuatro parámetros: α , τ , k , α . Dado que la ecuación logística tiene solución analítica para valores constantes de los parámetros, dicha solución será la base para obtener el esquema explícito de resolución numérica:

$$Q_t = \frac{Q_{t-1} \cdot Q_{eq,t-\tau}}{Q_{t-1} + (Q_{eq,t-\tau} - Q_{t-1}) \cdot \exp(-k \cdot \Delta t \cdot P_{t-\tau})}, \quad Q_{eq,t-\tau} > 0$$

$$Q_t = \frac{Q_{t-1} \cdot C_{eq,t}}{C_{eq,t} + k \cdot Q_{t-1} \cdot \Delta t}, \quad Q_{eq,t-\tau} = 0$$

Las variables desfasadas $Q_{eq,t-\tau}$ y $P_{t-\tau}$ pueden expresarse como combinaciones lineales de sus últimos valores discretos, asumiendo que el parámetro de desfase τ es menor que el incremento de tiempo Δt , en este caso 1 día:

$$P_{t-\tau} = \left(1 - \frac{\tau}{\Delta t}\right) \cdot P_t + \frac{\tau}{\Delta t} \cdot P_{t-1}, \quad 0 \leq \tau \leq \Delta t$$

$$Q_{eq,t-\tau} = \left(1 - \frac{\tau}{\Delta t}\right) \cdot Q_{eq,t} + \frac{\tau}{\Delta t} \cdot Q_{eq,t-1}, \quad 0 \leq \tau \leq \Delta t$$

Donde:

$$Q_{eq,t} = P_t \cdot C_{eq,t}$$

$$C_{eq,t} = \exp(-a \cdot \hat{\psi}_t(\alpha))$$

(xx)

El índice de aridez dinámico $\hat{\psi}_t(\alpha)$ se puede obtener fácilmente empleando el algoritmo recursivo de suavizado exponencial:

$$\hat{\psi}_t(\alpha) = \frac{\widehat{PE}_t(\alpha)}{\widehat{P}_t(\alpha)}$$

$$\widehat{PE}_t(\alpha) = \alpha \cdot PE_t + (1 - \alpha) \cdot \widehat{PE}_{t-1}$$

$$\widehat{P}_t(\alpha) = \alpha \cdot P_t + (1 - \alpha) \cdot \widehat{P}_{t-1}$$

La segunda parte del modelo resuelve la evolución del caudal $Q(x,t)$ a lo largo del eje principal, empleando la solución analítica de la ecuación de Hayami con flujo lateral:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) - D \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} - \frac{\partial q}{\partial x} \right) = 0$$

Que fue obtenida por Moussa (1996⁴). $Q(x,t)$ es el caudal en el cauce principal, $q(t)$ es el caudal lateral (q_L en la Figura 37) y C , D son los dos parámetros fundamentales del modelo difusivo, la celeridad (m/s) y la difusividad (m^2/s), respectivamente. Como en toda ecuación diferencial, deben especificarse las condiciones iniciales $Q(x,0)$ y las de contorno $Q(0,t)$.

Asumiendo que C y D son constantes, la solución analítica de esta ecuación permite construir un esquema numérico explícito de resolución, basado en ella, eficiente en términos computacionales y con alto grado de estabilidad numérica (pero no incondicionalmente estable, como se verá más adelante). Las expresiones analíticas finales del modelo empleado están recogidas en las ecuaciones (7), (8), (9), (47), (48) y (49) del artículo; en este caso, la integral del convolución que es la base de la solución analítica, se ha resuelto numéricamente asumiendo funciones por tramos.

Asumiendo que el enrutamiento de las cuencas laterales viene dado por un desfase constante proporcional al tiempo medio de concentración, y que las magnitudes de longitud (L), anchura (A) y sinuosidad del cauce principal (S) se determinan por criterios geográficos, el modelo LEM-DW consta de 5 parámetros por cada elemento considerado:

- a , k , α del submodelo LEM. Estos parámetros reflejan principalmente el comportamiento de la cuenca (proceso de humectación y secado del suelo), así como el tipo de flujo dominante (Base Flow Index).
- C y D del submodelo de la onda difusiva. Estos parámetros reflejan las características hidráulicas del cauce principal (pendiente media, rugosidad y anchura media).

La implementación numérica de ambos submodelos (el LEM y la onda difusiva) se ha realizado en el entorno Matlab. La calibración del modelo puede hacerse de forma manual (ensayo-error) o automática. En este trabajo se han aplicado un algoritmo de calibración automática (supervisada) que hace una búsqueda global en un hipercono del espacio de los parámetros, y luego aplica el algoritmo local *fmincon*, también de Matlab, en cada región explorada. La función objetivo que se desea minimizar, en este caso, será $1-NS$, donde NS es el coeficiente de Nash-Sutcliffe, una medida muy extendida de bondad de ajuste en el modelado hidrológico, que va de $-\infty$ a 1 (siendo 1 el ajuste perfecto y 0 el ajuste derivado de aproximar una serie con su valor medio constante).

⁴ Moussa, R. (1996). Analytical Hayami solution for the diffusive wave flood routing problem with lateral inflow. *Hydrological processes*, 10(9), 1209-1227.

3.3.2. Calibración y parametrización del modelo hidrológico

Calibración con datos históricos

La calibración del modelo hidrológico LEM-DW se ha llevado a cabo considerando parámetros uniformes del modelo para las siete subcuencas aguas arriba de Villa Florida (Figura 38), el único punto de la red fluvial donde se dispone de una serie larga de caudales medidos diarios. Existe solapamiento entre los datos de precipitación TRMM con los aforos en dicho punto, únicamente en dos periodos de tiempo:

Periodo 1: 1998-2001 (4 años)

Periodo 2: 2013-2014 (2 años)

Desafortunadamente, durante el periodo 2002-2012 se dejó de medir el nivel en la estación de Villa Florida, hasta que se renovó el sensor en el año 2013.

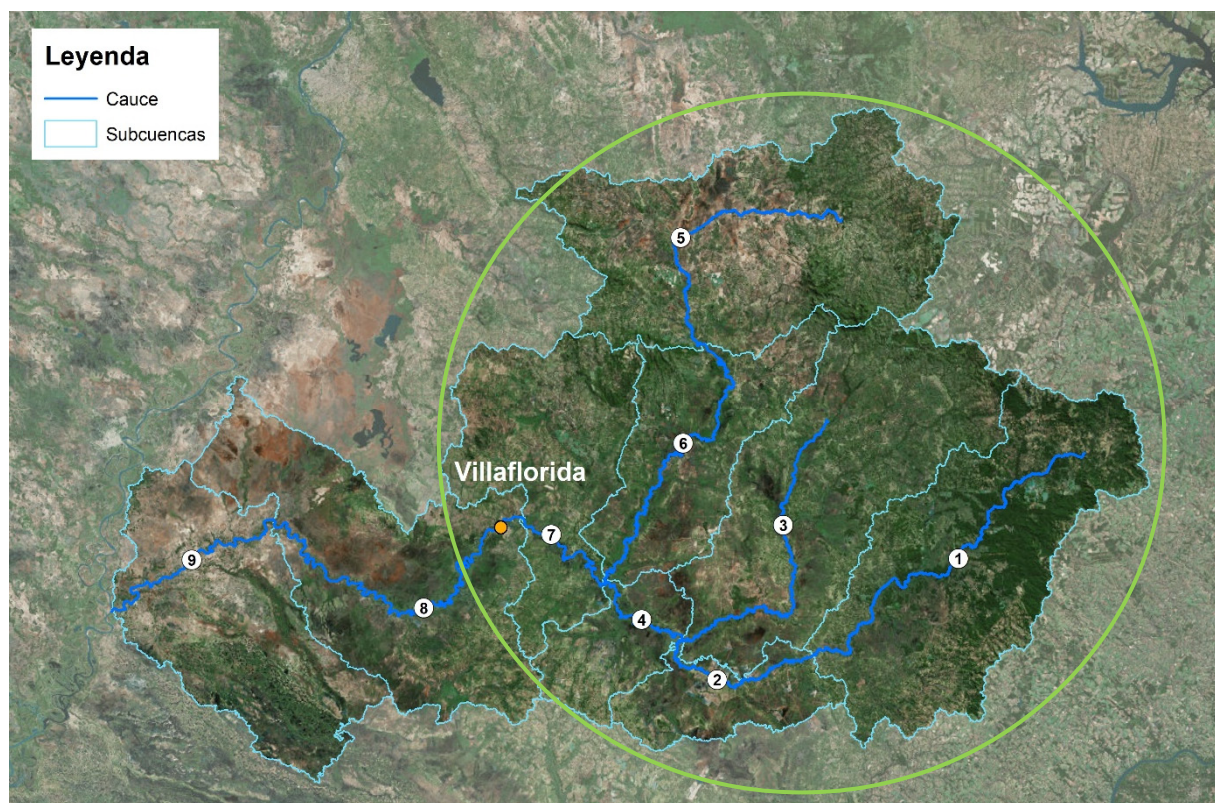


Figura 38. Subcuencas consideradas para el modelado de la cuenca del Tebicuary con indicación de las 7 situadas aguas arriba de la estación de aforo de Villa Florida utilizadas para la calibración del modelo.

Para calibrar los parámetros del modelo, se ha otorgado más peso a los datos del periodo 1, por ser más largo y por presentar previsiblemente menores alteraciones del régimen natural. La calibración se ha llevado a cabo combinado un procedimiento matemático de

optimización, con un ajuste final manual de los parámetros. La optimización se ha llevado a cabo con una variante del algoritmo "fmincon" incluido en el paquete numérico Matlab, empleando la función objetivo a minimizar $F_{obj} = 1 - NS$, donde NS es el coeficiente de Nash-Sutcliffe (su valor máximo es 1, lo que indica un ajuste perfecto). También se ha minimizado la misma función aplicada al logaritmo de los caudales (NSL), lo que produce que los valores altos no tengan tanto peso en la calibración. Los parámetros obtenidos, para ambos periodos y funciones objetivo, son los siguientes (Tabla 16):

	A	k	alfa	C	D	NS	Error Vol.
Periodo 1-NS	0.28	0.013	0.020	19.2	214	0.83	-0.6%
Periodo 1-NSL	0.26	0.022	0.014	18.4	559	0.78	-6.6%
Periodo 2-NS	0.20	0.015	0.028	22.5	205	0.88	-0.3%
Periodo 2-NSL	0.18	0.023	0.03	20.1	395	0.86	-4%

Tabla 16. Parámetros obtenidos para los periodos 1 y 2 y para las funciones objetivo NS y NSL.

La tabla también presenta, en la última columna y a título informativo, el error de volumen, si bien este indicador está muy influenciado por los caudales altos y no resulta muy relevante para los objetivos de este trabajo.

A la vista de estos resultados, se han determinado los siguientes valores finales para el modelo en situación actual, otorgando más peso a los resultados del periodo 1 (Tabla 17):

A	k	alfa	C	D
0.26	0.013	0.025	21	400

Tabla 17. Valores finales de los parámetros para el modelo en situación actual.

En las Figuras 39 y 40 se presentan las series medidas y ajustadas en los dos periodos de calibración. Finalmente, resulta un coeficiente NS de 0.82 para el periodo 1, y de 0.86 para el periodo 2.

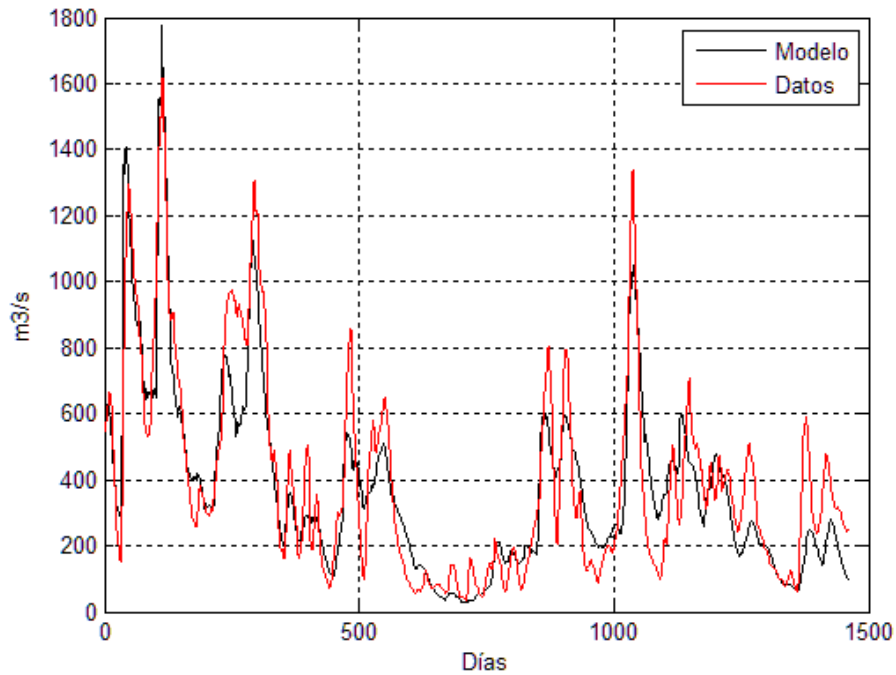


Figura 39. Ajuste del periodo 1 (1998-2001) con el modelo propuesto.

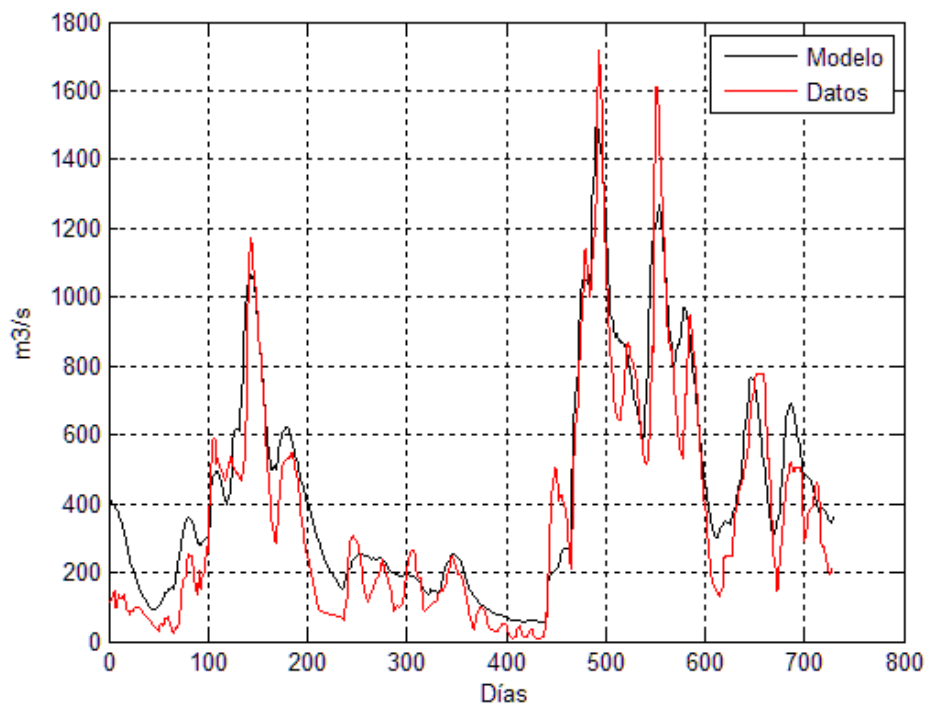


Figura 40. Ajuste del periodo 2 (2013-2014) con el modelo propuesto.

Parametrización para los escenarios futuros

Los parámetros de un modelo hidrológico pueden variar, tal y como pueden hacerlo los mecanismos físicos de generación de escorrentía, con el paso del tiempo. Por lo tanto, se debe analizar cuál debe ser el valor de los parámetros del modelo propuesto para los escenarios futuros, con cambio climático. Si bien en general esta tarea de proyectar parámetros es compleja y no está resuelta, el hecho de que el modelo LEM-DW se base en una hipótesis de equilibrio sustentada por la teoría de las curvas de Budyko, permite plantear de forma sencilla una perturbación de los parámetros obtenidos. Para ello, se asumen las siguientes hipótesis:

- 1) Las alteraciones en la cuenca derivadas del cambio climático no generarán cambios cualitativos en la vegetación ni en los ecosistemas asociados.
- 2) La geomorfología, tanto de la red fluvial como de los propios cauces (secciones tipo, pendiente, sinuosidad) no se verá afectada.

Como consecuencia de la segunda hipótesis planteada, los parámetros de celeridad y difusividad del modelo (C y D) no se modificarán con respecto a la situación actual. Es sabido, a partir del análisis de otras cuencas, que el parámetro k está ligado a la capacidad de almacenamiento del suelo, que a su vez guarda correlación con el índice de flujo base (base flow index o BFI, en inglés); se asumirá que este parámetro no se verá alterado por un cambio en las condiciones climáticas futuras. Sin embargo, tanto el parámetro A como alfa determinan de manera dinámica el coeficiente de escorrentía medio de la cuenca, y éste se verá alterado como consecuencia de los cambios en el índice de aridez. A partir de la series de precipitación y ETP futuras, se puede obtener el nuevo índice de aridez de la cuenca y, con la relación de Schreiber, la variación del coeficiente de escorrentía (CE) entre la situación actual y las condiciones futuras, derivada del cambio previsto en el índice de aridez (IAR) (Tabla 18):

	PREC	ETP	IAR	CE	A	Alfa
SIT. ACTUAL	4.50	4.29	0.953	0.386	0.260	0.025
RCP 4.5	4.62	4.54	0.982	0.375	0.264	0.024
RCP 8.5	5.59	4.71	0.844	0.430	0.244	0.028

Tabla 18. IAR, CE y valores de los parámetros A y alfa obtenidos para dos escenarios de cambio climático, RCP 4.5 y RCP 8.5.

Se observa un leve descenso del coeficiente de escorrentía para el RCP 4.5, y un aumento significativo del mismo para el RCP 8.5. Ahora hay que imponerle al nuevo modelo, en sus dos versiones, que cumpla con los valores del coeficiente de escorrentía estimados, modificando para ello el valor de los parámetros A y alfa. De la aplicación del modelo en otras cuencas, se sabe que alfa es proporcional al coeficiente de escorrentía, y dicha proporcionalidad se debe mantener en los escenarios futuros. Por lo tanto, queda por determinar únicamente A, tras obligar al modelo a cumplir con los coeficientes de escorrentía estimados; los resultados se presentan en las últimas dos columnas de la tabla

anterior. En definitiva, los parámetros del modelo hidrológico adoptados para los dos escenarios futuros con cambio climático quedan de la siguiente manera (Tabla 19):

	A	k	Alfa	C	D
RCP 4.5	0.264	0.013	0.024	21	400
RCP 8.5	0.244	0.013	0.028	21	400

Tabla 19. Valores finales parámetros para el modelo para los dos escenarios de cambio climático, RCP 4.5 y RCP 8.5.

Se puede observar que el escenario RCP4.5 muestra una cuenca prácticamente igual a la actual, pero en el RCP 8.5 el índice de aridez (y por tanto el parámetro A) se reducen visiblemente, mientras que el parámetro alfa aumenta, indicando una menor memoria del sistema (el inverso de alfa representa un tiempo característico de la cuenca en días, que pasa de 40 a 36 días).

3.3.3.Regímenes medios de caudales

Se ha ejecutado el modelo hidrológico LEM-DW para la cuenca del Tebicuary con los parámetros presentados en el apartado anterior, para los tres escenarios de trabajo considerados:

- 1) Situación actual (periodo 1998-2014).
- 2) Escenario con cambio climático RCP 4.5 (periodo 2045-2069).
- 3) Escenario con cambio climático RCP 8.5 (periodo 2045-2069).

A continuación se presentarán los resultados obtenidos.

Situación actual

El modelo LEM-DW ha proporcionado las series de caudales diarios en nueve puntos representativos de la cuenca, correspondientes a los puntos finales de las subcuencas consideradas. A partir de dichas series, es posible caracterizar el régimen de caudales en dichos puntos, tanto a escala anual como por meses.

Comenzando por el régimen anual, la Tabla 20 presenta varios percentiles representativos del caudal (también de forma gráfica en la Figura 41).

ACTUAL	Q5%	Q10%	Q50%	Q90%
SC-1	14.1	19.9	59.9	155.9
SC-2	18.1	24.9	75.1	194.2
SC-3	10.8	15.6	52.5	135.7
SC-4	33.6	44.5	141.8	362.0
SC-5	11.1	16.6	63.6	161.1
SC-6	18.1	27.2	98.9	233.7
SC-7	60.6	83.8	271.0	661.9
SC-8	78.8	102.9	327.4	756.7
SC-9	90.9	117.4	373.0	855.6

Tabla 20. Percentiles representativos del régimen de caudales en diversos puntos (m³/s) para la situación actual.

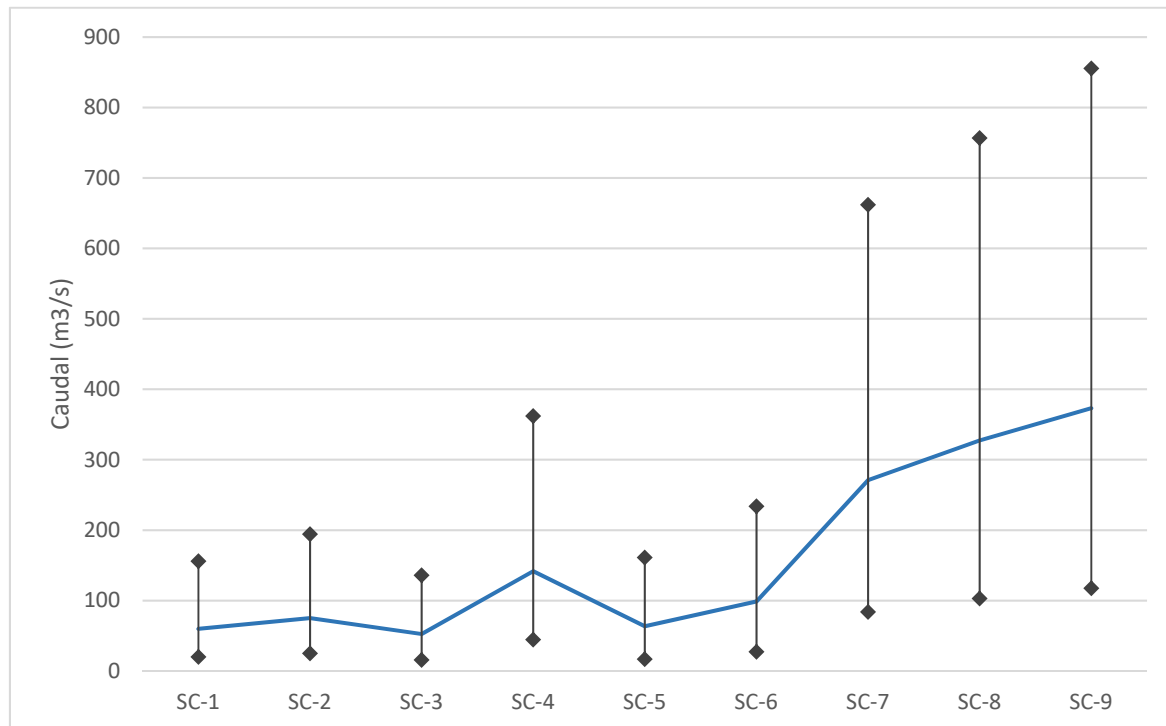


Figura 41. Percentiles del 10, 50 y 90% del régimen de caudales en los puntos de cálculo.

También se han obtenido las curvas de caudales acumulados para todas las subcuencas, y se ha representado un periodo de dos años de cada serie, para facilitar el análisis visual de las mismas. En las Figuras 42 y 43 se presenta las gráficas correspondientes a la subcuenca nº1 (SC-1) y nº7 (SC-7), correspondientes al Alto Tebicuary (aproximadamente a la altura de Yuty) y al Bajo Tebicuary en Villa Florida. El resto de gráficas se incluyen en el Apéndice 3.

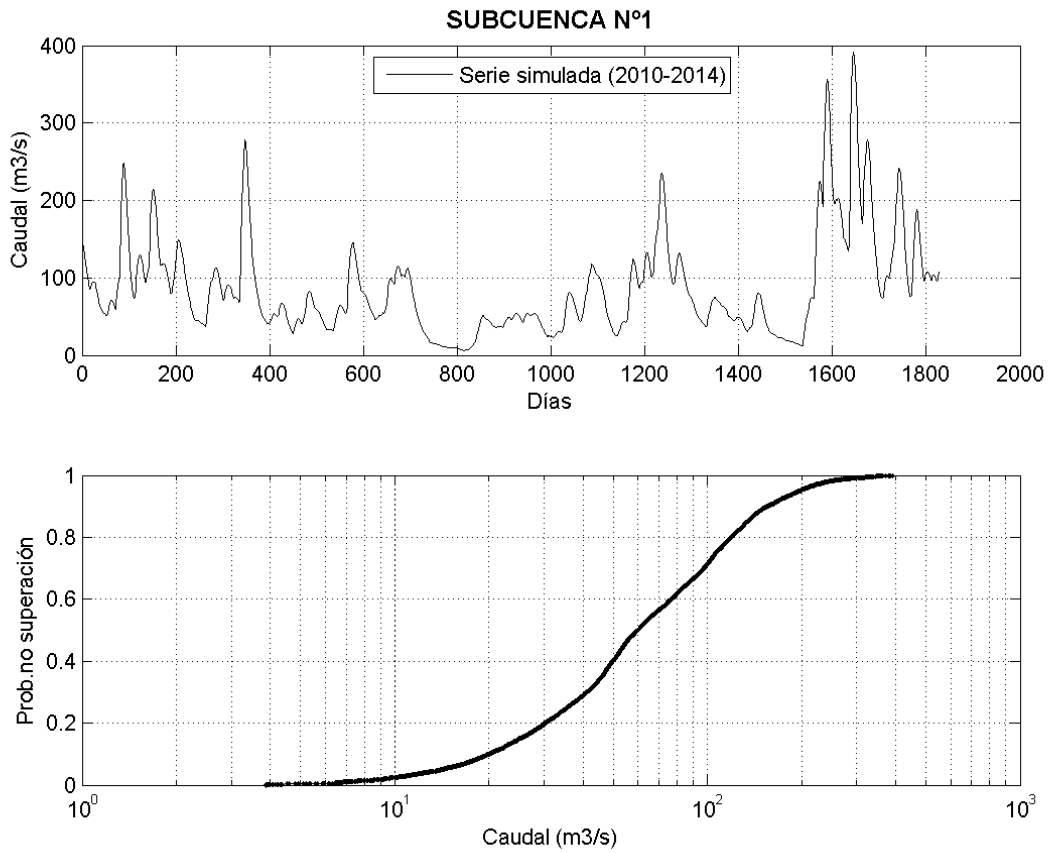


Figura 42. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-1 (Yuty).

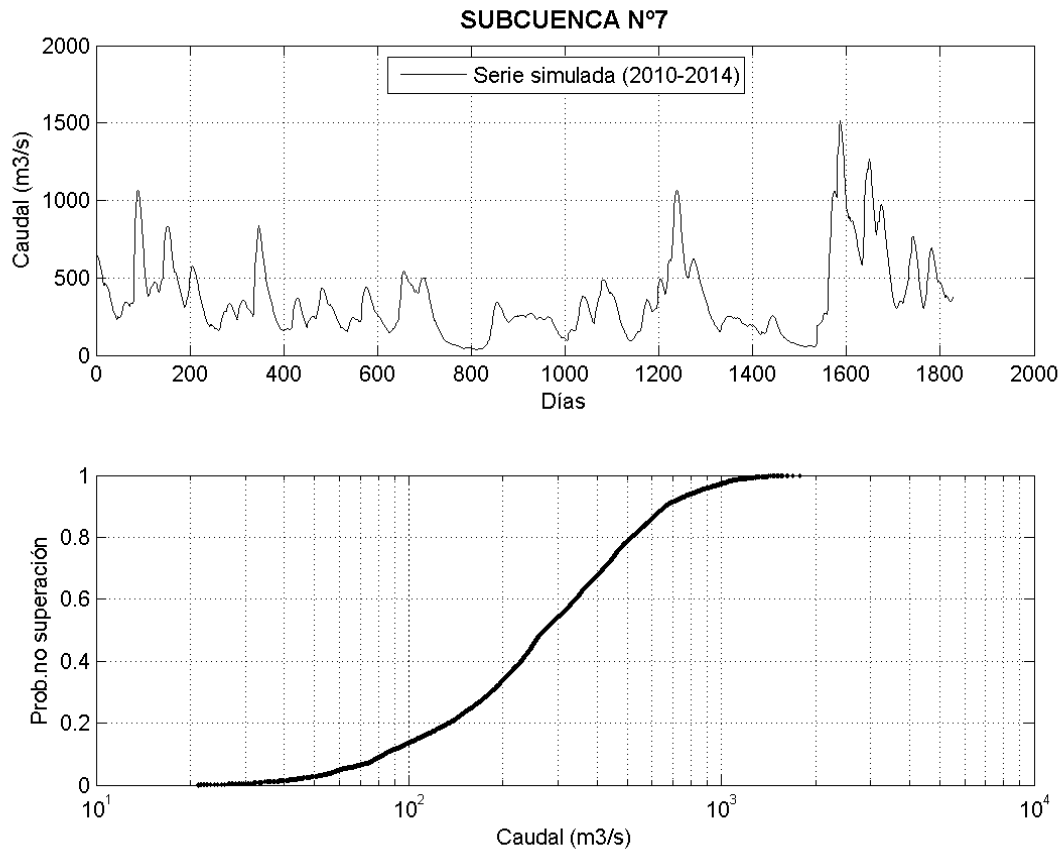


Figura 43. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-7 (Villa Florida).

Para el análisis mensual, en primer lugar se han obtenido las series de caudales agregadas, y se han determinado para cada mes los valores correspondientes al percentil del 10, 50 y 90% de probabilidad de superación; para facilitar la interpretación, los tres valores se han asimilado a un año seco, medio y húmedo, respectivamente. Los resultados en Yuty y Villa Florida se presentan en las Figuras 44 y 45, mientras que el resto se ha incluido en el Apéndice 3.

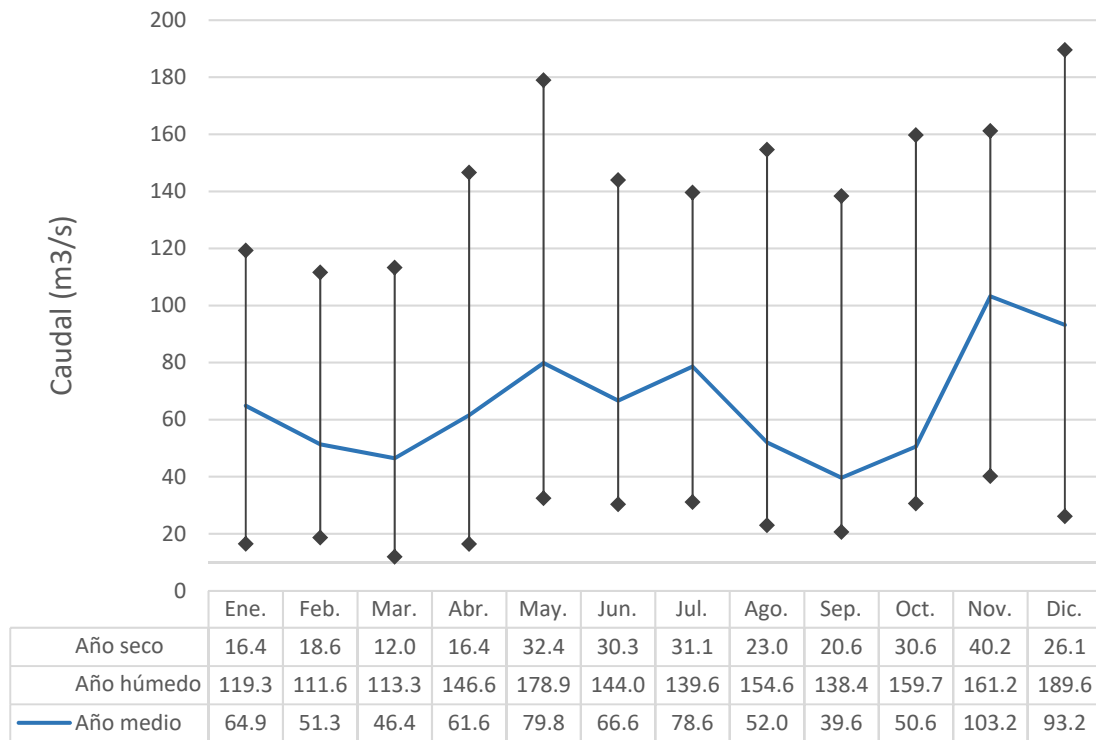


Figura 44. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-1.

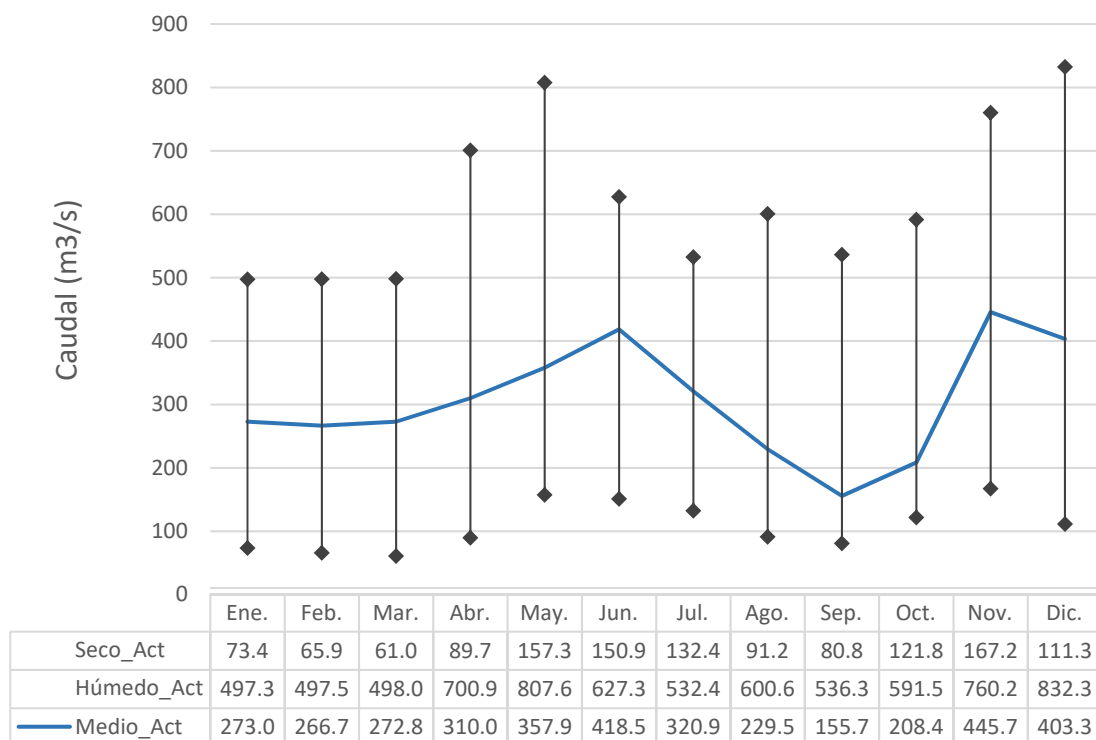


Figura 45. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-7 (Villa Florida).

Finalmente, se han obtenido los coeficientes de correlación entre las series diarias correspondientes a los diversos puntos, lo que permite una primera aproximación al grado de conocimiento que se puede adquirir de la cuenca a partir de la observación de ciertos puntos aislados. La Tabla 21 muestra los resultados de forma coloreada (un valor de 1 indica correlación total, y el cero indicaría series estadísticamente independientes). Se observa que en general la cuenca presenta altos coeficientes de correlación entre sus diferentes zonas, dándose la menor correlación en las subcuencas finales (8 y 9) y la subcuenca nº5 (alto Tebicuary Mi).

	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7	SC8	SC9
SC1		0.99	0.96	0.97	0.86	0.87	0.95	0.87	0.86
SC2	0.99		0.95	0.99	0.85	0.86	0.96	0.86	0.86
SC3	0.96	0.95		0.98	0.92	0.93	0.99	0.91	0.91
SC4	0.97	0.99	0.98		0.87	0.89	0.98	0.88	0.89
SC5	0.86	0.85	0.92	0.87		0.93	0.92	0.82	0.82
SC6	0.87	0.86	0.93	0.89	0.93		0.95	0.94	0.93
SC7	0.95	0.96	0.99	0.98	0.92	0.95		0.93	0.93
SC8	0.87	0.86	0.91	0.88	0.82	0.94	0.93		0.99
SC9	0.86	0.86	0.91	0.89	0.82	0.93	0.93	0.99	

Tabla 21. Coeficientes de correlación entre las series a escala diaria.

Resultados para el RCP 4.5

De igual forma, se han obtenido los resultados correspondientes al escenario con cambio climático correspondiente al RCP 4.5. Los percentiles representativos del régimen diario de caudales en cada punto se presentan en la Tabla 22.

RCP 4.5	Q5%	Q10%	Q50%	Q90%
SC-1	14.3	19.3	59.1	153.4
SC-2	18.0	23.9	74.3	188.9
SC-3	11.2	15.3	51.5	133.7
SC-4	33.0	42.8	139.7	352.4
SC-5	10.7	15.4	62.0	164.8
SC-6	18.8	25.7	95.7	236.3
SC-7	61.7	80.4	269.2	667.6
SC-8	78.5	99.1	328.6	771.9
SC-9	88.5	113.6	375.0	871.2

 Tabla 22. Percentiles representativos del régimen de caudales en diversos puntos (m³/s) para el RCP 4.5.

Las variaciones porcentuales con respecto a la situación actual se muestran de forma gráfica en la Figura 46.

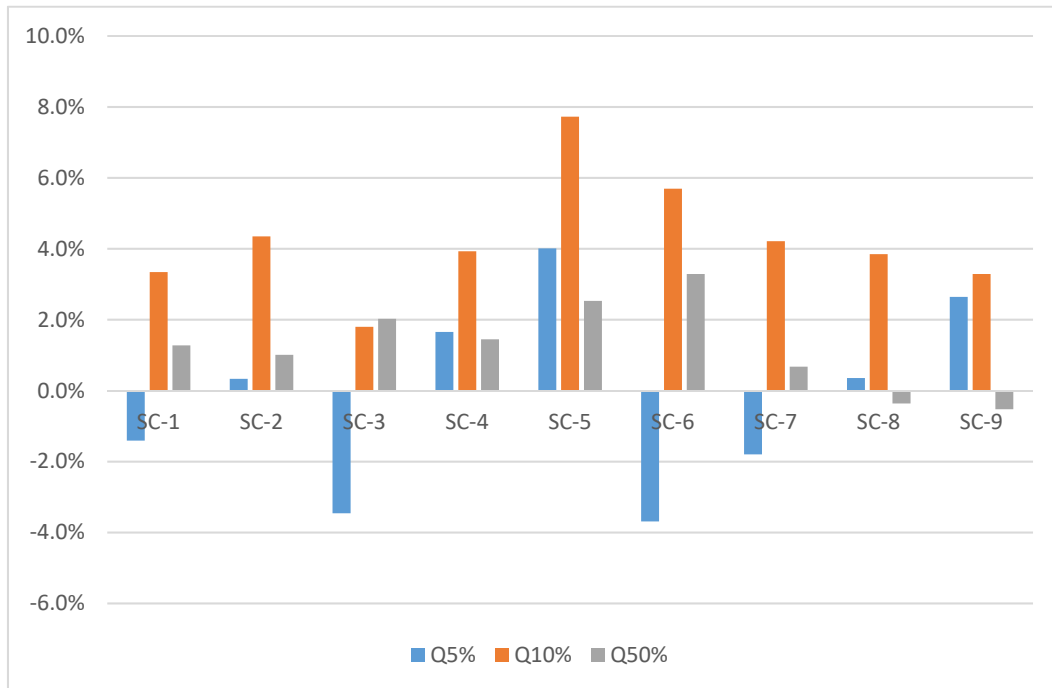


Figura 46. Variaciones porcentuales en tres percentiles representativos del régimen de caudales, para el escenario de cambio climático asociado al RCP 4.5.

Se observa, en primer lugar, que este escenario de cambio climático no conlleva alteraciones significativas en el régimen hidrológico de la cuenca (todas las variaciones son inferiores al 10%). En general, los caudales aumentarán ligeramente en todas las cuencas, si bien los caudales mínimos en estiaje (Q5%) podrán bajar en algunas de ellas.

Los resultados a escala mensual en Villa Florida (Figura 47) aportan algo más de información sobre las variaciones previstas, pero sin cambios sustanciales en la conclusión general.

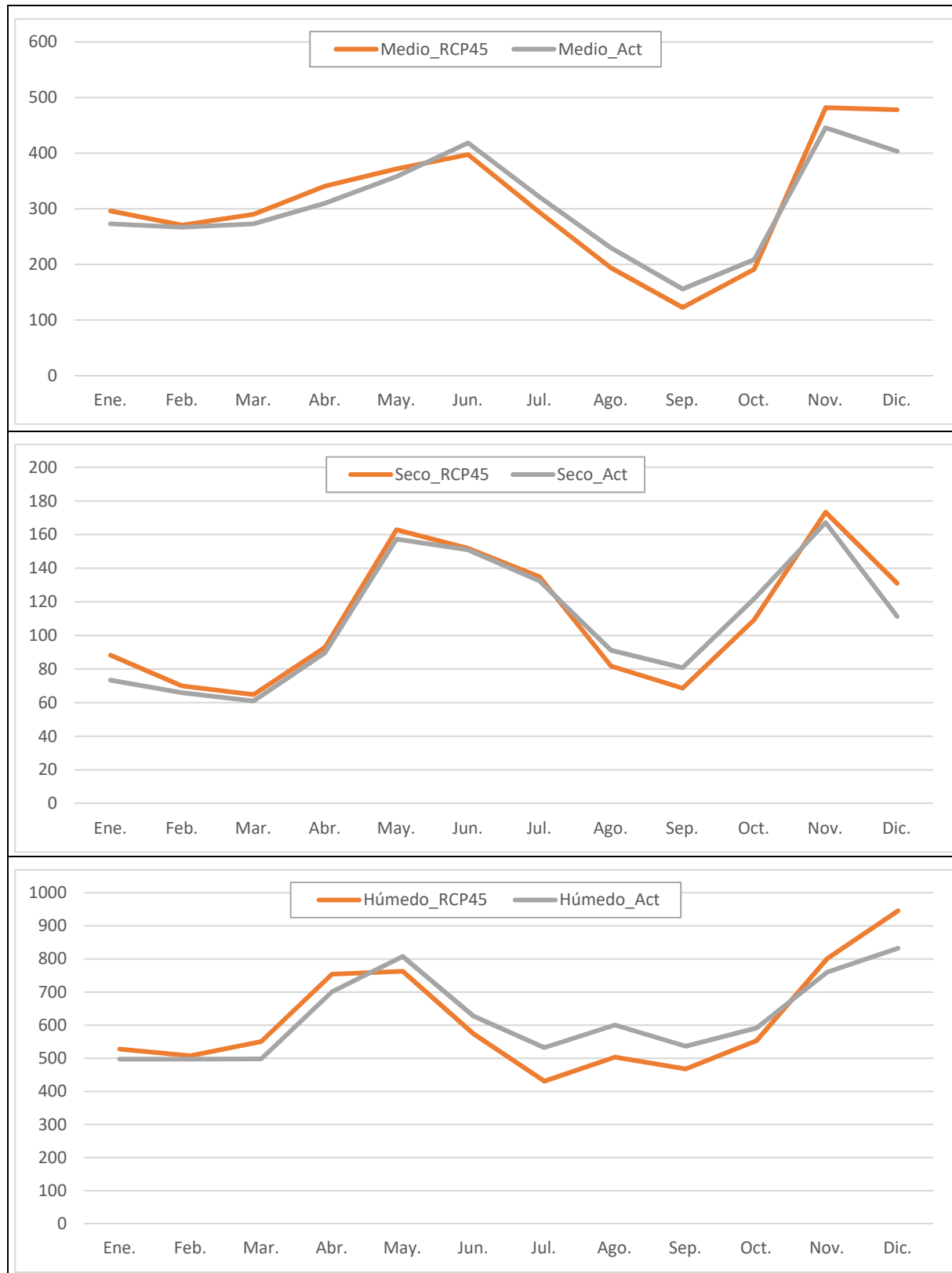


Figura 47. Comparación de los regímenes de caudales entre la situación actual y el del RCP 4.5 para un año medio, seco y húmedo. Escala vertical en m³/s. Nótese las diferencias en los rangos de valores en los ejes Y.

Resultados para el RCP 8.5

Finalmente, se han obtenido los resultados correspondientes al escenario con cambio climático correspondiente al RCP 8.5. Los percentiles representativos del régimen diario de caudales en cada punto se presentan en la Tabla 23.

RCP 8.5	Q5%	Q10%	Q50%	Q90%
SC-1	20.1	30.5	82.8	216.1
SC-2	26.9	38.2	103.4	266.4
SC-3	16.7	24.5	69.6	182.9
SC-4	49.8	70.1	192.0	496.4
SC-5	15.8	23.4	82.3	220.1
SC-6	29.6	41.0	129.3	311.5
SC-7	92.0	134.7	374.4	917.5
SC-8	116.0	166.2	442.6	1055.2
SC-9	131.6	189.3	495.6	1168.9

Tabla 23. Percentiles representativos del régimen de caudales en diversos puntos (m³/s) para el RCP 8.5.

Las variaciones porcentuales con respecto a la situación actual se muestran de forma gráfica en la Figura 48.

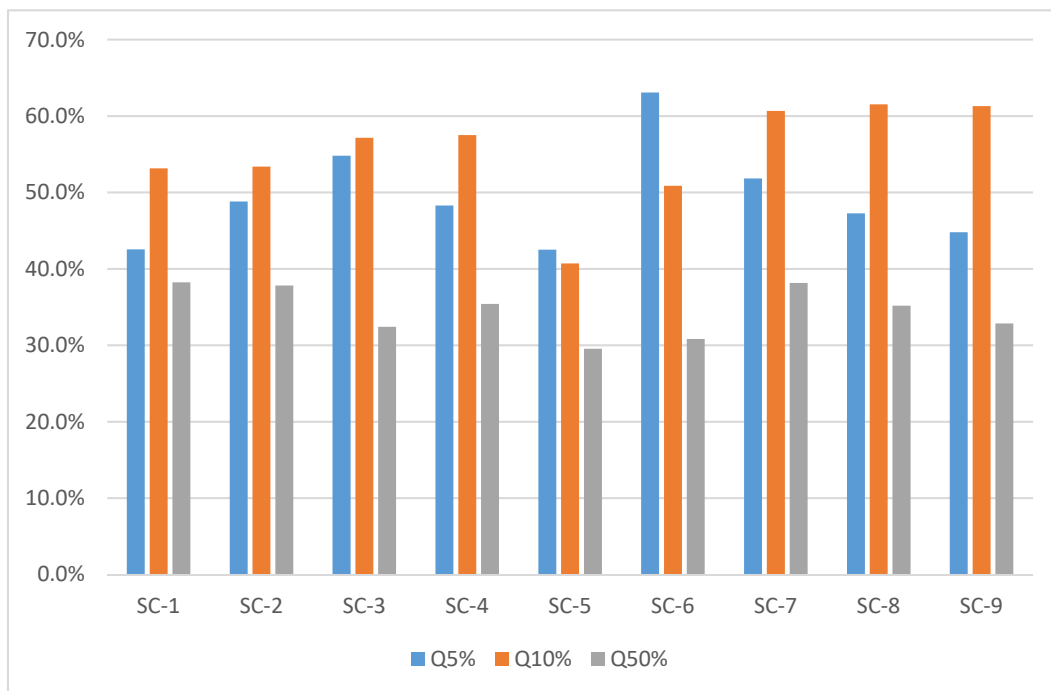


Figura 48. Variaciones porcentuales en tres percentiles representativos del régimen de caudales, para el escenario de cambio climático asociado al RCP 8.5.

A diferencia del escenario anterior más moderado, este escenario augura incrementos muy importantes en el régimen de caudales en todos los tramos de la cuenca, que oscilan del 30 al 60% según el percentil y la zona. Estos aumentos se deben en general a dos causas: por un lado, al aumento de la precipitación bruta; por otro, al aumento del coeficiente de escorrentía debido al descenso del índice de aridez.

Los resultados a escala mensual en Villa Florida (Figura 49) para el RCP 8.5 reflejan la estacionalidad de las variaciones previstas, pero sin cambios sustanciales en la conclusión general.

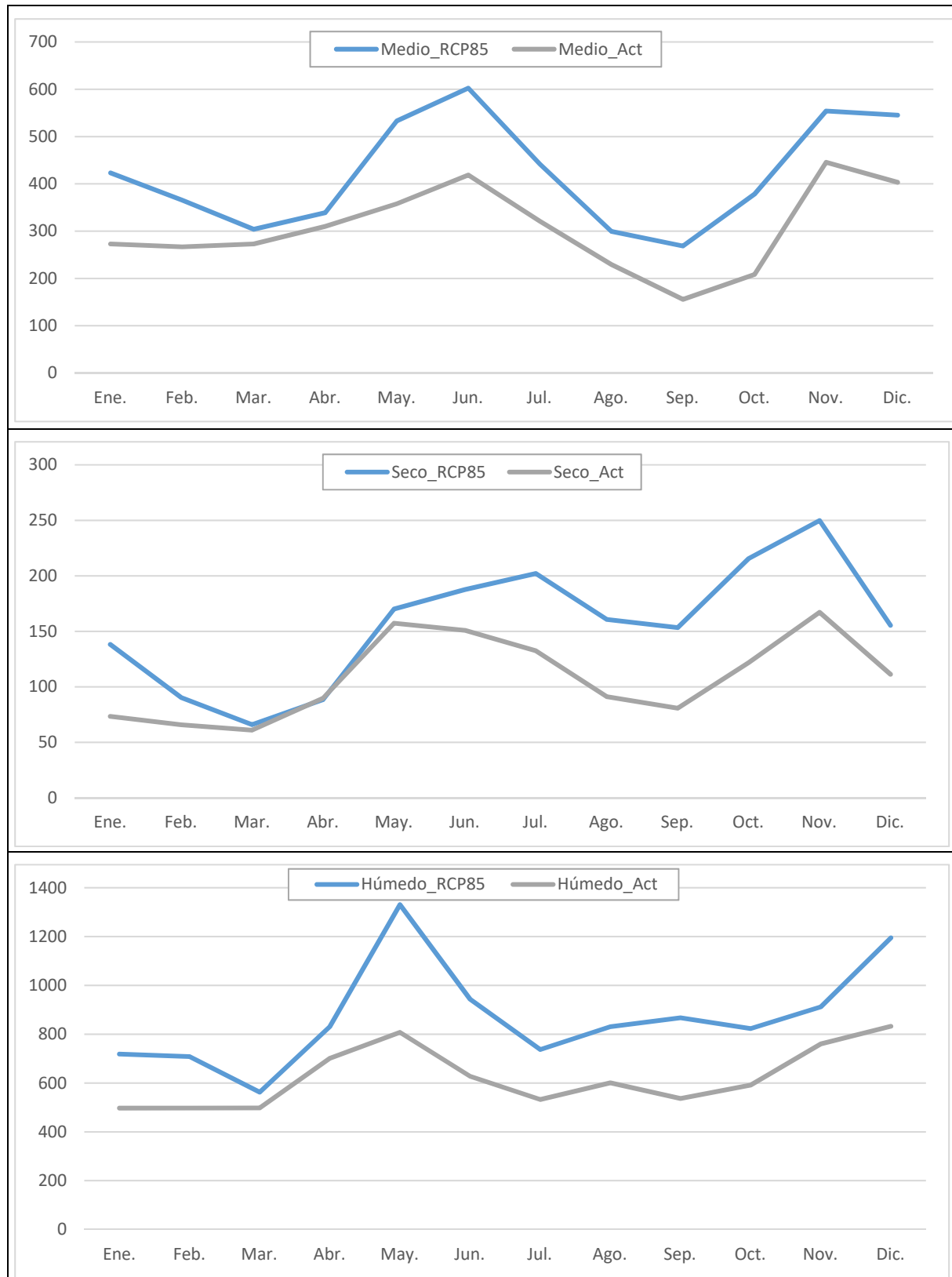


Figura 49. Comparación de los regímenes de caudales entre la situación actual y el del RCP 8,5 para un año medio, seco y húmedo. Escala vertical en m³/s. Nótese las diferencias en los rangos de valores en los ejes Y.

En situación actual, el estiaje más severo en años medios es el de septiembre, pero en años secos, que son los más limitantes, se sitúa en marzo, coincidiendo con el final de la campaña del arroz. El escenario con RCP 8.5 resolvería prácticamente la sequía de septiembre (al menos en términos hidrológicos), aumentando los caudales medios casi siempre durante todos los meses del año, salvo en el mes de marzo, cuando los estiajes severos (correspondientes a años secos) traerían aproximadamente el mismo caudal que en la actualidad.

4. DEFINICIÓN DE CAUDALES AMBIENTALES EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

En este capítulo se presenta la descripción de los métodos que serán utilizados para la obtención de los caudales ecológicos en la cuenca del río Tebicuary y los resultados derivados de su aplicación, incluyendo la propuesta final del régimen de caudales ecológicos para la cuenca.

4.1. Descripción de métodos de cálculo de caudales ambientales

Este apartado se centra, en primer lugar, en describir los métodos de tipo hidrológico para obtener los caudales ambientales en la cuenca del río Tebicuary, para pasar acto seguido a los métodos biológicos, de carácter más complejo.

4.1.1. Selección de métodos hidrológicos

Los métodos de cálculo de caudales ambientales basados en métodos hidrológicos consisten en aplicar una serie de operaciones y filtros sobre una serie temporal suficientemente larga (en general más de 10 años) de caudales diarios, medidos u obtenidos por simulación numérica en un determinado tramo fluvial. Al no intervenir de manera explícita otras variables (topográficas, hidráulicas o biológicas) más allá de la secuencia de caudales, se puede considerar, en sentido estricto, que los caudales ambientales derivados de estos métodos son un post-proceso del modelado hidrológico; por lo tanto, la validez y representatividad de los resultados obtenidos dependen directamente de la bondad de las series simuladas.

Para este estudio se ha optado por emplear una combinación de métodos, entre los que destaca el método de los caudales básicos propuesto por Palau (2003). Este método ha sido adoptado (en ocasiones con ligeras modificaciones) por diversas Administraciones Hidráulicas en España y Latinoamérica. Se caracteriza por ser algo más complejo en cuanto al cálculo que el resto, que se basan en obtener determinados estadísticos de la curva de caudales acumulados (un porcentaje de la media o ciertos percentiles) o en los determinar el mínimo de la media móvil de la serie, para una cierta ventana. No obstante, también se presentarán los resultados que proporcionan estos métodos basados en estadísticos y medias móviles.

Palau⁵ define el "Caudal básico de mantenimiento" como el caudal que hay que dejar en un río aguas abajo de cada aprovechamiento de regulación o derivación para mantener un nivel admisible de desarrollo de la vida acuática. El problema está en definir cuál es ese "nivel admisible de desarrollo". Como primera aproximación, se puede considerar que un nivel admisible tendrá que estar dentro del rango de variabilidad natural del sistema considerado (río) y lo más alejado posible de eventos hidrológicos con baja probabilidad de ocurrencia. El nivel admisible para el desarrollo de la vida acuática se logra con un "caudal de mantenimiento" representativo que se encuentre entre los valores mínimos y medios de la serie hidrológica estudiada. La variación hidrológica tiene un papel importante en la estructuración de la diversidad biótica en los ecosistemas de los ríos, ya que controla las condiciones de hábitat dentro del cauce del río, llanuras aluviales y las zonas hiporréicas (aguas subterráneas afectadas por la corriente). De esta forma, se reconoce que la variación hidrológica tiene un factor importante que favorece el hábitat de los ecosistemas ribereños. También se reconoce que tanto el rango de variación natural intra e interanual de los regímenes hidrológicos como las características asociadas de tiempos, duración, frecuencia y nivel de cambio, son fundamentales para sustentar la biodiversidad nativa y la integridad de los ecosistemas acuáticos.

El método parte del cálculo del caudal base a partir de la técnica de "medias móviles" aplicadas sobre intervalos de datos de amplitud creciente. La base de cálculo son las medias móviles obtenidas a partir de la fórmula:

$$\mu_{p,s}^j = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^{k=s} q_{p+k-1}^j$$

donde "s" es el intervalo escogido de media móvil (varía de 1 a 100), "p" es el número de orden de la media móvil dentro de cada columna de la matriz (varía de 1 a 366 - s) y "j" es el año considerado.

Sobre cada columna de esta matriz (que responde a cada uno de los años considerados), y empezando por el último año disponible (más actual), se calculan las medias móviles sobre intervalos de orden crecientes (retardos) comenzando en 1 (los propios datos de origen) hasta un máximo de 100 (medias de datos tomados de 100 en 100), de tal forma que se obtienen "j" tablas trapezoidales de 100 columnas y un número de filas que va de 365 en la primera columna (medias móviles de orden 1) a 266 en la última columna (medias móviles de orden 100).

De cada una de las columnas se obtiene el valor mínimo, que correspondería al promedio del período de caudales medios mínimos diarios de 1, 2, 3, ..., 100 días consecutivos, y que tiende hacia el caudal medio anual (media móvil de orden 365), siendo por tanto

⁵ A. Palau and J. Alcazar, "The Basic Flow: An Alternative Approach to Calculate Minimum Environmental Instream Flows", Proceedings of 2nd International Symposium on Habitat Hydraulics, Canadá, 1996.

siempre menor que él. Esto se repite para cada uno de los años considerados, y se obtiene una matriz de caudales mínimos de (nº de años) x100 datos. A partir de la matriz de mínimos, se calculan las medias aritméticas por columnas, obteniéndose una serie de 100 valores (vector vs) sobre el que se calcula el mayor incremento relativo entre cada par de valores consecutivos, siendo el Q_b el caudal mayor que define dicho par de valores. A continuación se presenta un esquema orientativo del proceso de cálculo del caudal básico a partir de una matriz inicial de caudales medios diarios de "n" años.

La flexibilidad de esta metodología permite variar, bajo un criterio adecuado, algunos de sus cálculos. Así sucede con la parte final del cálculo del Q_b , que puede realizarse, tal y como considera el propio autor, procediendo de la siguiente manera alternativa: en lugar de calcular directamente el vector media en función de la matriz de (nº de años) x100 obtenida, se calculan los incrementos relativos para cada una de las filas de dicha matriz, así como el caudal correspondiente al máximo incremento en cada una de ellas. De esta forma se obtiene un número de caudales mínimos igual al número de años del período de estudio, siendo el Caudal Básico la media de éstos. Para este estudio, el caudal básico obtenido por procedimiento inicial se denominará Q_{b1} , y el de aplicar ésta última variante Q_{b2} . Por lo tanto, se van a determinar dos valores diferentes del caudal básico para cada tramo.

Una vez calculado el caudal base (Q_b), el método original permite determinar un caudal adicional, llamado "caudal de acondicionamiento", el cual se considera un suplemento al Q_b , que se calcula a partir de la simulación de secciones representativas del tramo objeto de aprovechamiento y a partir de la comprobación del cumplimiento de unas condiciones de conservación predefinidas para el uso específico del tramo de estudio. Si el Q_b es insuficiente para cumplir con condiciones de habitabilidad o de calidad del agua, se puede establecer un caudal de acondicionamiento (caudal adicional al Q_b). El Q_b más el caudal de acondicionamiento, definen el denominado caudal de mantenimiento. En el caso del Tebicuary, se considerará que el caudal de acondicionamiento es igual o menor que el básico, por lo que caudal básico, caudal de mantenimiento y caudal ambiental (término no reconocido por Palau) representan la misma magnitud.

Antes de aplicar el método de Palau, se debe realizar un análisis exploratorio gráfico y cuantitativo, con el fin de confirmar la consistencia y homogeneidad de la serie hidrológica utilizada. En primer lugar, debe garantizarse que las series utilizadas no presentan tendencias en sus parámetros estadísticos (es decir, son estacionarias). Por otra parte, el método de Palau es susceptible a la variabilidad hidrológica de los registros de caudal, por lo que también se debe comprobar el coeficiente de variación interanual para determinar si la desviación típica era significativa con respecto a la media.

En el cálculo del caudal básico por el método de las medias móviles, es importante determinar el mes de inicio del año hidrológico, ya que puede condicionar el resultado final. Por ello Palau recomienda iniciar el año en un mes que ni contenga el mínimo caudal medio diario anual, ni el caudal medio mensual diario más bajo. Para el caso del río Tebicuary, es adecuado el uso del año natural, con las series comenzando en enero.

Además del caudal básico, para este proyecto se aplicarán otros métodos hidrológicos alternativos de determinación de los caudales ambientales, que han sido utilizados en otros lugares como valores de referencia (y, concretamente, recomendados por la normativa de

aguas española, hasta la transposición de la Directiva Marco del Agua en 2003, que dio un impulso a los métodos biológicos):

- Valores medios de los mínimos anuales de la media móvil de 21 y 25 días (Q_{mm21} , Q_{mm25}).
- Percentiles del 5 y 15% de la curva de caudales acumulados (Q_{p5} y Q_{p15}).
- Caudal equivalente al 10% del caudal medio interanual (Q_{ma}).

En definitiva, en este estudio se determinarán siete valores de caudales ecológicos para cada tramo de río: dos derivados del método del caudal básico, más los cinco valores anteriores. Dada la naturaleza heurística de todos estos métodos y la limitada base ecológica en que se sustentan, el hecho de tener obtener tantos estimadores sólo permite tener una idea de la volatilidad (o estabilidad) del enfoque hidrológico y, en última instancia, proponer un caudal medio ponderando con diferentes pesos los resultados. Tales pesos deberán asignarse por juicio de experto, y en este caso se proponen los siguientes pesos:

- 20% para cada uno de los caudales básicos (total 40%).
- 12.5 % para los caudales de media móvil 21 y 25 (total 25%).
- 12.5 % para los caudales del percentil 5 y 15% (total 25%).
- 10% para el caudal basado en el caudal medio.

Por tanto, el estimador medio del caudal ambiental por tramos será:

$$Q_a = 0.4 \cdot \frac{Q_{b1} + Q_{b2}}{2} + 0.25 \cdot \frac{Q_{mm21} + Q_{mm25}}{2} + 0.25 \cdot \frac{Q_{p5} + Q_{p15}}{2} + 0.1 \cdot Q_{ma}$$

4.1.2. Modelos hidro-biológicos o de simulación de hábitat

Los métodos de modelación de la idoneidad de hábitat se basan en la simulación hidráulica, acoplada al uso de curvas de preferencia del hábitat físico para la especie o especies objetivo, obteniéndose curvas que relacionen el hábitat potencial útil con el caudal en los tramos seleccionados. Para el desarrollo de estos métodos se empleará la metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology), que analiza las diferentes condiciones hidráulicas que se producen en un cauce al variar los caudales circulantes, relacionando además las preferencias de las especies seleccionadas mediante el uso de curvas, y obteniendo finalmente una relación entre el caudal circulante y el hábitat disponible para la especie.

El esquema conceptual de la metodología de modelización del hábitat combina dos factores fundamentales: las curvas de preferencia de la fauna potencial y las condiciones físicas del hábitat. Integrando el modelo hidráulico (que simula las condiciones de los distintos

segmentos del río en cuanto a niveles y velocidades, en función de los caudales circulantes) y el valor potencial del hábitat fluvial (que indica la idoneidad de dichas condiciones para las especies que pueden estar presentes), se llega al concepto del Hábitat Potencial Útil (HPU), herramienta con la que se planteará el régimen ambiental de caudales. Para las correspondientes modelizaciones, se aplicará el programa Rhyhabsim (Ian G. Jowett, NIWA, NZ). En la Figura 50 se presentan un ejemplo de curvas de preferencia para la trucha común (salmo trutta), donde se pueden observar las diferencias entre alevines y adultos.

La aplicación de este método requiere un conocimiento preciso de la geometría y características hidráulicas de los tramos donde es aplicado. En este caso, se han realizado campañas de campo específicas, en el marco del proyecto, para caracterizar las secciones, pendiente hidráulica, velocidades y caudales en un punto representativo del Tebicuary-Mi, en concreto en las cercanías de la localidad de Iturbe. Además, se dispone como información de partida, de datos similares en el río Tebicuary a la altura de Villa Florida. La descripción de los métodos y resultados de la campaña de campo realizada en el Tebicuary-Mi (Iturbe) es objeto de un documento específico dentro del proyecto.

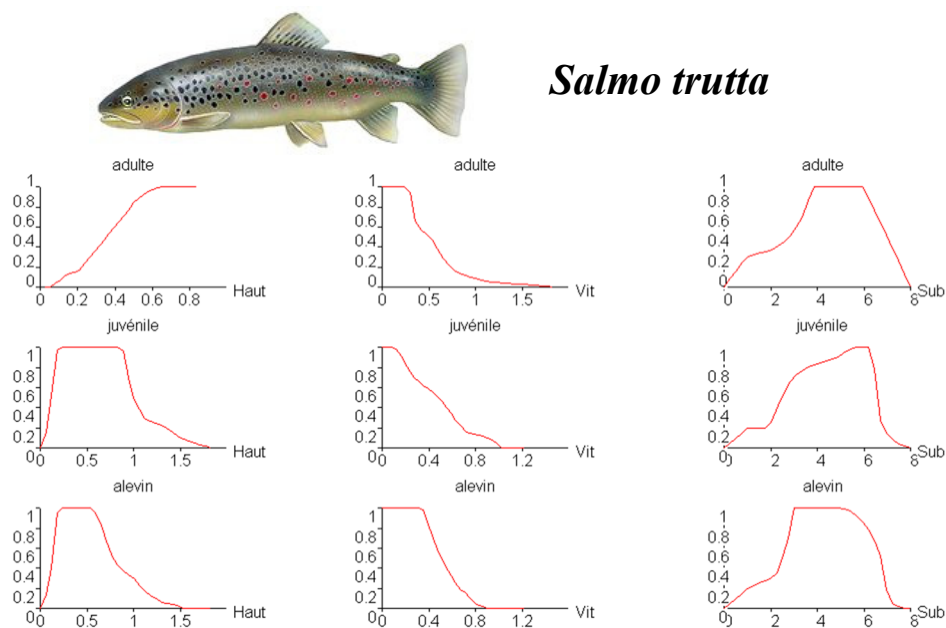


Figura 50. Curvas de preferencia obtenidas para la trucha común en diferentes estadios de desarrollo.

Las especies representativas que se han elegido para determinar el HPU, tras conversaciones con los agentes implicados y a la vista de las capturas registradas en los principales puertos fluviales, son las siguientes (nombre común):

- Suribí (pintado y atrigrado)
- Dorado
- Carimbatá o Sábalo

Dada la falta de información específica sobre estas especies, sus curvas de preferencia serán estimadas por criterios biológicos, a partir de datos de otras especies mejor conocidas.

4.2. Definición de caudales ecológicos

4.2.1. Caudales ambientales basados en métodos hidrológicos

Los denominados métodos hidrológicos permiten estimar el caudal ambiental asociado a un tramo de río a partir de una serie suficientemente larga (generalmente más de 10 años) de caudales diarios. En este proyecto, se han obtenido por simulación numérica series diarias de 17 años de duración (1998-2014) en nueve puntos representativos de la red fluvial, tanto en situación actual como para dos escenarios de cambio climático.

Se han aplicado cuatro algoritmos para el cálculo de caudales ambientales:

1. Método del caudal básico original (Qbas1)
2. Método del caudal básico con variante (Qbas2)
3. Método de las medias móviles de 21 días (Qmm21)
4. Método de las medias móviles de 21 días (Qmm25)

Finalmente, para condensar la información obtenida, se ha propuesto una combinación lineal de dichos valores para obtener un caudal ambiental ponderado por tramos (Qamb). Los resultados para los tres escenarios considerados se presentan en las Tablas 24 a 26, y gráficamente en las Figuras 51 y 52.

ACTUAL	Qbas1	Qbas2	Qmm21	Qmm25	Q_AMB	Q_AMB/Q_med
SC1	22.8	25.1	20.2	20.8	22.2	28.4%
SC2	27.0	31.8	25.0	25.9	27.4	28.3%
SC3	20.2	21.6	17.3	17.7	19.2	28.7%
SC4	50.1	57.0	47.2	48.6	50.7	28.1%
SC5	24.3	17.7	18.9	19.6	20.1	25.4%
SC6	34.1	26.8	31.7	32.5	31.3	26.5%
SC7	98.8	84.5	93.4	95.8	93.1	27.3%
SC8	133.3	143.7	111.9	115.1	126.0	31.5%
SC9	147.5	162.9	126.8	130.3	141.9	31.5%

Tabla 24. Caudales ambientales obtenidos por diversos métodos hidrológicos para la situación actual (m³/s).

RCP45	Qbas1	Qbas2	qmm21	qmm25	Q_AMB	Q_AMB/Q_med
SC1	24.1	24.3	19.3	19.8	21.9	28.0%
SC2	28.1	28.8	24.2	24.9	26.5	27.4%
SC3	19.8	14.5	16.7	17.1	17.0	25.4%
SC4	52.4	53.9	45.3	46.6	49.6	27.5%
SC5	21.2	14.9	17.3	17.9	17.8	22.5%
SC6	34.8	24.5	28.3	29.0	29.2	24.8%
SC7	98.8	76.7	87.3	89.4	88.0	25.7%
SC8	127.9	137.9	106.2	108.9	120.2	29.9%
SC9	144.4	153.7	119.4	122.5	135.0	29.7%

 Tabla 25. Caudales ambientales obtenidos por diversos métodos hidrológicos para el escenario con cambio climático RCP 4.5 (m³/s).

RCP85	Qbas1	Qbas2	qmm21	qmm25	Q_AMB	Q_AMB/Q_med
SC1	32.1	26.5	27.2	28.3	28.5	26.6%
SC2	38.8	29.1	34.3	35.8	34.5	25.9%
SC3	30.2	23.7	22.7	23.7	25.0	27.5%
SC4	75.2	54.0	63.1	65.8	64.5	26.1%
SC5	29.6	26.0	25.0	26.4	26.7	24.5%
SC6	54.7	42.3	43.0	44.4	46.1	28.5%
SC7	152.5	120.2	125.2	130.4	132.1	28.2%
SC8	180.0	143.4	157.6	161.8	160.7	29.3%
SC9	201.8	161.9	175.4	180.7	180.0	29.1%

 Tabla 26. Caudales ambientales obtenidos por diversos métodos hidrológicos para el escenario con cambio climático RCP 8.5 (m³/s).

En situación actual, los caudales ecológicos resultantes se sitúan, de manera consistente, entre el 25 y el 32% del caudal medio interanual de los tramos de estudio. El tramo que requiere un menor caudal ambiental, en términos relativos, es la subcuenca nº 5 (alto Tebicuary Mi), mientras que las más demandantes son las subcuencas finales (7, 8 y 9). En el escenario con RCP 4.5 la pauta se mantiene muy similar, con demandas algo menores en los tramos finales (bajan del 32% al 30% del caudal medio, aproximadamente). Para el escenario más extremo con RCP 8.5, los caudales ambientales se reducen una vez más, en términos relativos, si bien en absolutos aumentan notablemente.

En la Figura 51 se puede apreciar que los cuatro métodos aplicados producen resultados dentro del mismo rango, aunque los basados en medias móviles tienden a dar cifras algo más bajas (10-20%). En cuanto a la comparación de las cifras absolutas entre escenarios (Figura 52), se confirma lo ya expresado, con los resultados más favorables para el escenario con RCP 4.5.

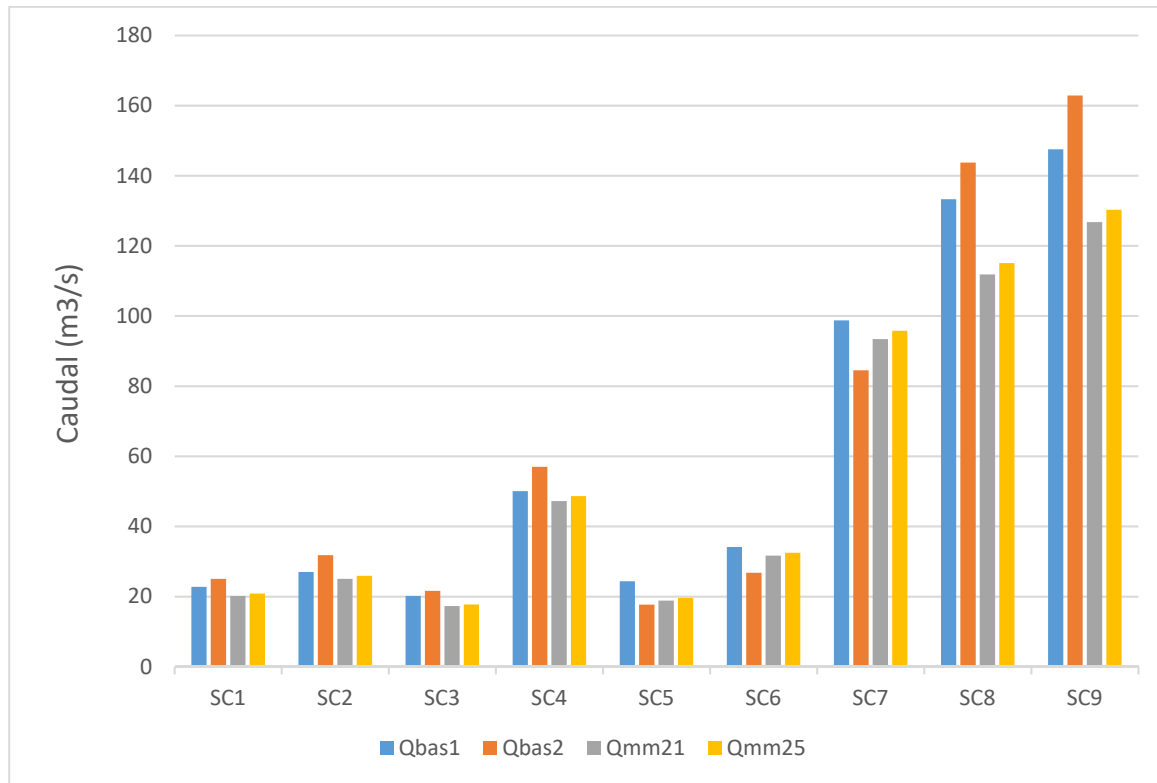


Figura 51. Comparación de los caudales ambientales obtenidos en la situación actual, con los cuatro métodos seleccionados.

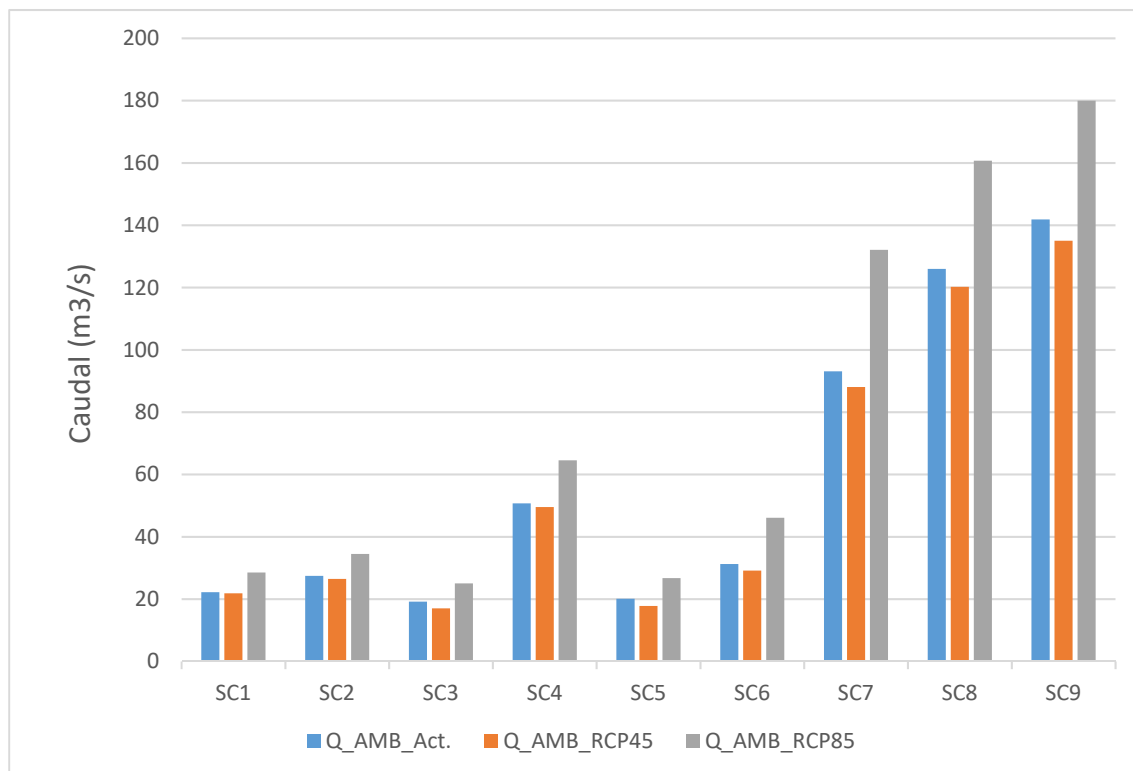


Figura 52. Comparación de caudales ambientales para las diferentes subcuencas, en función del escenario de cálculo.

4.2.2. Caudales ambientales basados en modelos biológicos

Introducción y objetivos

Para favorecer el buen estado de conservación de una determinada especie piscícola se deben conocer tanto sus necesidades ecológicas, como la respuesta que ésta muestra frente a las distintas afecciones antrópicas a las que se puede ver sometida. Partiendo de este conocimiento previo se puede diseñar un programa de medidas que compatibilice su conservación con el desarrollo económico y social del entorno en el que habita. En este sentido, hay numerosos factores que pueden afectar al desarrollo de la especie, como son la cantidad y calidad del agua, la estructura física del cauce o la disponibilidad de recursos tróficos. Todos estos componentes del hábitat fluvial se ven muy influenciados por diferentes actividades antrópicas, como puede ser el desarrollo de la agricultura (afecciones sobre la vegetación de ribera) o el incremento del volumen de agua detraído para el abastecimiento (disminución de caudales), las cuales limitan la habitabilidad del medio fluvial.

La determinación de un régimen de caudales ecológicos mínimos mediante métodos hidrobiológicos se fundamenta en la estimación de la cantidad de hábitat útil para la especie en función del caudal circulante. La determinación del hábitat útil, como Hábitat Potencial Útil (HPU), se basa en la combinación de dos modelos: (1) un modelo hidráulico, que permite simular las características hidráulicas de un tramo fluvial para un rango de caudales y (2) un modelo biológico, que estima las preferencias de la especie en función de la variación de las características hidráulicas. A partir de la conjunción de las funciones de HPU, junto con la información sobre la distribución de caudales en régimen natural, se obtienen las curvas HPU-Caudal. Estas curvas son la base para el establecimiento de los caudales ecológicos a través del análisis del efecto que los distintos escenarios hidrológicos tienen sobre la habitabilidad del tramo fluvial para las especies que lo habitan.

Por ello, el objetivo del presente estudio es determinar los caudales mínimos necesarios para garantizar unas condiciones hidráulicas adecuadas para la vida piscícola en el río Tebicuary.

Metodología

Tramo de estudio:

En el presente trabajo se ha seleccionado un tramo de estudio del río Tebicuary en Villa Florida, donde se dispone de secciones topográficas (ver apartado 2.4) y se han desarrollado modelos de simulación del hábitat para la definición de un régimen de caudales ecológicos mínimos. Concretamente la longitud del tramo de estudio ha sido de 1 km aguas abajo del puente de Villa Florida, con una pendiente hidráulica de 0.05%. La sección empleada se encuentra 500 m aguas abajo del puente (Figuras 12, 13 y 14) en un tramo relativamente recto y con un ancho aproximado de 215 m (Mongelós et al. 2015). Dicha sección ha sido considerada como representativa del tramo de estudio, es decir, desde el puente hasta 1 km aguas abajo.

Finalmente, se ha considerado que la composición del sustrato del tramo de estudio está formada por un 2% de bloques, 2% de cantos, 2% de gravas gruesas, 2% de gravas finas, 80% de arenas, 12% de limos, 0% de vegetación y 0% de roca madre (Tabla 27).

TIPO DE SUSTRATO	DIÁMETRO	COMPOSICIÓN (%)
Vegetación		0
Limos	<0.062 mm	12
Arenas	0.062 a 2 mm	80
Gravas finas	2 a 9 mm	2
Gravas gruesas	9 a 64 mm	2
Cantos	64 a 256 mm	2
Bloques	> 256 mm	2
Roca madre		0

Tabla 27. Clasificación de los tipos de sustrato, rango de diámetro y porcentaje de composición utilizado en la caracterización del lecho del tramo de estudio.

Serie de caudal natural:

Una fase fundamental para la estimación del régimen de caudales ecológicos mínimos es la obtención del régimen natural de caudales. Esta información es necesaria para simular y conocer las condiciones hidráulicas del tramo en el rango de valores de caudal que debería circular por el tramo objetivo de manera natural. Para ello, se ha utilizado la información hidrológica generada en el apartado 3.3 del presente estudio (Figura 53), es decir, la serie de caudales naturales y la curva de gasto.

Permanencia de caudales (1974-2002)

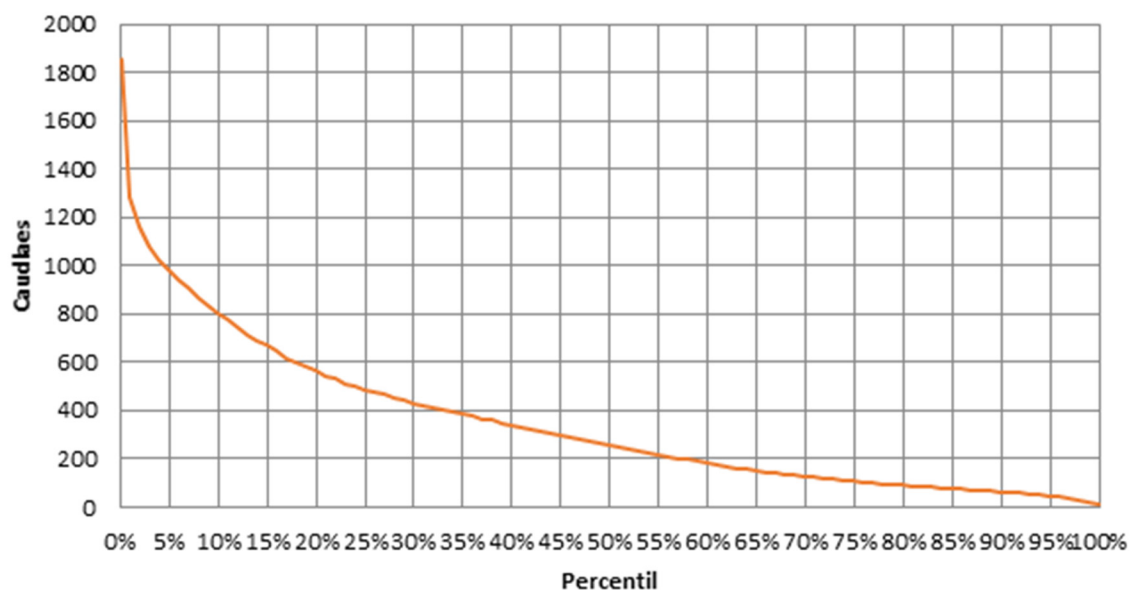


Figura 53. Curva de distribución acumulada de caudales (m³/s) en el río Tebicuary en villa Florida para el periodo comprendido entre 1974 y 2002.

Estimación del régimen de caudales ecológicos mínimos mediante simulación del hábitat:

La estimación del régimen de caudales ecológicos mínimos se ha realizado mediante métodos de simulación del hábitat. Este método proporciona una cuantificación de las capacidades potenciales de acogida para la fauna piscícola en función del caudal, a un nivel de estudio de amplitud espacial comprendida entre el meso y el microhábitat. De forma general, este método permite determinar la cantidad de hábitat disponible en un tramo fluvial para diversas especies ante diferentes escenarios de gestión de los recursos hídricos. La simulación del hábitat es un método ampliamente extendido y utilizado en muchos países del mundo, siendo uno de los métodos reconocidos por la actual legislación española en materia de planificación hidrológica (ORDEN ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica).

Para la determinación del hábitat útil mediante métodos de simulación se combinan dos modelos: un modelo hidráulico, que permite la estimación de los gradientes hidráulicos que se producen dentro de un tramo para un rango de caudales analizados, y un modelo de carácter biológico, que estima las preferencias de los organismos considerados, a través de la interpretación de las respuestas de las diferentes especies a los gradientes de una serie de parámetros hidráulicos y físicos (velocidad, calado y sustrato). La combinación de los dos modelos permite la cuantificación del Hábitat Potencial Útil, en forma de Hábitat Potencial Útil (HPU), para un rango de caudales. A partir de esta información se pueden determinar los regímenes de caudales necesarios para mantener un nivel de funcionalidad aceptable de acuerdo a criterios que se consideren a priori.

Las fases principales para el cálculo de caudales ecológicos mediante el método de simulación del hábitat son: (1) el desarrollo de un modelo hidráulico, (2) desarrollo o adopción de un modelo biológico para las especies representativas del tramo, (3) obtención del régimen natural de caudales, (4) simulación del hábitat, (5) establecimiento de criterios y (6) cálculo del régimen de caudales ecológicos. Cada una de estas fases y los trabajos desarrollados en el marco de este proyecto se describen brevemente en los siguientes apartados.

Modelo Hidráulico

La aplicación de los métodos de simulación del hábitat requiere en primer lugar el desarrollo y aplicación de un modelo hidráulico en una estación de estudio representativa de un segmento fluvial más amplio. Dadas las características hidromorfológicas del tramo de estudio se ha desarrollado un modelo hidráulico unidimensional. Para ello se ha empleado el programa RHYHABSIM (Jowett, 1989), el cual está diseñado específicamente para el cálculo de caudales ecológicos.

La simulación hidráulica se ha realizado mediante el software RHYHABSIM 5.0 (Jowett 1989), que está basado en los principios del PHABSIM (Bovee 1982), ofreciendo mayores prestaciones. Previamente, se llevó a cabo el procesado de los datos hidráulicos y de los datos topográficos para generar los archivos (*.rhb) con el formato adecuado para su lectura en RHYHABSIM 5.0. Una vez introducidos los datos, el proceso de simulación hidráulica consta de cuatro pasos básicos:

1. **Chequeo de los datos de entrada:** En este primer punto se analiza la calidad de los datos introducidos en el programa y la existencia de posibles errores en la composición del sustrato, la velocidad y el calado.
2. **Calculo del caudal e introducción del caudal de calibración:** El programa calcula el caudal en cada sección a partir de los datos de distancia, profundidad y velocidad obtenidos en campo. Se analiza la coherencia entre los caudales medidos y, a partir de éstos, se calcula el caudal de calibración, que es el dato en el que se basan los procesos de cálculo de los factores de distribución de caudales medios, el calibrado de las curvas de gasto y del perfil longitudinal de la lámina de agua. Normalmente, este caudal de calibración se estima como la media de los caudales medidos en la sección estudiada.
3. **Definición de las curvas de gasto:** Las curvas de gasto son la base del modelo hidráulico que se utilizan para predecir el nivel de la lámina de agua con caudales diferentes de los medidos. RHYHABSIM ajusta las curvas de gasto a partir de los datos de altura de lámina de agua y caudal medidos en las campañas de campo. Este cálculo se puede hacer mediante diferentes métodos que ofrece el software, siendo el método empleado el ajuste a través de mínimos cuadrados.
4. **Cálculo y edición de los factores de distribución de la velocidad:** El factor de distribución de velocidad se calcula para cada celda, es decir, cada una de las divisiones del transecto, a partir de la velocidad media en el transecto y la velocidad en esa celda. Cuando se simulan otros caudales distintos a los medidos en las campañas de campo, las velocidades en cada celda se calculan aplicando estos factores de corrección. No obstante, este factor de corrección es independiente del caudal simulado, es decir, se mantiene constante.

Una vez calibrado el modelo, es posible conocer para cada celda los valores de velocidad y profundidad que se generan con distintos valores de caudal. Posteriormente, los patrones de condiciones hidráulicas asociados al rango de caudales objetivo se cruzarán con el modelo biológico (curvas de preferencia) lo que nos permitirá conocer como varía la habitabilidad del tramo dentro de ese rango de caudales.

Modelo Biológico

El análisis de la habitabilidad fluvial y el posterior cálculo de caudales ecológicos requiere el desarrollo de un modelo biológico para la/s especie/s piscícola/s y estadio/s representativa/s del tramo fluvial. Los modelos biológicos se representan mediante curvas de preferencia. Las curvas de preferencia son funciones univariantes que expresan la idoneidad para una especie o estadio de un rango de valores de una determinada variable hidráulica (velocidad, profundidad y sustrato). Las curvas de preferencia toman valores entre 0 (no útil) y 1 (útil).

En este caso no se dispone de curvas de preferencia de especies específicas para el río Tobicuary, el desarrollo de las mismas supondría la realización de diversos estudios para la obtención de nuevos datos que exceden los alcances del presente proyecto. Se ha optado por emplear curvas de preferencia desarrolladas en otros estudios específicos, concretamente se han utilizado las curvas desarrolladas por Costa et al. (2013) para dos

especies nativas del Tebicuary: *Astyanax Bimaculatus* (sardina de dos puntos) y *Oligosarcus hepsetus* (dientudo) así como dos especies nativas y comerciales del Tebicuary: *Hoplias malabaricus* (tararira) y *Pimelodus maculatus* (bagre amarillo) para la profundidad (Figura 54), velocidad (Figura 55) y substrato (Figura 56).

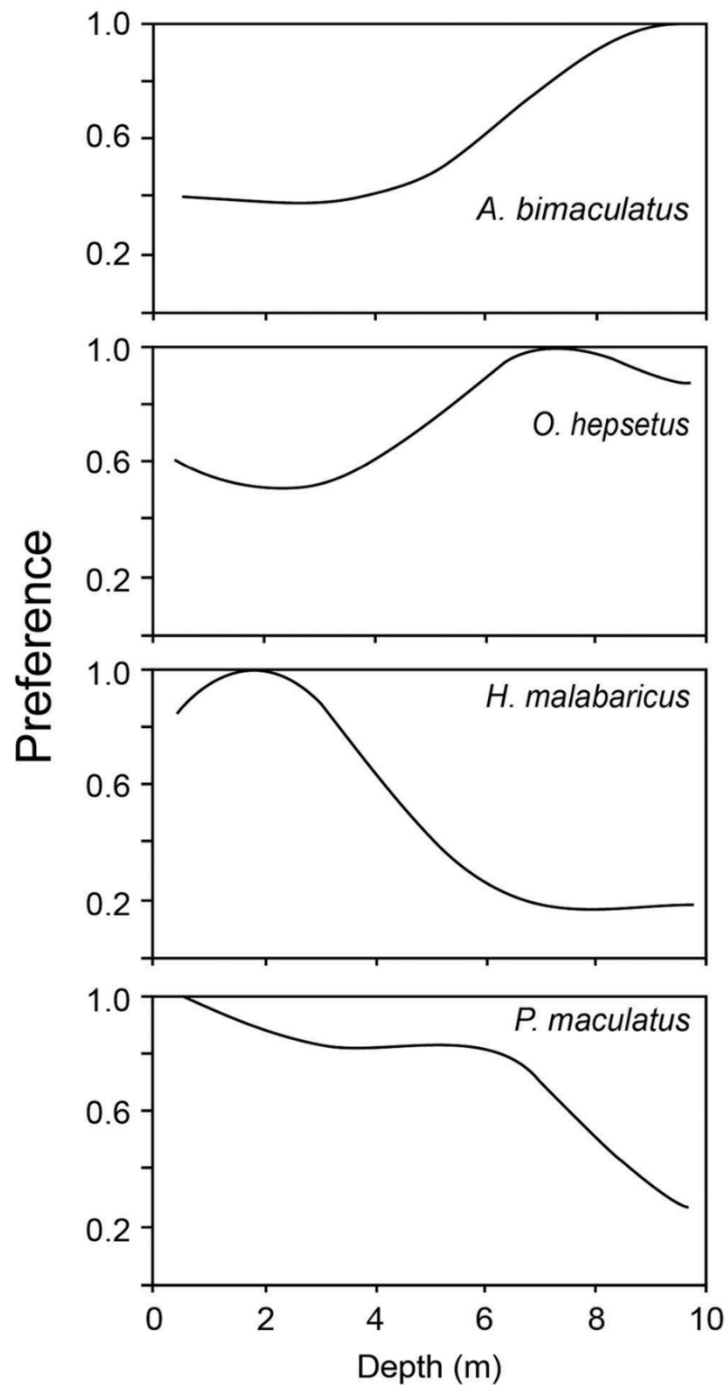


Figura 54. Curvas de preferencia de profundidad para *Astyanax Bimaculatus* (sardina de dos puntos), *Oligosarcus hepsetus* (dientudo), *Hoplias malabaricus* (tararira) y *Pimelodus maculatus* (bagre amarillo) elaboradas por Costa et al. (2013).

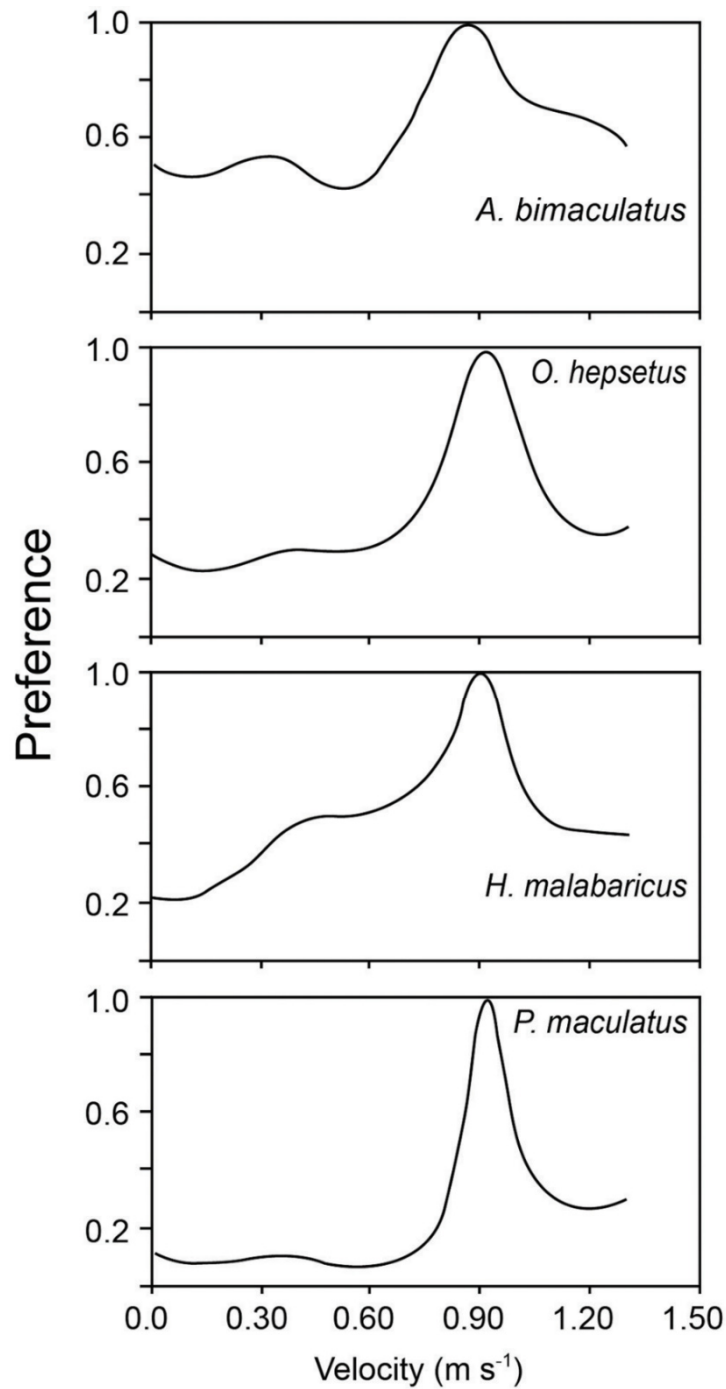


Figura 55. Curvas de preferencia de velocidad para *Astyanax Bimaculatus* (sardina de dos puntos), *Oligosarcus hepsetus* (dientudo), *Hoplias malabaricus* (tararira) y *Pimelodus maculatus* (bagre amarillo) elaboradas por Costa et al. (2013).

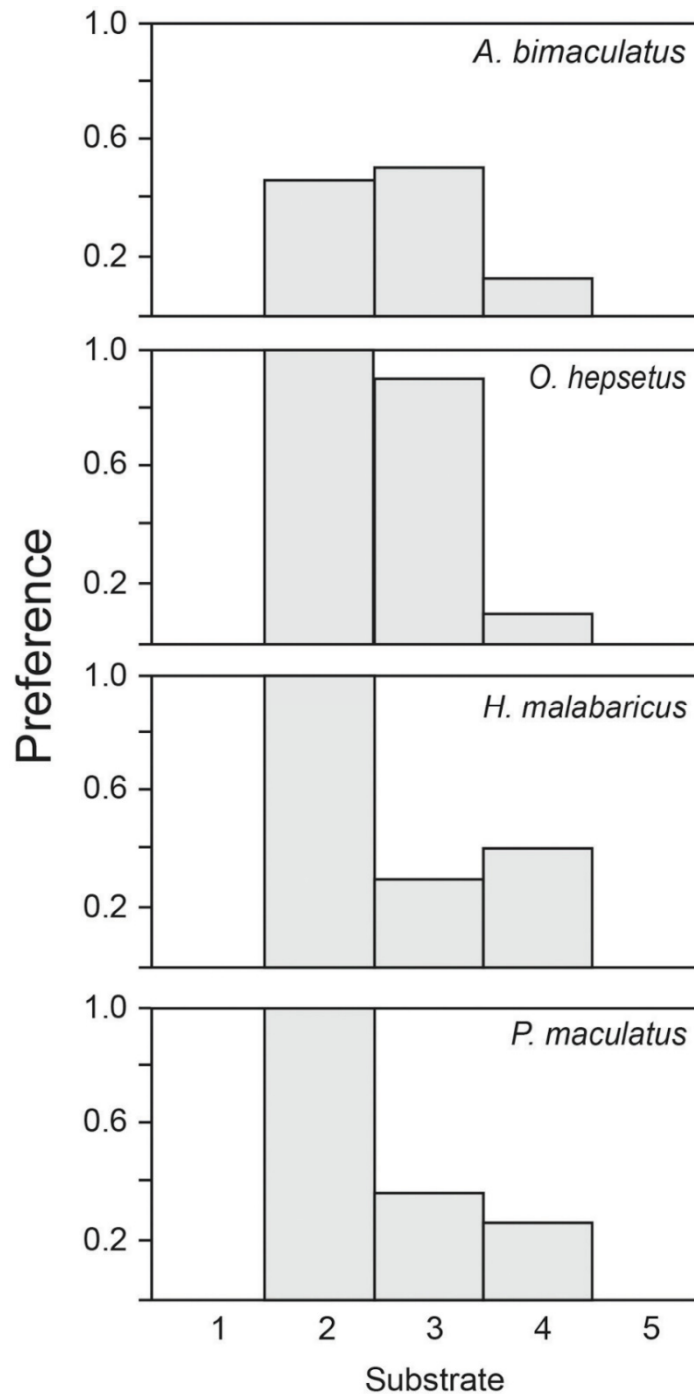


Figura 56. Curvas de preferencia de sustrato para *Astyanax Bimaculatus* (sardina de dos puntos), *Oligosarcus hepsetus* (dientudo), *Hoplias malabaricus* (tararira) y *Pimelodus maculatus* (bagre amarillo) elaboradas por Costa et al. (2013). (1, clay; 2, mud; 3, sand; 4, boulder/cobble/gravel; 5, bedrock).

Modelo de hábitat

A partir de la combinación del modelo hidráulico, las curvas de preferencia y los caudales naturales, se procedió al cálculo del Hábitat Potencial Útil (HPU). El HPU nos informa sobre

la cantidad de hábitat utilizable por cada especie/estadio en función del caudal circulante. Dicho hábitat, en este estudio, se obtiene como el valor ponderado de hábitat total dividida por la longitud del tramo de río. Por lo tanto, sus unidades son m^2/m .

Por otro lado, la HPU no se trató en términos absolutos, sino que se utilizó la relación HPU/HPU_{max} , donde la HPU_{max} representa la HPU máxima que puede albergar ese tramo en condiciones de caudal natural. Por lo tanto, la relación HPU-Caudal se proporciona en términos relativos atendiendo al porcentaje de HPU que se genera con cada caudal respecto al HPU_{max} . El uso del porcentaje de HPU_{max} en lugar de los valores de HPU absolutos permiten, por un lado, equiparar la habitabilidad de las diferentes especies a un rango de valores homogéneo entre sí y, por otro, seleccionar el caudal ecológico mínimo necesario para mantener una proporción de hábitat adecuado.

Establecimiento de criterios y cálculo del régimen de caudales ecológicos

El establecimiento de un régimen de caudales ecológicos mínimo requiere que se establezcan unos criterios de selección o umbrales sobre las curvas HPU_{max} -Caudal. En el presente proyecto, los regímenes de caudales ecológicos se han establecido con base a unos umbrales de HPU comprendidos entre el rango 50-80% del HPU_{max} . Es decir, el caudal ecológico mínimo es aquel que permite mantener un HPU igual o superior al 50-80% respecto al HPU_{max} del tramo en condiciones de caudal natural. El objetivo de presentar un rango de caudales ecológicos no es otro que facilitar la posterior toma de decisiones en el proceso de implantación del régimen de caudales ecológicos, en el que han de tenerse en cuenta todos los usuarios del agua. El cálculo de ese rango nos permite conocer de manera objetiva las consecuencias, en términos de habitabilidad, de reducir el caudal circulante.

El establecimiento de un verdadero régimen de caudales requiere asumir la variabilidad temporal natural. Debido a ello, el cálculo de los modelos de hábitat se ha establecido en el rango de caudales entre el caudal nulo y el caudal medio calculado para el río Tebicuary en Villa Florida a partir de las series de caudal natural. Finalmente, a partir de las curvas obtenidas, se han calculado los caudales necesarios para cumplir con los umbrales establecidos.

Por último, cabe mencionar que los requerimientos de caudal para cumplir con los criterios establecidos, varían de una especie a otra. Por tanto, el caudal ecológico mínimo se ha propuesto en función del estadio más exigente, es decir, aquel que necesita el caudal más alto para mantener una habitabilidad dentro del rango 50-80% del HPU_{max} .

Resultados

A continuación, se presentan los resultados del modelo hidráulico, de simulación de hábitat, es decir, las curvas HPU-Caudal, tomando en todos los casos el HPU_{max} como referencia y, finalmente, se presentan los regímenes de caudales ecológicos calculados de acuerdo a los dos umbrales de pérdida de hábitat establecidos.

El caudal observado durante la campaña de campo (Mongelós et al., 2015) fue $55.34 m^3/s$, en la que la anchura media fue 215 m y la profundidad media 2.17 m (Figura 57A). En la Figura 57B/C se muestran los patrones de profundidad y velocidad modelados mediante

Rhyhabsim en las condiciones de caudal observadas por Mongelós et al. (2015), respectivamente.

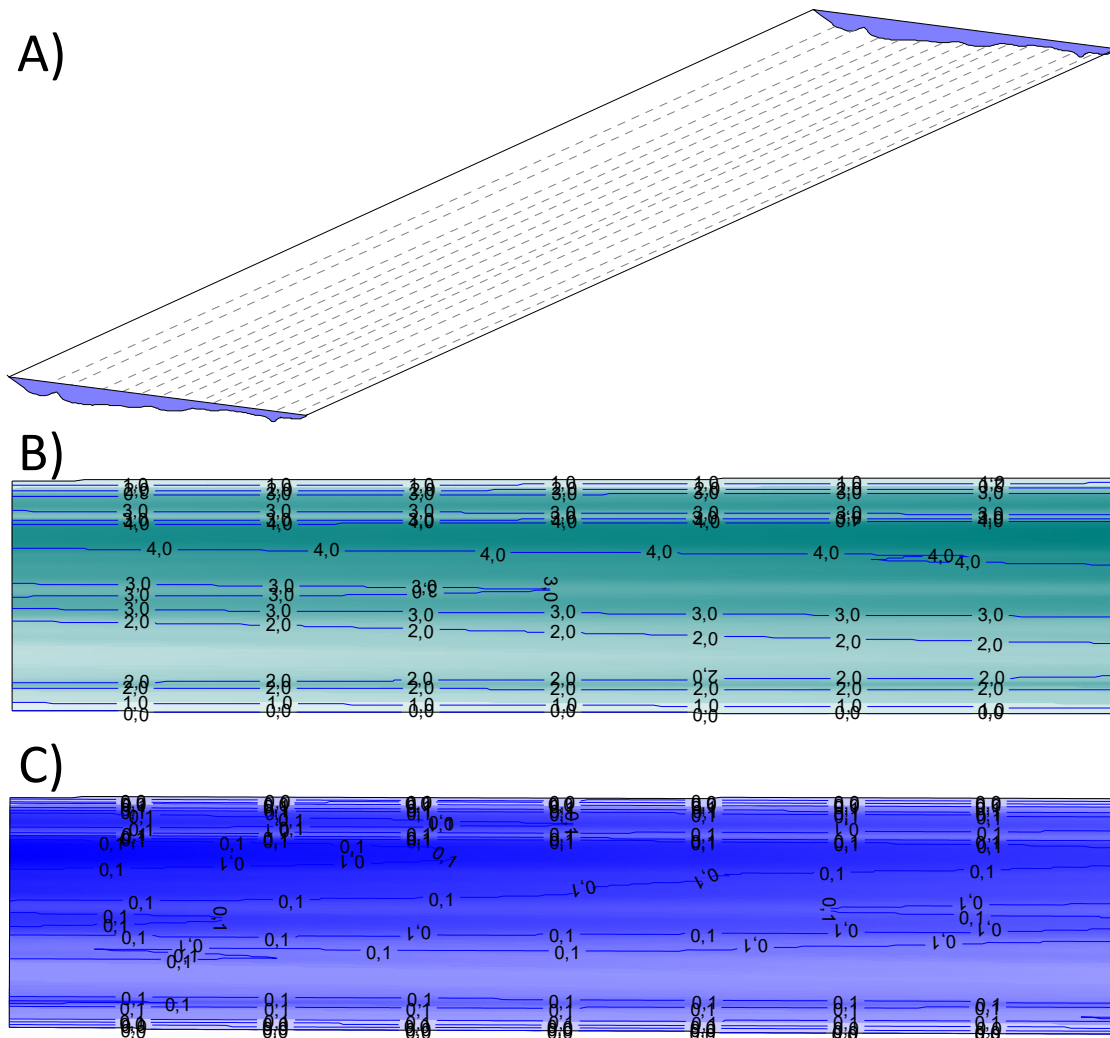


Figura 57. A) Vista isométrica del tramo de estudio del río Tebicuary en Villa Florida mediante Rhyhabsim en las condiciones de caudal observadas durante la campaña de campo (Mongelós et al., 2015). B) Profundidad con $Q=55.34 \text{ m}^3/\text{s}$. C) Velocidad con $Q=55.34 \text{ m}^3/\text{s}$.

Atendiendo a los resultados de este estudio, el caudal medio del río Tebicuary en Villa Florida para el periodo comprendido entre 1974 y 2002 ha sido $359.76 \text{ m}^3/\text{s}$. Por tanto, para realizar la simulación de hábitat se han llevado a cabo diferentes simulaciones con caudales desde 0 hasta $360 \text{ m}^3/\text{s}$ en intervalos de $5 \text{ m}^3/\text{s}$. En la Figura 58 se presenta la variación del HPU respecto al HPU_{max} de *P. maculatus* (azul), *H. malabaricus* (verde), *O. hepsetus* (marrón) y *A. bimaculatus* (morado) para los caudales comprendidos entre 0 y $360 \text{ m}^3/\text{s}$.

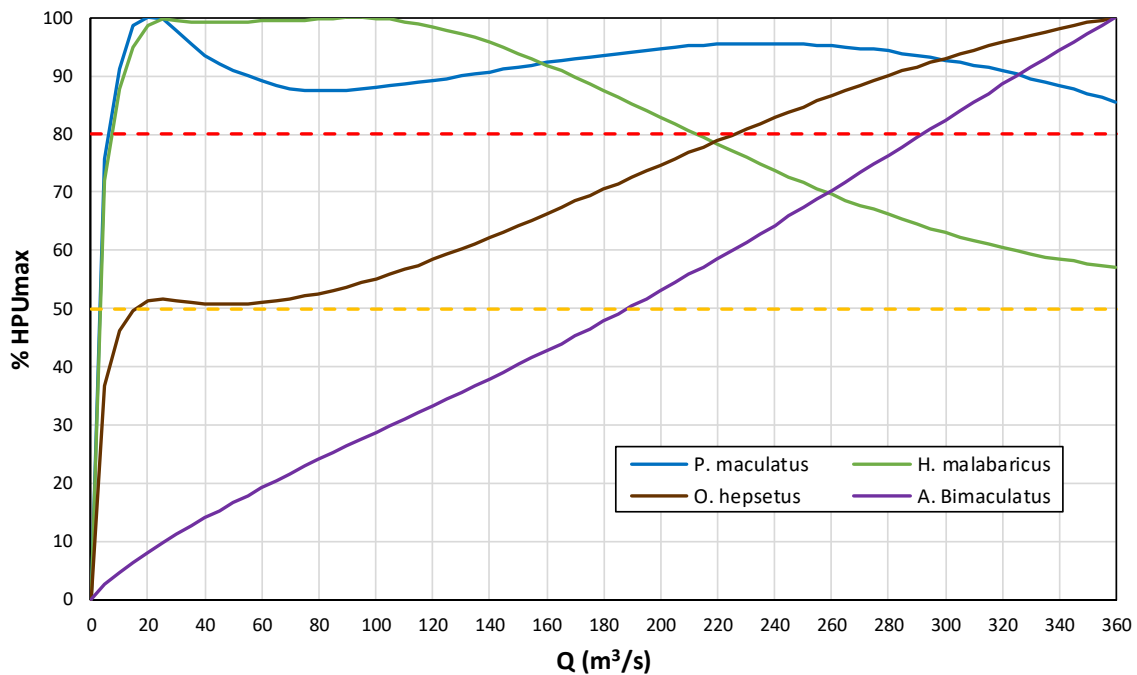


Figura 58. Variación del HPU respecto al HPU_{max} de *P. maculatus* o bagre amarillo (azul), *H. malabaricus* o tararira (verde), *O. hepsetus* o dientudo (marrón) y *A. Bimaculatus* o sardina de dos puntos (morado) para los caudales comprendidos entre 0 y 360 m³/s. Las líneas horizontales representan los umbrales propuestos para la selección de los caudales ecológicos: 80% HPU_{max} (rojo) y 50% HPU_{max} (naranja).

En la curva obtenida para *P. maculatus* o bagre amarillo (azul) y *H. malabaricus* o tararira (verde), el HPU_{max} se ha alcanzado con caudales relativamente bajos y a partir de ahí la habitabilidad se mantiene constante o incluso disminuye, debido principalmente al aumento de la velocidad del agua más allá del óptimo considerado para estas especies (Figura 58). En el caso del *O. hepsetus* o dientudo (marrón), se observa que, aunque la curva es creciente desde el caudal nulo hasta el caudal máximo simulado, existe un claro punto de inflexión con caudales en torno a 20 m³/s, coincidiendo prácticamente con el umbral del 50% del HPU_{max}. A partir de este valor, el aumento de HPU con el caudal adquiere una pendiente menos acusada. Por último, para *A. bimaculatus* o sardina de dos puntos (morado), se observa como la curva presenta una pendiente más constante en todo el rango de caudales simulados. Esta curva no presenta máximos y los puntos de inflexión no son tan acusados, es decir, un aumento del caudal se ve traducido en un aumento constante del hábitat para esta especie.

Teniendo en cuenta los criterios establecidos para determinar el régimen de caudales, el caudal ecológico necesario para cumplir el umbral del 50% y el 80% del HPU_{max} en el caso del *P. maculatus* (azul) y *H. malabaricus* (verde) ha sido de 5 y 10 m³/s, lo que supone un 1.4% y 2.8% del caudal medio natural, respectivamente (Tabla 28; Figura 58). En el caso de *O. hepsetus* (marrón), el caudal ecológico necesario para cumplir el umbral del 50% y el 80% del HPU_{max} ha sido de 20 y 230 m³/s, lo que supone un 5.6% y 63.9% del caudal medio natural, respectivamente (Tabla 28; Figura 58). Por último, el caudal ecológico necesario para cumplir el umbral del 50% y el 80% del HPU_{max} en el caso del *A. bimaculatus*

(morado) ha sido de 190 y 295 m³/s, lo que supone un 52.8% y 81.9% del caudal medio natural, respectivamente (Tabla 28; Figura 58).

	Nombre común	Caudal Natural	Caudal Ecológico (50%)	Porcentaje Natural	Caudal Ecológico (80%)	Porcentaje Natural
<i>P. maculatus</i>	Bagre amarillo	360	5.0	1.4%	10.0	2.8%
<i>H. malabaricus</i>	Tararira		5.0	1.4%	10.0	2.8%
<i>O. hepsetus</i>	Dientudo		20.0	5.6%	230.0	63.9%
<i>A. bimaculatus</i>	Sardina de dos puntos		190.0	52.8%	295.0	81.9%

Tabla 28. Regímenes de caudales ecológicos correspondientes al tramo de estudio del río Tebicuary en Villa Florida. La tabla incluye los caudales ecológicos calculados para distintas especies y de acuerdo a los dos umbrales propuestos, así como el porcentaje que los caudales ecológicos suponen respecto al caudal medio natural del periodo comprendido entre 1974 y 2002. Todos los datos de caudal en m³/s.

A partir de los resultados obtenidos, se observa que las dos especies nativas del Tebicuary (*Astyanax bimaculatus* y *Oligosarcus hepsetus*) son las más restrictivas en cuanto a requerimientos de caudales ecológicos que las dos especies nativas y comerciales del Tebicuary (*Hoplias malabaricus* y *Pimelodus maculatus*).

Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones más importantes del presente estudio:

- Las curvas HPU-Caudal han presentado puntos de inflexión claros a partir de los cuales el aumento del HPU con el caudal presenta una pendiente relativamente reducida (*Oligosarcus hepsetus*), nula (*Pimelodus maculatus*) o incluso decreciente (*Hoplias malabaricus*). En estos casos, el hábitat no sería un factor tan limitante ya que los caudales ecológicos representan porcentajes reducidos respecto al caudal en régimen natural.
- En contraste, para la especie *Astyanax bimaculatus*, se observa que el HPU aumenta con pendientes prácticamente constantes en todo el rango de caudales modelados ya que un aumento de caudal lleva asociado un aumento de la profundidad hasta valores óptimos o próximos al óptimo de acuerdo con las curvas de preferencia. Paralelamente, las velocidades no aumentan por encima de valores que disminuyan la habitabilidad significativamente. Por tanto, el caudal va a ser un factor muy limitante para mantener la condición física del hábitat por lo que una reducción del mismo tiene consecuencias importantes para la habitabilidad. Debido a ello, los caudales ecológicos calculados suponen porcentajes relativamente elevados respecto al caudal medio, siendo superiores al 52%.

4.2.3. Síntesis y propuesta de caudales ecológicos en la cuenca

En cuanto a los métodos hidrológicos se han aplicado cuatro algoritmos de caudales ambientales (método del caudal básico original (Qbas1), método del caudal básico con variante (Qbas2), método de las medias móviles de 21 días (Qmm21) y método de las medias móviles de 25 días (Qmm25) y a partir de los resultados de cada uno de ellos se ha propuesto una combinación lineal de dichos valores para obtener un caudal ambiental ponderado por tramos (Qamb). Este caudal ambiental se ha obtenido para cada una de las 9 subcuencas en que se ha dividido la cuenca del río Tebicuary para los tres escenarios de cálculo (situación actual y dos escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5).

En cuanto a los métodos biológicos el régimen de caudales ecológicos se ha obtenido mediante la aplicación de métodos de simulación de hábitat utilizando para las modelizaciones hidráulicas el software RHYHABSIM (Jowett, 1989) en un tramo de 1 km de longitud aguas abajo del puente de Villa Florida. En este caso no se dispone de curvas de preferencia de especies específicas para el río Tebicuary, el desarrollo de las mismas supondría la realización de diversos estudios para la obtención de nuevos datos que exceden los alcances del presente proyecto. Se ha optado por emplear curvas de preferencia desarrolladas en otros estudios específicos, concretamente se han utilizado las curvas desarrolladas por Costa et al. (2013) para dos especies nativas del Tebicuary: *Astyanax bimaculatus* (sardina de dos puntos) y *Oligosarcus hepsetus* (dientudo) así como dos especies nativas y comerciales del Tebicuary: *Hoplias malabaricus* (tararira) y *Pimelodus maculatus* (bagre amarillo).

A modo de resumen de los resultados obtenidos y para facilitar la comparación de los diferentes métodos, en la Tabla 29 se presentan los caudales ecológicos obtenidos para la situación actual en Villa Florida (subcuenca SC-7).

		Caudal ecológico	Porcentaje natural
Métodos hidrológicos	Qbas1	98.8	28.9%
	Qbas2	84.5	24.8%
	Qmm21	93.4	27.4%
	Qmm25	95.8	28.1%
	Q_AMB	93.1	27.3%
Métodos biológicos	<i>P. maculatus</i> (Bagre amarillo)	10.0	2.8%
	<i>H. malabaricus</i> (Tararira)	10.0	2.8%
	<i>O. hepsetus</i> (Dientudo)	230.0	63.9%
	<i>A. bimaculatus</i> (Sardina de dos puntos)	295.0	81.9%

Tabla 29. Comparación de los caudales ambientales obtenidos por diversos métodos hidrológicos y biológicos en Villa Florida para la situación actual (m³/s).

Como resultado de los metidos hidrológicos se puede apreciar que los cuatro métodos aplicados producen resultados dentro del mismo rango, aunque los basados en medias móviles tienden a dar cifras algo más bajas (10-20%).

En cuanto a los resultados obtenidos por métodos biológicos para las cuatro especies disponibles, se observa que para las especies nativas del Tebicuary (Dientudo y sardina de dos puntos) el requerimiento de caudales es muy superior al obtenido para las especies comerciales (Bagre amarillo y tararira) y por encima del doble de los obtenidos por métodos hidrológicos. Esta divergencia confirma las hipótesis iniciales acerca de la aplicabilidad de este tipo de métodos sin disponer de curvas de preferencia ajustadas a las características de cada especie para el tramo de la cuenca objeto de estudio, como se puede ver en estos resultados, el empleo de curvas de preferencia de las mismas especies, pero obtenidas en otros ríos parece que no representa adecuadamente el comportamiento de las mismas en el río Tebicuary.

5. USOS DEL AGUA. MODELO DE GESTIÓN

En este capítulo se presenta la descripción e implementación del modelo de gestión SIMGES-TEBI que se ha empleado para la gestión de recursos hídricos en la cuenca del río Tebicuary. Además, se incluye un análisis de sensibilidad de las variables más importantes de entrada al modelo para estimar la estabilidad, robustez y, en definitiva, fiabilidad de los resultados obtenidos y los resultados de la aplicación su aplicación teniendo en cuenta los efectos del cambio climático en la cuenca.

5.1. Descripción del modelo de gestión

5.1.1. Estructura e hipótesis del modelo

El modelo empleado para el estudio de la gestión de recursos hídricos en la cuenca del río Tebicuary (SIMGES-TEBI) está basado en el modelo hidrológico LEM-DW (Logistic Equilibrium Model with Diffusive Wave), descrito en el apartado 3.3, con sus dos sub-módulos de cálculo:

- 1) Un sub-módulo hidrológico convencional, empleando el modelo de equilibrio logístico (LEM).
- 2) Un sub-módulo de propagación que resuelve la ecuación de Hayami u onda difusiva (DW).

La principal diferencia del modelo de gestión es que opera de manera secuencial, es decir, se calcula el caudal para cada instante de tiempo en todos los puntos de cálculo, en función de los valores antecedentes de caudales fluyentes y demandas. Este esquema paso a paso es menos eficiente computacionalmente, pero permite introducir reglas de explotación dinámicas, que hacen depender las detracciones de agua (o retornos si los hubiera) de las condiciones de flujo o precipitación en cada instante de tiempo, en cualquier punto de la cuenca.

El modelo mantiene la subdivisión en subcuencas presentada en el estudio hidrológico (ver Figura 4, apartado 2.2); se han asignado demandas de riego (u potencialmente cualquier otro uso) a cada subcuenca, asumiendo que las detracciones de agua se reparten de manera homogénea a lo largo de cada tramo.

Dado que algunas subcuencas de menor longitud (en particular la SC-4 y, en algunas simulaciones, la SC-2) presentan inestabilidades en la solución de la onda difusiva para el paso de tiempo empleado (1 día) y ciertos rangos de caudales, se ha aplicado un método simplificado para resolverlo. El procedimiento consiste en considerar a efectos de cálculo una cuenca extendida con una longitud "n" veces mayor que la real, y que los caudales obtenidos entre el punto de entrada y de salida son interpolables linealmente. De esa forma, se puede obtener una estimación del caudal en el punto final de la cuenca real, que

representa un punto intermedio de la longitud total de la cuenca extendida, por interpolación de los resultados obtenidos.

Finalmente, cabe indicar que, con el fin de reducir los tiempos de ejecución y dada la ausencia de detracciones significativas, se ha omitido la última subcuenca (SC-9) en el modelo de gestión. Además, el tramo final del río Tebicuary presenta grandes zonas de encharcamiento y está afectado por el régimen de caudales del río Paraguay, por lo que los resultados en él son menos fiables que en el resto de tramos de la cuenca.

5.1.2. Datos de entrada

Los datos de entrada del modelo SIMGES-TEBI son, por una parte, los requeridos para operar el modelo hidrológico en que se sustenta:

- 1) Series de precipitación y ETP diarias por subcuencas (mm/d).
- 2) Parámetros físicos de las subcuencas: área (km²), longitud (km), sinuosidad (s.u.).
- 3) Parámetros del modelo hidrológico: A, k, alfa, C, D (ver unidades en el apartado 3.3).

Además, se requiere toda la información asociada a las demandas de agua y las restricciones de uso:

- 4) Caudales mínimos (que pueden equivaler a los caudales ecológicos) por tramos (m³/s).
- 5) Superficie de riego por subcuencas (ha).
- 6) Dotación de riego por meses y por subcuencas (m³ por ha y mes).
- 7) Volumen de almacenamiento disponible por subcuencas (hm³).

Finalmente, se requiere el establecimiento de los puntos de control dentro de la cuenca (donde se comprueba si el valor del caudal cumple una determinada condición o regla) y la descripción de las reglas que rigen la explotación del sistema, que se describen en un apartado posterior, a las que se asigna un código numérico:

- 8) Establecimiento de los puntos de control.
- 9) Código de las reglas de explotación empleadas (1, 2, 3, etc.).

Además de estos datos de entrada, el modelo permite modificar ciertas variables internas de ejecución, como la duración de la simulación en años (en general se ejecutarán los 17 años disponibles).

En cuanto a la definición de las dotaciones de riego por meses, se ha optado por emplear en el modelo dotaciones brutas, que incluyen las pérdidas por evapotranspiración en las parcelas, por infiltración del suelo y las aportaciones por lluvia. De esta forma, la dotación neta (equivalente a las necesidades de riego, procedentes de fuentes fluyentes o

reguladas) es la dotación bruta menos la precipitación local por meses, y es calculada internamente por el modelo SIMGES-TEBI. Por lo tanto, los años más húmedos las parcelas de riego requerirán menos extracción de recursos fluyentes. Se han considerado despreciables las variaciones interanuales en evapotranspiración en un mismo mes, a efectos del cálculo de las dotaciones de riego (pero no a efectos del modelo hidrológico).

En relación con el funcionamiento de los elementos de regulación asociados a las explotaciones agrícolas (reservorios), se adoptan los siguientes criterios:

- Los reservorios aportan agua siempre que la demanda sea menor que el caudal disponible en el cauce. Dicho caudal disponible viene dado por las reglas de explotación vigentes (ver apartado 5.1.4).
- Tiene prioridad la satisfacción de la demanda de riego frente al relleno de los reservorios.
- Una vez satisfecha la demanda de riego, los reservorios no llenos se podrán rellenar con el resto del caudal disponible en el cauce, entendiendo como caudal disponible el que determinan las reglas de explotación vigentes (ver apartado 5.1.4).
- La tasa máxima de relleno de los reservorios viene dado por una variable interna del modelo, que por defecto se fija en valor equivalente a la mitad de su capacidad máxima (i.e. un reservorio necesita al menos dos días para llenarse desde cero).

5.1.3. Resultados y explotación del modelo

El modelo genera una serie de variables intermedias para cada instante de tiempo, entre las que destacan:

- Caudal fluyente (Q) en los puntos de entrada y salida de cada subcuenca. Por interpolación lineal, se puede estimar el caudal en cualquier punto intermedio si se requiere.
- Demanda total (DT), demanda satisfecha con aportaciones fluyentes (DAF), demanda satisfecha con aportaciones reguladas (DAR) y demanda no satisfecha o déficit de explotación (DEXP) en cada subcuenca. Se cumple que $DT=DAF+DAR+DEXP$.
- Déficit ambiental (DAMB) en cada subcuenca o punto representativo, definido como la diferencia, siempre que sea positiva, entre el caudal ambiental estipulado (QAMB) y el caudal fluyente (Q): $DAMB=\min(QAMB-Q,0)$.
- Porcentajes de tiempo en que se produce un déficit de explotación ($DEXP>0$) o un déficit ambiental ($DAMB>0$) en cada subcuenca.

Dada la gran cantidad de variables de estado disponibles, y con el objetivo de facilitar la interpretación y comparación de resultados entre diferentes escenarios y reglas de explotación, se ha considerado una única función objetivo del modelo, resultado de agregar los dos tipos de déficits (el de explotación y el ambiental) de todas las subcuencas que componen el sistema:

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^{nsc} [w \cdot D_{exp_i} + (1 - w) \cdot D_{amb_i}]$$

donde el índice i representa cada subcuenca y nsc es el número de ellas. El factor de peso w indica cuál es la importancia o valor relativo que se le da a cada tipo de déficit. Un valor de 0.5, empleado por defecto, indica que tiene la misma importancia o coste generar un determinado déficit ambiental, que no satisfacer una demanda consuntiva de la misma magnitud. En otras palabras, el valor de cada m^3 de agua que el ecosistema echa en falta para su conservación es el mismo que el de cada m^3 de demanda agrícola que no puede satisfacerse.

Cabe señalar que, mientras que el déficit de explotación es nulo en el caso hipotético de que no hubiera demandas en la cuenca, el déficit ambiental puede no serlo si se establecen valores para los caudales ambientales superiores a los caudales mínimos registrados en régimen natural, como suele ser el caso. Esto no invalida el uso, ni altera el significado, de la función objetivo propuesta, pero sí condiciona el valor mínimo que puede alcanzar, que en general será superior a cero.

La formulación de una función objetivo como la propuesta convierte la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Tebicuary en un problema clásico de optimización: determinar, para unas condiciones (aportaciones y demandas) dadas, cuáles son las reglas de explotación que minimizan el déficit total en la cuenca.

En cada ejecución, el modelo produce de forma automática un fichero de resultados con la siguiente información en filas, para cada subcuenca:

- 1) N° de subcuenca.
- 2) Caudal medio fluyente (m^3/s).
- 3) Déficit medio de explotación ($hm^3/año$).
- 4) Déficit medio ambiental ($hm^3/año$).
- 5) Déficit medio total (suma de los dos anteriores) ($hm^3/año$).
- 6) Proporción de tiempo con déficit de explotación (%).
- 7) Proporción de tiempo con déficit ambiental (%).

5.1.4. Reglas de explotación

Para el presente estudio, se han considerado varios tipos de reglas de explotación, que se describen continuación:

Regla R0

Esta regla no es una regla de explotación como tal ya que en ella no se aplica ningún tipo de detracción y, por lo tanto, representa el comportamiento de la cuenca en régimen natural y va a servir como base comparativa de la aplicación del resto de reglas propuestas.

Como resultado de su aplicación el déficit de explotación será máximo (ya que no se extraerá agua) y el déficit ambiental será mínimo y representará además el mínimo valor que se puede obtener de la función objetivo (déficit total).

Tipo de reglas R1

El primer conjunto de reglas considerado (R1) trata de reflejar el régimen de explotación no regulado que ha estado vigente en la cuenca (salvo en años muy secos, en que se han aplicado restricciones de uso). Consisten en extraer en cada subcuenca todo el caudal que esté disponible en el cauce para satisfacer las demandas existentes, sin ninguna limitación salvo la obvia de no poder sacar más caudal de lo que hay. Como es de esperar, este régimen de operación consigue bajos déficits de explotación (aunque no los minimiza), con la contrapartida de disparar el déficit ambiental.

Tipo de reglas R2

El régimen denominado R2 consiste en imponer un cese de los bombeos (detracciones) cuando el caudal fluyente en los puntos de control de la cuenca donde se miden caudales (por ejemplo, Villa Florida) desciende por debajo de un umbral estipulado (el caudal ambiental o una cierta proporción de él). Esta prohibición de extraer agua permanece vigente durante un tiempo dado (unas semanas o meses) o hasta que el caudal en el/los punto/s de control recupera una cierta magnitud. Las reglas R2 tienen como parámetros los factores multiplicadores del caudal ambiental que definen el cese y reinstauración de los bombeos, o alternativamente la duración del periodo de prohibición.

Tipo de reglas R3

Intuitivamente, las reglas que mejor podrían explotar los recursos del sistema sin rebasar los límites establecidos son las que permiten extraer en cada tramo el excedente de agua, definido como la diferencia entre el caudal fluyente y el caudal ambiental estipulado. Este planteamiento resulta, sin embargo, un ejercicio teórico, ya que para ponerlo en práctica se requeriría conocer el caudal fluyente en cada punto, y se debería poder detraer una cantidad variable cada día (tarea que implica un control muy fino de las estructuras de derivación, más allá de una simple apertura o cierre de compuertas); ninguno de estos dos supuestos se cumple.

Sin embargo, sí se puede plantear una versión simplificada de este principio, estableciendo unos tramos de bombeo admitidos en función del excedente de caudales registrado en uno (o varios) puntos de control. Si dicho excedente, por ejemplo en Villa Florida, se cuantifica como el cociente entre el caudal fluyente y el caudal ambiental (Q/Q_{amb}), las reglas resultantes podrían expresarse como:

- Si $Q/Q_{amb} > C2$, Se pueden detraer hasta un máximo de $Q2 \text{ m}^3/\text{s}$ (donde $Q2$ es un valor correspondiente a la totalidad de la demanda máxima potencial)
- Si $C1 < Q/Q_{amb} < C2$, Se pueden detraer hasta $Q1 \text{ m}^3/\text{s}$ (donde $Q1$ es equivalente a una cierta proporción de la demanda máxima potencial, por ejemplo $Q1 = 0.5 \cdot Q2$)

- Si $Q/Q_{amb} < C1$, no se puede detraer agua (cese de bombeo).

Los parámetros asociados al tipo de reglas R3 son los valores C1, C2, Q1 y Q2 para cada explotación.

5.2. APLICACIÓN DEL MODELO SIMGES-TEBI

En este apartado se presentan los datos de entrada y resultados de la aplicación del modelo SIMGES-TEBI en la cuenca del río Tebicuary para los diferentes tipos de reglas de explotación propuestas en el apartado anterior con el objetivo final de encontrar la regla que minimice la función objetivo propuesta (déficit total de la cuenca obtenido como suma del déficit ambiental y el déficit de explotación).

Además, se incluye un análisis de sensibilidad de las variables más importantes de entrada al modelo para estimar la estabilidad, robustez y, en definitiva, fiabilidad de los resultados obtenidos y los resultados de la aplicación su aplicación teniendo en cuenta los efectos del cambio climático en la cuenca.

5.2.1. Datos de entrada

A continuación se presentan los diferentes datos de entrada considerados para la implementación del modelo para la situación actual.

Series de precipitación y ETP diarias por subcuencas

Se han utilizado las series de precipitación de 17 años de duración (periodo 1998-2014) con resolución diaria obtenidas para cada subcuenca tras combinar los datos del proyecto TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) con los datos instrumentales de los 7 pluviómetros disponibles en la cuenca (ver apartado 3.1.2).

En cuanto a los datos de ETP, se han utilizado las series de datos diarios promediados por subcuencas obtenidas a partir de los datos de la base de datos CGIAR-CSI (ver apartado 3.1.3).

Parámetros físicos de las subcuencas

Los parámetros físicos de cada subcuenca considerados en el modelo e han obtenido a partir de la red hidrográfica y la topografía disponible (ver Tabla 2, apartado 2.2).

Parámetros del modelo hidrológico

Para la implementación del modelo de gestión se han utilizado los parámetros obtenidos tras la calibración del modelo hidrológico LEM-DW presentados en la Tabla 17 (ver apartado 3.3.2).

Caudales mínimos por tramos

Se han considerado como caudales mínimos los valores del caudal ambiental ponderado por tramos (Q_{amb}) obtenido por métodos hidrológicos como combinación lineal de la aplicación de cuatro métodos diferentes (Q_{bas1} , Q_{bas2} , Q_{mm21} y Q_{mm25}), para la situación actual (ver Tabla 24 del apartado 4.2.1).

Superficie de riego por subcuencas

Se ha utilizado la información disponible sobre las áreas de cultivo de arroz presentada en el apartado 2.5 que incluye la localización de áreas de cultivo de arroz, identificadas por mes de siembra y consumos mensuales de agua en la mayoría de los casos, así como la localización de los reservorios correspondientes (ver Figura 17 y Tablas 4 y 5).

Dotación de riego por meses y por subcuencas

Se ha considerado una dotación bruta de riego de 10,000 m³/ha.año obtenida del "Informe cuenca del río Tebicuary, Proyecto Modernización del Sector Agua Potable y Saneamiento (PMSAS-77/10), SEAM 2016", que se ha repartido por subcuencas y por meses según la información de áreas de cultivo de arroz y consumos de agua presentadas anteriormente (factor de demanda mensual).

	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	TOTAL
SC-1	4.16	15.82	19.15	19.15	14.99	7.49	2.50	83.26
SC-2	6.12	23.25	28.15	28.15	22.03	11.01	3.67	122.38
SC-3	6.00	22.80	27.60	27.60	21.60	10.80	3.60	119.99
SC-4	2.95	11.21	13.56	13.56	10.62	5.31	1.77	58.98
SC-5	0.71	2.69	3.25	3.25	2.54	1.27	0.42	14.14
SC-6	2.44	9.29	11.24	11.24	8.80	4.40	1.47	48.89
SC-7	2.91	11.04	13.37	13.37	10.46	5.23	1.74	58.12
SC-8	35.05	133.17	161.21	161.21	126.16	63.08	21.03	700.90
TOTAL	60.33	229.27	277.53	277.53	217.20	108.60	36.20	1206.66

Tabla 30. Demanda bruta por meses y por subcuencas (hm³).

Volumen de almacenamiento disponible por subcuencas

Para la obtención del volumen de almacenamiento disponible en cada una de las subcuencas y debido a que no se conoce la profundidad de cada uno de los reservorios se ha considerado una profundidad media de los mismos de 1 metro (Tabla 31).

	Volumen almacenamiento (Hm³)
SC-1	6.43
SC-2	28.85
SC-3	20.47
SC-4	16.13
SC-5	1.39
SC-6	4.70
SC-7	3.65
SC-8	71.16
TOTAL	152.78

Tabla 31. Volumen de almacenamiento disponible por subcuencas.

Establecimiento de puntos de control

Actualmente solamente existen dos estaciones de aforo activas en la cuenca (Villa Florida y Yuty) que disponen de reglas limnimétricas para la medición de niveles. La tercera estación existente en la cuenca (Iturbe), es una estación automática instalada en mayo de 2016 que no toma datos desde julio de 2017.

Por lo tanto, se han utilizado como puntos de control para comprobar el valor del caudal y aplicar los diferentes tipos de reglas de explotación planteadas, las dos estaciones activas y, concretamente, la estación de Yuty para regular la extracción de agua en las subcuencas (SC-1 – SC-4) y la estación de Villa Florida para regular la extracción en las subcuencas (5-8), tal y como se muestra en la Figura 59.

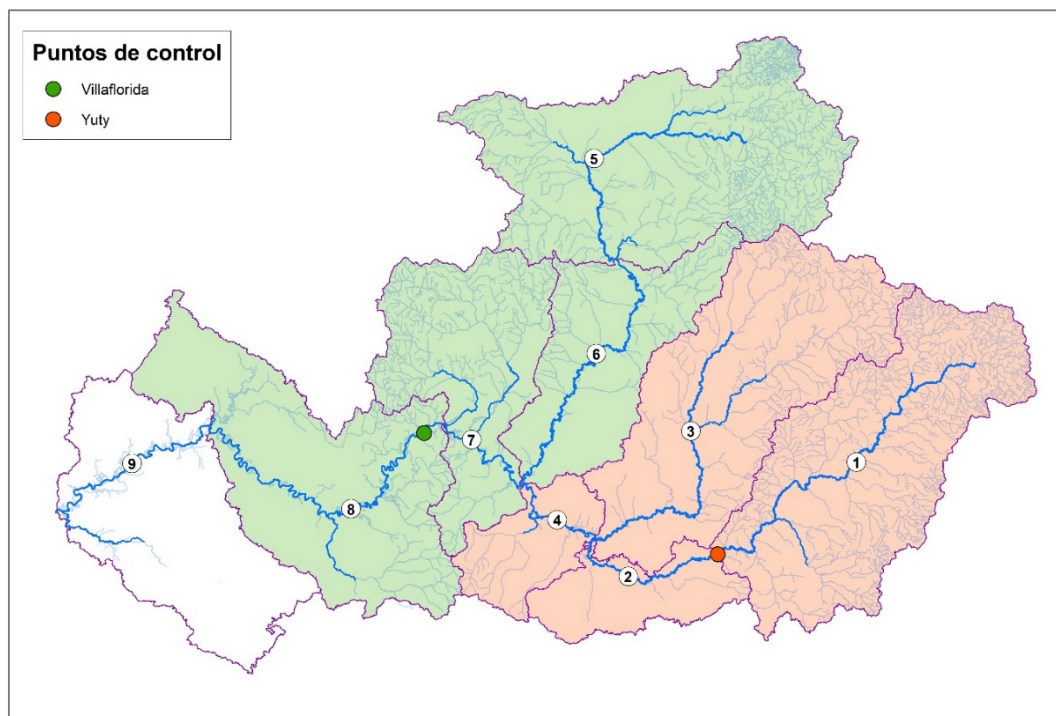


Figura 59. Localización de los puntos de control y subcuencas asociadas a los mismos.

5.2.2. Resultados

A continuación se presentan y analizan los resultados obtenidos tras la implementación de los diferentes tipos de reglas de explotación para la cuenca del río Tebicuary en el modelo de gestión para, posteriormente, proponer como regla de explotación a utilizar, la que minimice el déficit total obtenido como suma del déficit ambiental y el déficit de explotación (función objetivo propuesta).

Regla de explotación R0

Tal y como se comenta anteriormente, esta simulación va a servir como base comparativa para la aplicación de las diferentes reglas de explotación propuestas ya que en ella no se considera ningún tipo de detracción y, por lo tanto, sirve por un lado, para cuantificar el déficit ambiental de la cuenca en régimen natural que representará, además, el valor mínimo del déficit total y, por otro lado, para obtener el valor máximo del déficit de explotación que será igual a la demanda total de riego para el cultivo de arroz.

A modo de resumen de los resultados obtenidos tras la aplicación de la regla de explotación R0 (simulación sin detracciones) se presentan en la Tabla 32 y en las Figuras 60 y 61 los valores resultantes por subcuencas (caudal medio, déficit de explotación, ambiental y total y los porcentajes de tiempo en que se producen los mismos).

	Caudal medio (m³/s)	Déficit expl. (hm³/año)	Déficit amb. (hm³/año)	Déficit total (hm³/año)	% tiempo déficit expl.	% tiempo déficit amb.
SC-1	39.22	18.17	28.48	46.65	23.79	12.18
SC-2	87.82	28.19	29.19	57.38	22.88	11.31
SC-3	33.61	27.67	30.15	57.82	23.46	14.49
SC-4	172.77	13.68	55.67	69.35	23.63	11.54
SC-5	39.71	3.36	32.51	35.87	28.67	14.62
SC-6	98.83	11.97	44.22	56.19	24.29	13.02
SC-7	320.28	15.04	12.51	27.54	25.64	13.51
SC-8	360.86	172.95	143.82	316.77	25.64	13.51
TOTAL	-	291.01	376.56	667.57	28.67	14.62

Tabla 32. Resumen de resultados por subcuencas. Regla tipo R0.

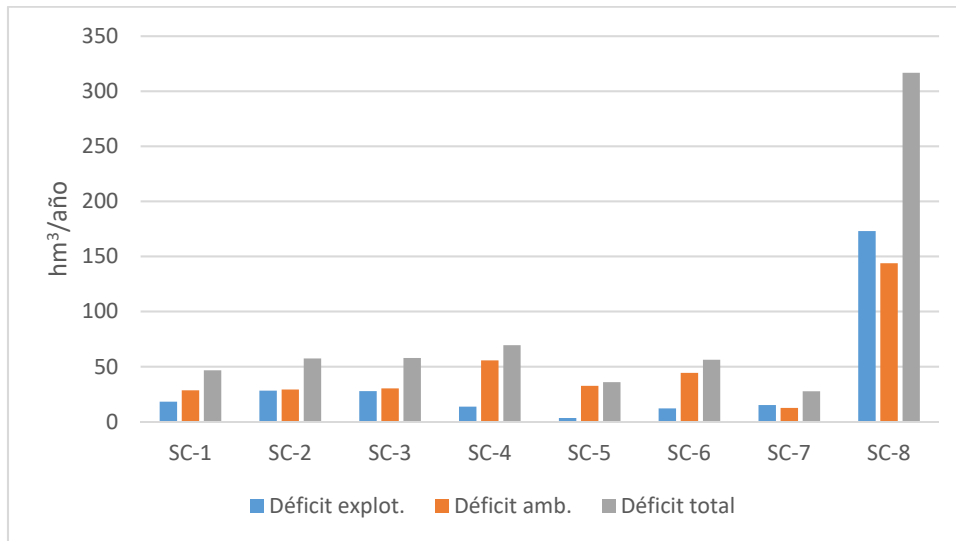


Figura 60. Déficits obtenidos por subcuencas. Regla tipo R0.

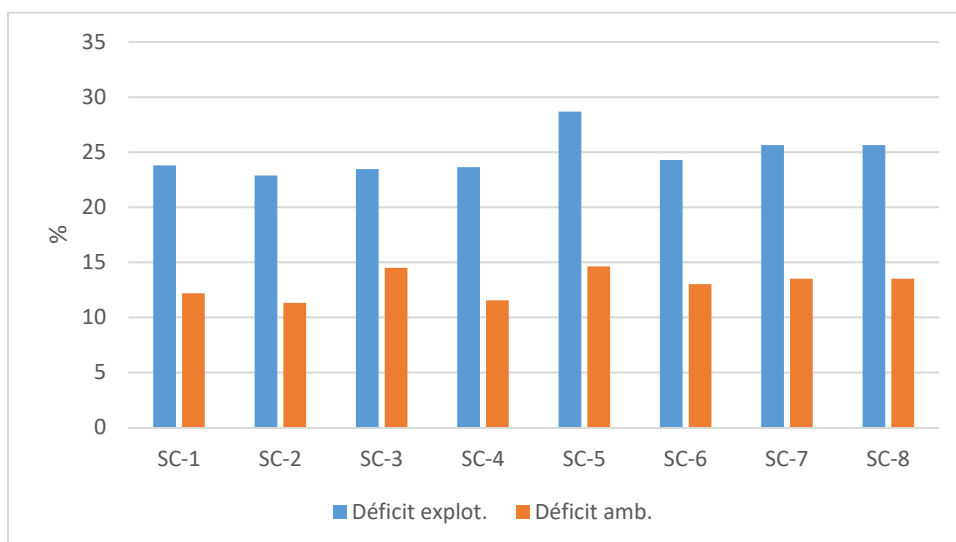


Figura 61. Porcentajes de tiempo con déficit de explotación y ambiental por subcuencas. Regla tipo R0.

Tras analizar la tabla y figuras anteriores, se observa como aún sin realizar ningún tipo de explotación de los recursos hídricos en la cuenca, ya existe un déficit ambiental importante de unos 375 hm³ anuales, y que este se concentra en la SC-8 (145 hm³/año) llegando casi al 40% del déficit ambiental total existente en la cuenca.

Por otro lado, el déficit de explotación alcanza un valor de 290 hm³/año, que se concentra al igual que el déficit ambiental, en la SC-8 (173 hm³/año), debido a la mayor proporción de área de cultivo de arroz existente en la misma respecto a las otras subcuencas y que equivale al 60% del déficit de explotación en la cuenca.

Reglas de explotación R1

Este tipo de reglas refleja el régimen de explotación existente en la cuenca sin ningún tipo de regulación. Consiste en extraer en cada subcuenca todo el caudal que esté disponible en el cauce para satisfacer las demandas existentes.

A modo de resumen de los resultados se presentan en la Tabla 33 y las Figuras 62 y 63 los resultados obtenidos por subcuencas (caudal medio, déficit de explotación, ambiental y total y los porcentajes de tiempo en que se producen los mismos).

	Caudal medio (m³/s)	Déficit expl. (hm³/año)	Déficit amb. (hm³/año)	Déficit total (hm³/año)	% tiempo déficit expl.	% tiempo déficit amb.
SC-1	38.93	0.00	32.83	32.83	0.00	12.73
SC-2	86.77	0.00	39.73	39.73	0.00	12.36
SC-3	33.19	0.06	36.07	36.13	0.19	15.46
SC-4	170.17	0.00	74.75	74.75	0.00	12.62
SC-5	39.66	0.00	33.28	33.28	0.00	14.67
SC-6	98.53	0.00	47.28	47.28	0.00	13.28
SC-7	315.74	0.05	17.26	17.32	0.18	15.21
SC-8	353.98	0.63	198.55	199.17	0.18	15.21
TOTAL	-	0.741	479.73	480.48	0.19	15.46

Tabla 33. Resumen de resultados por subcuencas. Reglas tipo R1.

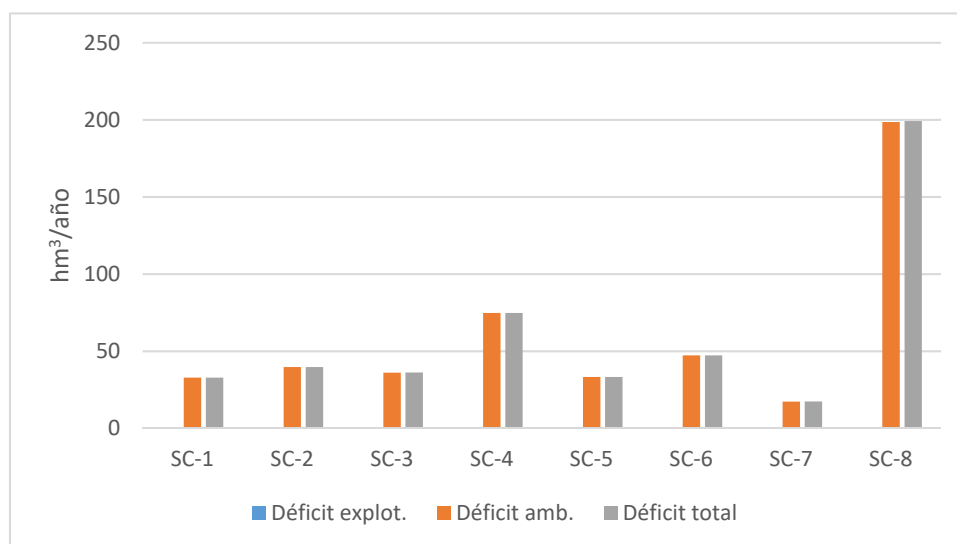


Figura 62. Déficits obtenidos por subcuencas. Reglas tipo R1.

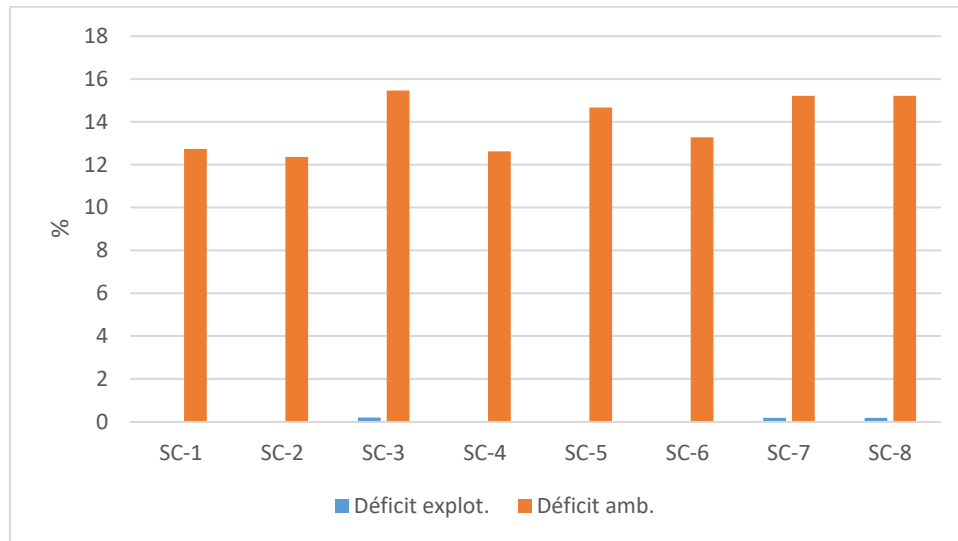


Figura 63. Porcentajes de tiempo con déficit de explotación y ambiental por subcuencas. Reglas tipo R1.

Tanto en la tabla como en las figuras anteriores se observa cómo, en el caso de que no existiera ninguna limitación a la hora de extraer agua para satisfacer la demanda de riego para el cultivo de arroz, el déficit de explotación sería casi nulo ($0.75 \text{ hm}^3/\text{año}$) y estaría localizado casi en su totalidad en la subcuenca 8 ($0.63 \text{ hm}^3/\text{año}$) donde se produciría el 85% del déficit de explotación.

En cuanto al déficit ambiental, se comprueba como este aumenta en gran medida respecto de la aplicación de la regla R0 ($480 \text{ hm}^3/\text{año}$ para R1 frente a $375 \text{ hm}^3/\text{año}$ para R0) y al ser el déficit de explotación prácticamente nulo es casi igual al déficit total.

Por otro lado y para entender el funcionamiento del modelo a nivel de subcuenca, se presentan en la Figura 64 los resultados para cada instante de tiempo a lo largo de la simulación de algunas variables intermedias del modelo en la SC-8 (se ha elegido esta subcuenca debido a que, presenta es la mayor superficie destinada al cultivo de arroz en la actualidad). En concreto se presenta la demanda de agua para el cultivo de arroz satisfecha con aportaciones fluyentes (detracciones del río), la demanda satisfecha con aportaciones reguladas (procedente del agua almacenada en los reservorios existentes), la demanda diaria no satisfecha (déficit de explotación) y el volumen de agua almacenado en los reservorios.

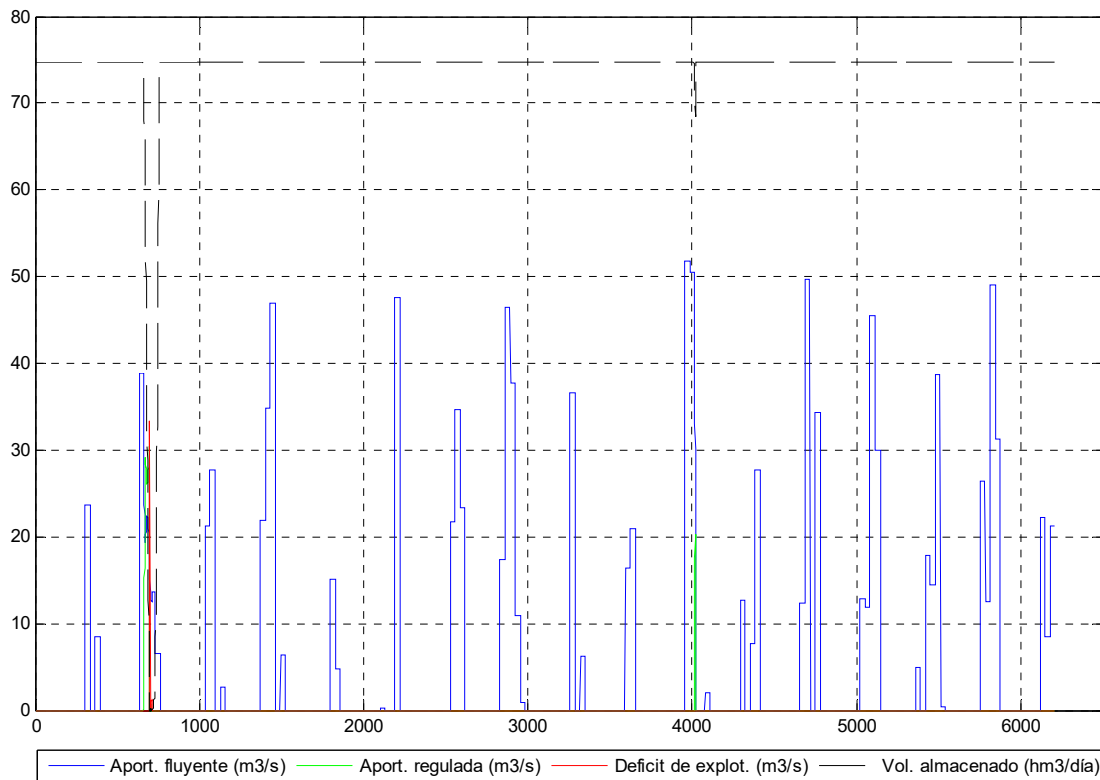


Figura 64. Aportación fluyente, aportación regulada, déficit de explotación y volumen almacenado a lo largo de la simulación para la SC-8. Reglas tipo R1.

La mayoría de la demanda satisfecha a lo largo de la simulación se produce mediante aportaciones fluyentes lo que es lógico ya que no existe ningún tipo de restricción la hora de extraer agua del río. En cuanto a los reservorios estos se llenan al comienzo de la simulación y permanecen llenos prácticamente todo el tiempo y, solamente en dos ocasiones a lo largo de los 17 años de la simulación es necesario satisfacer la demanda de riego con aportaciones reguladas por no disponer el río de la cantidad de agua suficiente llegando a producirse solo en el primer caso déficit de explotación.

Reglas de explotación R2

Este tipo de reglas consiste en imponer un cese de los bombeos (detracciones) cuando el caudal fluyente en los puntos de control establecidos en la cuenca desciende por debajo de un umbral estipulado. En este sentido se ha impuesto el cese de los bombeos cuando el caudal fluyente desciende por debajo del caudal ambiental en la estación de Yuty para las subcuencas SC-1 a SC-4 y en la estación de Villa Florida para las subcuencas SC-5 a SC-8.

En cuanto a la permanencia del cese de bombeo se han planteado las siguientes opciones para ver cuál es la más adecuada (cuál minimiza la función objetivo):

- 1) El cese de bombeo permanece vigente hasta que $Q/Q_{amb} \geq 1.25$
- 2) El cese de bombeo permanece vigente hasta que $Q/Q_{amb} \geq 1.5$
- 3) El cese de bombeo permanece vigente hasta que $Q/Q_{amb} \geq 2$
- 4) El cese de bombeo permanece vigente 10 días
- 5) El cese de bombeo permanece vigente 20 días
- 6) El cese de bombeo permanece vigente 30 días

Caso	Déficit expl. (hm³/año)	Déficit amb. (hm³/año)	Déficit total (hm³/año)	% tiempo déficit expl.	% tiempo déficit amb.
1	17.98	396.95	414.93	2.48	15.37
2	17.98	395.79	413.77	2.48	15.37
3	17.98	395.67	413.65	2.48	15.37
4	17.90	396.96	414.86	2.22	15.37
5	17.98	396.75	414.73	2.48	15.37
6	17.98	396.34	414.32	2.48	15.37

Tabla 34. Resumen de resultados para los diferentes casos planteados. Reglas tipo R2.

En la Tabla 34 se observa como en los seis casos planteados, tanto en los tres donde la prohibición de extracción de agua permanece vigente hasta que el caudal en los puntos de control recupera una cierta magnitud (casos 1, 2 y 3), como en los tres donde que esta permanece vigente durante un periodo de tiempo dado (casos 4, 5 y 6), se obtiene prácticamente el mismo déficit de explotación, alrededor de 18 hm³/año.

No ocurre lo mismo con el déficit ambiental, donde aunque la variación es mínima si existe una disminución de su valor a medida que aumenta la magnitud a alcanzar para la reinstauración del bombeo o el tiempo en que permanece vigente la prohibición del mismo.

Esta evolución se mantiene en el déficit total (ver Figura 65) siendo el caso que minimiza el déficit total (función objetivo) el número 3 (done el cese de bombeo permanece vigente hasta que $Q/Q_{amb} \geq 2$) dando un valor de 413.65 hm³ anuales y siendo, por lo tanto la mejor opción a plantear dentro del tipo de medidas R2.

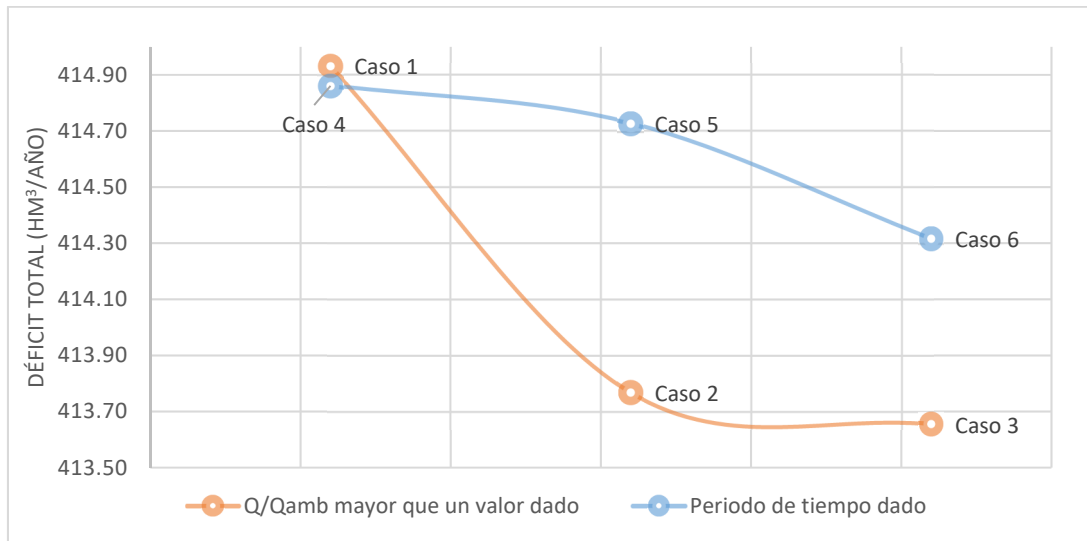


Figura 65. Déficit total para los diferentes casos planteados. Reglas tipo R2.

Una vez seleccionado el caso 3 dentro del tipo de reglas R2 como el que minimiza la función objetivo, se presentan en la Tabla 35 y las Figuras 66 y 67 los resultados obtenidos para el mismo por subcuencas (caudal medio, déficit de explotación, ambiental y total y los porcentajes de tiempo en que se producen esos déficits).

	Caudal medio (m³/s)	Déficit expl. (hm³/año)	Déficit amb. (hm³/año)	Déficit total (hm³/año)	% tiempo déficit expl.	% tiempo déficit amb.
SC-1	38.99	1.82	29.18	31.00	1.95	12.72
SC-2	86.99	0.60	30.92	31.51	1.02	12.22
SC-3	33.25	1.55	32.18	33.73	1.32	15.37
SC-4	170.66	0.23	59.57	59.80	0.90	12.44
SC-5	39.67	0.33	32.57	32.90	2.48	14.65
SC-6	98.60	0.99	44.41	45.41	1.77	13.12
SC-7	316.63	1.00	13.35	14.34	1.64	14.73
SC-8	355.30	11.47	153.49	164.96	1.64	14.73
TOTAL	-	17.98	395.67	413.65	2.48	15.37

Tabla 35. Resumen de resultados por subcuencas. Reglas tipo R2.

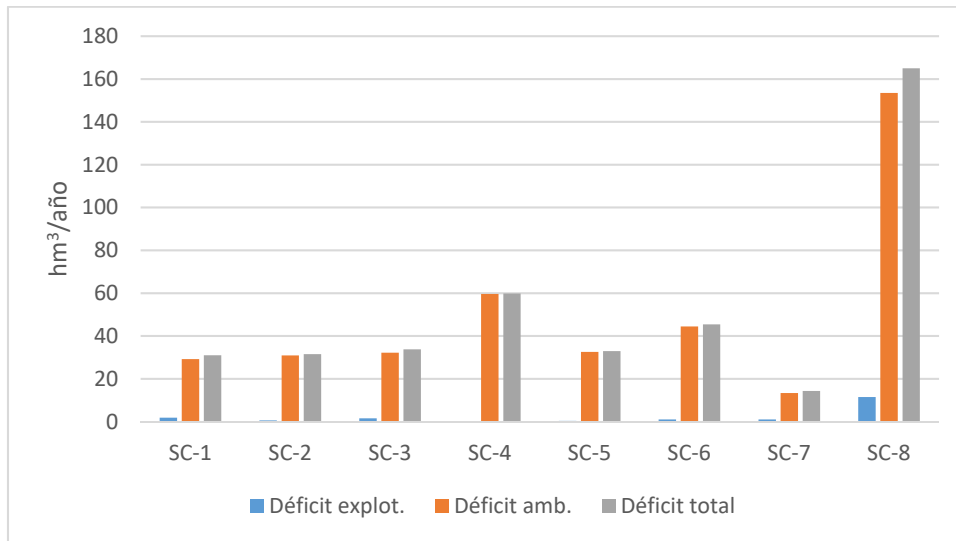


Figura 66. Déficits obtenidos por subcuencas. Reglas tipo R2.

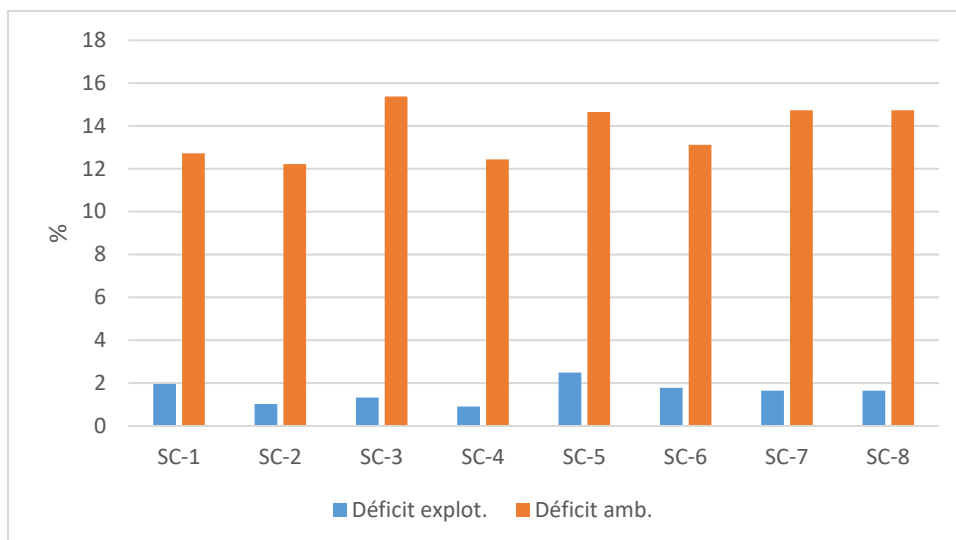


Figura 67. Porcentajes de tiempo con déficit de explotación y ambiental por subcuencas. Reglas tipo R2.

Si se comparan los resultados con los obtenidos para el tipo de reglas R1 (simulación sin limitaciones), se observa como el déficit de explotación aumenta pasando de 0.75 hm³/año a 18 hm³/año, el déficit ambiental disminuye notablemente pasando de 480 a 395 hm³/año y, finalmente, el déficit total también disminuye (de 480 a 418 hm³/año) obteniendo una mejor gestión de los recursos hídricos de la cuenca. Al igual que en los casos anteriores el mayor peso de ambos déficits se presentan en la SC-8.

Por último en la Figura 68 se presentan, al igual que en el caso anterior, los resultados para cada instante de tiempo obtenidos en la SC-8 de: la demanda de agua para cultivo de arroz satisfecha con aportaciones fluyentes y reguladas, la demanda diaria no satisfecha y el volumen de agua almacenado en los reservorios.

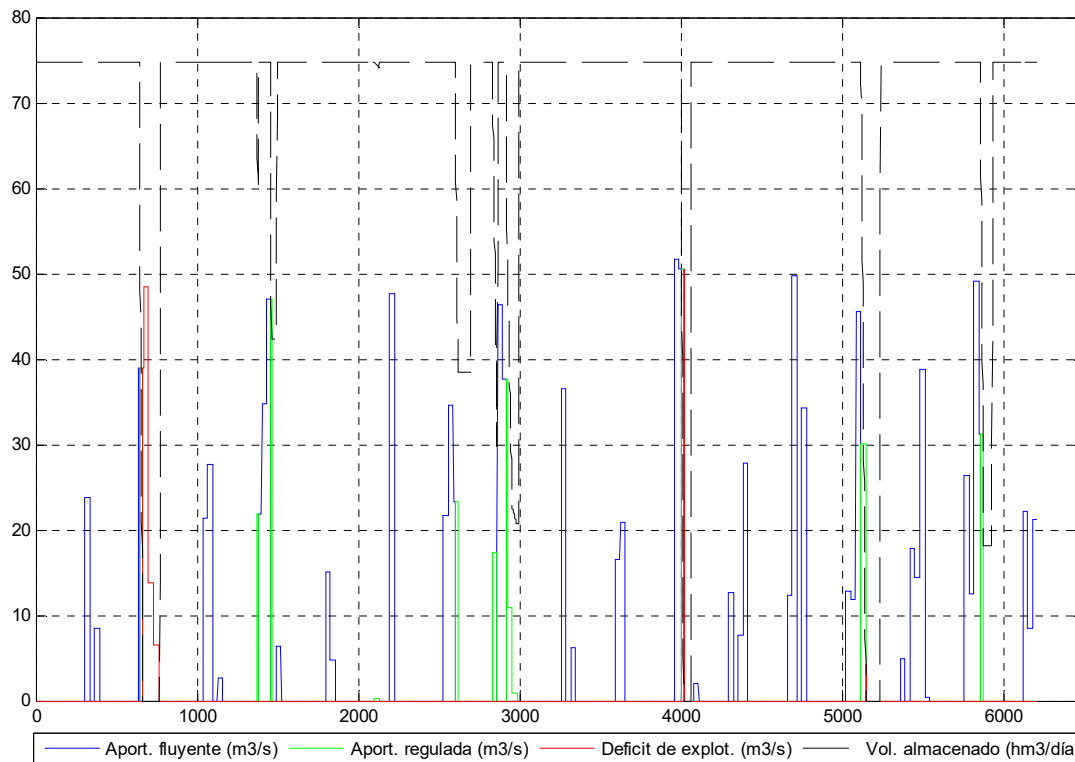


Figura 68. Aportación fluvente, aportación regulada, déficit de explotación y volumen almacenado a lo largo de la simulación para la SC-8. Reglas tipo R2.

Al igual que en el caso anterior, la mayoría de la demanda satisfecha a lo largo de la simulación se produce mediante aportaciones fluventes, pero al existir restricciones para las detracciones existen varios periodos donde la demanda se satisface con las aportaciones reguladas (coincidentes con disminuciones del volumen almacenado en los reservorios) y también aumentan como es lógico en número de veces en que existe demanda no satisfecha (coincidentes con el vaciado completo de los reservorios).

Reglas de explotación R3

En este tipo de reglas se han planteado tramos de bombeo en función del excedente de caudales registrado en los dos puntos de control establecidos (Villa Florida y Yuty) donde el excedente se ha cuantificado como el cociente entre el caudal fluvente y el caudal ambiental (Q/Q_{amb}) teniendo las reglas resultantes la siguiente forma:

- Si $Q/Q_{amb} > C2$, Se pueden extraer hasta un máximo de $Q2 \text{ m}^3/\text{s}$, (donde $Q2 =$ totalidad de la demanda máxima potencial).
- Si $C1 < Q/Q_{amb} < C2$, Se pueden extraer hasta $Q1 \text{ m}^3/\text{s}$ (donde $Q1 = F \cdot Q2$ y $F = C3 \cdot ((Q/Q_{amb}) - C4)$).
- Si $Q/Q_{amb} < C1$, no se puede extraer agua (cese de bombeo).

En cuanto a los 4 parámetros asociados a las reglas de explotación tipo R3 (C1, C2, C3 y C4) se han planteado varias combinaciones de los mismos para posteriormente escoger la que minimice la función objetivo como regla tipo R3 óptima. Las combinaciones planteadas se presentan en la Tabla 36 y los resultados obtenidos para cada una de ellas en la Tabla 37.

Caso	C1	C2	C3	C4
1	1.5	1	2	1
2	1	0.5	2	0.5
3	1.25	0.75	2	0.75
4	2	1	1	1
5	1.5	0.5	1	0.5
6	1	0.75	4	0.75
7	1.25	1	4	1

Tabla 36. Parámetros propuestos para cada uno de los casos planteados. Reglas tipo R3.

Caso	Déficit expl. (hm³/año)	Déficit amb. (hm³/año)	Déficit total (hm³/año)	% tiempo déficit expl.	% tiempo déficit amb.
1	18.54	387.58	406.12	2.87	15.17
2	13.43	429.05	442.48	1.50	15.46
3	16.63	404.23	420.87	1.92	15.37
4	30.61	383.48	414.09	4.58	14.94
5	15.30	409.67	424.98	1.82	15.29
6	15.79	414.01	429.80	1.72	15.44
7	17.85	392.20	410.05	2.05	15.34

Tabla 37. Resumen de resultados para los diferentes casos planteados. Reglas tipo R3.

En los 7 casos propuestos se obtienen déficits explotación con un rango amplio de valores que van desde los 13.5 hm³/año para el caso 2 hasta los 30.5 hm³/año para el caso 4. En cuanto al déficit ambiental ocurre lo mismo estando el rango de valores entre los 383.5 hm³/año para el caso 4 y los 429 hm³/año para el caso 2. Analizando estos resultados se observa como cuando el déficit de explotación es mínimo el déficit ambiental es máximo y viceversa.

Finalmente se ha considerado como caso optimizado el que minimiza el déficit total: caso 1 con 406 hm³/año (ver Figura 69). Este caso no minimiza ninguno de los déficits anteriores sino que consigue unos valores intermedios tanto para el déficit de explotación (18.5 hm³/año) como para el déficit ambiental (387.5 hm³/año).

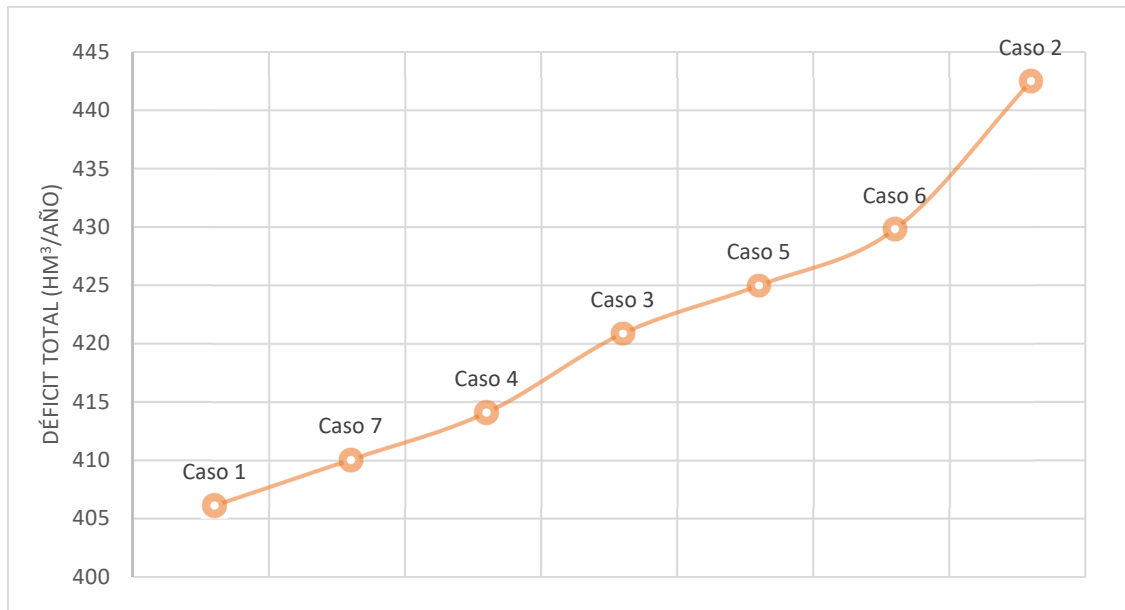


Figura 69. Déficit total para los diferentes casos planteados. Reglas tipo R3.

Una vez seleccionado el caso 1 dentro del tipo de reglas R3 se presentan en la Tabla 38 y las Figuras 70 y 71 los resultados obtenidos para el mismo por subcuencas (caudal medio, déficit de explotación, ambiental y total y los porcentajes de tiempo en que se producen esos déficits).

	Caudal medio (m³/s)	Déficit expl. (hm³/año)	Déficit amb. (hm³/año)	Déficit total (hm³/año)	% tiempo déficit expl.	% tiempo déficit amb.
SC-1	39.00	2.16	28.78	30.95	2.87	12.43
SC-2	87.02	0.65	29.96	30.61	1.05	11.80
SC-3	33.27	1.63	31.39	33.02	1.37	15.17
SC-4	170.74	0.26	57.47	57.73	1.02	12.05
SC-5	39.67	0.36	32.58	32.94	2.64	14.65
SC-6	98.60	1.02	44.41	45.43	1.92	13.12
SC-7	316.71	1.00	13.04	14.04	1.72	14.52
SC-8	355.39	11.46	149.95	161.41	1.72	14.52
TOTAL	-	18.54	387.58	406.12	2.87	15.17

Tabla 38. Resumen de resultados por subcuencas. Reglas tipo R3.

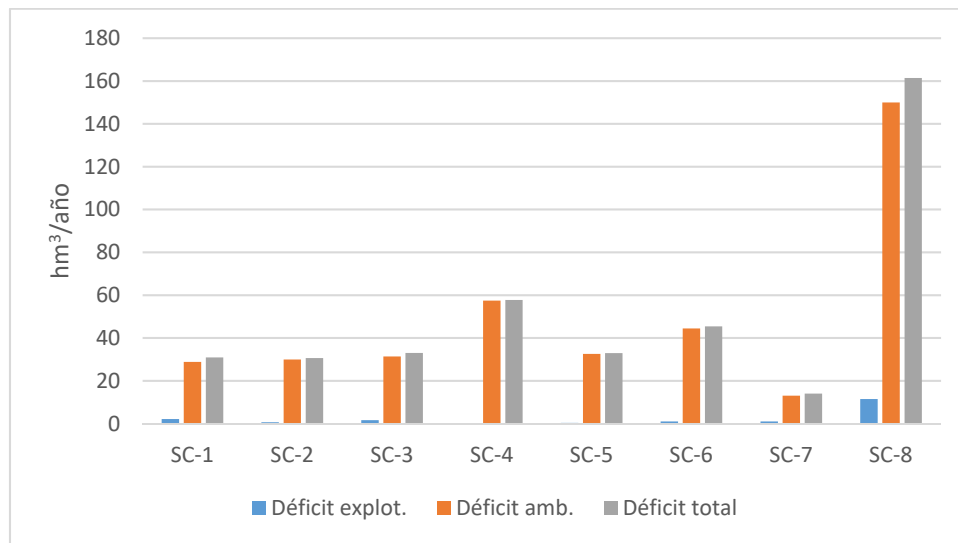


Figura 70. Déficits obtenidos por subcuencas. Reglas tipo R3.

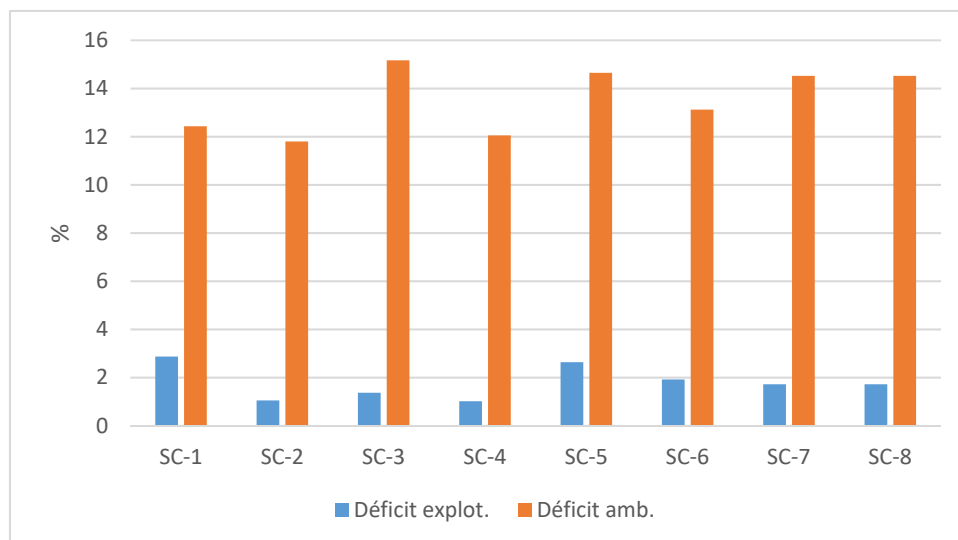


Figura 71. Porcentajes de tiempo con déficit de explotación y ambiental por subcuencas. Reglas tipo R3.

Si se comparan los resultados con los obtenidos para los tipos de reglas R1 (simulación sin limitaciones) y R2 (ceses de bombeo), se observa como el déficit de explotación aumenta en gran medida respecto al tipo de reglas R1 pasando de 0.75 hm³/año a 18.5 hm³/año, siendo muy similar al resultado obtenidos para el tipo de reglas R2 (18 hm³/año). En cuanto al déficit ambiental disminuye notablemente pasando de 480 hm³/año para las reglas R1 a 395 hm³/año para las reglas R2 y llegando un valor de 387.5 hm³/año para las reglas R3. Finalmente, el déficit total también disminuye respecto a los tipos de reglas anteriores (406 hm³/año) obteniendo una mejor gestión de los recursos hídricos de la cuenca. Al igual que en los casos anteriores el mayor peso de ambos déficits se presentan en la SC-8.

En la Figura 72 se presentan, al igual que en los casos anteriores, los resultados para cada instante de tiempo obtenidos en la SC-8 de: la demanda de agua para cultivo de arroz

satisfecha con aportaciones fluyentes y reguladas, la demanda diaria no satisfecha y el volumen de agua almacenado en los reservorios.

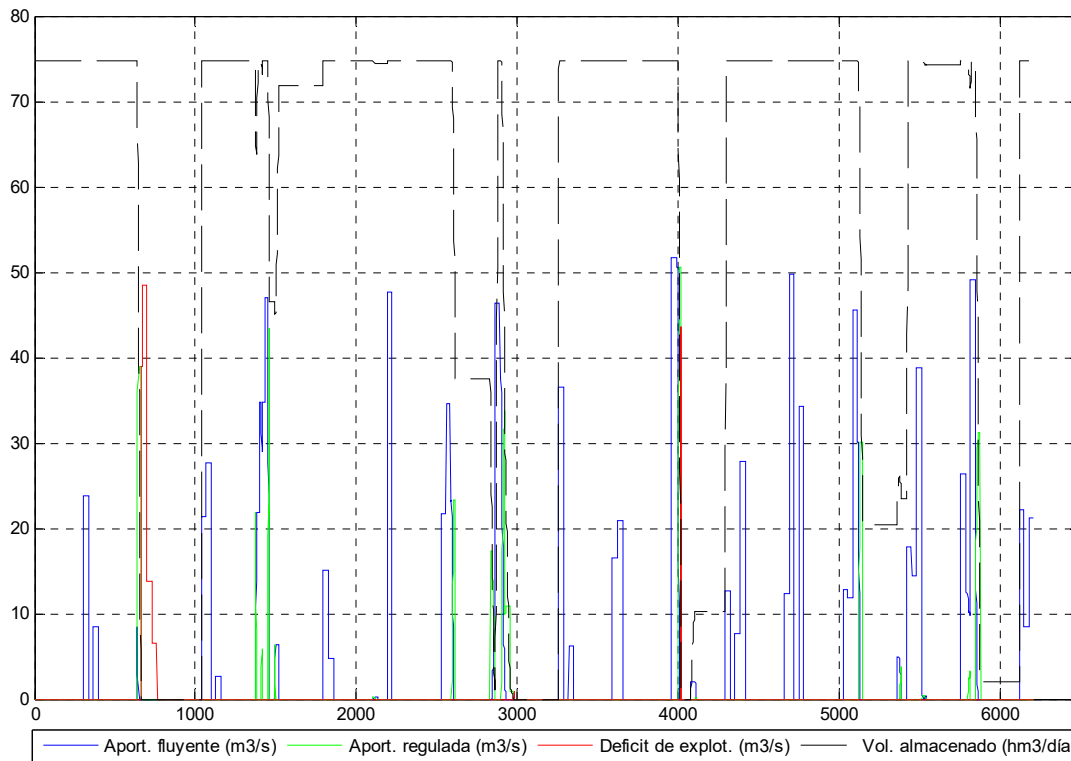


Figura 72. Aportación fluyente, aportación regulada, déficit de explotación y volumen almacenado a lo largo de la simulación para las subcuencas 7 y 8. Reglas tipo R3.

Tras analizar la Figura 72 se observa como es bastante similar a el caso anterior (tipo de reglas R2) pero con la diferencia de que se realiza un mayor aprovechamiento de los reservorios con lo que la demanda de agua satisfecha por aportaciones reguladas es mayor y por lo tanto se extrae menos agua del río en las épocas de menor caudal razón por la cual el déficit ambiental disminuye respecto del as reglas tipo R2 obteniendo una gestión más óptima del recurso en la cuenca.

Elección de la regla propuesta

Una vez presentados y analizados los resultados obtenidos tras la aplicación de los diferentes tipos de reglas (R0-R3) se ha comprobado como la regla que aportaría una gestión más optimizada de los recursos hídricos de la cuenca es la propuesta dentro del tipo de reglas R3.

En la Figura 73 se presentan a modo de resumen los resultados obtenidos para cada tipo de regla.

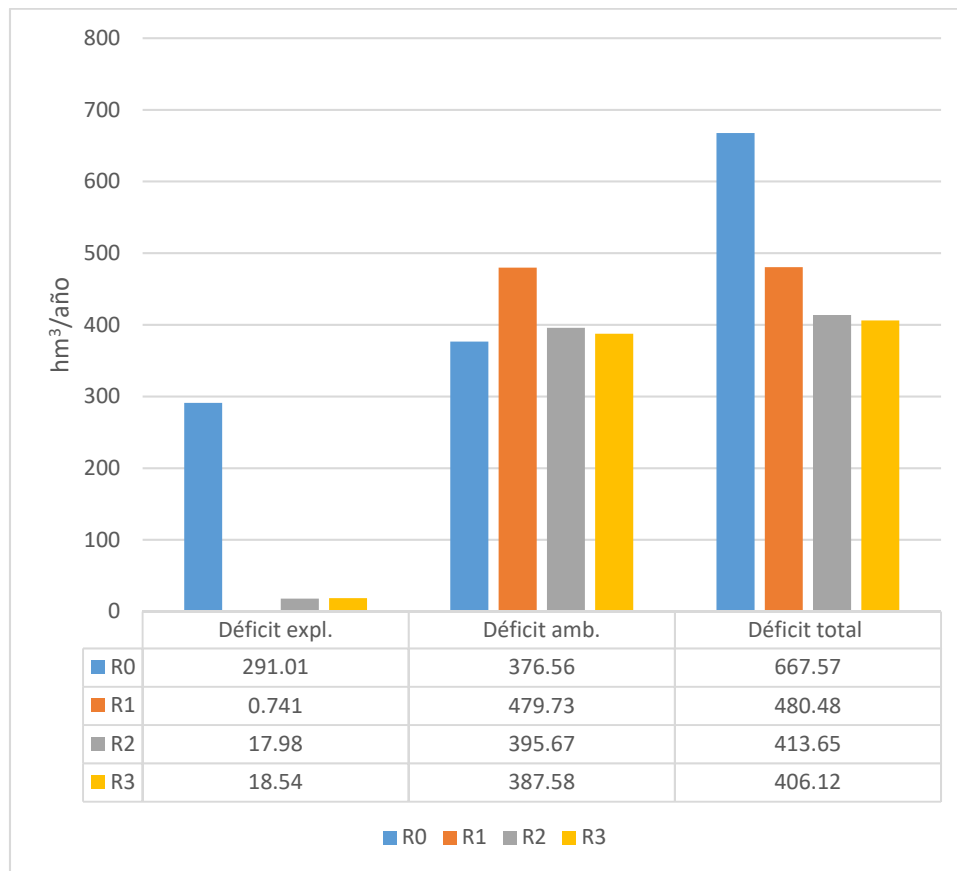


Figura 73. Déficits obtenidos en la cuenca del río Tebicuary para cada tipo de regla.

5.2.3. Análisis de sensibilidad

Dada la diversidad de variables de entrada del modelo, se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad del mismo frente a las más importantes, para estimar la estabilidad, robustez y, en definitiva, fiabilidad de los resultados obtenidos. Concretamente las variables seleccionadas para llevar a cabo este análisis de sensibilidad son:

- Dotación de riego ($\text{hm}^3/\text{ha.año}$)
- Caudal mínimo (m^3/s)
- Superficie de riego (ha)
- Profundidad media de los reservorios (m)
- Puntos de control

Las perturbaciones de los valores esperados de las variables seleccionadas se realizan sobre el caso 0 (caso propuesto en el apartado anterior que minimiza la función objetivo para la situación actual) que se considera como caso de referencia. La Tabla 39 resume todos los casos simulados para llevar a cabo el análisis de sensibilidad.

Caso	Dotación riego (m ³ /ha.año)	Caudal mínimo (m ³ /s)	Superficie riego (ha)	Prof. Media reservorios (m)	Puntos de control
0	10000	Qamb	Sup. actual	1	Yuty (SC1-SC4) Villa Florida (SC5-SC8)
1	8000	Qamb	Sup. actual	1	Yuty (SC1-SC4) Villa Florida (SC5-SC8)
2	12000	Qamb	Sup. actual	1	Yuty (SC1-SC4) Villa Florida (SC5-SC8)
3	10000	0.5·Qamb	Sup. actual	1	Yuty (SC1-SC4) Villa Florida (SC5-SC8)
4	10000	1.5·Qamb	Sup. actual	1	Yuty (SC1-SC4) Villa Florida (SC5-SC8)
5	10000	Qamb	0.75·Sup. actual	1	Yuty (SC1-SC4) Villa Florida (SC5-SC8)
6	10000	Qamb	1.25·Sup. actual	1	Yuty (SC1-SC4) Villa Florida (SC5-SC8)
7	10000	Qamb	Sup. actual	0.5	Yuty (SC1-SC4) Villa Florida (SC5-SC8)
8	10000	Qamb	Sup. actual	1.5	Yuty (SC1-SC4) Villa Florida (SC5-SC8)
9	10000	Qamb	Sup. actual	1	Villa Florida (SC1-SC8)
10	10000	Qamb	Sup. actual	1	Yuty (SC1-SC4) Iturbe (SC5-SC6) Villa Florida (SC7-SC8)

Tabla 39. Casos seleccionados para el análisis de sensibilidad.

Dotación de riego

Se han utilizado tres dotaciones de riego diferentes (10000, 8000 y 12000 m³/ha.año) que se corresponden con los casos 0, 1 y 2. Los resultados obtenidos de las simulaciones (Figuras 74, 75 y 76) muestran como es lógico que al aumentar la dotación de riego aumenta tanto el déficit de explotación como el déficit ambiental aumentando por lo tanto también el déficit total producido en la cuenca. Es importante mencionar que este aumento no se produce en la misma medida, mientras que el déficit ambiental aumenta de manera lineal (pasando de 384 a 391 hm³/año) el déficit de explotación lo hace de manera exponencial (pasando de 7.5 a 45 hm³/año).

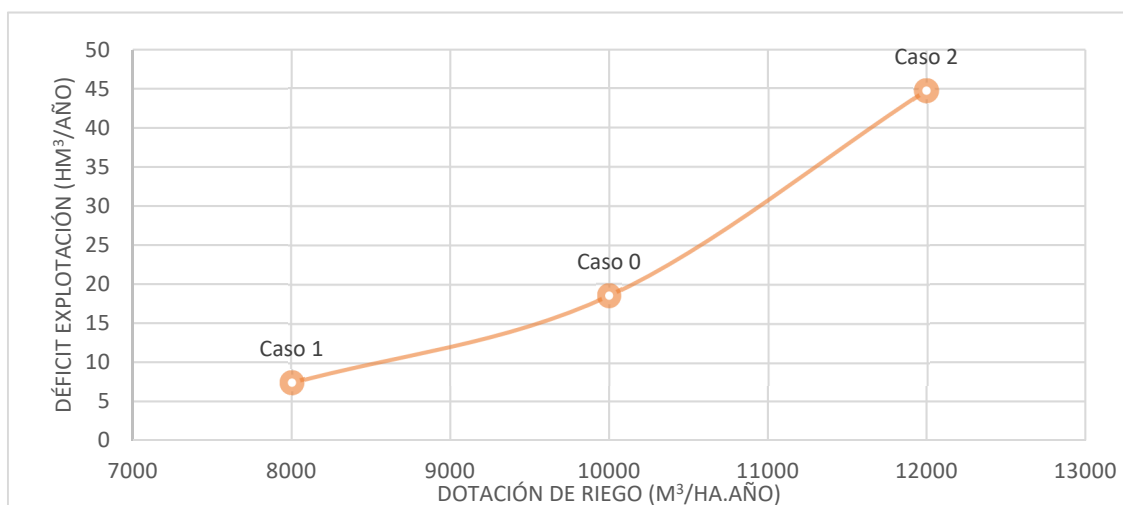


Figura 74. Déficit explotación vs dotación de riego.

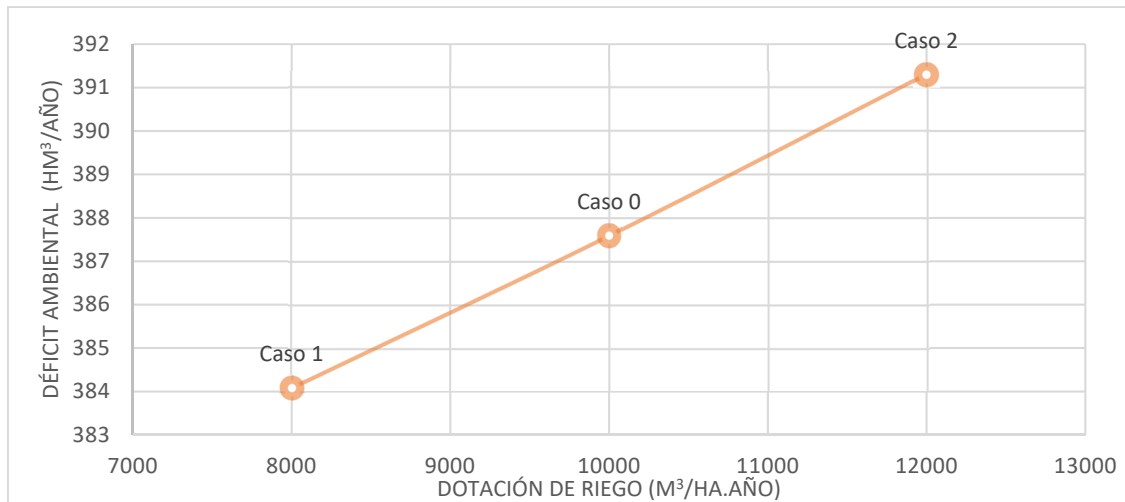


Figura 75. Déficit ambiental vs dotación de riego.

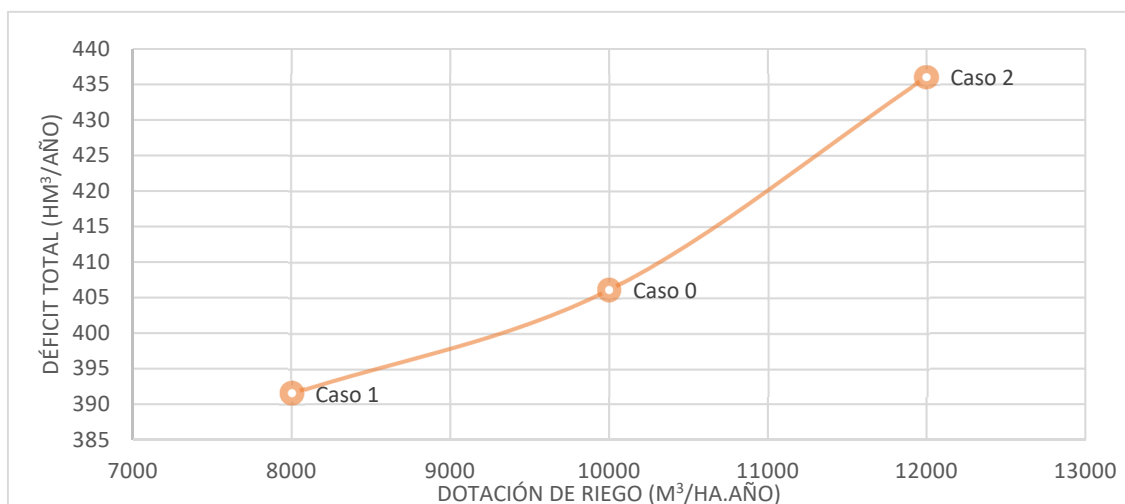


Figura 76. Déficit total vs dotación de riego.

Caudal mínimo

En cuanto a los valores del caudal mínimo por tramos se han considerado tres casos diferentes:

- Caso 0: $Q_{min}=Q_{amb}$
- Caso 3: $Q_{min}= 0.5 \cdot Q_{amb}$
- Caso 4: $Q_{min}= 1.5 \cdot Q_{amb}$

Los resultados de los mismos se presentan en las Figuras 77, 78 y 79 donde se observa como el déficit de explotación es bastante similar entre los casos 0 y 3 (pasamos de 18.5 a 12.5 hm³/año) mientras que aumenta de manera exponencial para el caso 4 llegando a los 52 hm³/año.

Sin embargo, esto no ocurre con el déficit ambiental, que se ve muy afectado por este parámetro alcanzando un valor de 37 hm³/año para el caso 3 (10 veces menos déficit que en el caso 0) y de 1240 hm³/año para el caso 4 triplicando el valor de referencia.

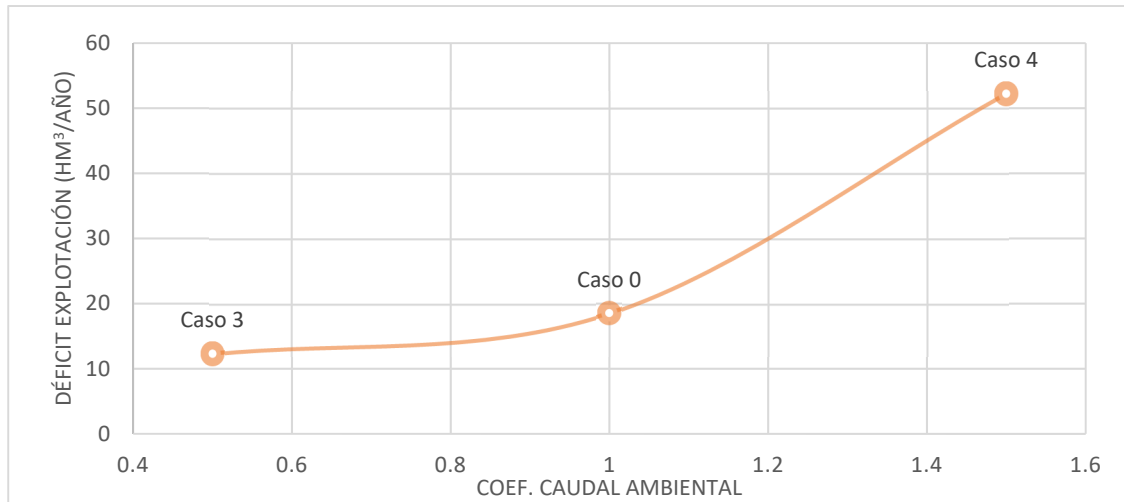


Figura 77. Déficit explotación vs coeficiente que multiplica al caudal ambiental.

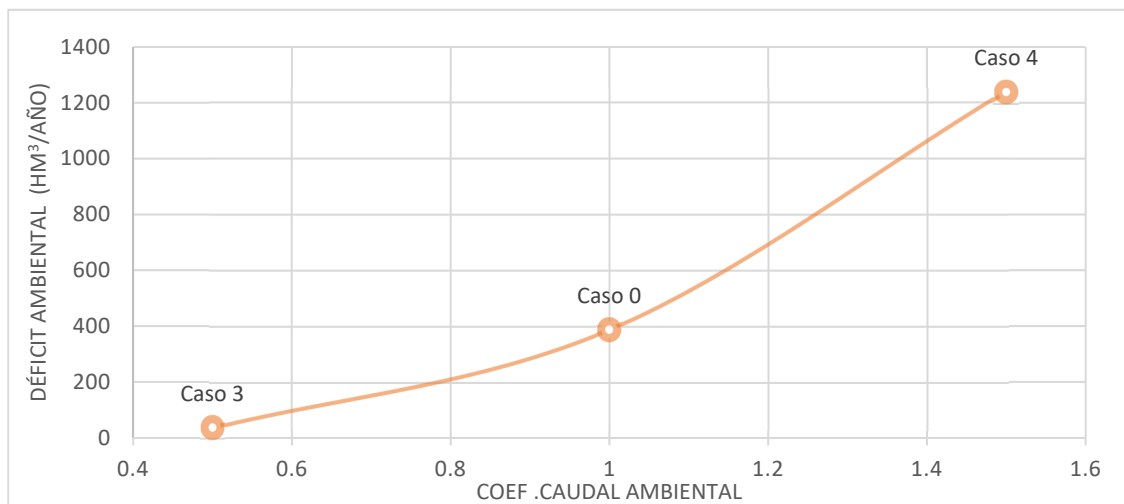


Figura 78. Déficit ambiental vs coeficiente que multiplica al caudal ambiental.

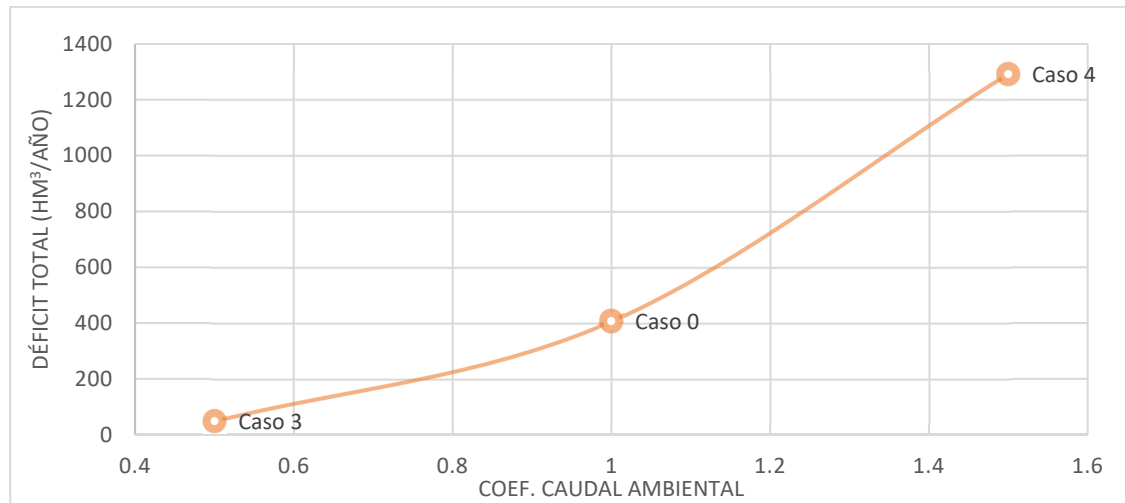


Figura 79. Déficit total vs coeficiente que multiplica al caudal ambiental.

Superficie de riego

En cuanto a la superficie destinada a cultivo de arroz (superficie de riego) se han considerado tres casos diferentes:

- Caso 0: sup. riego = sup. actual
- Caso 5: sup. riego = 0.75· sup. actual
- Caso 6: sup. riego = 1.25· sup. actual

Los resultados de los mismos que se presentan en las Figuras 80, 81 y 82, muestran como es lógico que al aumentar la superficie de riego aumenta tanto el déficit de explotación como el déficit ambiental aumentando por lo tanto también el déficit total producido en la cuenca. Cabe mencionar que la influencia de esta variable es bastante similar a la influencia de la dotación de riego, mientras que el déficit de ambiental aumenta de manera lineal (pasando de 385 a 390 hm³/año) el déficit de explotación lo hace de manera exponencial (pasando de 11 a 32.5 hm³/año).

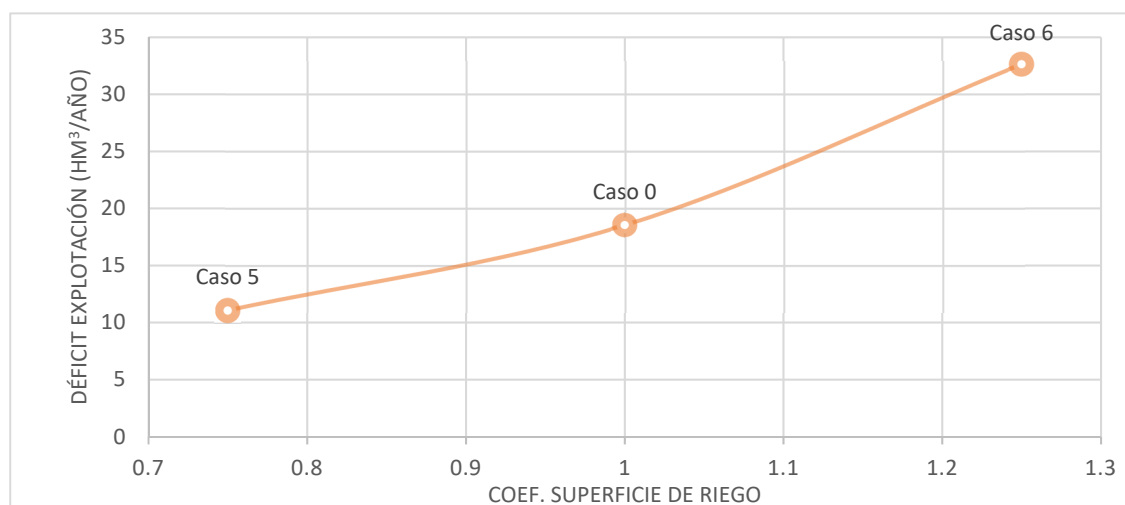


Figura 80. Déficit explotación vs coeficiente que multiplica a la superficie de riego.

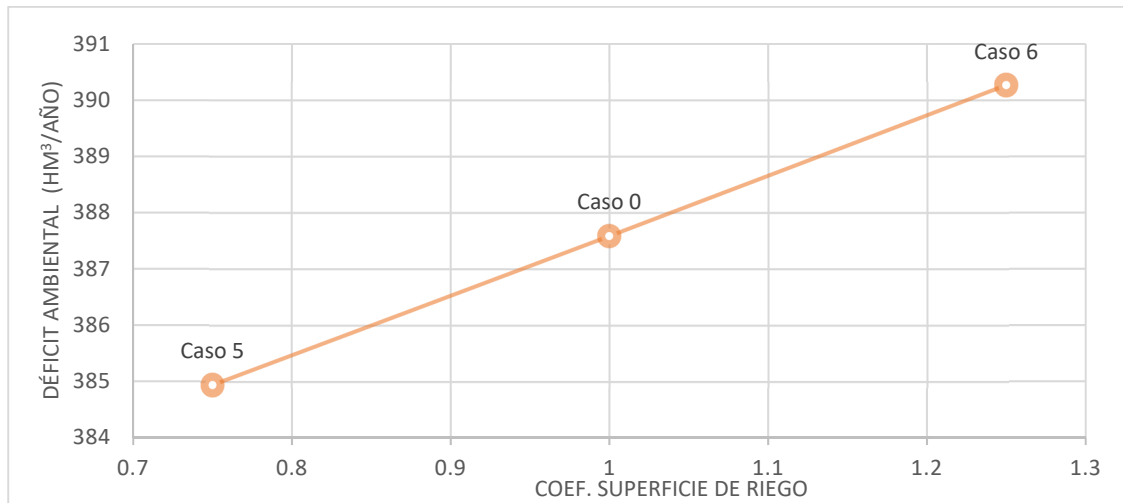


Figura 81. Déficit ambiental vs coeficiente que multiplica a la superficie de riego.

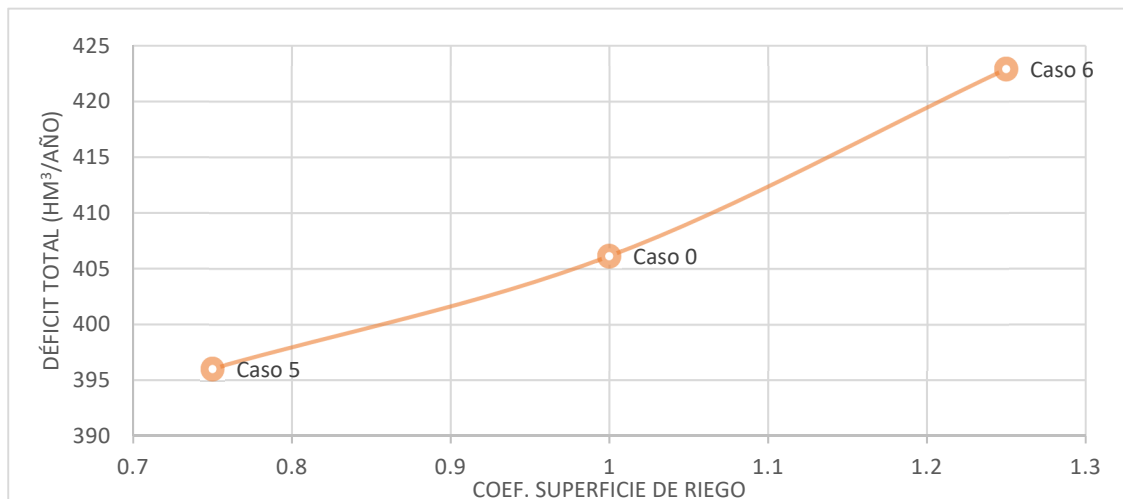


Figura 82. Déficit total vs coeficiente que multiplica a la superficie de riego.

Profundidad media de los reservorios

Se han considerado tres profundidades medias para los reservorios presentes en la cuenca que influirán lógicamente en el volumen de almacenamiento disponible (0.5, 1 y 1.5 m para los casos 7, 0 y 8 respectivamente):

Los resultados de los mismos se presentan en las Figuras 83, 84 y 85 donde se observa como a medida que se aumenta la capacidad de los reservorios obviamente disminuye el déficit de explotación (pasando de 36 hm³/año para el caso 7 a 13.5 hm³/año para el caso 8) mientras que el déficit ambiental permanece constante (387.5 hm³/año). Esto quiere decir que es una buena medida para disminuir el déficit por riego de la cuenca manteniendo un déficit ambiental muy similar al existente en la cuenca de forma natural (recordemos que para el caso sin detracciones, R0 el déficit ambiental es igual a 375 hm³/año).

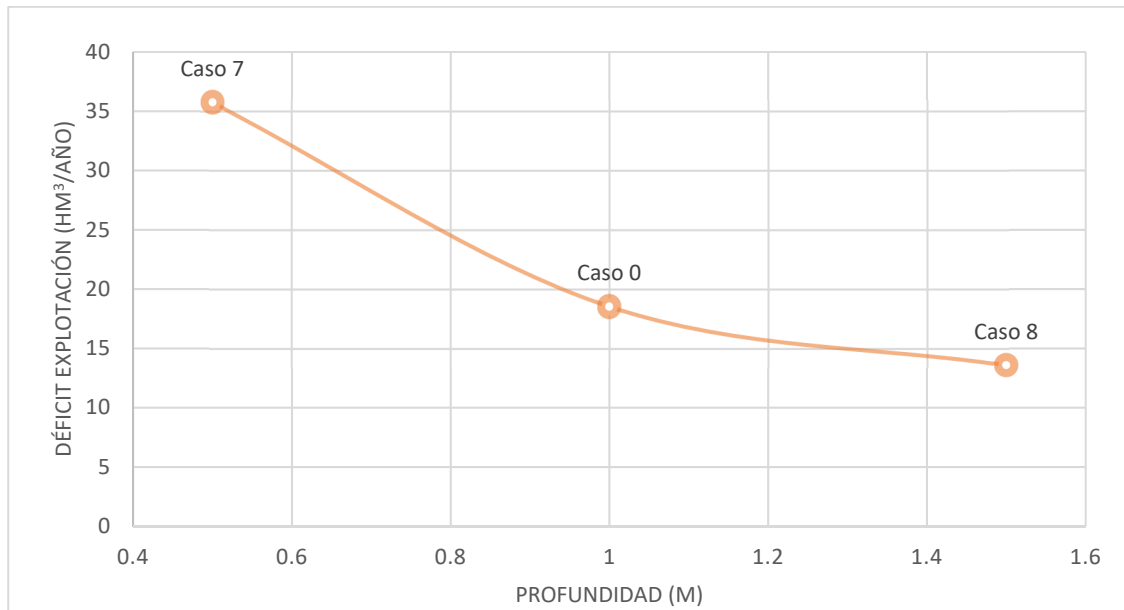


Figura 83. Déficit explotación vs profundidad reservorios.

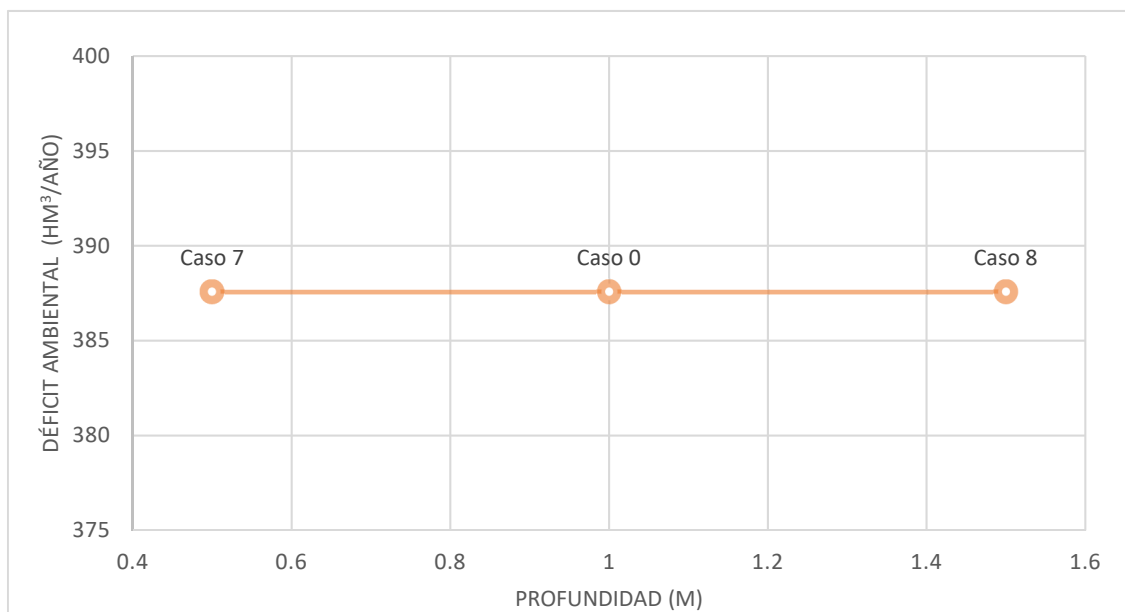


Figura 84. Déficit ambiental vs profundidad reservorios.

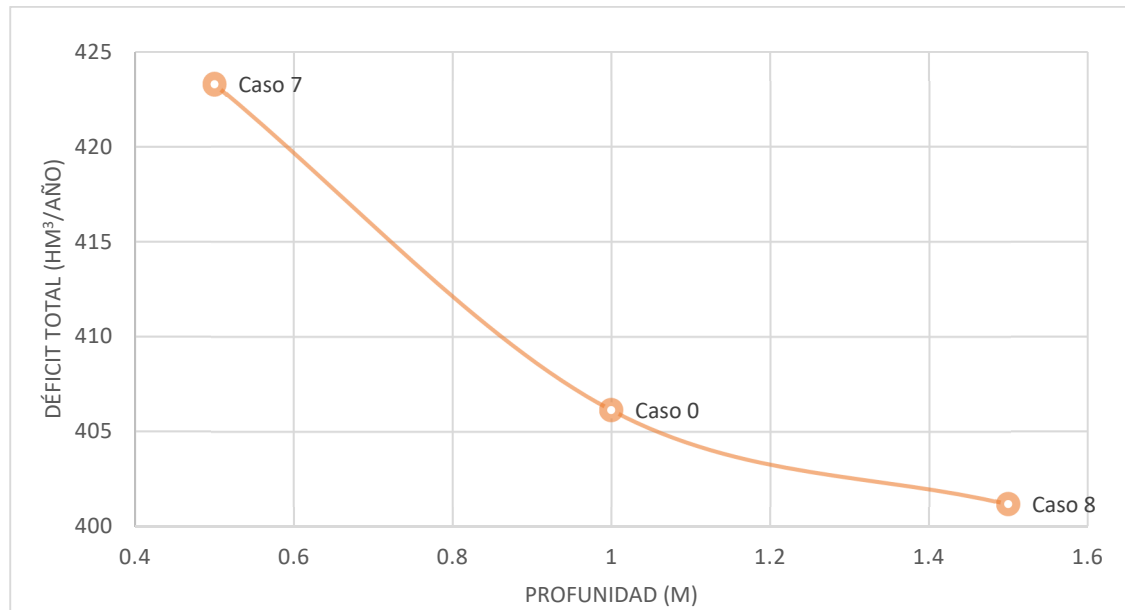


Figura 85. Déficit total vs profundidad reservorios.

Puntos de control

Además del caso 0 donde se consideraron como puntos de control los dos aforos activos existentes en la actualidad: la estación de Yuty para regular la extracción de agua en las subcuencas (SC-1 – SC-4) y la estación de Villa Florida para regular la extracción en las subcuencas (5-8), se han considerado dos variaciones más. +

- Caso 9: Que solo se considere como punto de control la estación de Villa Florida
- Caso 10: Que además de considerar Yuty y Villa Florida se considere también la posibilidad de establecer como punto de control la estación de Iturbe (actualmente inactiva) para controlar la extracción de agua para riego en las subcuencas 5 y 6.

Los resultados para los tres casos se presentan en las Figuras 86, 87 y 88 donde se observa que el déficit de explotación es prácticamente el mismo para los tres casos y el déficit ambiental es un poco más alto para el caso 9 (punto de control único en Villa Florida). Esto da un déficit total prácticamente igual para los casos 0 y 10 por lo que no se ve la necesidad de implantar de nuevo el aforo en la estación de Iturbe para este fin en concreto aunque cuantos más puntos de control existente está claro que se gestionará mejor el recurso hídrico de la cuenca.

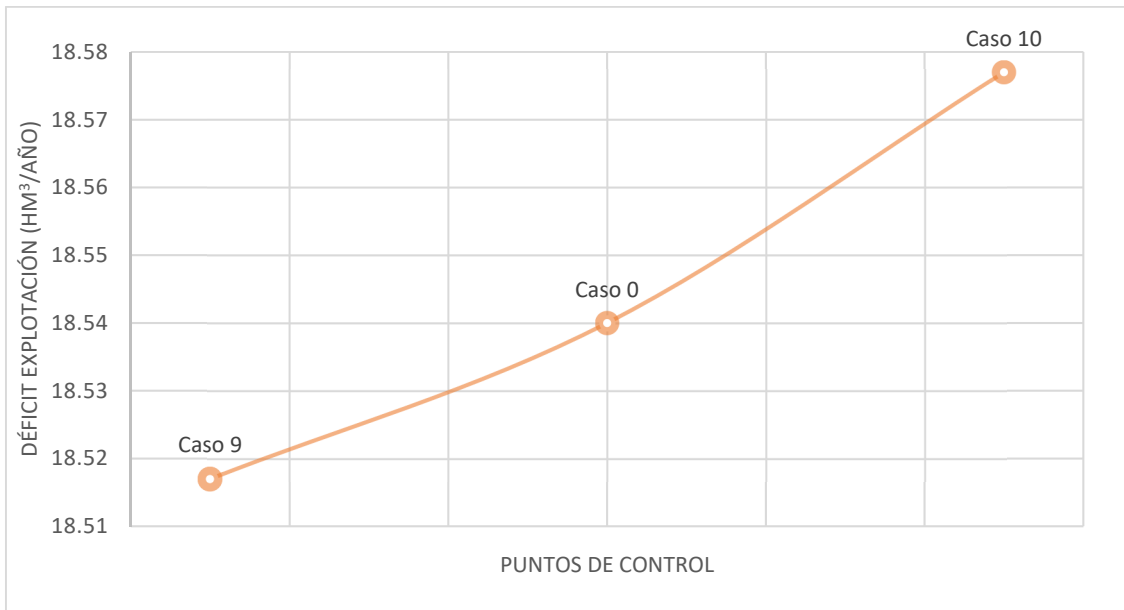


Figura 86. Déficit explotación vs puntos de control.

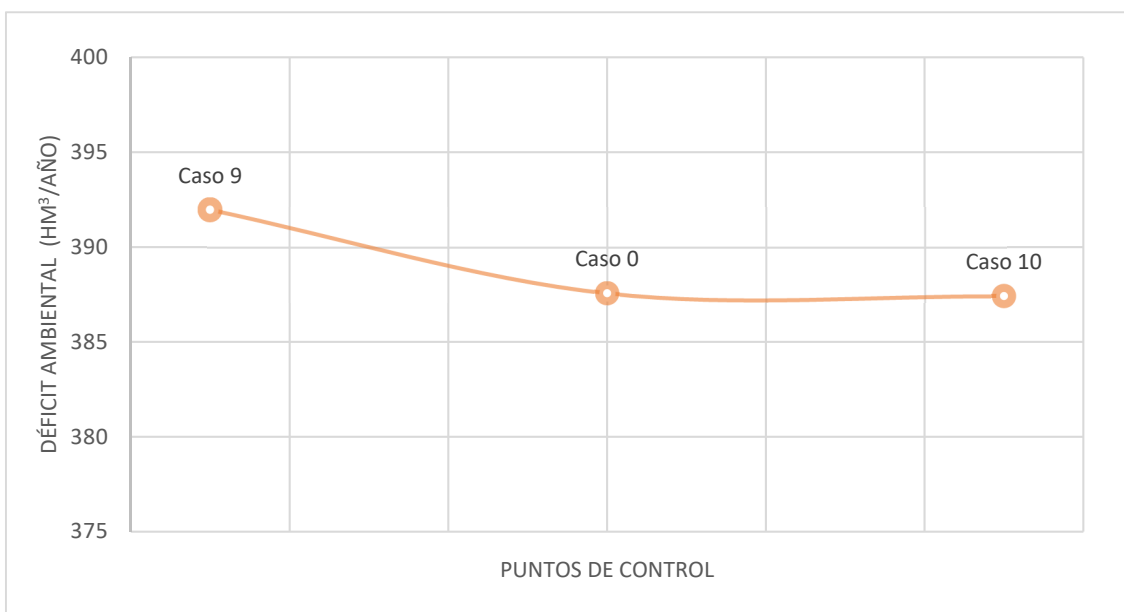


Figura 87. Déficit ambiental vs puntos de control.

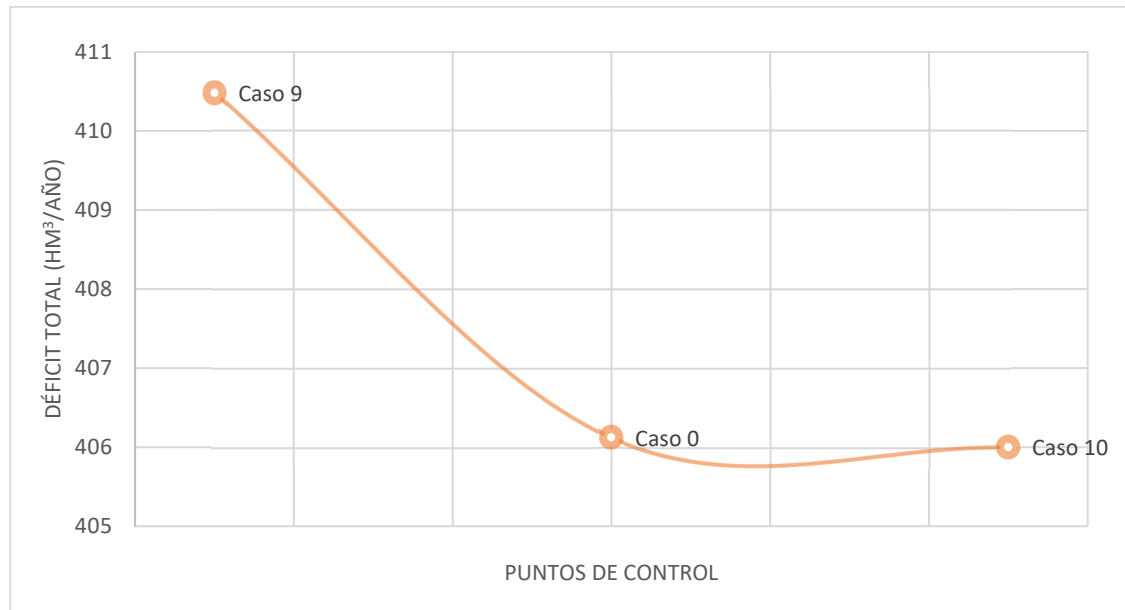


Figura 88. Déficit total vs puntos de control.

Por último, en la Tabla 40 se presenta un resumen de los resultados de todos los casos simulados durante el análisis de sensibilidad donde se observa claramente que la variable más sensible del modelo es el valor del caudal mínimo considerado y la menos el número de puntos de control.

Caso	Déficit expl. (hm³/año)	Déficit amb. (hm³/año)	Déficit total (hm³/año)	% tiempo déficit expl.	% tiempo déficit amb.
0	18.54	387.58	406.12	2.87	15.17
1	7.41	384.09	391.50	1.48	14.89
2	44.77	391.30	436.07	5.25	15.39
3	12.34	36.96	49.30	1.43	5.01
4	52.24	1240.04	1292.28	6.06	25.04
5	11.09	384.94	396.03	1.84	14.89
6	32.64	390.27	422.91	3.58	15.33
7	35.73	387.58	423.31	4.58	15.17
8	13.58	387.58	401.16	1.72	15.17
9	18.52	391.97	410.49	2.69	15.17
10	18.58	387.43	406.00	2.87	15.17

Tabla 40. Resumen de resultados para los diferentes casos planteados para el análisis de sensibilidad.

5.2.4. Análisis del efecto del cambio climático

En este apartado se presentan los resultados de la aplicación del modelo de gestión SIMGES-TEBI teniendo en cuenta los efectos del cambio climático en la cuenca del río Tebicuary para el periodo 2041-2070 y los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Para la implementación del cambio climático en el modelo, se han modificado las variables de entrada de las que se dispone de información para hacerlo (series de precipitación y ETP diarias, parámetros del modelo hidrológico y caudales mínimos considerados por tramos), dejando las demás variables con los valores considerados para la situación actual (parámetros físicos de las subcuencas, superficie de riego, dotación de riego y volumen de almacenamiento).

Series de precipitación y ETP diarias por subcuencas

Para determinar el efecto del cambio climático sobre las precipitaciones se han empleado los resultados de la base de datos Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP) para generar series de precipitación para el periodo 2041-2070 y los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 (ver Tabla 14 y Tabla 15, apartado 3.2.2).

Parámetros del modelo hidrológico

Se han utilizado los parámetros del modelo hidrológico LEM-DW obtenidos para los dos escenarios de cambio climático planteados: RCP 4.5 y RCP 8.5 (ver Tabla 19 apartado 3.3.2).

Caudales mínimos por tramos

Se han considerado como valores mínimos los valores del caudal ambiental ponderado por tramos (Q_{amb}) obtenido por métodos hidrológicos como combinación lineal de la aplicación de cuatro métodos diferentes (Q_{bas1} , Q_{bas2} , Q_{mm21} y Q_{mm25}), para los dos escenarios de cambio climático considerados (ver Tablas 25 y 26, apartado 4.2.1).

Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos tras la implementación del cambio climático en el modelo de gestión para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 en la cuenca del río Tebicuary. En la Figura 89 se presentan los resultados del déficit de explotación, ambiental y total y en la Figura 90 los porcentajes de cambio de los dos escenarios de cambio climático respecto de la situación actual.

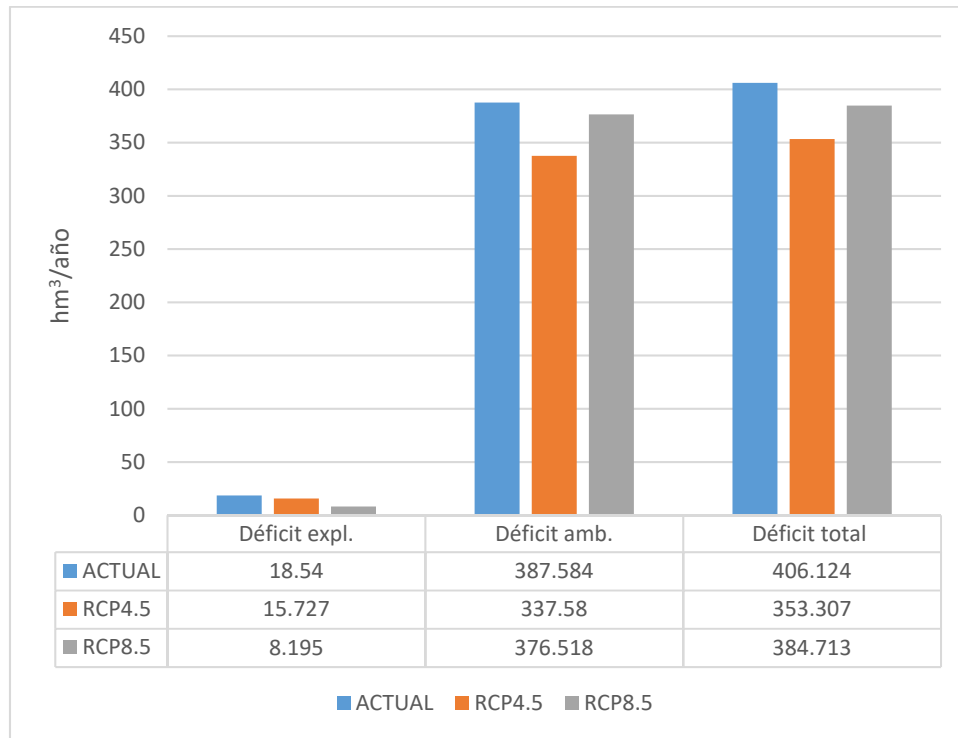


Figura 89. Déficits obtenidos en la cuenca del río Tebicuary para la situación actual y los dos escenarios de cambio climático, RCP 4.5 y RCP 8.5.

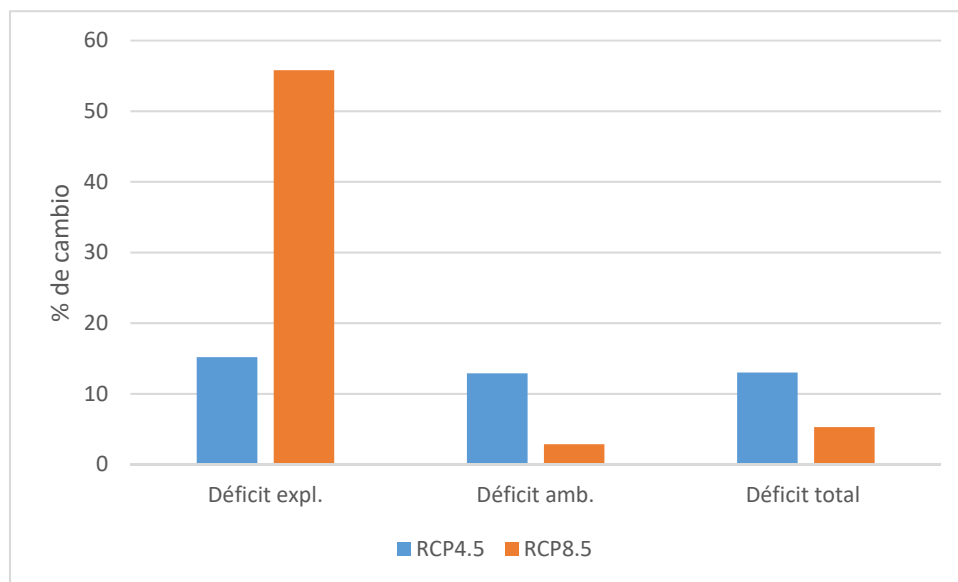


Figura 90. Porcentajes de cambio de los dos escenarios de cambio climático, RCP 4.5 y RCP 8.5, respecto a la situación actual.

Si se analizan las figuras anteriores se observa como el déficit de explotación se reduce un 15% para RCP 4.5 (16 hm³/año) y un 56% para el RCP 8.5 (8 hm³/año) respecto a la situación actual (18.5 hm³/año). Para el caso del déficit ambiental la reducción no es tan notoria en porcentaje aunque si en cantidad: el 13% para el RCP 4.5 (337.5 hm³/año) y del 3% para el RCP 8.5 (376.5 hm³/año)). En consecuencia, el déficit total menor es para

el RCP 4.5 con un valor de 353 hm³/año (13% menos que en la situación actual) aunque también se reduce para le RCP 8.5 un 5%.

Todo esto es lógico debido a que, como se comenta en los apartados anteriores, las precipitaciones aumentan para los dos escenarios de cambio climático y en términos relativos el caudal ambiental disminuye, lo que conduce a que por un lado haya menos déficit ambiental y por otro exista una mayor cantidad de agua disponible en la cuenca para su extracción disminuyendo el déficit ambiental y por lo tanto el total.

6. RIESGOS HIDROCLIMÁTICOS. INUNDACIÓN

6.1. Evaluación de la amenaza por inundación en la cuenca del río Tobicuary

En este apartado se presenta la evaluación de la amenaza por inundación en un tramo del río Tobicuary que abarca unos 12 km en las inmediaciones de Villaflorida (ver Figura 91) a modo de ejemplo la metodología a aplicar para poder realizar una correcta evaluación de esta amenaza en la cuenca.

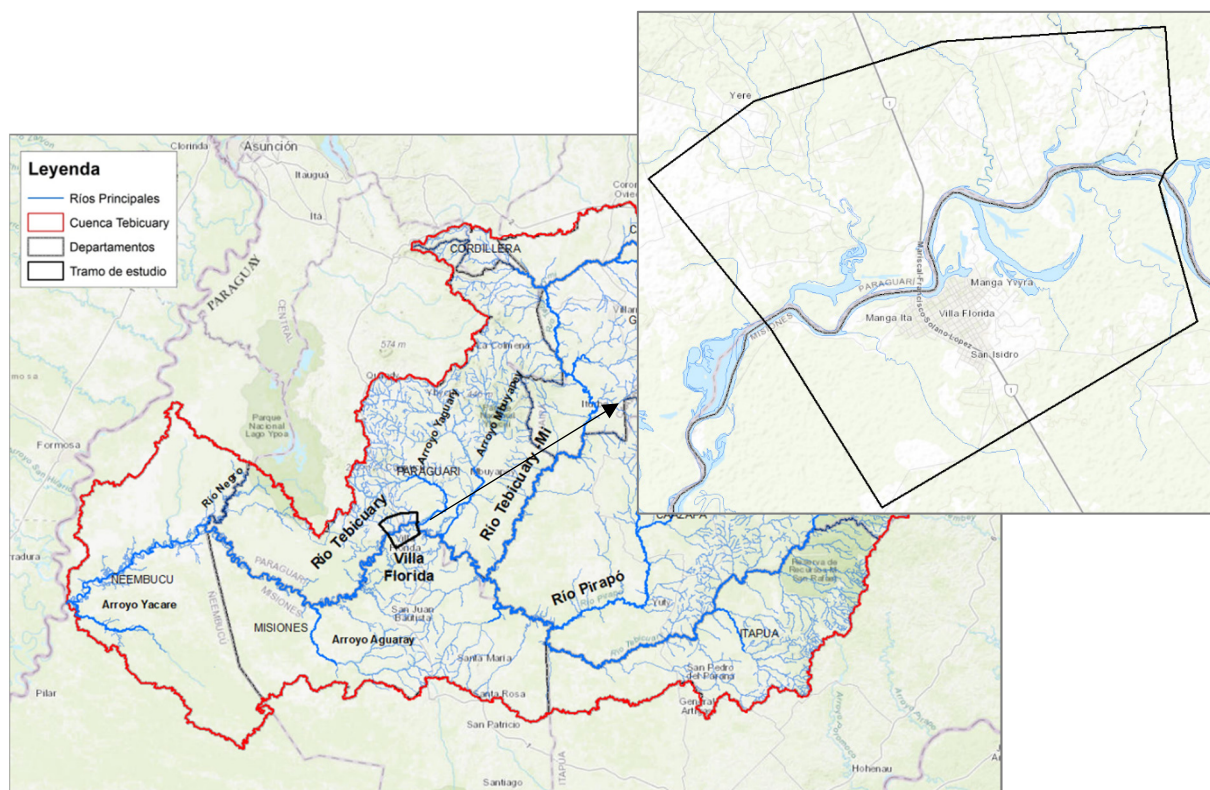


Figura 91. Localización del tramo de estudio dentro de la cuenca del río Tobicuary.

El estudio de la amenaza por desbordamiento del cauce en el tramo de río seleccionado, se ha abordado mediante el cálculo de los calados y velocidades asociados a eventos de avenida con diferentes probabilidades de presentación. Concretamente, se ha analizado el efecto de los eventos de inundación correspondientes a $T=10$, 20 y 50 años de periodo de retorno.

Para este fin, se ha realizado un estudio hidráulico bidimensional en régimen permanente mediante el modelo hidráulico HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center- River Analysis System*) en su versión 5.0.6., desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de EE.UU. Este modelo es probablemente el más conocido y ampliamente utilizado por organismos internacionales y empresas públicas y

privadas para análisis hidráulicos en la gestión de los ríos, por lo que sus resultados han sido ampliamente contrastados.

A continuación se presentan los datos utilizados para su implementación y los principales resultados del análisis realizado.

6.1.1. Implementación del modelo hidráulico

En este apartado se describen todos los pasos que se han seguido para la implementación del modelo numérico HEC-RAS (incluyendo todos los datos necesarios) y los análisis realizados para la obtención de los mapas de calados y velocidades para los diferentes periodos de retorno ($T=10, 20$ y 50 años) en el tramo de estudio seleccionado.

Caracterización geométrica y definición de la malla de cálculo

El primer paso en el cálculo bidimensional exige la correcta caracterización geométrica de la zona de estudio. Esto se consigue mediante la definición previa de una serie de elementos triangulares o rectangulares, que conforman la malla de cálculo. Esta malla tiene que tener una precisión suficiente para una adecuada definición de la zona de estudio y una correcta representación de las condiciones del flujo. En este sentido hay que hacer referencia, en primer lugar, a la información topográfica, que es básica para la realización del estudio y el análisis del comportamiento hidráulico.

En este caso se ha utilizado MDT de la ALOS Mission, realizada por la JAXA (Japón) en colaboración con la NASA (EEUU) que cuenta con una resolución de 12.5 m (Figura 3).

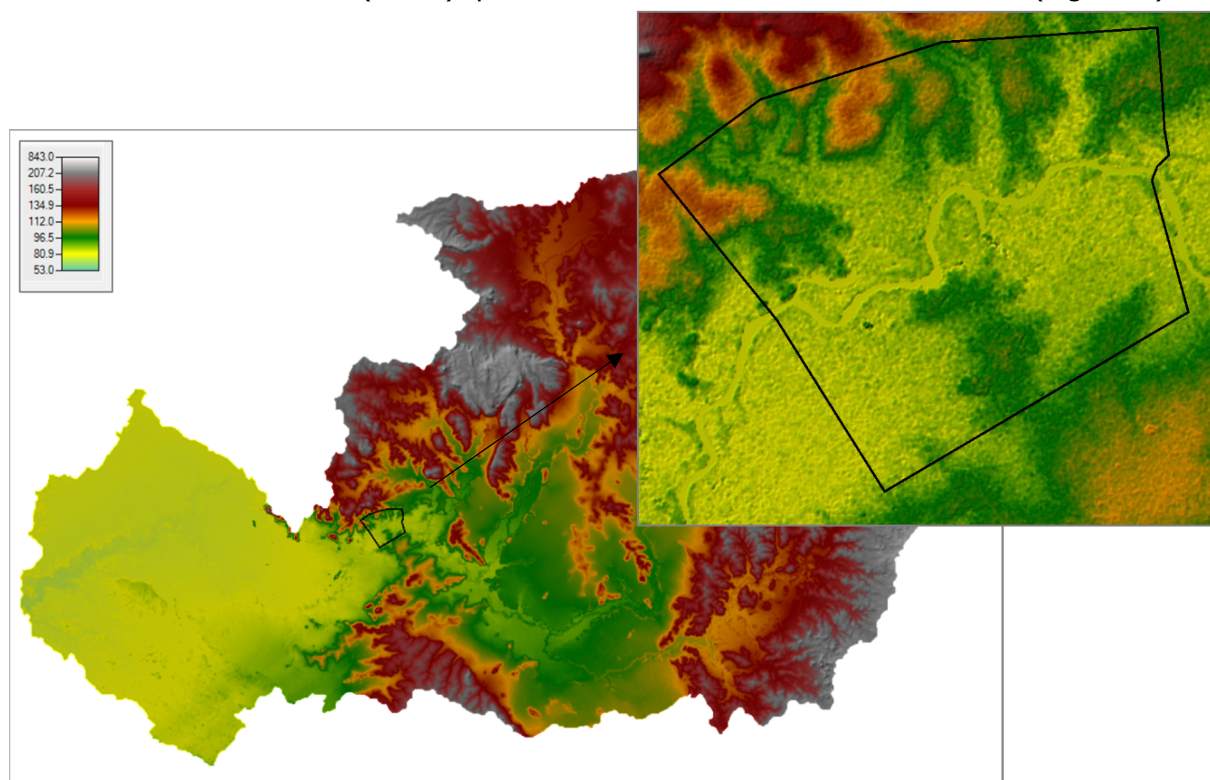


Figura 92. MDT ALOS de resolución 12.5 m con indicación del tramo de estudio seleccionado.

Este MDT se ha mejorado en el tramo de estudio mediante un proceso iterativo de modificaciones con el objetivo de mejorar el perfil, la continuidad y la profundidad del fondo del cauce principal para una mejor caracterización del mismo (empleando datos topográficos disponibles y referencias de estudios previos). En la Figura 93 se muestra el MDT mejorado que se va a utilizar como base para la definición de la malla de cálculo.

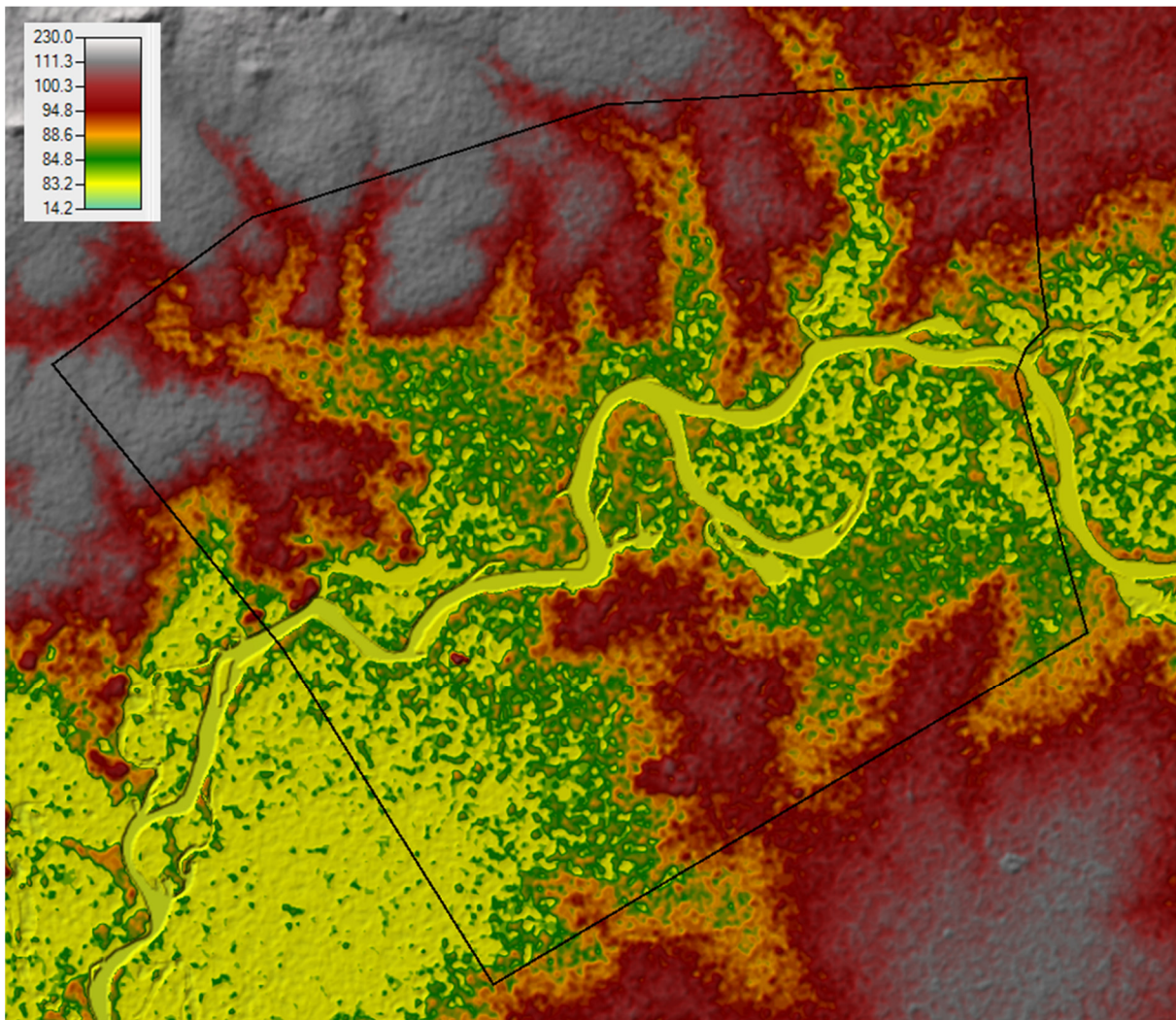


Figura 93. MDT mejorado de 12.5x12.5 m de resolución.

A partir del MDT, se ha generado con el modelo HEC-RAS una malla numérica no estructurada para realizar el cálculo bidimensional del área de estudio. Esta malla abarca una superficie de unos 90 km², y está conformada por más de medio millón de elementos. Se ha realizado un mallado sensible a la altimetría del MDT que caracteriza de forma precisa el del río (para lo cual se han añadido líneas de rotura) y las zonas inundables alrededor del mismo (ver Figuras 94 y 95).

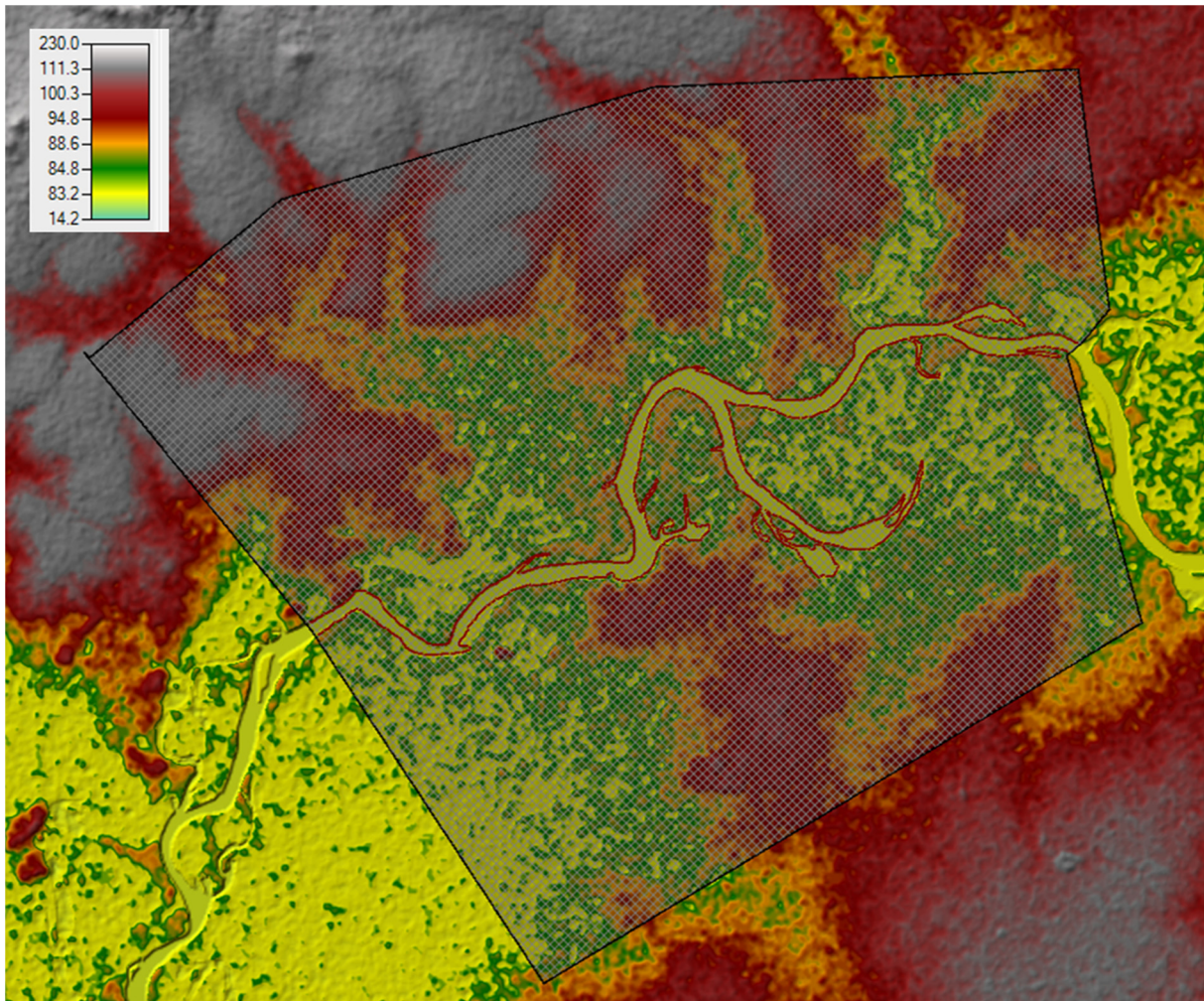


Figura 94. Malla de cálculo.

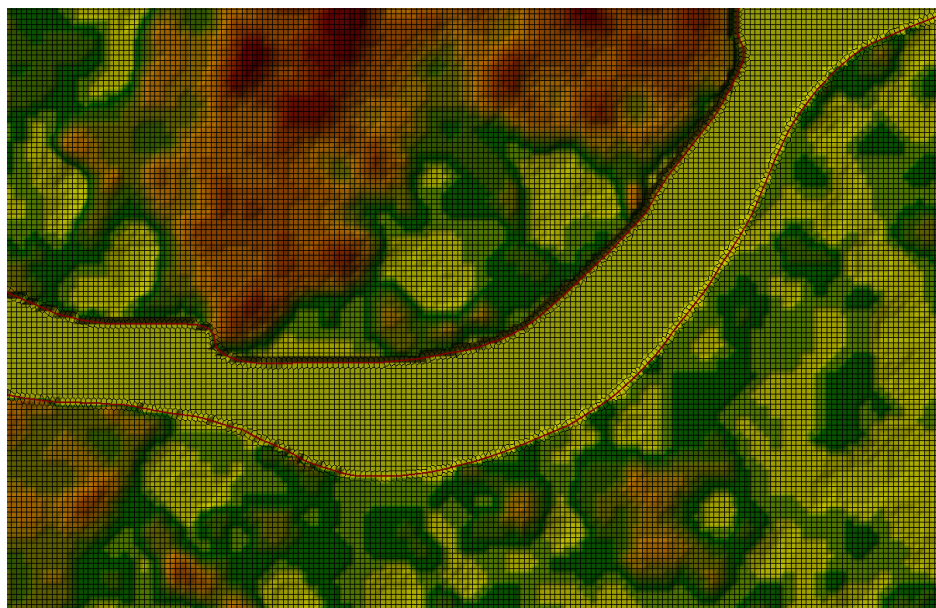


Figura 95. Detalle de la malla de cálculo.

Caudales de entrada a la malla de cálculo

En este apartado se presenta la obtención de los caudales correspondientes a los eventos de inundación para los diferentes periodos de retorno considerados ($T = 10, 20$ y 50 años). Para ello se han ajustado los datos de caudales en Villaflorida, obtenidos combinando los datos instrumentales con los obtenidos mediante el modelado hidrológico para obtener la serie más larga posible (ver Figura 96), a una función de extremos escogiendo la generalizada de Pareto y, a partir de esta, se ha obtenido su régimen extremal. El grado de ajuste se muestra en la Figura 97 y el régimen extremal con los caudales para diferentes periodos de retorno en la Figura 98 presentándose en la Tabla 41 los valores para los periodos de retorno seleccionados.

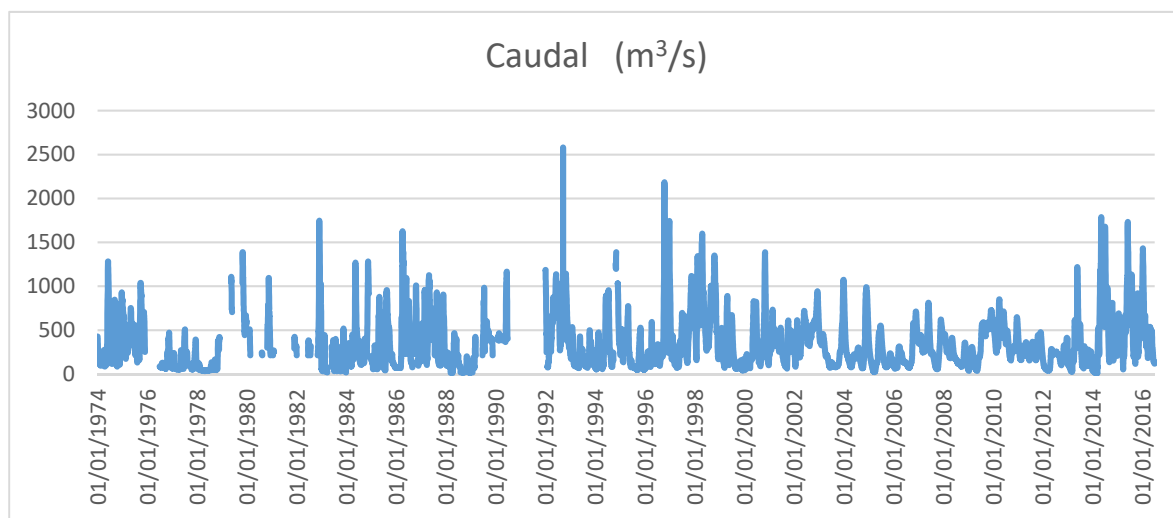


Figura 96. Serie temporal de caudales en Villa Florida (1974-2016).

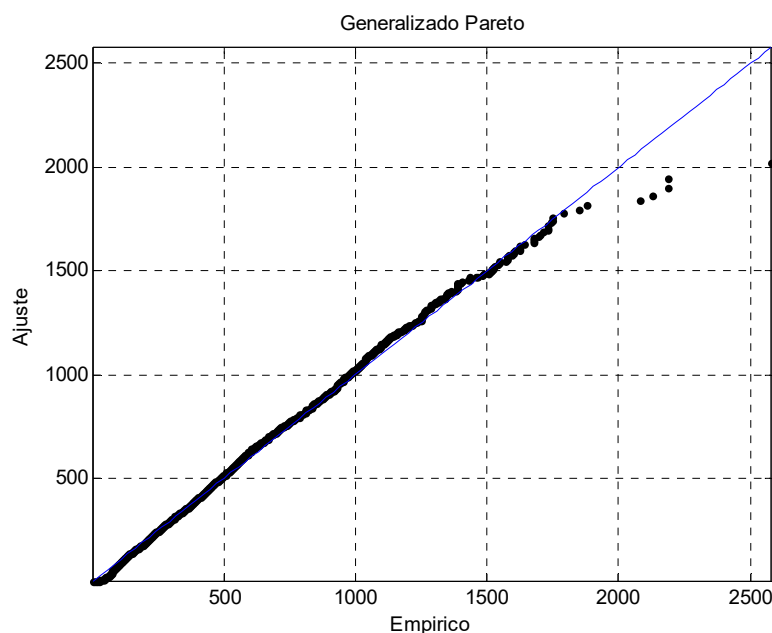


Figura 97. Ajuste de los datos de caudales a una función generalizada de Pareto.

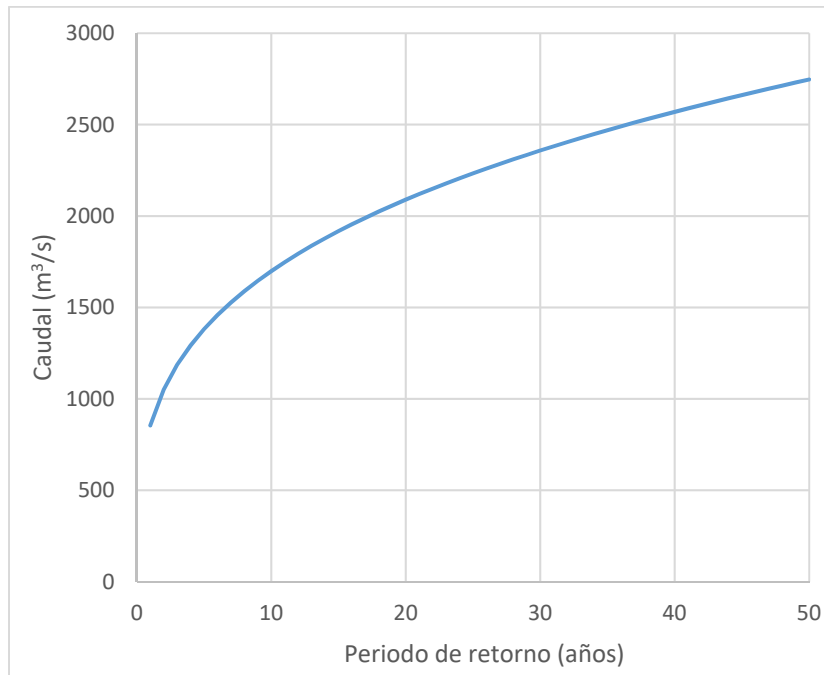


Figura 98. Régimen extremal de caudales.

T (años)	Caudal (m³/s)
1	855
5	1380
10	1700
20	2090
50	2750

Tabla 41. Caudales para los eventos de inundación de los periodos de retorno seleccionados.

Coefficiente de rugosidad de Manning

Para la caracterización de los diferentes elementos de la malla desde el punto de vista hidráulico, es necesario determinar un valor del coeficiente de rugosidad de Manning para cada tipo de uso del suelo existente en el área de estudio. Para ello se ha utilizado la información en formato digital de los usos del suelo en la cuenca del río Tebicuary proporcionada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (ver Figura 99). En la Tabla 42 se incluyen los valores del coeficiente de Manning para las tipologías de terreno en el área de estudio.

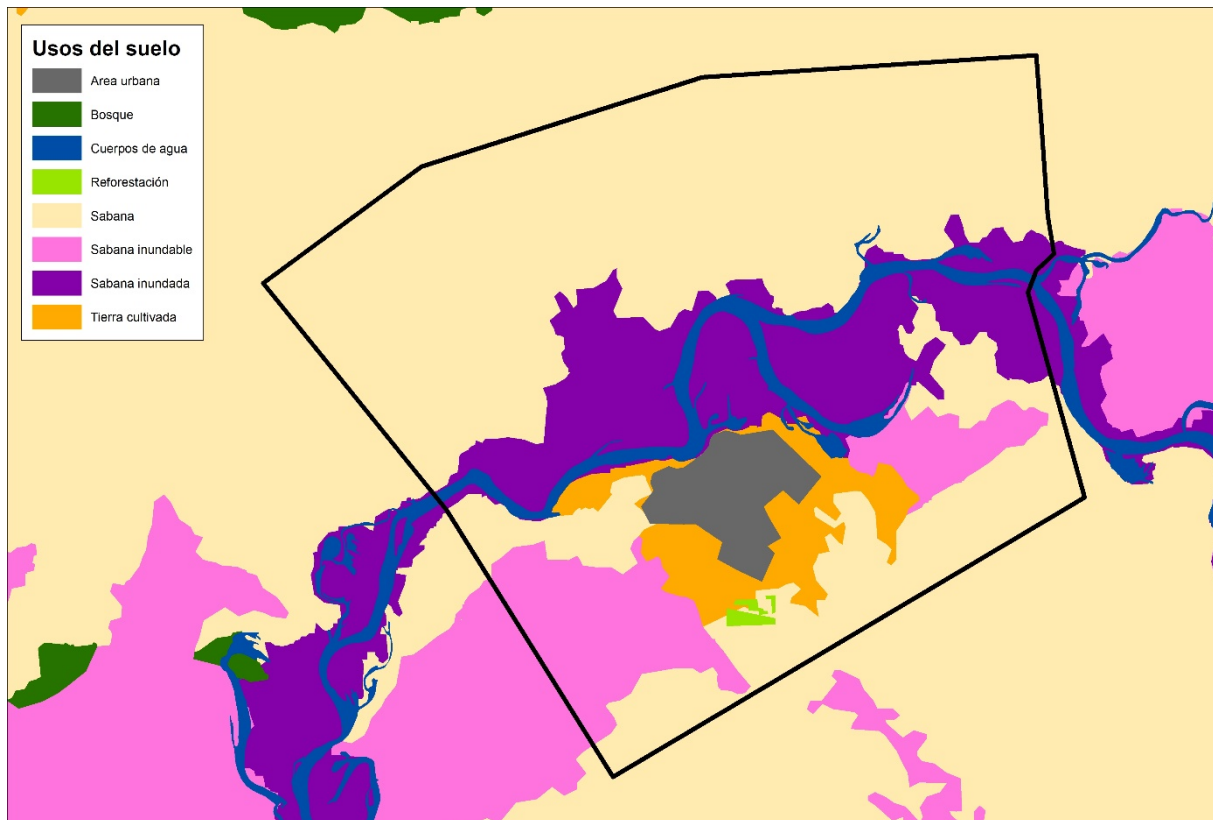


Figura 99. Usos del suelo y tipos de vegetación en el área de estudio donde se enmarca la zona 2D.

Tipo	Rugosidad (n de Manning)
Área urbana	0.075
Bosque	0.065
Cuerpos de agua	0.035
Reforestación	0.065
Sabana	0.050
Sabana inundable	0.045
Sabana inundada	0.040
Tierra Cultivada	0.040

Tabla 42. Coeficientes de escorrentía y de rugosidad de Manning para diferentes usos del suelo y vegetación.

Condiciones de contorno

Como condición de contorno para el cálculo hidráulico en los límites de la malla de cálculo se ha adoptado el calado normal correspondiente al caudal circulante en esos elementos de la malla para cada uno de los periodos de retorno analizados.

6.1.2. Resultados

Tras las diferentes ejecuciones del modelo con las variables y condicionantes descritos anteriormente, a continuación se incluye un breve resumen de los resultados obtenidos, con objeto de tener una visión fácilmente interpretable del comportamiento hidráulico del sistema analizado.

Las variables seleccionadas han sido el calado y la velocidad del flujo en cada uno de los elementos de la malla de cálculo presentándose los mapas obtenidos para los diferentes periodos de retorno analizados. Cabe destacar que además de los resultados aquí expuestos a continuación, existe la posibilidad de exportar los valores obtenidos para las variables calculadas en tablas, de forma gráfica, para elementos individuales, en perfiles, por superficies, etc.

Por último y a modo de calibración de los resultados obtenidos se han utilizado los mapas del Centro Común de Investigación, más conocido por JRC (*Joint Research Center*) de la Comisión Europea obtenidos a través del análisis de imágenes satelitales (*Global Surface Water Dataset*).

Calados

En las siguientes figuras se muestran los mapas de calados para los periodos de retorno analizados ($T=10, 20$ y 50 años). Se puede apreciar que, incluso para los menores periodos de retorno analizados, ya se produce la inundación de áreas extensas. Esto es debido sobre todo a la propia configuración planimétrica de la zona, con escasas pendientes y dificultad para dar salida a los flujos de escorrentía, de forma que el agua queda embalsada en los puntos bajos. No obstante cabe señalar que fuera del cauce del río, los calados se encuentran de forma general por debajo de 1 metro, con velocidades del flujo (como se muestra a continuación) inferiores a 0.5 m/s.

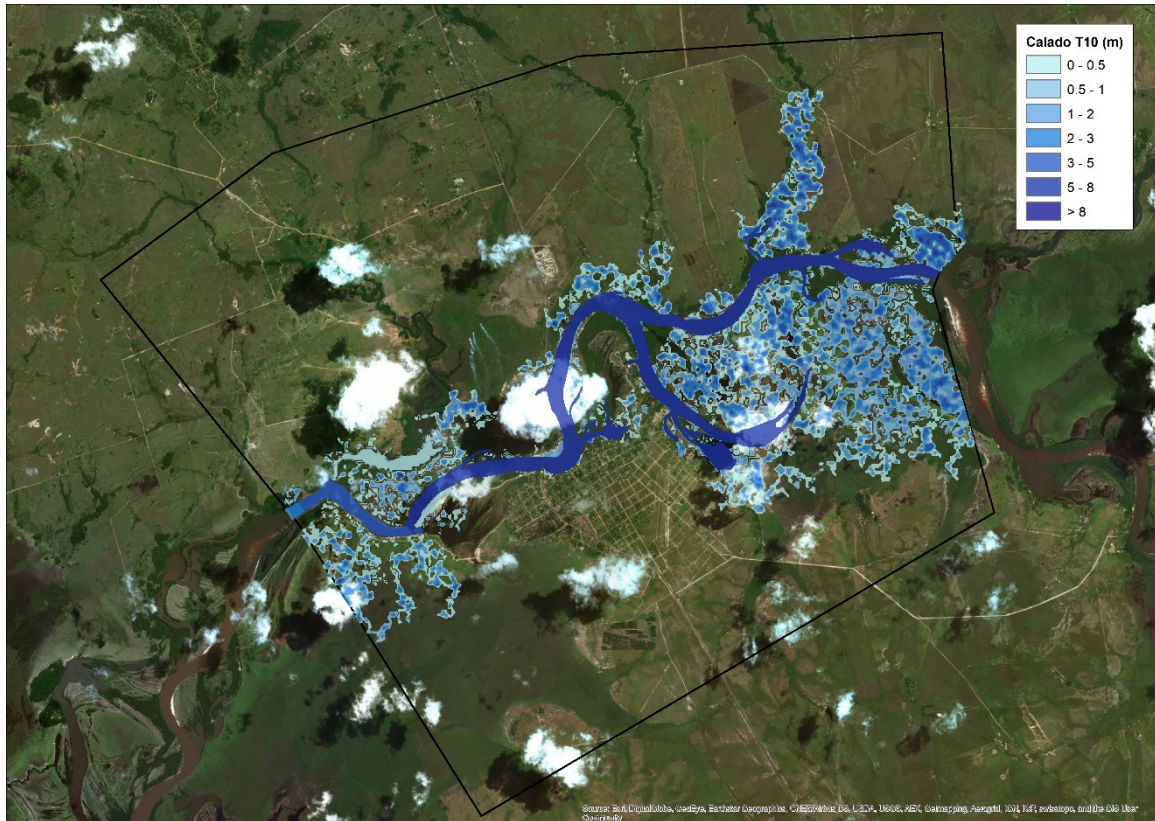


Figura 100. Mapa de calados máximos para T=10 años.

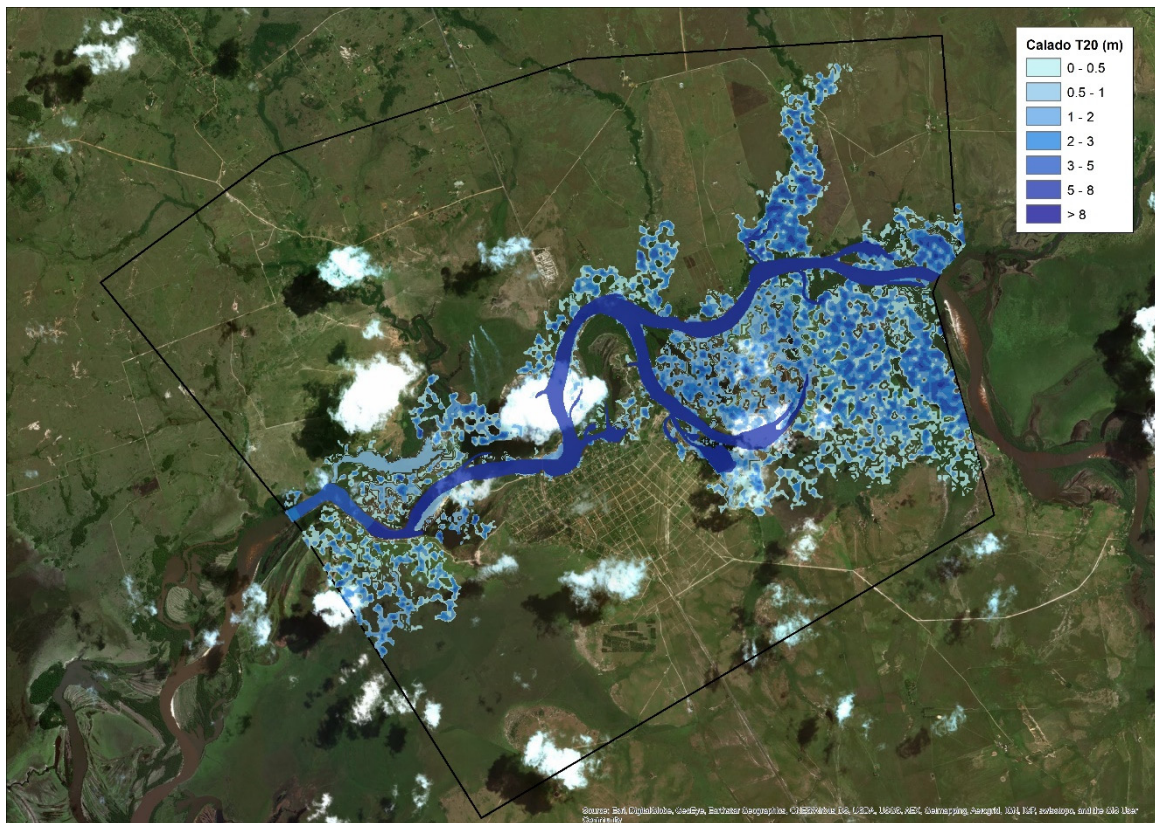


Figura 101. Mapa de calados máximos para T=20 años.

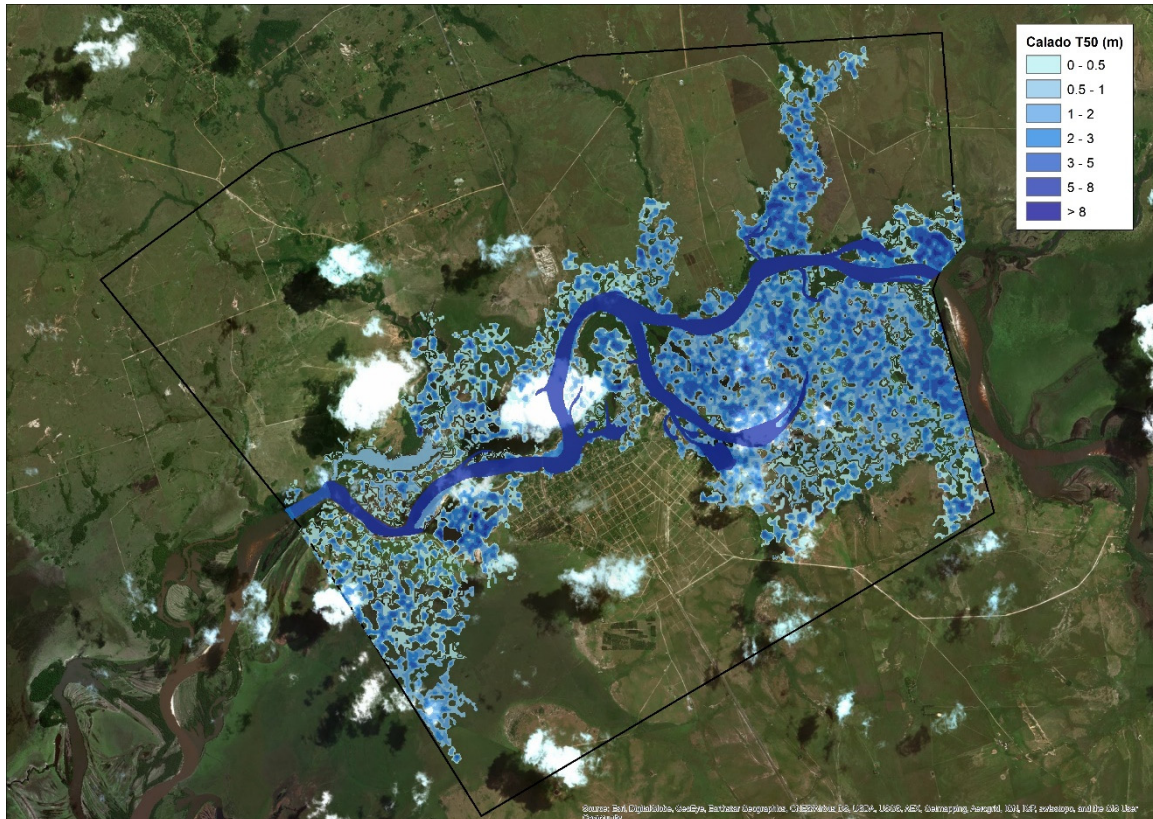


Figura 102. Mapa de calados máximos para T=50 años.

Velocidades

En las siguientes figuras se muestran los mapas de velocidades del flujo para los periodos de retorno analizados (T=10, 20 y 50 años). En las figuras se observa, tal y como se comenta anteriormente, que las velocidades del flujo se encuentran por encima de 0.5 m/s únicamente en el cauce del río.

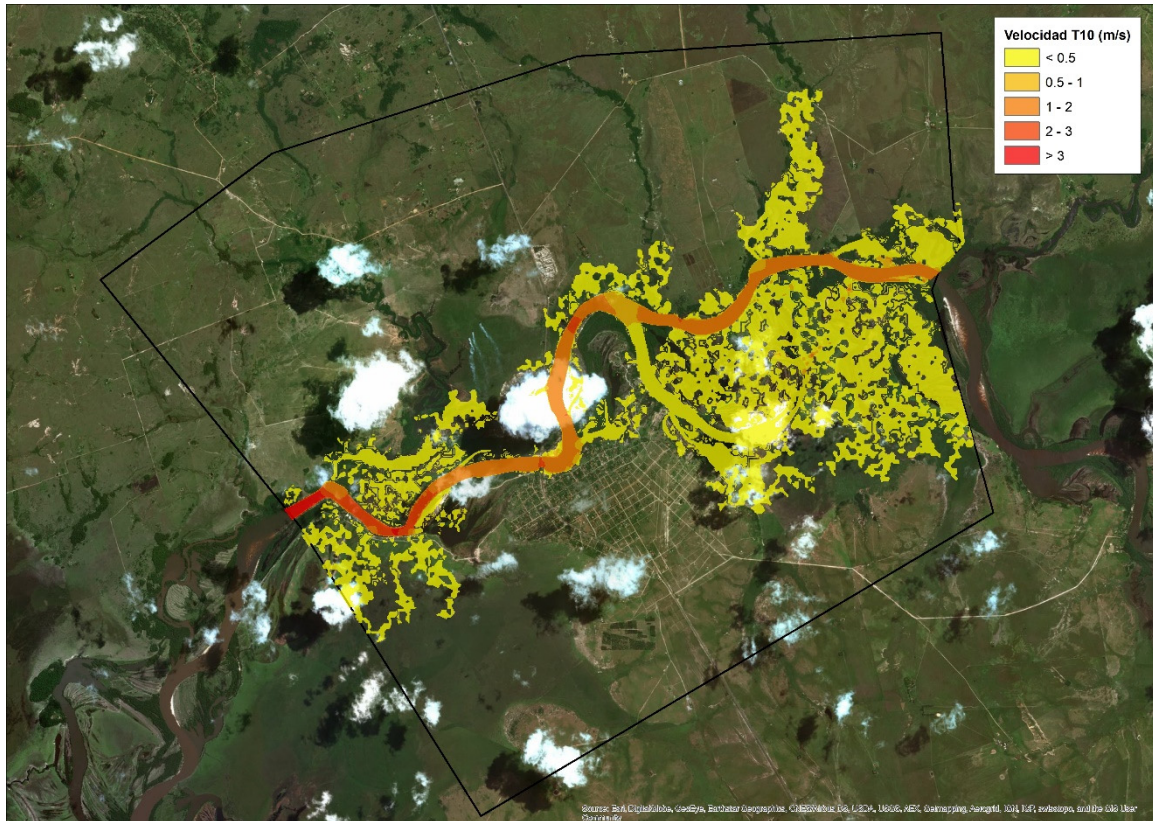


Figura 103. Mapa de velocidades máximas T=10 años.

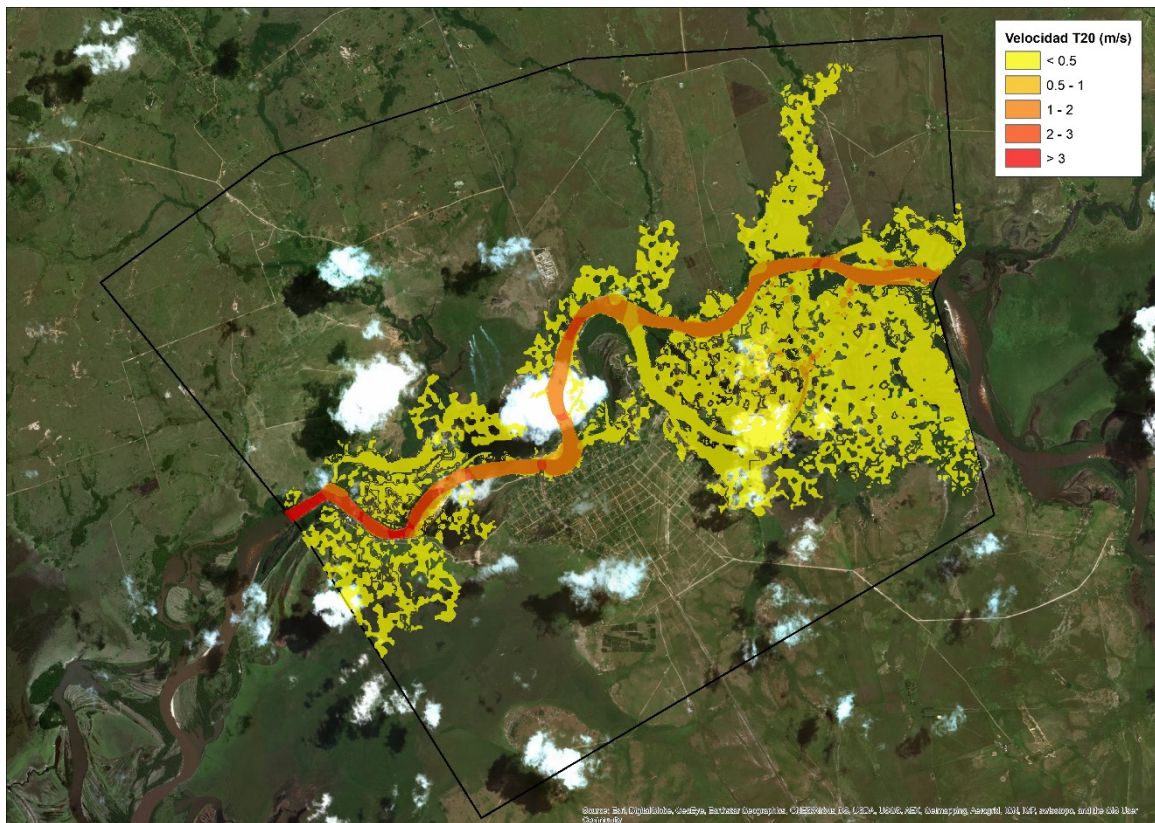


Figura 104. Mapa de velocidades máximas T=20 años.

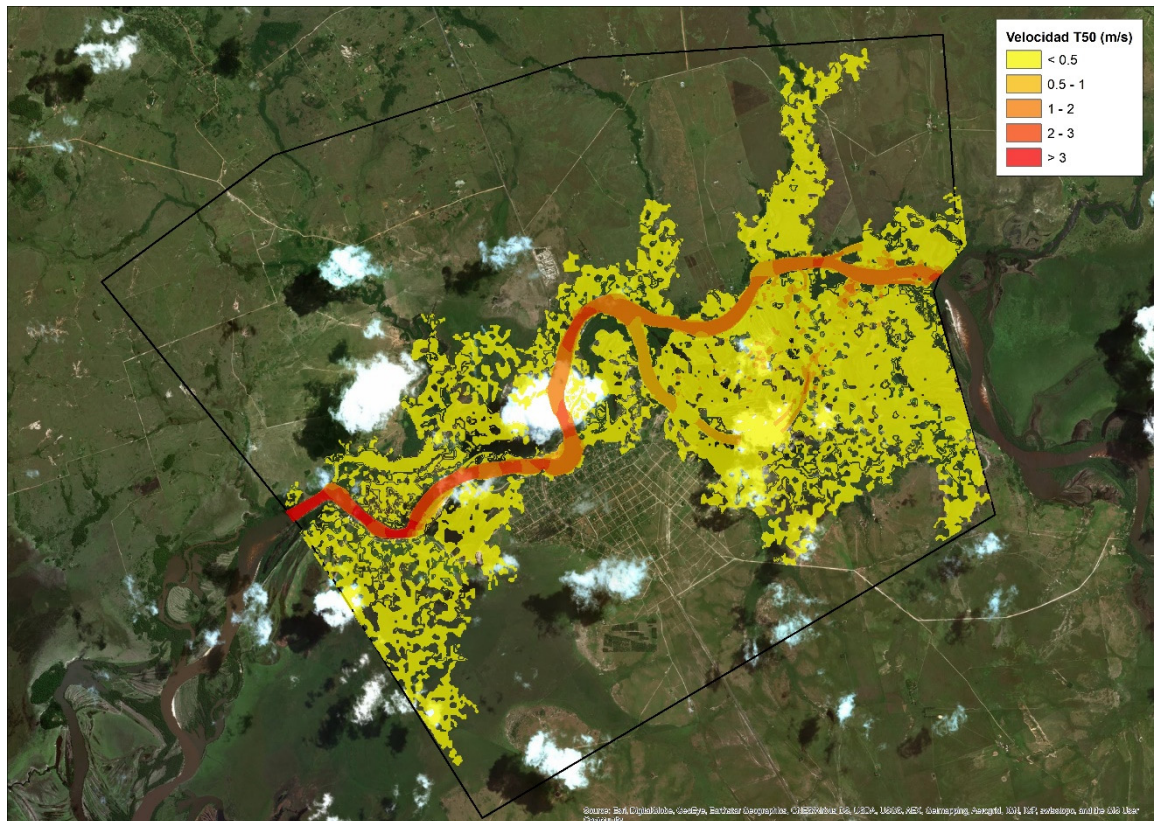


Figura 105. Mapa de velocidades máximas T=50 años.

Comparativa con datos de imágenes satelitales

Tal y como se indica anteriormente, se han comparado los resultados obtenidos con los mapas realizados por el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea mediante el análisis de imágenes satelitales (*Global Surface Water Dataset*).

Concretamente se ha comparado la extensión de la mancha de inundación para el periodo (1984-2015) con la extensión del evento de 50 años de periodo de retorno (Figura 106) y el porcentaje de tiempo con agua para el mismo periodo (Figura 107) comprobándose que tanto las extensiones de las manchas de inundación como las permanencia de agua son muy similares.

7. CONCLUSIONES Y DIRECTRICES

A continuación se incluye un resumen de las conclusiones de los estudios expuestos en los capítulos anteriores, así como las recomendaciones más reseñables orientadas a la elaboración de un Plan de Gestión de la cuenca del río Tebicuary.

En lo referido a la **información disponible**, cabe resumir brevemente algunos aspectos relevantes:

- Se dispone de información de la red hidrográfica así como de información topográfica suficiente para la correcta caracterización de la cuenca (definición de subcuencas y obtención de sus parámetros básicos).
- En cuanto a los datos instrumentales de precipitaciones, poseen precisión y fiabilidad, así como buena resolución temporal (diaria); sin embargo, existe una falta de cobertura espacial dentro de la cuenca. Esta carencia de datos instrumentales, puede complementarse con bases de datos climáticos globales (como TRMM), pero pone de manifiesto la necesidad de mejorar la instrumentalización de la cuenca.
- Los datos hidrológicos son escasos: existen únicamente tres estaciones de aforo en la cuenca del río Tebicuary (Villa Florida, Iturbe y Yuty), y sólo una de ellas, la estación de Villa Florida, dispone de una serie histórica de registros de más de 5 años. Debe ser un objetivo prioritario dentro de un PGC la mejora de estos sistemas de registro (con el objetivo último en un futuro de obtener datos en tiempo real), así como su implementación en otras zonas de la cuenca (los puntos de resultados de los modelos hidrológicos y de gestión que se mencionan en los capítulos correspondientes podrían ser localizaciones adecuadas)
- Para la redacción de estos trabajos se han empleado mapas en formato digital de los usos y tipos del suelo de la cuenca del río Tebicuary proporcionados por MADES así como mapas de las áreas de cultivo de arroz (principal demanda del recurso hídrico). Hay que señalar que, como se menciona en los apartados correspondientes, esta información no está actualizada, y presenta una serie de lagunas e inconsistencias que hacen necesaria la revisión/renovación de la misma.
- En lo referente a las informaciones sobre la fauna piscícola existente dentro de la cuenca, existen registros sobre sus características y explotación, pero a futuro es recomendable el desarrollo de campañas de trabajo que permitan definir mejor los condicionantes específicos (como conteos y curvas de preferencia de especies autóctonas).
- Finalmente, entre otros tipos de información no vinculada directamente con las tareas del proyecto, pero igualmente relevante para la redacción de un PGC, cabe destacar los aspectos relacionados con la calidad ambiental. El Plan debe priorizar un adecuado sistema de registro y control de puntos de vertidos y de otras actividades que puedan afectar a las masas de agua.

Con respecto a los **estudios hidrológicos y de cambio climático** en la cuenca del Tebicuary cabe destacar lo siguiente:

- Se han obtenido series de precipitación promediadas para cada subcuenca con una calibración mediante bases de datos globales con resultados adecuados a las necesidades de los modelos a implementar.
- En el análisis del cambio climático se han considerado dos escenarios globales de cambio climático RCP4.5 y RCP8.5. En los resultados obtenidos se observa que la precipitación experimentará un aumento moderado en la cuenca, sobre todo en la zona sureste y especialmente para la RCP 8.5. Sin embargo, la nueva precipitación se producirá en un número menor de días al año, lo que hace pensar en tormentas más cortas o menos frecuentes, y de mayor intensidad. En cuanto a la ETP, se detecta también un aumento derivado de unas temperaturas más altas, que es más significativo en el RCP 8.5.
- Para la obtención de las series de caudales en cada una de las subcuencas, tanto para la situación actual como para los escenarios futuros considerados, se ha construido un modelo ad hoc de la cuenca del río Tebicuary. El modelo propuesto, que se ha denominado LEM-DW (Logistic Equilibrium Model with Diffusive Wave), es un modelo agregado conceptual que se basa en discretizar la cuenca completa en un conjunto de elementos o unidades hidrológicas (subcuencas) dispuestas en forma de árbol, según la topología de la red.

Con base en este modelo hidrológico específico se han aplicado diferentes metodologías para proponer un **régimen de caudales ambientales** en la cuenca del río Tebicuary. En función de los datos disponibles se han aplicado métodos hidrológicos e hidrobiológicos:

- En cuanto a los métodos hidrológicos, se han aplicado cuatro algoritmos de caudales ambientales y a partir de los resultados de cada uno de ellos se ha propuesto una combinación lineal de dichos valores para obtener un caudal ambiental ponderado por tramos (Qamb). Este caudal ambiental se ha obtenido para cada una de las 9 subcuencas en que se ha dividido la cuenca del río Tebicuary para los tres escenarios de cálculo: situación actual y dos escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5.
- Los resultados de la aplicación de métodos hidrológicos producen resultados dentro del mismo rango, en torno a un 25-30% del régimen natural, aunque los basados en medias móviles tienden a dar cifras algo más bajas (10-20%).
- En cuanto a los métodos biológicos, el régimen de caudales ecológicos se ha obtenido mediante la aplicación de métodos de simulación de hábitat utilizando para las modelizaciones hidráulicas el software RHYHABSIM (Jowett, 1989) en un tramo aguas abajo del puente de Villa Florida.

En el caso de los métodos biológicos, los resultados obtenidos indican un requerimiento de caudales es muy superior para las especies nativas del Tebicuary (Dientudo y sardina de dos puntos) frente al de las especies comerciales (Bagre amarillo y tararira) y por encima del doble de los obtenidos por métodos hidrológicos. Parece por tanto que la aplicación de estos métodos sin disponer de curvas de preferencia ajustadas a las características de cada especie en el río Tebicuary, no produce resultados adecuados y coherentes.

Partiendo de la información y los resultados presentados en este estudio, las **principales líneas de actuación propuestas para la cuenca del río Tebicuary** se pueden agrupar en tres grandes apartados:

1. Desarrollo e implementación de medidas para la armonización de los usos del agua en la cuenca.

Entre las diversas medidas planteadas sobre este aspecto, enunciadas en el apartado 5 del documento "Propuesta marco para la GIRH y adaptación al cambio climático", se destaca la activación de un foro o comunidad de usuarios de la cuenca, dado que la cuenca del río Tebicuary presenta claros conflictos entre diferentes usos del agua e incluso entre el mismo tipo de usuarios en diferentes sectores de la cuenca.

Estos conflictos probablemente irán en aumento debido a los efectos del cambio climático y no es de esperar que se resuelvan satisfactoriamente de forma natural sin intervención del Gobierno.

Este foro tendría como finalidad debatir los problemas y las posibles soluciones asociados al uso del agua. Además, serviría para negociar entre los agentes implicados los derechos de uso del agua en la cuenca, teniendo en cuenta las restricciones ambientales y los antagonismos entre diferentes usos. Para que sea útil, en este foro debe participar el Gobierno, que además debe proporcionar una información técnica de partida, de forma que el debate se desarrolle sobre una base compartida de hechos y datos científicos no cuestionables. Esto último guarda estrecha relación con el segundo grupo de medidas propuestas (medición y control).

Una vez alcanzados acuerdos por escrito, el Gobierno deberá proporcionar los instrumentos para poder controlar y garantizar el cumplimiento de dichos acuerdos. Entre ellos se encuentra la red de monitoreo y control de la cuenca gestionada por el Gobierno (ver punto siguiente), que debería ir complementada por mediciones obligatorias de ciertas variables por parte de los usuarios.

2. Refuerzo de la red de medición y control de la cuenca.

En la actualidad, la cuenca del Tebicuary presenta carencias en cuanto a la red de monitoreo de parámetros existente, que impide llevar a cabo una gestión objetiva y basada en datos. Se propone, como propuesta de mínimos, incorporar los siguientes dispositivos:

- Instalar 2-3 nuevos pluviómetros en la zona alta de la cuenca (cabeceras del Tebicuary Mi, Pirapó, y Tebicuary).
- Instalar o consolidar las estaciones de aforo de Yuty e Iturbe. Se podría utilizar una cámara fija en lugar de un sensor de nivel para estimar calados y velocidades.
- Instalar al menos tres puntos de control en continuo de la calidad del agua.
- Plantear un programa que defina las prioridades y planifique la obtención de datos biológicos/ecosistémicos.



Figura 108. Propuesta de instalación de nuevos dispositivos de medición y control.

3. Medidas de gobernanza y gestión

La mejora de la situación hídrica en la cuenca del Tebicuary, como cuenca emblemática y representativa del país, pasa por desarrollar cuanto se indica en relación a la gestión integrada de los recursos hídricos en Paraguay, y en particular:

- Reestructurar y reforzar la administración hidráulica a escala nacional.
- Revisar y/o desarrollar la ley de aguas para que sirva como instrumento real de ordenación y gestión del recurso hídrico.
- Desarrollar el registro de aguas en la cuenca del Tebicuary, así como los sistemas y procedimientos de vigilancia y control asociados.
- Desarrollar y revisar ciertos estudios básicos en relación con la cuenca.

APÉNDICE 1

CAMPAÑAS DE MEDICIÓN DE NIVELES Y CAUDALES EN LA CUENCA DEL RÍO TEBICUARY - ESTACIÓN DE ITURBE (RÍO TEBICUARY-MÍ)

**INFORME FINAL
CAMPAÑAS DE MEDICIÓN DE
NIVELES Y CAUDALES EN LA CUENCA DEL RÍO
TEBICUARY**

ESTACIÓN DE ITURBE (RÍO TEBICUARY-MÍ)

Departamento de Guairá

Objeto del Trabajo

Colectar datos de caudales y niveles en la estación de la ciudad de Iturbe ubicada sobre el río Tebicuary-mí, en campañas mensuales durante un periodo de tres meses (Julio, Agosto y Setiembre).

EQUIPO DE TRABAJO

Responsable: Dr. Ing. Andrés Wehrle

Ing. Francisco Bock

Octubre de 2018

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	4
2	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN REFERENTE A LA ESTACIÓN	5
3	INSTALACIÓN DE ESTACIÓN LIMNIMÉTRICA Y LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO	7
3.1	INSTALACIÓN DEL LIMNÍMETRO ELECTRÓNICO (WATER LEVEL LOGGER)	7
3.2	REFERENCIACIÓN DEL CERO DE LA REGLA LIMNIMÉTRICA A UN PUNTO FIJO DE REFERENCIA.....	7
3.3	LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO	8
3.4	DATOS DE NIVEL OBTENIDOS DURANTE LAS CAMPAÑAS DE MEDICIÓN	10
4	RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS DE MEDICIÓN DE CAUDALES PRIMERA CAMPAÑA (06-07-2018)	10
4.1	MEDICIÓN DE CAUDAL EN LA SECCIÓN DEL PUENTE, PRIMERA CAMPAÑA (06-07-2018)	10
4.2	MEDICIÓN DE CAUDAL EN LA SECCIÓN DEL PUENTE, SEGUNDA CAMPAÑA (05 DE SETIEMBRE DE 2018).....	11
4.2.1	Medición de caudal en la sección del puente (margen izquierda hasta la jaula)	12
4.2.2	Medición de caudal en la sección del puente (jaula hasta la margen derecha)	13
4.2.3	Resultado general de la medición del 05 de setiembre de 2018.....	14
4.3	MEDICIÓN DE CAUDAL EN LA SECCIÓN DEL PUENTE, TERCERA CAMPAÑA (30 DE SETIEMBRE DE 2018).....	15
4.3.1	Medición de caudal en la sección del puente (margen izquierda hasta la jaula)	15
4.3.2	Medición de caudal en la sección del puente (jaula hasta la margen derecha)	16
4.3.3	Resultado general de la medición del 30 de setiembre de 2018.....	17
5	DETERMINACIÓN DE CURVA ALTURA CAUDAL RESULTADO GENERAL DE LAS MEDICIONES 17	
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	19
7	ANEXOS	20
7.1	ANEXO I: CARACTERÍSTICAS DE LO EQUIPOS	20
7.2	ANEXO II: INFORMACIÓN FOTOGRÁFICA.....	21

Índice de Tablas

Tabla 1: Campañas realizadas durante el servicio.....	4
Tabla 2: Puntos levantados en el terreno.....	9
Tabla 3: Resumen de la medición; Campaña 1; 06-07-2018.....	11
Tabla 4: Calculo de caudal entre la cara y el eje de la jaula, para cada transecta (05-09-18)...	12
Tabla 5: Resumen de la medición de caudal entre la margen izquierda y la jaula de la estación de monitoreo (05-09-18).....	13
Tabla 6: Resumen de la medición de caudal entre la jaula de la estación de monitoreo y la margen derecha (05-09-18).....	14
Tabla 7: Calculo de caudal entre la cara y el eje de la jaula, para cada transecta (30-09-18)...	15

<i>Tabla 8: Resumen de la medición de caudal entre la margen izquierda y la jaula de la estación de monitoreo (30-09-18).</i>	16
<i>Tabla 9: Resumen de la medición de caudal entre la jaula de la estación de monitoreo y la margen derecha (30-09-18).</i>	17
<i>Tabla 10: Resumen general de las mediciones realizadas</i>	17
<i>Tabla 11: Características del equipo ADCP utilizado</i>	20

Índice de Gráficos

<i>Gráfico 1: Secciones levantadas.</i>	9
<i>Gráfico 2: Niveles en la Estación Iturbe y precipitación en la zona.</i>	10
<i>Gráfico 2: Distribución de velocidades en el puente para 0,33 [m] de nivel (06-07-2018)</i>	11
<i>Gráfico 3: Distribución de velocidades en el puente MI_Jaula para 0,72[m] de nivel (05-09-18)</i>	12
<i>Gráfico 4: Distribución de velocidades en el puente Jaula-MD para 0,72 [m] de nivel (05-09-18)</i>	13
<i>Gráfico 5: Distribución de velocidades en el puente MI_Jaula para 3.67 [m] de nivel (30-09-18)</i>	15
<i>Gráfico 6: Distribución de velocidades en el puente Jaula-MD para 3.67 [m] de nivel (30-09-18)</i>	16
<i>Gráfico 8: Sección de medición de caudales</i>	18
<i>Gráfico 9: Curva Altura Caudal de la estación Iturbe</i>	18

Índice de Ilustraciones

<i>Ilustración 1: Captura de la imagen en la web de la DMH-DINAC de los datos de la estación....</i>	5
<i>Ilustración 2: Niveles de la Estación Iturbe del proyecto PMSAS-SEAM</i>	5
<i>Ilustración 3: Ubicación Estaciones meteorológicas y estación de Iturbe dentro de la cuenca el río Tebicuary-mi (rojo)</i>	6
<i>Ilustración 4: Niveles y precipitaciones en la cuenca del río Tebicuary-mi.....</i>	6
<i>Ilustración 5: Montaje del limnómetro electrónico en el tubo existente.</i>	7
<i>Ilustración 6: (A) Nivelación de cero de la regla; (B) Vista general del punto fijo RN; (C) Detalle del RN.....</i>	7
<i>Ilustración 7: Ubicación de las secciones levantadas.....</i>	8

“MEDICIÓN DE CAUDALES EN LA ESTACIÓN DE ITURBE (RÍO TEBICUARY-MÍ)”

INFORME FINAL

1 Introducción

En el presente servicio se han realizado tres campañas de medición de caudales y niveles durante un periodo de tres meses en la estación ubicada en la ciudad de Iturbe sobre el río Tebicuary-mí. Las campañas realizadas en el presente servicio fueron:

Tabla 1: Campañas realizadas durante el servicio.

Campaña	Mes Previsto año: 2018	Fecha de realización
1	Julio	06-07-18
2	Agosto	05-09-18
3	Setiembre	30-09-18

Las mediciones de caudal se realizaron con un equipo “Acoustic Doppler Current Profiler” (ADCP) por sus siglas en inglés o “perfilador de corriente Doppler acústico”, el cual es un instrumento que calcula las componentes de la velocidad del agua en diferentes capas de la columna de la misma, en las 3 direcciones así como también la topografía del fondo y el área de la sección. Para su determinación, se basa en el efecto Doppler, transmitiendo sonidos a una frecuencia fija y escuchando los ecos retornados por los reflectores en el agua. Estos reflectores son pequeñas partículas microscópicas de sedimentos o plancton presentes naturalmente en el agua, que se mueven a una velocidad igual que la misma.

Además se instaló una estación automática para registrar los niveles del río durante el periodo de medición la cual se referenció a la regla ya existente en el sitio. Para esto se colocó un sensor que registra los niveles del agua midiendo la presión absoluta y la temperatura sobre el sensor, donde además otro sensor ubicado fuera del agua mide la presión atmosférica con lo que se obtiene la presión diferencial sobre el sensor y con esta el nivel del agua sobre el mismo.

El presente informe final contiene la síntesis de todos los trabajos realizados en el transcurso del servicio además de la información recopilada referente a la estación hidrométrica y las precipitaciones ocurridas en la cuenca en el periodo de trabajo.

2 Recopilación de información referente a la estación

En el sitio de medición se encuentra una estación automática la cual se encontraba fuera de funcionamiento, según la web de la DMH-DINAC (<http://www.meteorologia.gov.py/nivel/>) el ultimo valor medido fue el día 8 de julio del 2017.

Localidad - Río Tebicuarymi	Fecha	Nivel del Día (Prom)	Variación Diaria (Prom)
Iturbe - Guairá	2017-06-08	2.47 m	↓ -4 cm

Ilustración 1: Captura de la imagen en la web de la DMH-DINAC de los datos de la estación

La estación fue instalada por el Proyecto Modernización del Sector Agua Potable y Saneamiento (PMSAS-SEAM) llevado adelante por la Secretaría del Ambiente (SEAM) y el Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones (MOPC) en colaboración con la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH-DINAC). La misma inicio las mediciones en el mes de mayo de 2016. Según se pudo observar en el momento de la instalación de esta estación y otras del citado proyecto los niveles en los ríos se encontraban alto por lo que las mismas se instalaron teniendo en cuenta estos niveles, por lo que la misma quedaba fuera del agua en periodos de caudales bajos. Además se instaló un metro de regla hidrométrica que correspondía al tramo de 1 a 2 metros, es decir no se instaló el primer tramo de regla que va de 0 a 1 m. En anexo se presentan los valores medidos desde el mes de abril del 2016 hasta julio del 2017, fecha en la que se cortó el cable de comunicación entre el sensor y el datalogger.

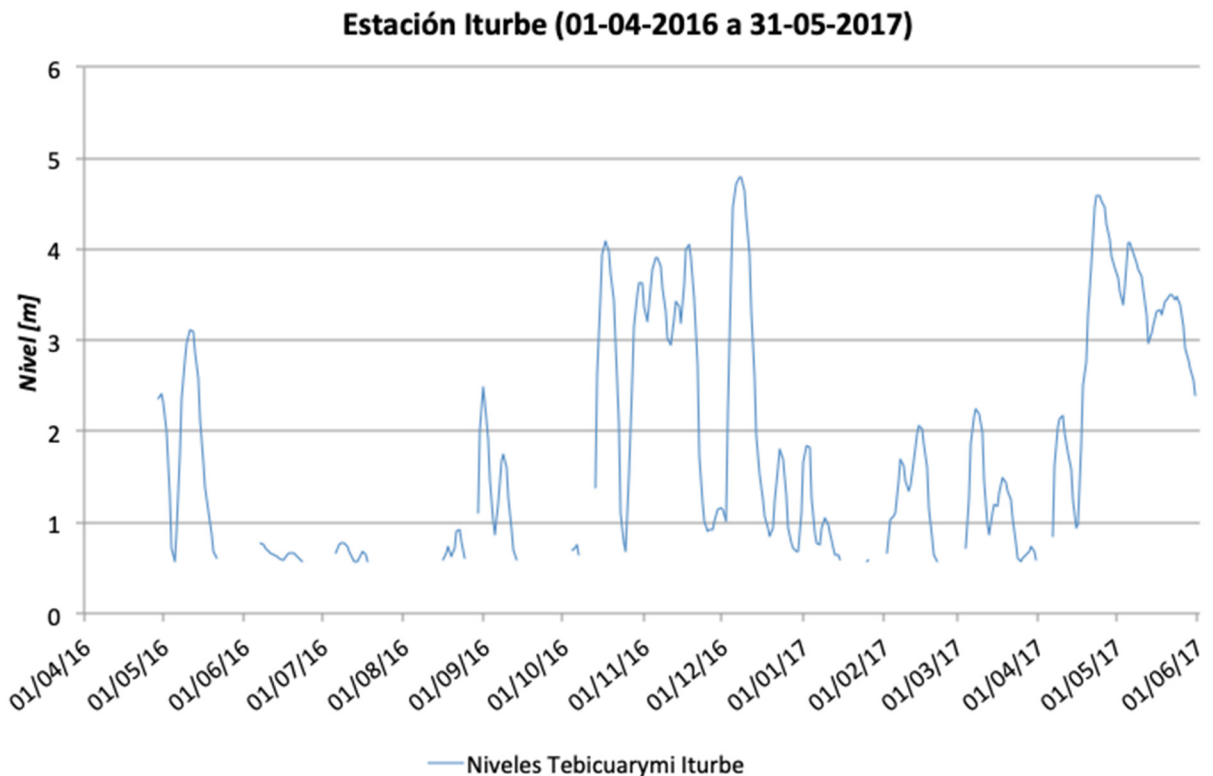


Ilustración 2: Niveles de la Estación Iturbe del proyecto PMSAS-SEAM

Por otro lado se recopiló la información referente a las precipitaciones para el mismo periodo en la cuenca de manera a comparar preliminarmente los datos de precipitación con las niveles del río. Se tienen datos de 5 estaciones meteorológicas cuya ubicación se muestra en el mapa. Para comparar los datos se realizó solamente la media matemática de las estaciones. Se observa que existe una buena correlación entre las precipitaciones y los niveles de río tanto en los datos diarios como en los datos mensuales. En anexo se presentan las planillas con la información recopilada.

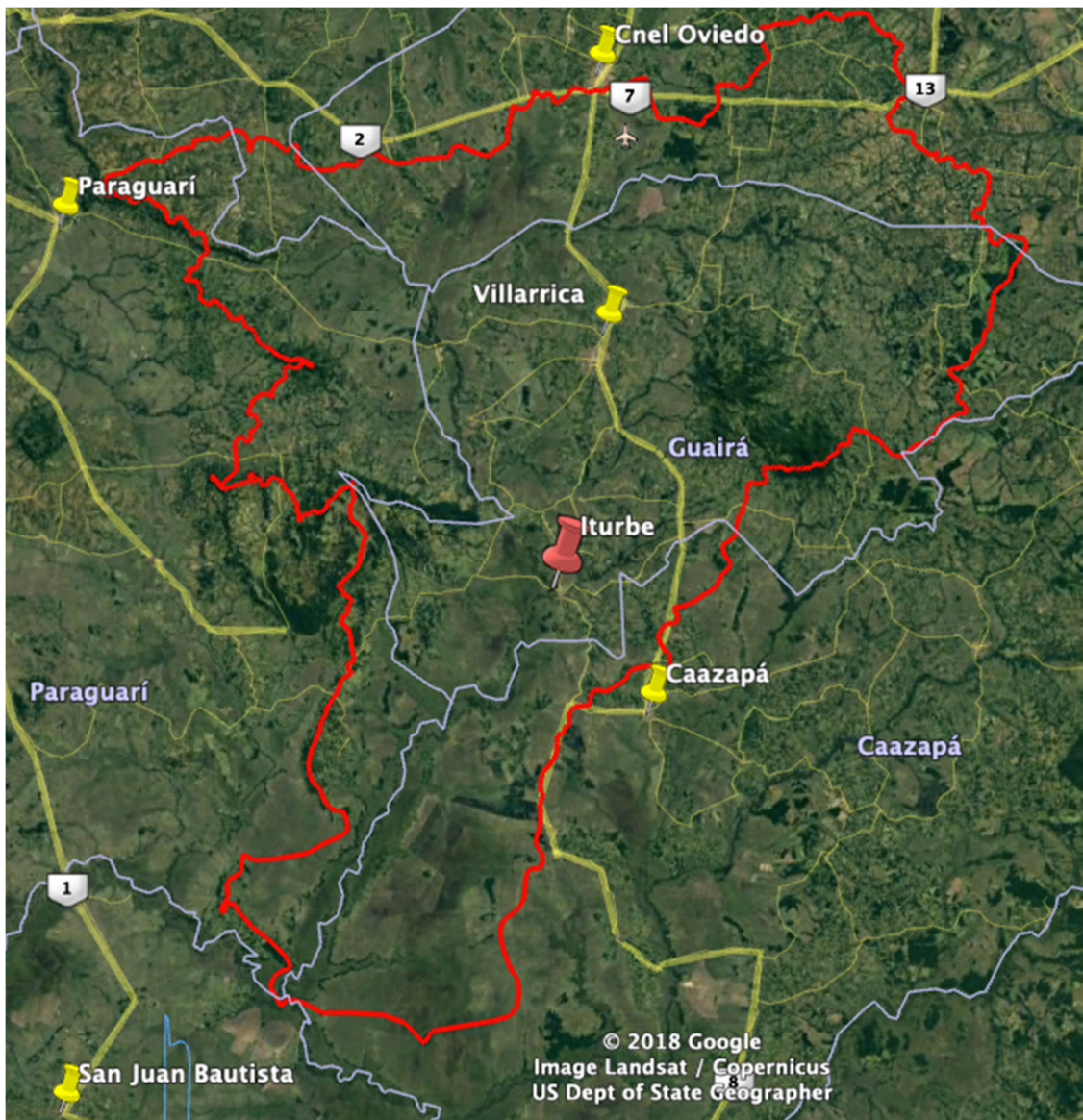


Ilustración 3: Ubicación Estaciones meteorológicas y estación de Iturbe dentro de la cuenca el río Tebicuary-mi (rojo)

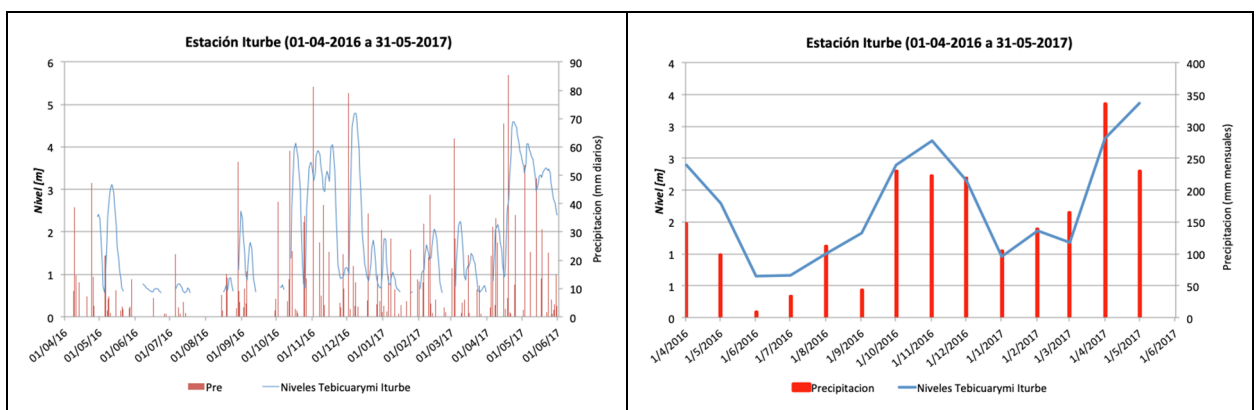


Ilustración 4: Niveles y precipitaciones en la cuenca del río Tebicuary-mi

3 Instalación de estación limnimétrica y levantamiento batimétrico

El día 06 de julio fue ejecutada la primera campaña de campo, en la cual se han realizado las siguientes actividades.

- Instalación del limnímetro electrónico (Water Level Logger).
- Referenciación del cero de la regla limnimétrica a un punto fijo de referencia.
- Levantamiento de una sección aguas arriba del puente.
- Levantamiento de una sección aguas abajo del puente.
- Levantamiento de una sección inmediatamente aguas abajo del puente.
- Medición de caudal en la sección del puente.

3.1 Instalación del limnímetro electrónico (Water Level Logger)

El limnímetro electrónico ha sido configurado para la colecta de datos a intervalos regulares de 10 minutos. El equipo ha sido montado dentro un tubo de acero existente adosado a un pilote de fundación de la pila del puente.



Ilustración 5: Montaje del limnímetro electrónico en el tubo existente.

El nivel del agua asociado al cero de la regla limnimétrica en el lugar fue de 0.330[m].

3.2 Referenciación del cero de la regla limnimétrica a un punto fijo de referencia

En la Ilustración 5 puede observarse que existe adosado a un pilote de la pila del puente un único tramo de regla limnimétrica de las informaciones recopiladas se tiene que dicha regla corresponde al tramo de 1 a 2 metros, es decir que el primer tramo de la regla no se encontraba. El cero del mencionado tramo no se encuentra amarrado a ningún punto fijo del terreno con el cual, en caso de hurto o vandalismo, pudiera ser restituida. En este sentido se ha realizado un trabajo de nivelación topográfica entre el cero de la regla y una referencia de nivel (RN) o punto fijo.



Ilustración 6: (A) Nivelación de cero de la regla; (B) Vista general del punto fijo RN; (C) Detalle del RN

La Ilustración 6 muestra el proceso de nivelación realizado con estación total. El RN escogido consiste en el apoyo de pila de la segunda fila de pilares de la margen izquierda en la pila de aguas abajo (Ilustración 6 (B) y (C)).

El RN se encuentra 3.882[m] por encima del cero de la regla limnimétrica.

3.3 Levantamiento batimétrico

Se han levantado tres secciones batimétricas, la sección 1: aguas arriba del puente, la sección 2: inmediatamente aguas abajo del puente, y la sección 3: aguas abajo del puente.

La metodología adoptada para el levantamiento fue la siguiente:

- Primero: se niveló el pelo de agua (P.A) referido al cero de la regla limnimétrica con estación total en el inicio de la sección (estaca).
- Segundo: las profundidades de la sección fueron levantadas con el ADCP.
- Tercero: se convirtieron las profundidades a nivel con:

$$[(\text{Nivel de P.A}) - (\text{Prof.}) = (\text{Nivel de Fondo})].$$



Ilustración 7: Ubicación de las secciones levantadas.

La sección 1 se encuentra a 376.26 [m] aguas arriba de la sección 2 ubicada inmediatamente aguas abajo del puente. El nivel del P.A en la sección 1 al momento del levantamiento fue de 0.373 [m]. El nivel del P.A en la sección 2 (puente) fue de 0.33 [m], mientras que en la sección 3 de aguas abajo fue de 0.285 [m], distante de la sección 2 454.85[m] conforme se indica en la Ilustración 7.

En Tabla 2 se listan las coordenadas de los puntos levantados en el terreno.

Tabla 2: Puntos levantados en el terreno.

PtID	East	North	Nivel	Codigo
E1	550291.150	7118540.270	4.309	ESTACION
E2	550195.700	7118624.860	8.478	ORIENTACION
DATALOGGER_RN	550285.593	7118568.755	8.478	DATALOGGER_RN
PTE1	550326.443	7118544.239	8.408	PUENTE
PTE2	550330.772	7118551.215	8.403	PUENTE
PTE3	550328.887	7118547.988	8.191	PUENTE
RNPILA	550300.956	7118560.009	3.882	RN_PILA
REGLA 0.0	550276.443	7118576.002	1.000	CERO_REGLA (1 m.)
ESTACA1	550368.121	7118918.106	0.373	AGUAS_ARRIBA
ESTACA3	550239.890	7118098.548	0.285	AGUAS_ABAJO
ESTACA2	550284.888	7118551.166	0.330	PUENTE

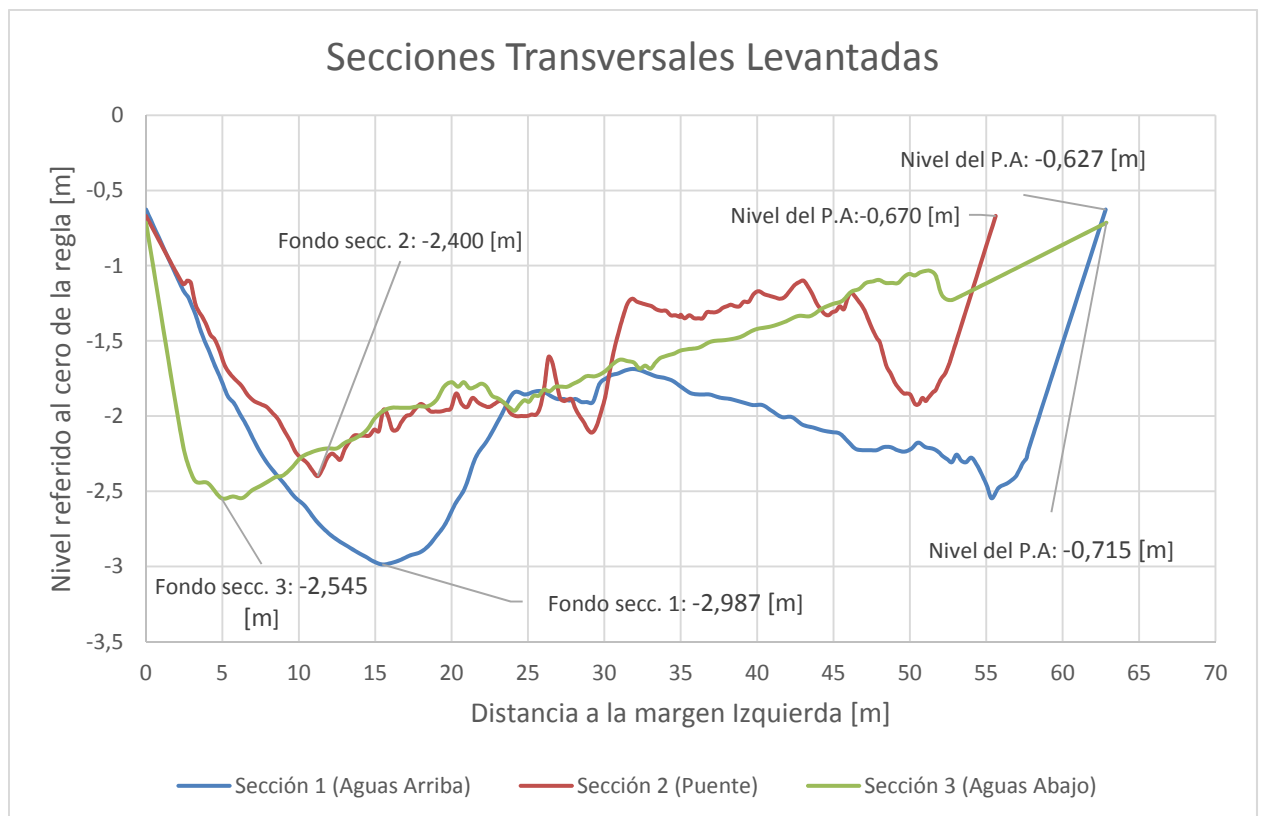


Gráfico 1: Secciones levantadas.

En el Gráfico 1 se presentan las secciones levantadas identificando los puntos de mayor profundidad en cada sección, en los tres casos referidos al cero de la regla así como los niveles del P.A en la margen de cada sección. Es importante notar que la sección 1 de aguas arriba presenta la mayor profundidad.

La pendiente del pelo de agua entre las secciones 1 y 3 al momento de la medición fue de 10.588 [cm/km] o de 0.0001058 [m/m].

El listado de puntos de las secciones levantadas se presenta en los anexos digitales.

3.4 Datos de nivel obtenidos durante las campañas de medición

El equipo registro los datos de nivel desde el 6 de julio hasta el 11 de setiembre, lastimosamente no se registraron datos desde el 11 de setiembre probablemente por algún golpe del equipo ya que luego de un aumento de nivel dejo de registrar los datos. En la segunda quincena de setiembre se dio un periodo de lluvias que mantuvo el nivel del río alto, por encima de los 2 metros en la regla, nivel donde se encontraba el acceso al caño en el cual estaba colocado el equipo, cuando se pudo acceder al mismo al final de las campañas se encontró con el problema del equipo. Se recopiló también datos de precipitación de 2 estaciones meteorológicas de la zona con lo cual se pudo realizar una comparación visual de las precipitaciones y los niveles (Grafico 2). En el anexo digital se presentan los datos medidos cada 1 hora y los promedios diarios.

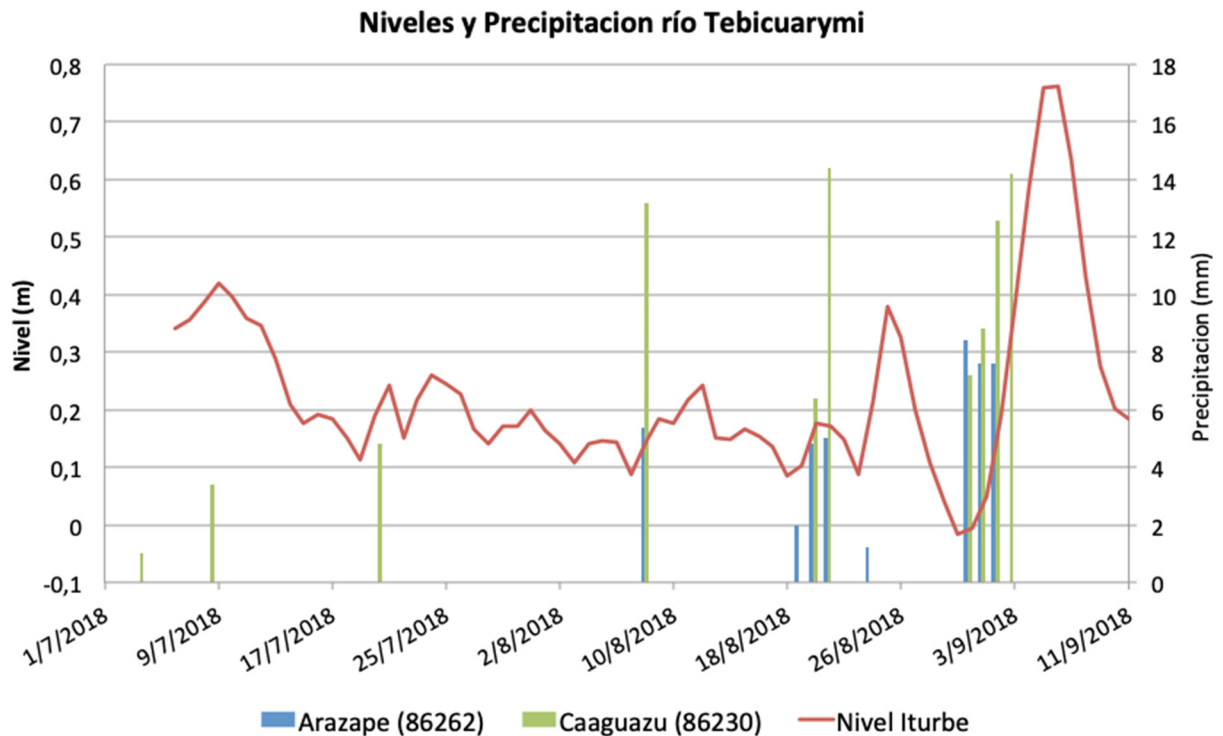


Gráfico 2: Niveles en la Estación Iturbe y precipitación en la zona.

Considerando las mediciones anteriores recopiladas se tiene en ella que el nivel mínimo medido fue de 0.56 m (nivel mínimo medible por el equipo debido al nivel donde fue colocado) y el nivel máximo medido en ese periodo fue de 4.79. En las campañas realizadas en el año 2018 si se pudieron medir los niveles bajos del río obteniéndose valores negativos a finales de agosto de -0.01 m. Considerando ambos periodos tenemos que los niveles del río en la estación Iturbe varían desde -0.01 m hasta 4.79 m.

4 Resultados de las campañas de medición de caudales

4.1 Medición de caudal en la sección del puente, primera campaña (06-07-2018)

El día 06 de julio fue ejecutada la primera campaña de medición de caudales. Se presenta el resumen de la medición del lugar de aforo. Se han realizado 4 transectas cuyos resultados han sido promediados.

En la presente campaña se han realizado 4 transectas dando como caudal promedio 25.95 [m³/s] para un nivel de -0.33 [m].

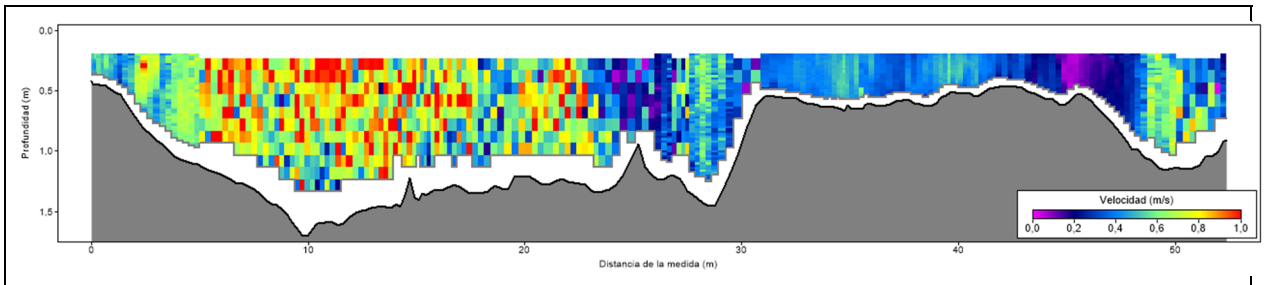


Gráfico 3: Distribución de velocidades en el puente para 0,33 [m] de nivel (06-07-2018)

La velocidad máxima registrada es de 1.433 [m/s] y la velocidad promedio es de 0.506 [m/s]. El Gráfico 3 se presenta el mapa de velocidades de la sección iniciando en la margen izquierda.

Tabla 3: Resumen de la medición; Campaña 1; 06-07-2018.

Resumen de Medida de Caudal																					
Información de la Estación		Información de la Medida																			
Estación	Iturbe	Equipo	S5-Bock																		
Estación N°	Tebicuary-mi	Plataforma	Catamaran 2 y PK 15-17																		
Localización	Lat.: 26° 3.058'S ; Long.: 56° 29.858'O	Medida N°	Campaña Julio 2018																		
Información de Sistema		Configuración del Sistema																			
Tipo de sistema	RS-S5	Profund Transductor (m)	0,13																		
Numero de serie	1873	Distancia de monitoreo (m)	0,00																		
Versión de Firmware	4.02	Salinidad (ppt)	0,0																		
Versión de Software	4.0	Declin. magnetica (grados)	-14,8																		
		Unidades																			
		Distancia	m																		
		Velocidad	m/s																		
		Area	m2																		
		Caudal	m3/s																		
		Temperatura	grados C																		
Ajustes del Cálculo de caudal																					
Ref. del Track	Bottom-Track	Metodo de cálculo del margen izquierdo	Margen pendiente																		
Ref. de profundidad	Haz Vertical	Metodo de cálculo del margen derecho	Margen pendiente																		
Sistema coordinadas	ENU	Ajuste al modelo superior	Ajuste potencia																		
		Ajsute al modelo de fondo	Ajuste potencia																		
		Lectura inicial de escala (m)	0,00																		
		Lectura final de escala (m)	0,00																		
			Resultados del Cálculo de Caudal																		
			Ancho (m)	53,472																	
			Area (m2)	51,317																	
			Velocidad promedio (m/s)	0,506																	
			Q Total (m3/s)	25,947																	
			Profundidad máxima medida	1,728																	
			Velocidad máxima medida	1,433																	
Resultados de la Medida																					
Numero de Transecto	Tiempo		Distancia				Velocidad promedio	Caudal						%							
	#	Tiempo	Duración	Temp.	Track	DMG		Anchura	Area	Barca	Agua	Izquierda	Derecha		Parte arriba	Medio	Fondo	Total	LCTotal	Medida	
1	M	0:09:14	0:04:01	20.3	51.16	48.72	52.719	51.049	0.212	0.510	0.16	0.29	5.67	16.51	3.39	26.025	--	63.4			
2	M	0:13:19	0:03:45	20.3	53.30	49.52	53.522	51.013	0.237	0.504	0.15	0.16	5.67	16.37	3.38	25.724	--	63.8			
3	M	0:17:11	0:03:18	20.3	51.66	49.74	53.742	52.007	0.261	0.503	0.13	0.19	5.65	16.75	3.46	26.179	--	64.0			
4	M	0:21:09	0:03:50	20.3	53.11	49.91	53.905	51.198	0.231	0.505	0.15	0.10	5.68	16.57	3.36	25.858	--	64.1			
					Promedio		53.472	51.317	0.235	0.506	0.15	0.18	5.67	16.55	3.40	25.947	0.000	63.8			
					Desviación Estandar		0.0	0.92	0.46	0.455	0.405	0.017	0.002	0.01	0.07	0.01	0.14	0.04	0.172	0.000	0.3
					COV		0.0	0.018	0.009	0.009	0.008	0.074	0.005	0.059	0.370	0.002	0.008	0.011	0.007	0.000	0.004
Tiempo total: 0:14:54																					
Numero de Transecto 1=20050101000914.riv; Numero de Transecto 2=20050101001319.riv; Numero de Transecto 3=20050101001710.riv; Numero de Transecto 4=20050101002102.riv;																					

En la tabla anterior se presentan todos los datos, parámetros y configuraciones adoptadas en la medición así como los datos del equipo utilizado. También en el apartado inferior (resultados de la medida) se puede comprobar el número de transectas realizadas.

4.2 Medición de caudal en la sección del puente, segunda campaña (05 de setiembre de 2018)

En fecha 05 de setiembre se ha realizado la segunda campaña, en esta oportunidad la medición fue realizada desde el puente. Dado que la instalación de la jaula del gabinete de la estación de monitoreo hidrométrico (fuera de servicio) fue instalada en el sector de aguas abajo del puente, la medición tuvo que ejecutarse en dos etapas, es decir, de la margen izquierda hasta la jaula (MI-Jaula) en la que se realizaron tres transectas y desde la jaula hasta la margen derecha (Jaula-MD) en la que también se realizaron tres transectas.

Para que esta metodología de medición sea correcta se ha calculado el caudal circulante entre la cara lateral de la jaula y el eje de la misma, para cada transecta, y éste valor calculado ha sido introducido en el software como definido por el usuario, es decir, el software en ese tramo no aproxima el caudal con la formula exponencial.

El resultado de los cálculos del caudal entre la cara lateral de la jaula y el eje de la misma se expone en la Tabla 4.

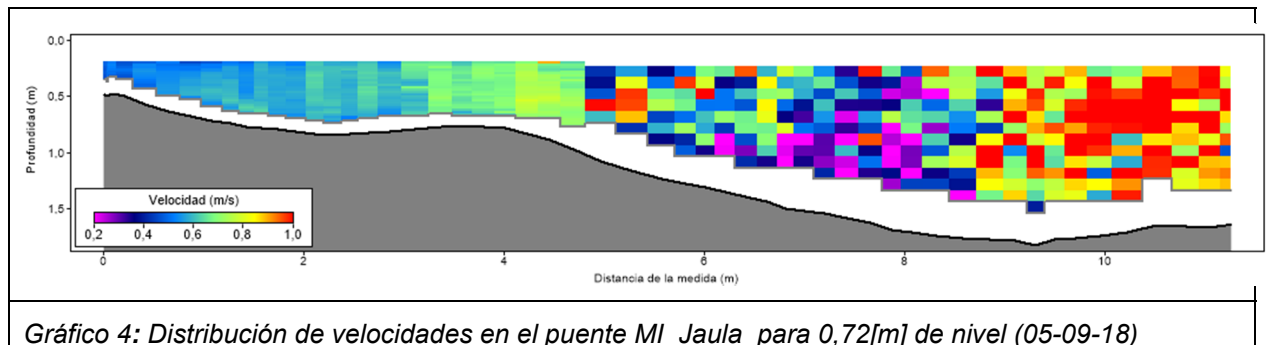
Tabla 4: Calculo de caudal entre la cara y el eje de la jaula, para cada transecta (05-09-18).

Transecta	(A) Promedio de Profundidad [m]	(B) Promedio de Velocidad promedio [m/s]	(C) Ancho de la Jaula [m]	(D) Área [m ²] $D=0.5*C*A$	(E) Caudal [m ³ /s] $E=D*B$
T_Jaula-MD_149	1.789	0.747	0.8	0.7157	0.53
T_Jaula-MD_204	1.605	0.813	0.8	0.6420	0.52
T_Jaula-MD_425	1.600	0.924	0.8	0.6400	0.59
T_MI-Jaula_034	1.106	0.634	0.8	0.4425	0.28
T_MI-Jaula_230	1.671	0.821	0.8	0.6684	0.55
T_MI-Jaula_410	1.673	0.895	0.8	0.6693	0.60

4.2.1 Medición de caudal en la sección del puente (margen izquierda hasta la jaula)

Se presenta el resumen de la medición del lugar de aforo. Se han realizado 3 transectas cuyos resultados han sido promediados.

En la presente campaña se han realizado 3 transectas dando como caudal promedio 8.56 [m³/s] para un nivel de -0.72 [m].



La velocidad máxima registrada es de 1,52 [m/s] y la velocidad promedio es de 0,674 [m/s]. El Gráfico 4 se presenta el mapa de velocidades de la sección iniciando en la margen izquierda.

Tabla 5: Resumen de la medición de caudal entre la margen izquierda y la jaula de la estación de monitoreo (05-09-18).

Resumen de Medida de Caudal										Fecha de medida: miércoles, 5 de septiembre de 2018							
Información de la Estación					Información de la Medida												
Estación: Iturbe					Equipo: S5-Bock												
Estación N°: Tebicuary-mi					Plataforma: Catamaran2												
Localización: Lat.: 26° 3.058'S ; Long.: 56° 29.858'O					Medida N°: Campaña2												
Información de Sistema			Configuración del Sistema						Unidades								
Tipo de sistema	RS-S5		Profund Transductor (m)		0,13		Distancia		m								
Numero de serie	1873		Distancia de monitoreo (m)		0,00		Velocidad		m/s								
Versión de Firmware	4.10		Salinidad (ppt)		0,0		Area		m2								
Versión de Software	4.1		Declin. magnetica (grados)		-14,8		Caudal		m3/s								
								Temperatura		grados C							
Ajustes del Cálculo de caudal							Resultados del Cálculo de Caudal										
Ref. del Track	Bottom-Track	Metodo de cálculo del margen izquierdo			Margen pendiente												
Ref. de profundidad	Bottom-Track	Metodo de cálculo del margen derecho			Introd. manual		Ancho (m) 11,883										
Sistema coordinadas	ENU	Ajuste al modelo superior			Ajuste potencia		Area (m2) 12,695										
		Ajsute al modelo de fondo			Ajuste potencia		Velocidad promedio (m/s) 0,674										
		Lectura inicial de escala (m)			-0,28		Q Total (m3/s) 8,566										
		Lectura final de escala (m)			-0,28		Profundidad máxima medida 1,815										
							Velocidad máxima medida 1,519										
Resultados de la Medida																	
#	Tiempo		Temp.	Distancia			Velocidad promedio			Caudal					%		
	Tiempo	Duración		Track	DMG	Anchura	Area	Barca	Agua	Izquierda	Derecha	Parte arriba	Medio	Fondo		Total	LCTotal
1	M 13:50:34	0:01:47	19,5	11,86	10,58	11,979	12,470	0,111	0,640	0,08	0,28	1,58	4,83	1,22	7,985	--	60,5
2	M 13:52:30	0:01:20	19,6	11,78	10,11	11,514	12,600	0,147	0,687	0,07	0,55	1,59	5,25	1,19	8,651	--	60,7
3	M 13:54:20	0:01:20	19,6	11,56	10,76	12,155	13,014	0,144	0,696	0,08	0,60	1,68	5,37	1,32	9,063	--	59,3
		Promedio	19,6	11,73	10,48	11,883	12,695	0,134	0,674	0,08	0,48	1,62	5,15	1,24	8,566	0,000	60,1
		Desviación Estandar	0,0	0,13	0,27	0,270	0,232	0,017	0,024	0,01	0,14	0,05	0,23	0,06	0,444	0,000	0,6
		COV	0,0	0,011	0,026	0,023	0,018	0,123	0,036	0,090	0,295	0,028	0,045	0,045	0,052	0,000	0,010
Tiempo total: 0:04:27																	
Numero de Transecto 1=20180905135034/rv; Numero de Transecto 2=20180905135230/rv; Numero de Transecto 3=20180905135410/rv;																	

4.2.2 Medición de caudal en la sección del puente (jaula hasta la margen derecha)

Se presenta el resumen de la medición del lugar de aforo. Se han realizado 3 transectas cuyos resultados han sido promediados.

En la presente campaña se han realizado 3 transectas dando como caudal promedio 37.024 [m3/s] para un nivel de 0.72 [m].

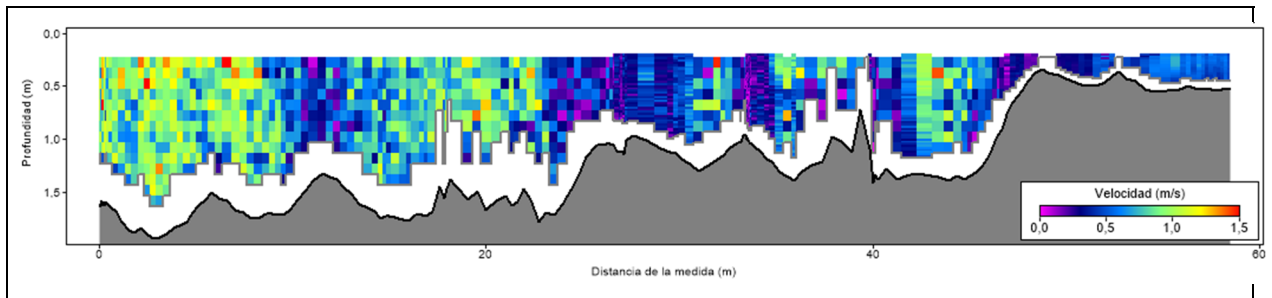


Gráfico 5: Distribución de velocidades en el puente Jaula-MD para 0,72 [m] de nivel (05-09-18)

La velocidad máxima registrada es de 1.635 [m/s] y la velocidad promedio es de 0.587 [m/s]. El Gráfico 5 se presenta el mapa de velocidades de la sección.

Tabla 6: Resumen de la medición de caudal entre la jaula de la estación de monitoreo y la margen derecha (05-09-18).

Resumen de Medida de Caudal										Fecha de medida: miércoles, 5 de septiembre de 2018								
Información de la Estación					Información de la Medida													
Estacion	Iturbe				Equipo	S5-Bock												
Estacion Nº	Tebicuary-mi				Plataforma	Catamaran2												
Localización	Lat.: 26° 3.058'S ; Long.: 56° 29.858'O				Medida Nº	Campaña2												
Información de Sistema			Configuración del Sistema				Unidades											
Tipo de sistema	RS-S5		Profund Transductor (m)		0,13		Distancia		m									
Numero de serie	1873		Distancia de monitoreo (m)		0,00		Velocidad		m/s									
Versión de Firmware	4.10		Salinidad (ppt)		0,0		Area		m2									
Versión de Software	4.1		Declin. magnetica (grados)		-14,8		Caudal		m3/s									
								Temperatura		grados C								
Ajustes del Cálculo de caudal								Resultados del Cálculo de Caudal										
Ref. del Track	Bottom-Track	Metodo de cálculo del margen izquierdo			Introd. manual			Ancho (m)		55,940								
Ref. de profundidad	Bottom-Track	Metodo de cálculo del margen derecho			Margen pendiente			Area (m2)		63,076								
Sistema coordinadas	ENU	Ajuste al modelo superior			Ajuste potencia			Velocidad promedio (m/s)		0,587								
		Ajsute al modelo de fondo			Ajuste potencia			Q Total (m3/s)		37,024								
		Lectura inicial de escala (m)						Profundidad máxima medida		1,938								
		Lectura final de escala (m)			0,20			Velocidad máxima medida		1,635								
Resultados de la Medida																		
Numero de Transecto	Tiempo		Distancia				Velocidad promedio		Caudal						%			
	#	Tiempo	Duración	Temp.	Track	DMG	Anchura	Area	Barca	Agua	Izquierda	Derecha	Parte arriba	Medio		Fondo	Total	LCTotal
1	M	13:01:48	0:05:34	20,4	64,00	50,73	56,134	63,758	0,192	0,595	0,53	0,40	6,83	23,48	6,71	37,955	--	61,9
2	M	13:24:25	0:03:27	19,6	58,92	50,61	56,014	63,622	0,285	0,569	0,59	0,31	6,66	22,08	6,57	36,211	--	61,0
3	M	13:42:04	0:03:41	19,7	57,04	50,27	55,673	61,849	0,258	0,597	0,52	0,20	6,80	22,47	6,86	36,908	--	60,9
			Promedio	19,9	60,01	50,54	55,940	63,076	0,245	0,587	0,55	0,33	6,76	22,68	6,71	37,024	0,000	61,2
			Desviación Estandar	0,4	2,93	0,20	0,195	0,870	0,039	0,013	0,03	0,06	0,07	0,59	0,12	0,717	0,000	0,4
			COV	0,0	0,049	0,004	0,003	0,014	0,160	0,022	0,057	0,180	0,011	0,026	0,018	0,019	0,000	0,007
Tiempo total: 0:12:42																		
Numero de Transecto 1=20180905130149.rlv; Numero de Transecto 2=20180905132425.rlv; Numero de Transecto 3=20180905134204.rlv;																		

4.2.3 Resultado general de la medición del 05 de setiembre de 2018

Como resultado general de la medición de caudal realizada en fecha 05 de setiembre se tiene que el caudal integrado para el nivel 0.72[m] referido al RN de cota 3.882[m] (ver Tabla 2) es de 45.59 [m³/s], con una velocidad media de la sección de 0.602 [m/s], siendo el área de la sección 75.771 [m²].

4.3 Medición de caudal en la sección del puente, tercera campaña (30 de setiembre de 2018)

Con la misma metodología empleada en fecha 05 de setiembre, en la presente campaña se midió el caudal en dos etapas, de la margen izquierda hasta la jaula de la estación hidrométrica y desde la misma, hasta la margen derecha.

El resultado de los cálculos del caudal entre la cara lateral de la jaula y el eje de la misma se expone en la Tabla 7.

Tabla 7: Calculo de caudal entre la cara y el eje de la jaula, para cada transecta (30-09-18).

Transecta	(A) Promedio de Profundidad [m]	(B) Promedio de Velocidad promedio [m/s]	(C) Ancho de la Jaula [m]	(D) Área [m ²] $D=0.5*C*A$	(E) Caudal [m ³ /s] $E=D*B$
T_Jaula-MD_008	4.669	0.992	0.80	1.8676	1.85
T_Jaula-MD_441	4.644	1.074	0.80	1.8574	1.99
T_Jaula-MD_532	4.649	1.044	0.80	1.8597	1.94
T_Jaula-MD_801	4.602	1.043	0.80	1.8408	1.92
T_MI-Jaula_529	4.747	1.068	0.80	1.8989	2.03
T_MI-Jaula_743	4.705	1.064	0.80	1.8820	2.00
T_MI-Jaula_912	4.743	0.990	0.80	1.8971	1.88

4.3.1 Medición de caudal en la sección del puente (margen izquierda hasta la jaula)

Se presenta el resumen de la medición del lugar de aforo. Se han realizado 3 transectas cuyos resultados han sido promediados.

En la presente campaña se han realizado 3 transectas dando como caudal promedio 30.573 [m³/s] para un nivel de 3.67 [m].

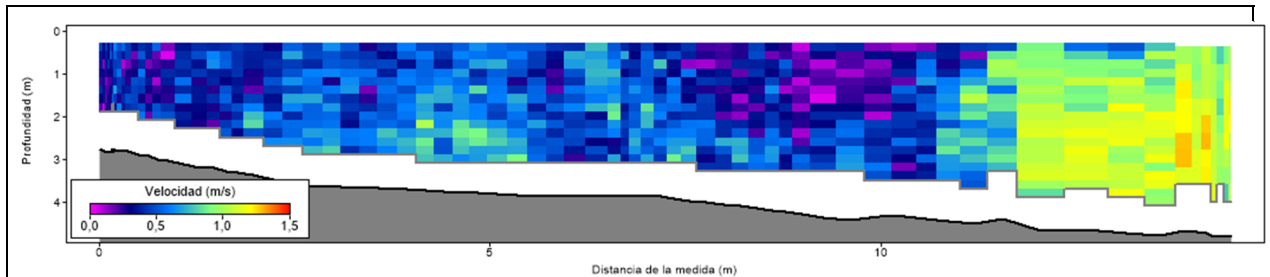


Gráfico 6: Distribución de velocidades en el puente MI_Jaula para 3.67 [m] de nivel (30-09-18)

La velocidad máxima registrada es de 1.405 [m/s] y la velocidad promedio es de 0.553 [m/s]. El Gráfico 6 presenta el mapa de velocidades de la sección iniciando en la margen izquierda.

Tabla 8: Resumen de la medición de caudal entre la margen izquierda y la jaula de la estación de monitoreo (30-09-18).

Resumen de Medida de Caudal										Fecha de medida: domingo, 30 de septiembre de 2018								
Información de la Estacion					Información de la Medida													
Estacion Iturbe					Equipo S5-Bock													
Estacion Nº Tebicuary-mi					Plataforma Catamaran2													
Localización Lat.: 26° 3.058'S ; Long.: 56° 29.858'O					Medida Nº Campaña3													
Información de Sistema			Configuración del Sistema				Unidades											
Tipo de sistema R5-S5			Profund Transductor (m) 0,13				Distancia m											
Numero de serie 1873			Distancia de monitoreo (m) 0,00				Velocidad m/s											
Versión de Firmware 4.10			Salinidad (ppt) 0,0				Area m2											
Versión de Software 4.1			Declin. magnetica (grados) -14,8				Caudal m3/s											
							Temperatura grados C											
Ajustes del Cálculo de caudal								Resultados del Cálculo de Caudal										
Ref. del Track Bottom-Track		Metodo de cálculo del margen izquierdo		Margen pendiente				Ancho (m) 18,297										
Ref. de profundidad Bottom-Track		Metodo de cálculo del margen derecho		Introd. manual				Area (m2) 55,458										
Sistema coordinadas ENU		Ajuste al modelo superior		Ajuste potencia				Velocidad promedio (m/s) 0,553										
		Ajsute al modelo de fondo		Ajuste potencia				Q Total (m3/s) 30,573										
		Lectura inicial de escala (m) 2,67						Profundidad máxima medida 4,836										
		Lectura final de escala (m) 2,67						Velocidad máxima medida 1,405										
Resultados de la Medida																		
Numero de Transecto	Tiempo		Distancia				Velocidad promedio		Caudal						%			
	#	Tiempo	Duración	Temp.	Track	DMG	Anchura	Area	Barca	Agua	Izquierda	Derecha	Parte arriba	Medio		Fondo	Total	LCTotal
1	M	13:35:29	0:03:20	24,4	17,96	13,21	18,612	51,256	0,090	0,604	1,43	2,03	2,42	20,26	4,74	30,948	--	65,5
2	M	13:39:12	0:02:02	24,4	16,04	12,66	18,055	56,935	0,132	0,549	1,29	1,88	2,27	21,49	4,34	31,280	--	68,7
3	M	13:47:43	0:01:29	24,4	16,02	12,82	18,223	58,182	0,180	0,507	1,02	2,00	2,20	19,85	4,42	29,491	--	67,3
			Promedio	24,4	16,68	12,90	18,297	55,458	0,134	0,553	1,25	1,97	2,32	20,54	4,50	30,573	0,000	67,2
			Desviación Estándar	0,0	0,91	0,23	0,233	3,014	0,037	0,040	0,17	0,06	0,12	0,70	0,17	0,777	0,000	1,3
			COV	0,0	0,054	0,018	0,013	0,054	0,276	0,072	0,135	0,033	0,053	0,034	0,038	0,025	0,000	0,020
Tiempo total: 0:06:51																		
Numero de Transecto 1=20180930133529.rlv; Numero de Transecto 2=20180930133912.rlv; Numero de Transecto 3=20180930134743.rlv;																		
Comentarios																		

4.3.2 Medición de caudal en la sección del puente (jaula hasta la margen derecha)

Se presenta el resumen de la medición del lugar de aforo. Se han realizado 4 transectas cuyos resultados han sido promediados.

En la presente campaña se han realizado 4 transectas dando como caudal promedio 221.708 [m3/s] para un nivel de 32.67 [m].

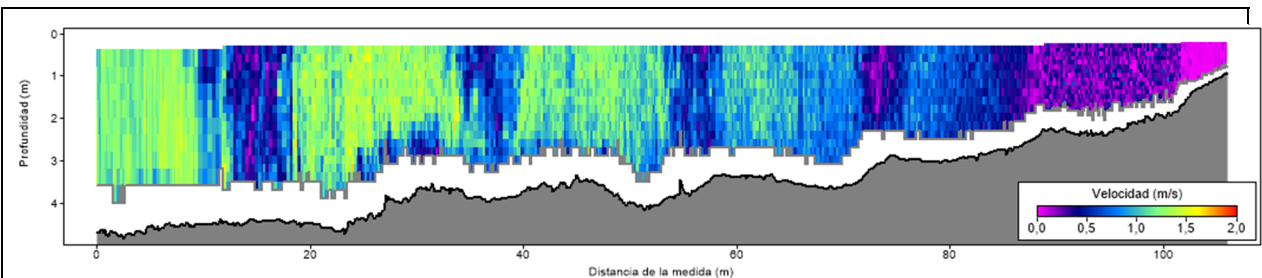


Gráfico 7: Distribución de velocidades en el puente Jaula-MD para 3.67 [m] de nivel (30-09-18)

La velocidad máxima registrada es de 1.731 [m/s] y la velocidad promedio es de 0.747[m/s]. El Gráfico 7 se presenta el mapa de velocidades de la sección.

Tabla 9: Resumen de la medición de caudal entre la jaula de la estación de monitoreo y la margen derecha (30-09-18).

Resumen de Medida de Caudal										Fecha de medida: domingo, 30 de septiembre de 2018								
Información de la Estación					Información de la Medida													
Estación		Iturbe			Equipo		S5-Bock											
Estación N°		Tebicuary-mi			Plataforma		Catamaran2											
Localización		Lat.: 26° 3.058'S ; Long.: 56° 29.858'O			Medida N°		Campaña3											
Información de Sistema				Configuración del Sistema						Unidades								
Tipo de sistema		RS-55		Profund Transductor (m)		0,13		Distancia		m								
Numero de serie		1873		Distancia de monitoreo (m)		0,00		Velocidad		m/s								
Versión de Firmware		4.10		Salinidad (ppt)		0,0		Area		m2								
Versión de Software		4.1		Declin. magnetica (grados)		-14,8		Caudal		m3/s								
								Temperatura		grados C								
Ajustes del Cálculo de caudal										Resultados del Cálculo de Caudal								
Ref. del Track		Bottom-Track		Metodo de cálculo del margen izquierdo		Introd. manual		Ancho (m)		93,388								
Ref. de profundidad		Bottom-Track		Metodo de cálculo del margen derecho		Margen pendiente		Area (m2)		296,637								
Sistema coordinadas		ENU		Ajuste al modelo superior		Ajuste potencia		Velocidad promedio (m/s)		0,747								
				Ajsute al modelo de fondo		Ajuste potencia		Q Total (m3/s)		221,708								
				Lectura inicial de escala (m)		2,67		Profundidad máxima medida		4,834								
				Lectura final de escala (m)		2,67		Velocidad máxima medida		1,731								
Resultados de la Medida																		
Numero de Transecto	Tiempo		Distancia				Velocidad promedio		Caudal						%			
	#	Tiempo	Duración	Temp.	Track	DMG	Anchura	Area	Barca	Agua	Izquierda	Derecha	Parte arriba	Medio		Fondo	Total	LCTotal
1	M	12:44:41	0:10:35	24,3	107,28	90,58	95,981	298,369	0,169	0,754	1,99	-0,02	19,88	167,55	35,44	224,839	-	74,5
2	M	12:55:32	0:12:25	24,3	106,24	85,03	90,432	290,809	0,143	0,732	1,94	-0,01	18,14	159,10	33,78	212,944	-	74,7
3	M	13:08:01	0:09:15	24,4	97,12	87,52	92,923	295,836	0,175	0,763	1,92	0,01	20,14	166,47	37,06	225,589	-	73,8
4	M	13:20:16	0:10:02	24,4	102,46	88,81	94,213	301,535	0,170	0,741	1,85	0,01	19,31	166,80	35,48	223,458	-	74,6
			Promedio	24,3	103,27	87,99	93,388	296,637	0,164	0,747	1,92	0,00	19,37	164,98	35,44	221,708	0,000	74,4
			Desviación Estandar	0,0	3,96	2,02	2,023	3,924	0,013	0,012	0,05	0,01	0,77	3,42	1,16	5,117	0,000	0,4
			COV	0,0	0,039	0,023	0,022	0,013	0,077	0,016	0,026	-2,700	0,040	0,021	0,033	0,023	0,000	0,005
Tiempo total: 0:42:17																		
Numero de Transecto 1=20180930124441.rlv; Numero de Transecto 2=20180930125532.rlv; Numero de Transecto 3=20180930130801.rlv; Numero de Transecto 4=20180930132008.rlv;																		

4.3.3 Resultado general de la medición del 30 de setiembre de 2018

Como resultado general de la medición de caudal realizada en fecha 30 de setiembre se tiene que el caudal integrado para el nivel 3.667[m] referido al RN de cota 3.882 [m] (ver Tabla 2) es de 252.281 [m³/s], con una velocidad media de la sección de 0.717 [m/s], siendo el área de la sección 352.095 [m²].

5 Determinación de curva altura caudal resultado general de las mediciones

En la Tabla 10 se presenta el resumen general de las mediciones realizadas durante el servicio. Los niveles referidos en la Tabla 10 están amarrados al RNPILA: 3.882[m] de la Tabla 2.

Tabla 10: Resumen general de las mediciones realizadas

Fecha	Nivel [m]	Caudal [m3/s]	Área [m2]	Vel. Prom. [m/s]	Vel. Máx. [m/s]	Prof. Máx. [m]
06-07-18	0,33	25.947	51.317	0.506	1.433	1.728
05-09-18	0,72	45.59	75.771	0.602	1.635	1.938
30-09-18	3.67	252.281	352.095	0.717	1.731	4.836

Además de estas mediciones se recopiló una medición de caudal realizada por la SEAM el 25 de abril del 2017 con una altura del agua de 4.55 m y un caudal de 359.65 [m³/s]. Con estas mediciones de caudal se realiza la determinación de la curva altura caudal de la estación.

Fecha	Nivel [m]	Caudal [m3/s]	Área [m2]	Vel, Prom, [m/s]
6/7/2018	0.33	25.947	51.32	0.506
5/9/2018	0.716	45.59	75.77	0.602
30/9/2018	3.667	252.281	352.10	0.717
25/4/2017	4.55	359.65	483.22	0.74

Se graficaron en base a la sección obtenida en la medición de caudal con el nivel de 4.55 metros las secciones referenciales para los otros niveles de caudal medidos en esta campaña. Se observa que no existe un cambio abrupto de sección hasta los 4 metros donde si luego aparece un pequeño valle de inundación en la margen izquierda.

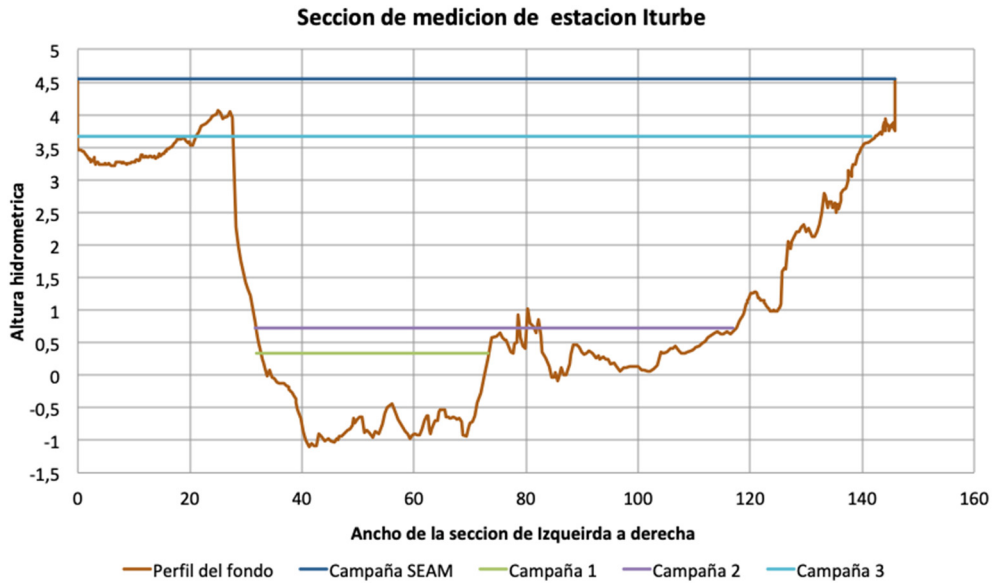


Gráfico 8: Sección de medición de caudales

Graficando los puntos con los valores de nivel en el eje de abscisas y los caudales en el de ordenadas y determinando la curva de tendencia, se observa en la gráfica que se obtiene para los puntos una curva polinómica de segundo orden con un $R^2=0.996$. En el gráfico 8 se observa que se deben realizar mediciones para mejorar la curva en el tramo comprendido entre los 1 a 3.5 metros donde considerando el gráfico 8 se observa que no existe cambios abruptos en la sección, por lo que la primera aproximación de la curva realizada con las mediciones actuales puede considerarse valida.

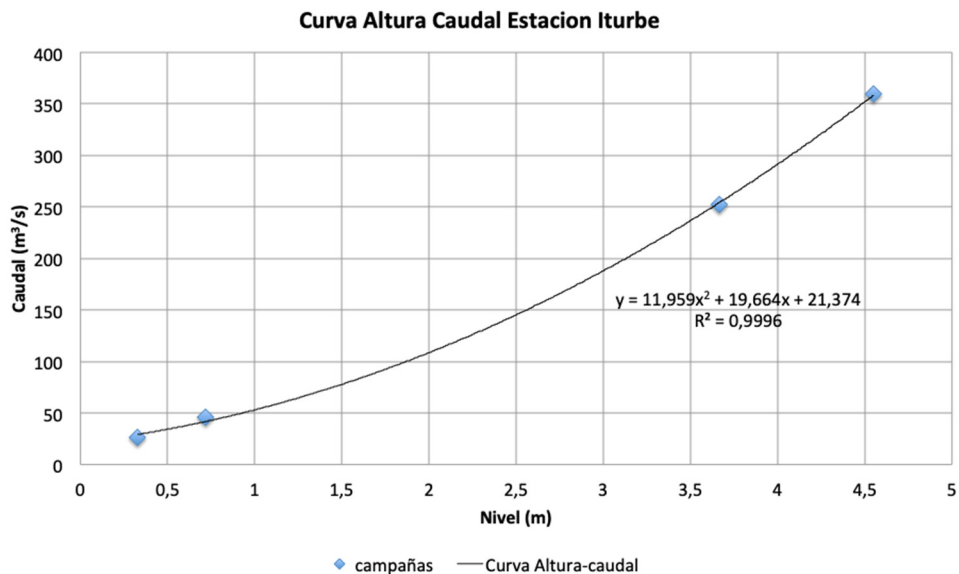


Gráfico 9: Curva Altura Caudal de la estación Iturbe

Finalmente la curva que relaciona las alturas con los caudales obtenidas es una curva polinómica de segundo orden la cual tiene una validez entre las alturas 0,30 a 4,6 metros, siendo al misma

$$Q=11.96h^2+19.66h+21.37$$

Con la altura (h) en metros y el caudal (Q) en m³/s.

6 Conclusiones y recomendaciones

Se cumplió con el objetivo de realizar 3 mediciones de caudales en un periodo de 3 meses donde se obtuvieron además los niveles diarios en la estación Iturbe. A partir de las mediciones de caudal realizadas y otra medición recopilada por la SEAM se logró construir una curva altura caudal valida hasta los 4.6 metros.

Con la información de nivel obtenida en este trabajo y la recopilada se tienen datos de unos 15 meses con los cuales utilizando la curva altura caudal se puede obtener la serie de caudales del río Tebicuary-mi en la Estación Iturbe y con ellos verificar los valores obtenidos con los modelos matemáticos.

Se recomienda realizar otras campañas de medición de caudales de manera a verificar la curva en el tramo donde no se cuentan con mediciones (1-3.5 m)

7 Anexos

7.1 Anexo I: Características de lo equipos

- **ADCP Sontek**

Como se ha mencionado, se utilizó un equipo ADCP de la marca Sontek, modelo S5 del cual se presentan sus características principales.

Tabla 11: Características del equipo ADCP utilizado

<i>Especificación</i>	<i>S5:</i>
<i>Rango de perfiles - Distancia</i>	<i>0.06 a 5 metros</i>
<i>Rango de perfiles ' - Velocidad</i>	<i>± 20 m / s</i>
<i>Velocidad ' - Precisión</i>	<i>± 0.25% de la velocidad medida</i>
	<i>± 0.2 cm / s</i>
<i>Velocidad - Resolución</i>	<i>0.001 m / s</i>
<i>Número de células</i>	<i>Hasta 128</i>
<i>Tamaño de la célula</i>	<i>0.02 a 0.5 M</i>
<i>Configuración del transductor</i>	<i>Cinco (5) Transductores</i>
	<i>4-haz de 3.0 MHz</i>
	<i>Janus 25 ° de ángulo inclinado</i>
	<i>Ecosonda haz vertical de 1,0 MHz</i>
<i>Rango de profundidad</i>	<i>0.20 a 15 m</i>
<i>Profundidad - Precisión</i>	<i>1%</i>
<i>Profundidad - Resolución</i>	<i>0.001 m</i>
<i>Rango de medición de descarga - Bottom-Track</i>	<i>0.3 a 5 metros</i>
<i>Rango de medición de descarga - RTK GPS</i>	<i>0.3 a 15 m</i>
<i>Medición de descarga - Cálculos</i>	<i>Interno</i>

- **Características de la estación automática HOBO U20**

Presión y nivel de agua

Rango de operaciones *0-9 metros*

Precisión : *Típica ±0.05% FS, 0.5 cm de agua*
Máximo error: ±0.1% FS, 1.0 cm de agua

Resolución *<0.02 kPa (0.003 psi), 0.21 cm de agua*

Temperatura

Rango de operaciones *-20° a 50°C*

Precisión : *±0.44°C from 0° a 50°C*

Resolución *0.10°C at 25°C*

Registrador

Reloj *± 1 minuto por mes 0° a 50°C*

Vida útil de la batería *5 años guardando datos cada 1 minuto*

Memoria *64K bytes memory (aprox. 21700 datos de nivel y temperatura)*

Intervalo de medición *Múltiples intervalos de medición*

Inicio de medición *Inicio instantáneo o programable para inicio posterior*

7.2 Anexo II: Información fotográfica
Primera campaña de medición de caudales





Segunda campaña de medición de caudales





Tercer campaña de medición de caudales





APÉNDICE 2

RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN

1. CALIBRACIÓN TRMM

1.1. Pluviómetro 1

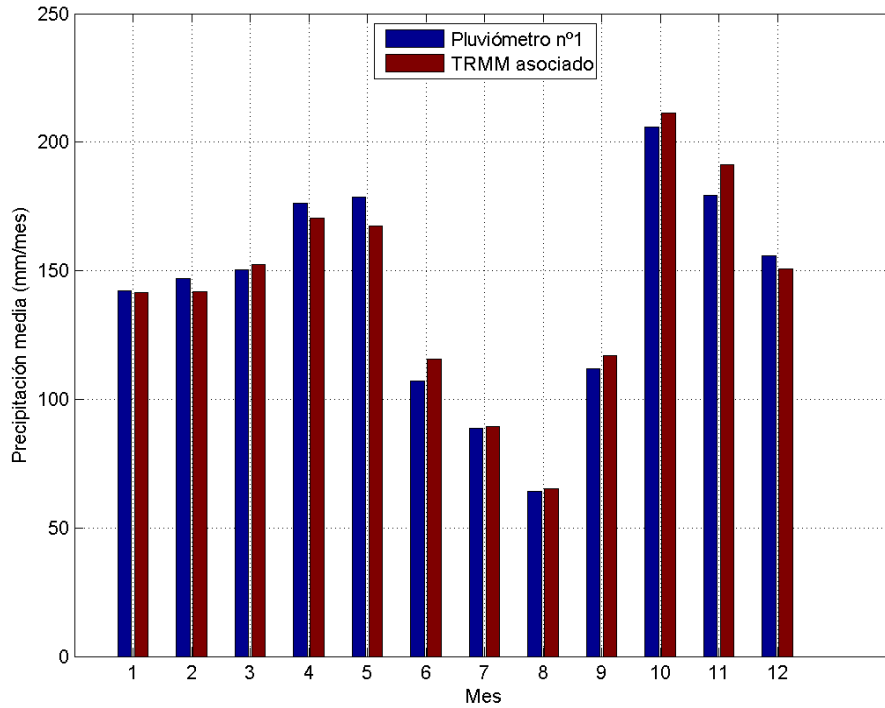


Figura 1. Comparación de valores de precipitación medios mensuales del TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 1.

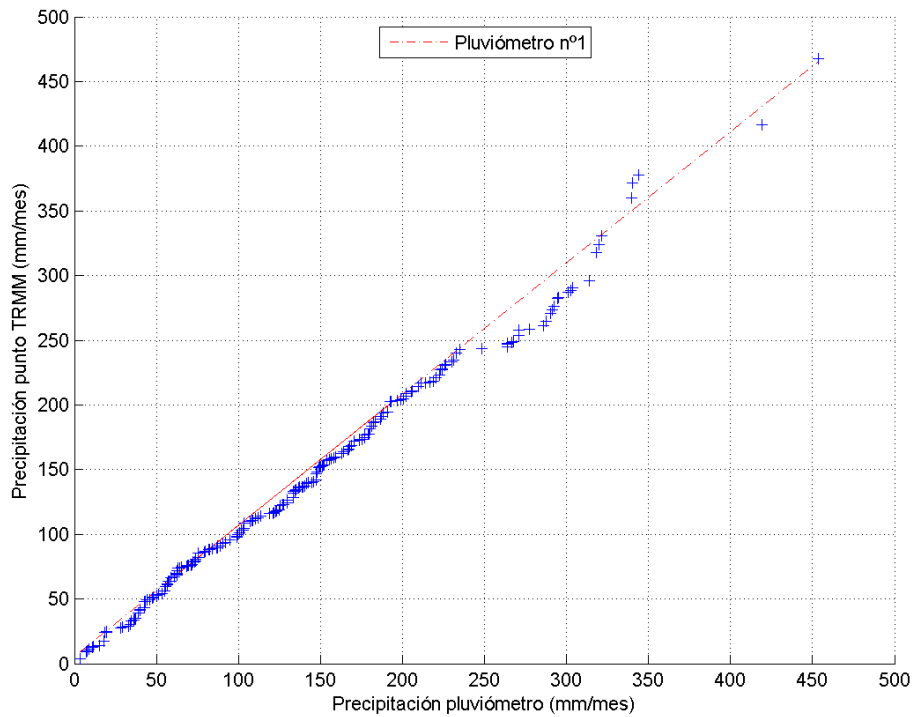


Figura 2. Comparación de datos de precipitación de TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 1. QQ-plot de ambas series a escala mensual.

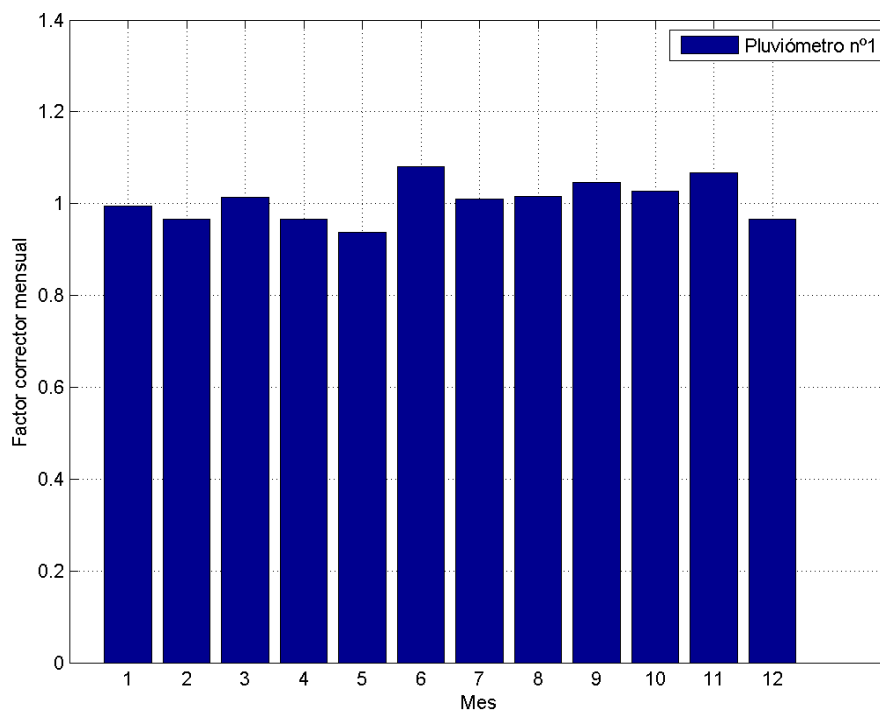


Figura 3. Comparación de datos de precipitación de TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 1. Factores correctores a escala mensual.

1.2. Pluviómetro 2

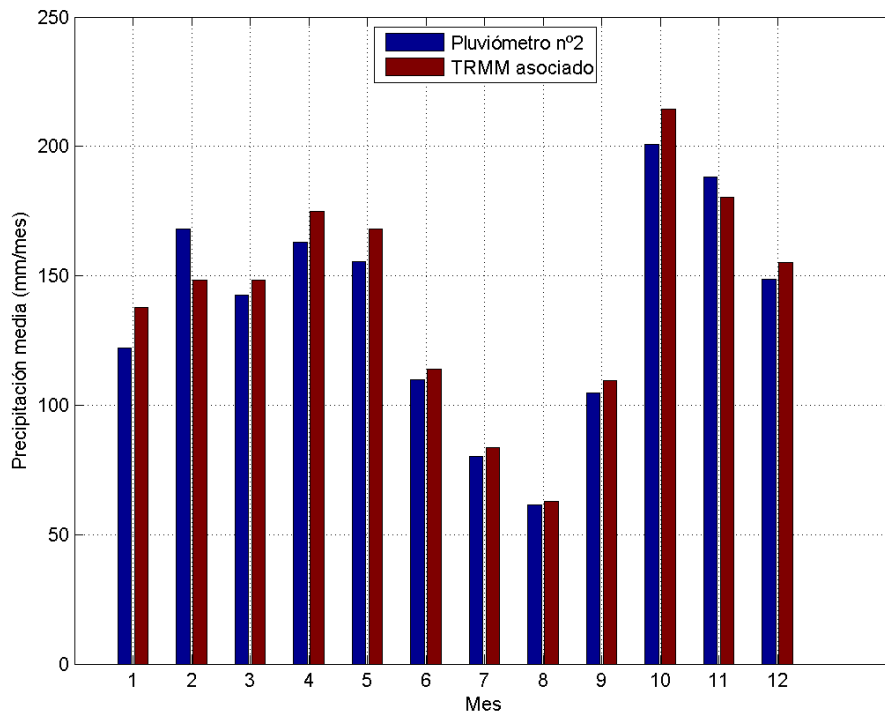


Figura 4. Comparación de valores de precipitación medios mensuales del TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 2.

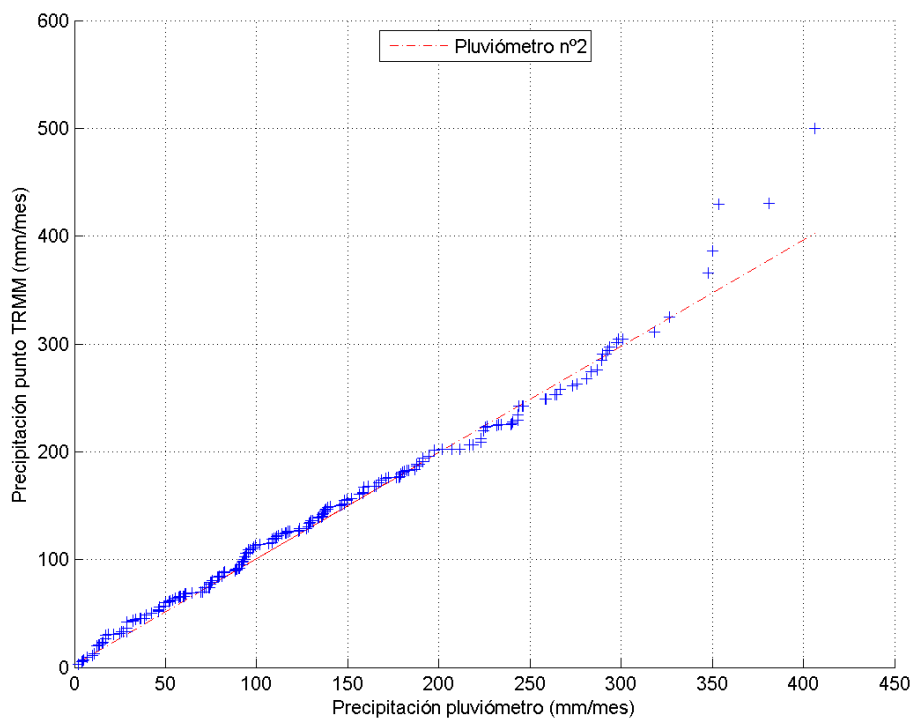


Figura 5. Comparación de datos de precipitación de TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 2. QQ-plot de ambas series a escala mensual.

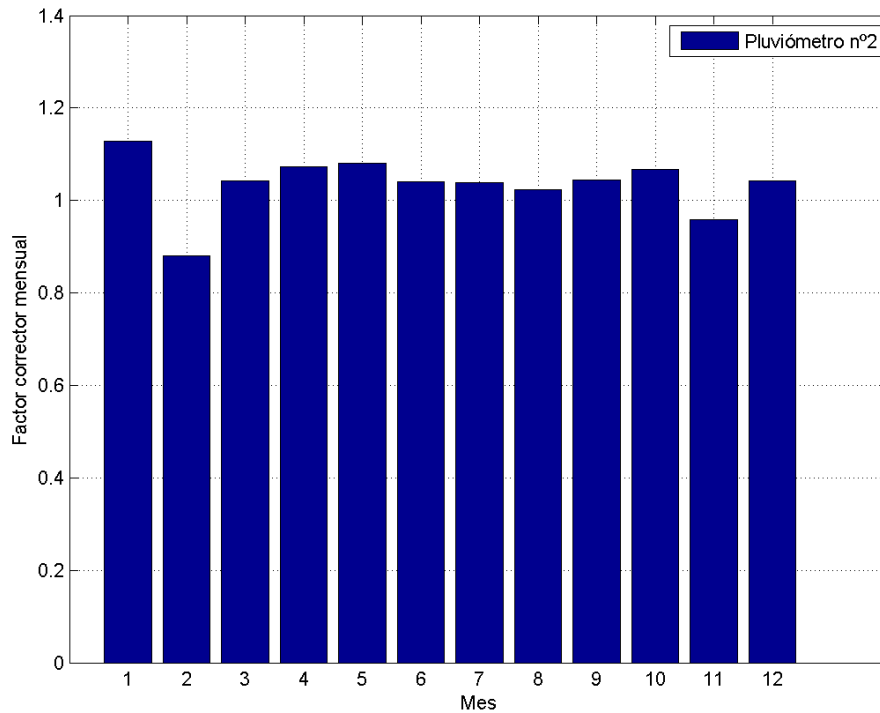


Figura 6. Comparación de datos de precipitación de TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 2. Factores correctores a escala mensual.

1.3. Pluviómetro 3

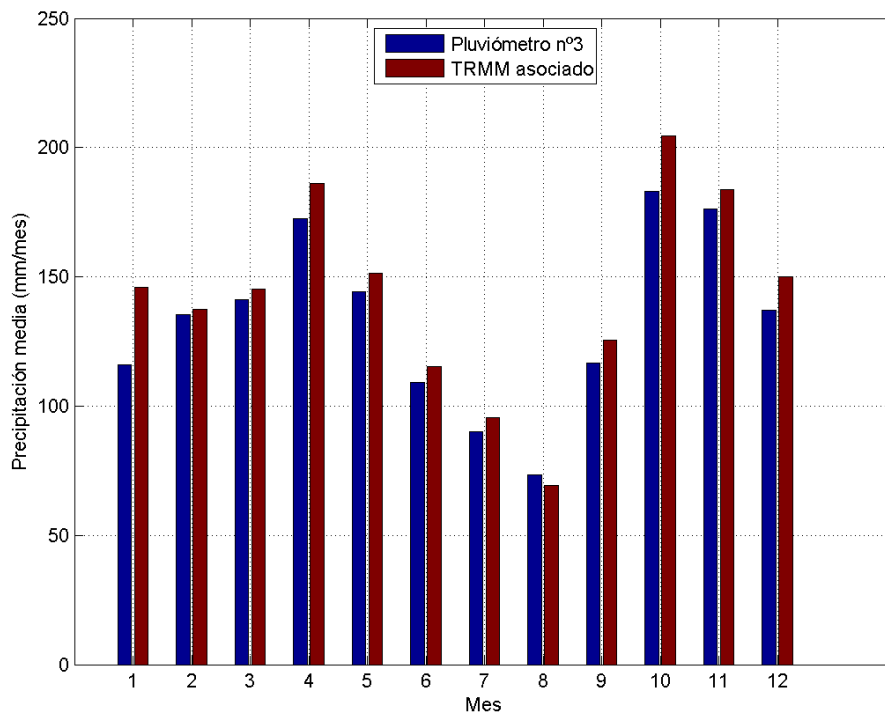


Figura 7. Comparación de valores de precipitación medios mensuales del TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 3.

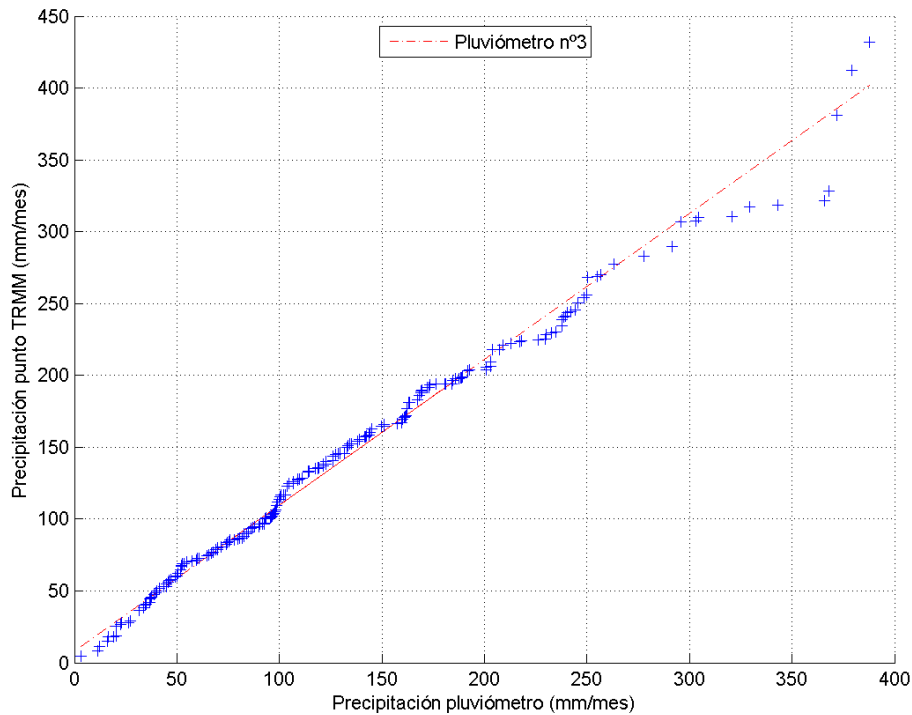


Figura 8. Comparación de datos de precipitación de TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 3. QQ-plot de ambas series a escala mensual.

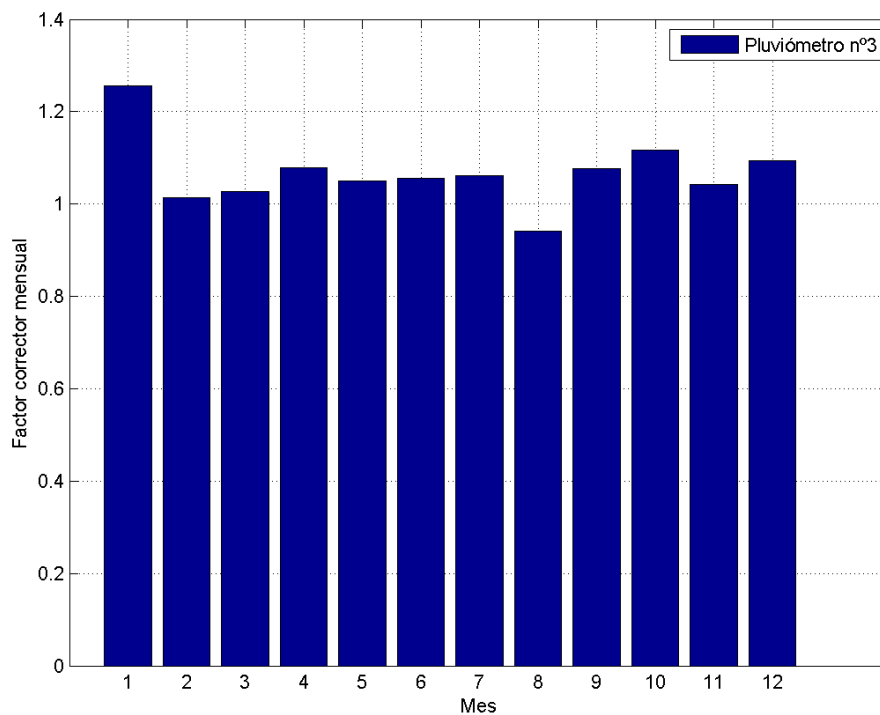


Figura 9. Comparación de datos de precipitación de TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 3. Factores correctores a escala mensual.

1.4. Pluviómetro 4

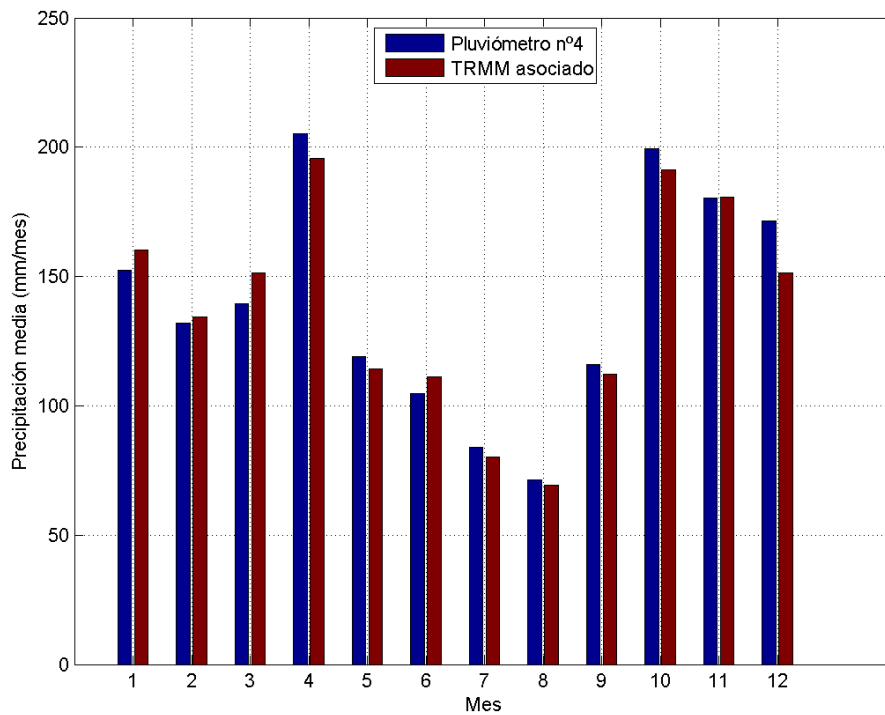


Figura 10. Comparación de valores de precipitación medios mensuales del TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 4.

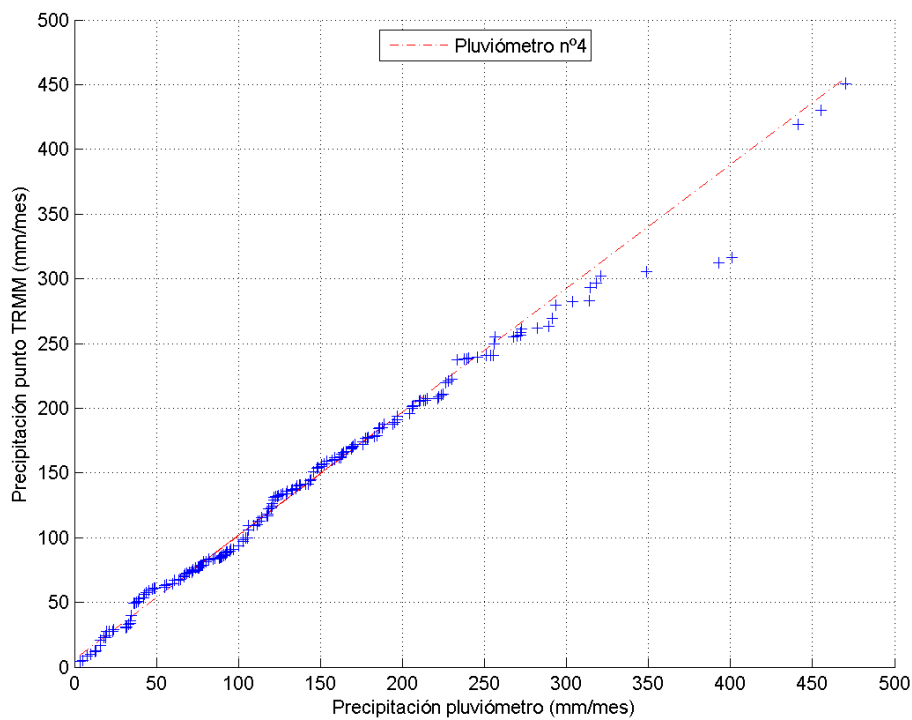


Figura 11. Comparación de datos de precipitación de TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 4. QQ-plot de ambas series a escala mensual.

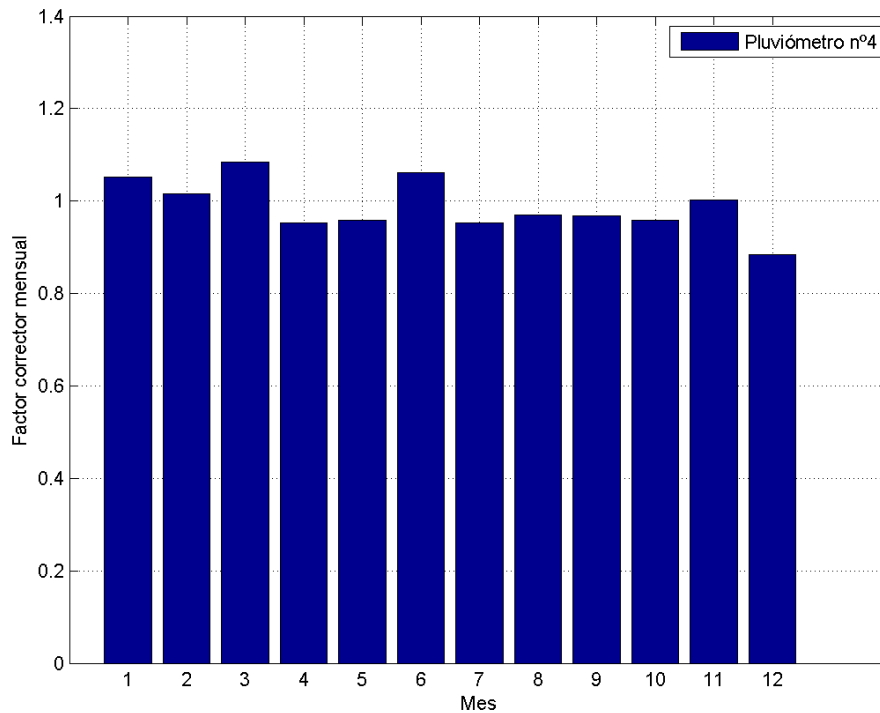


Figura 12. Comparación de datos de precipitación de TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 4. Factores correctores a escala mensual.

1.5. Pluviómetro 5

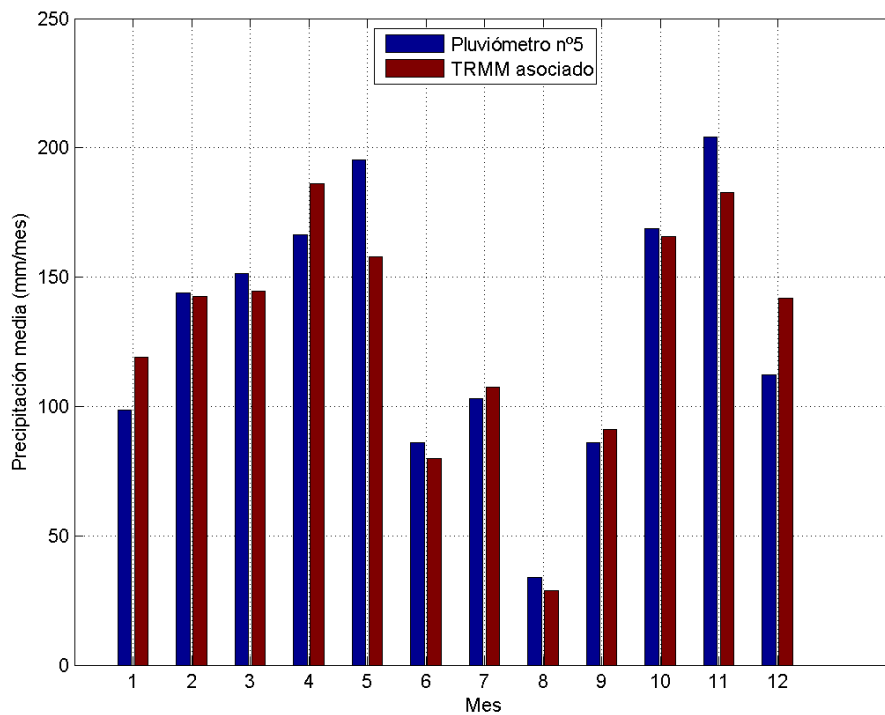


Figura 13. Comparación de valores de precipitación medios mensuales del TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 5.

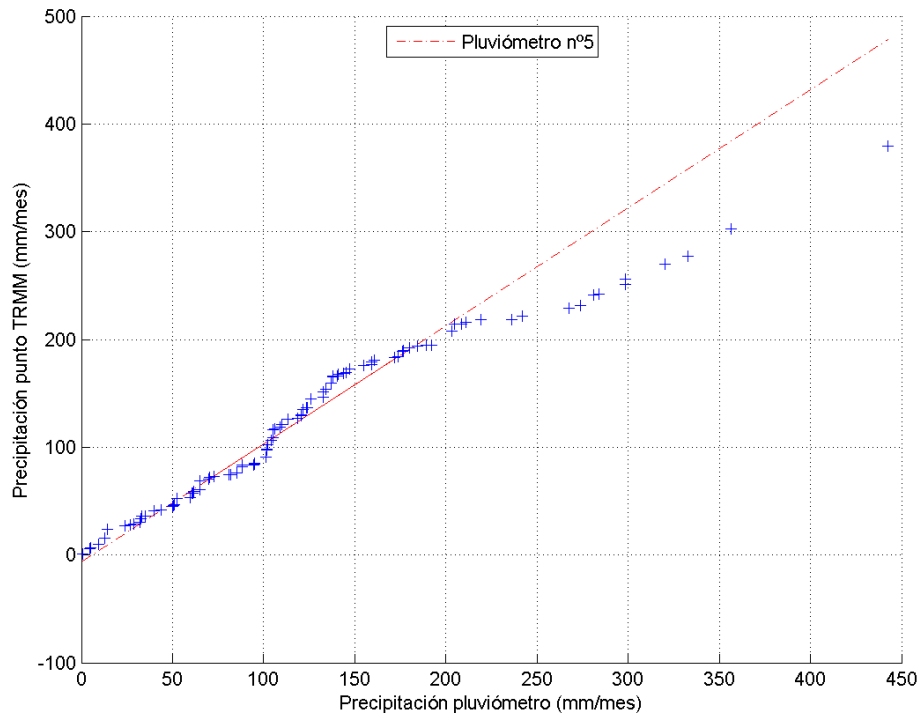


Figura 14. Comparación de datos de precipitación de TRMM e instrumentales para el pluviómetro n° 5. QQ-plot de ambas series a escala mensual.

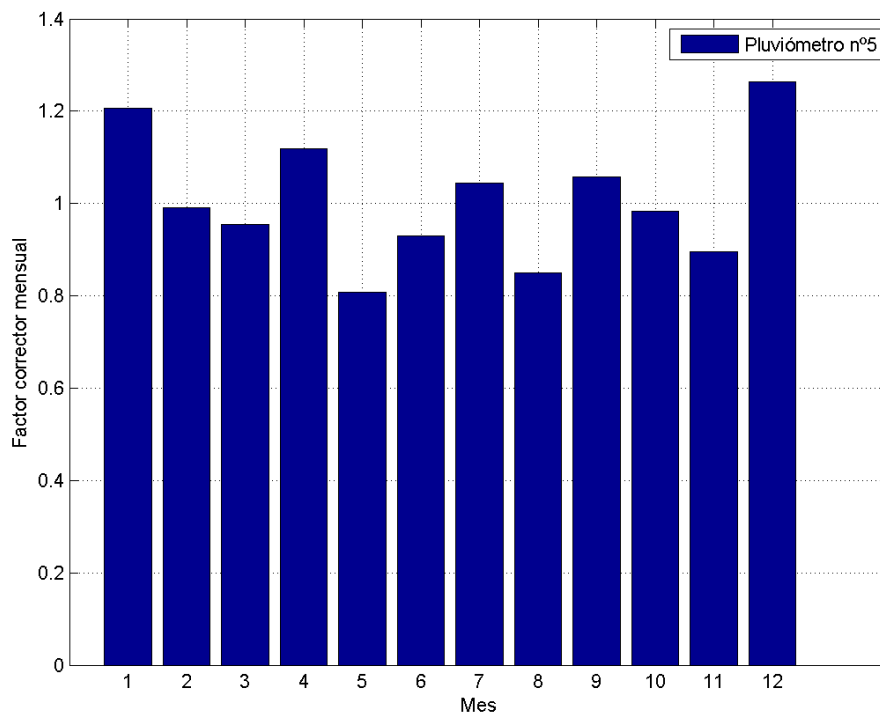


Figura 15. Comparación de datos de precipitación de TRMM e instrumentales para el pluviómetro n° 5. Factores correctores a escala mensual.

1.6. Pluviómetro 6

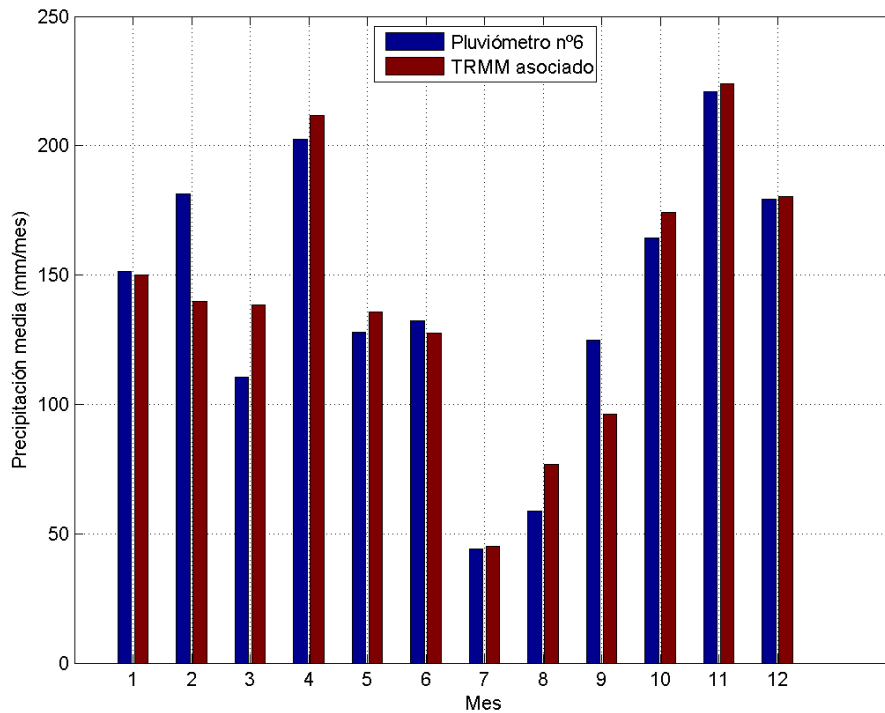


Figura 16. Comparación de valores de precipitación medios mensuales del TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 6.

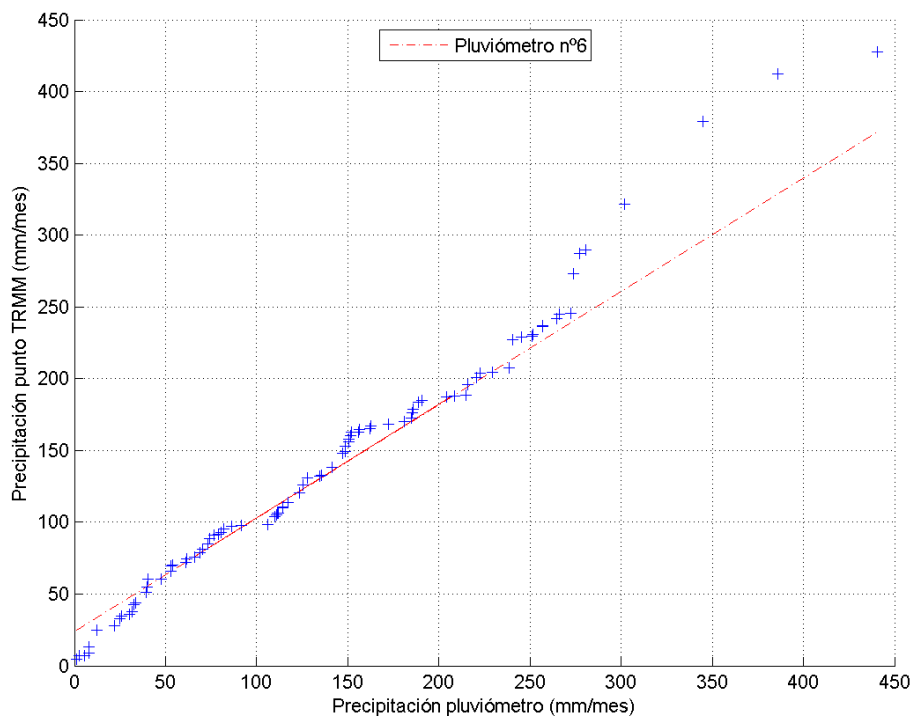


Figura 17. Comparación de datos de precipitación de TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 6. QQ-plot de ambas series a escala mensual.

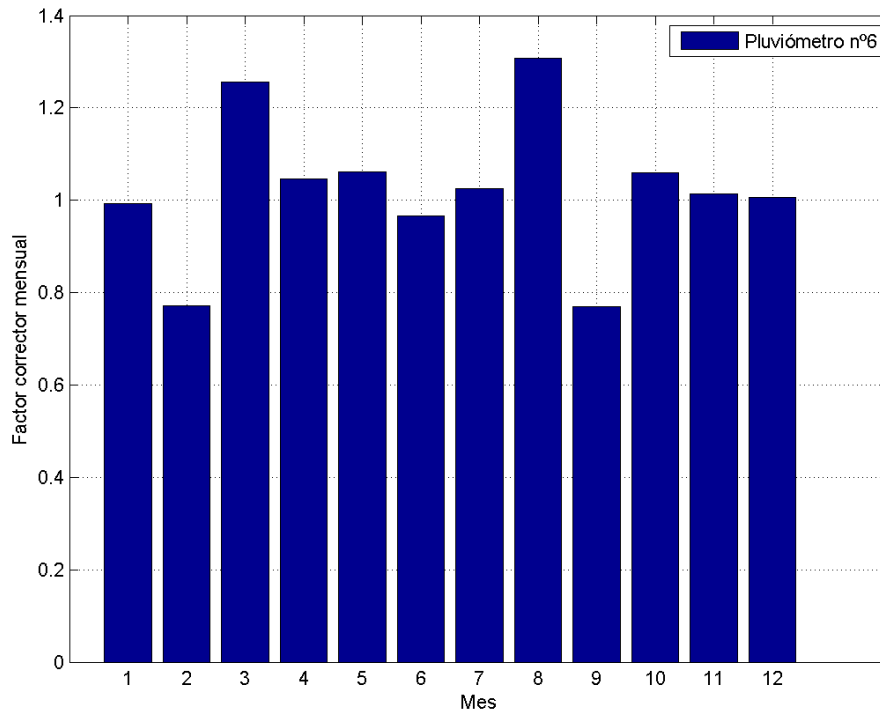


Figura 18. Comparación de datos de precipitación de TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 6. Factores correctores a escala mensual.

1.7. Pluviómetro 7

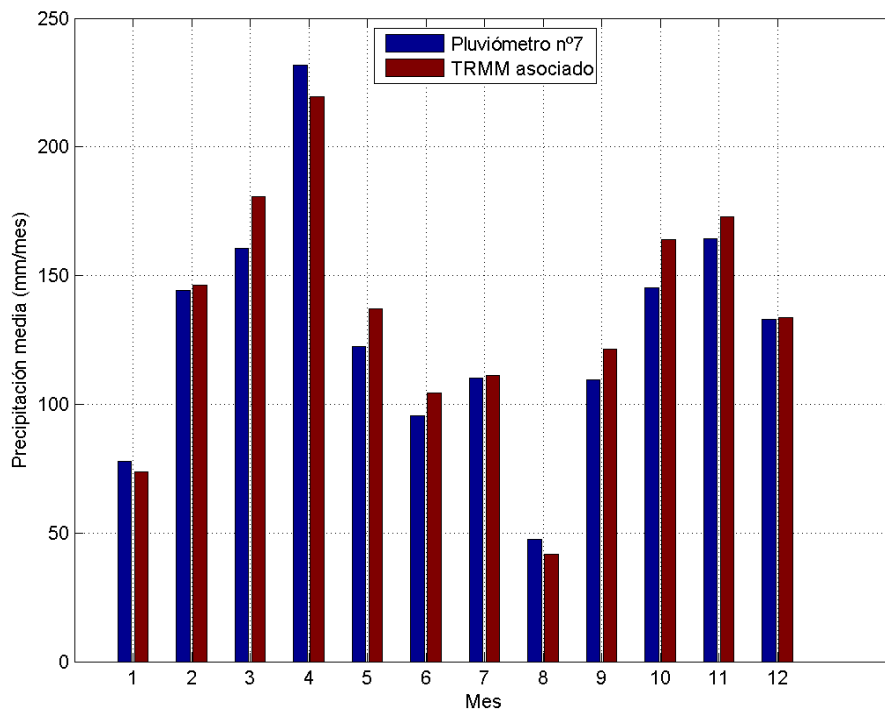


Figura 19. Comparación de valores de precipitación medios mensuales del TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 7.

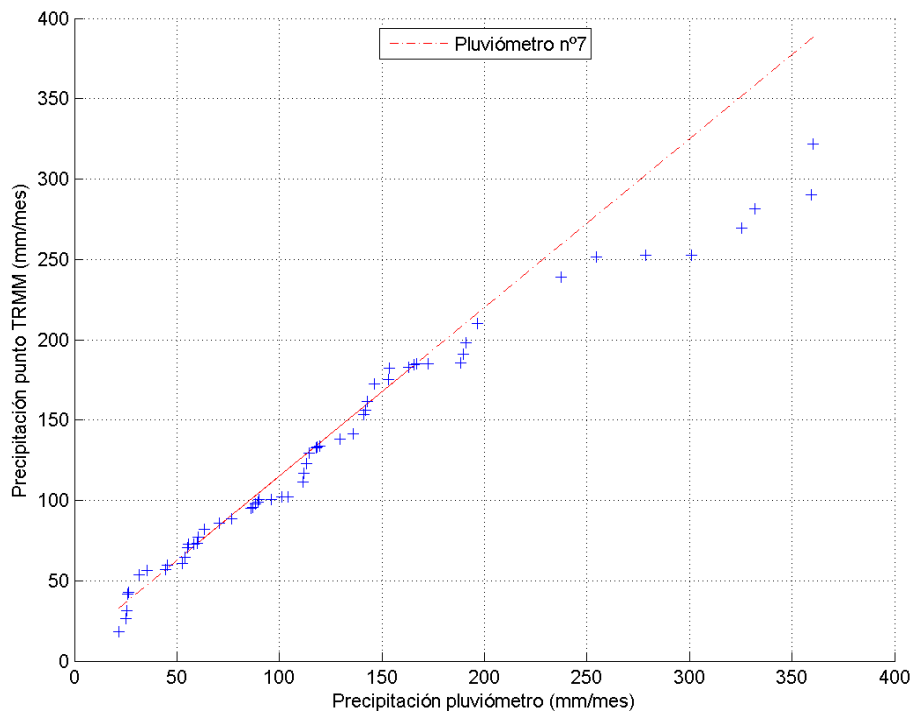


Figura 20. Comparación de datos de precipitación de TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 7. QQ-plot de ambas series a escala mensual.

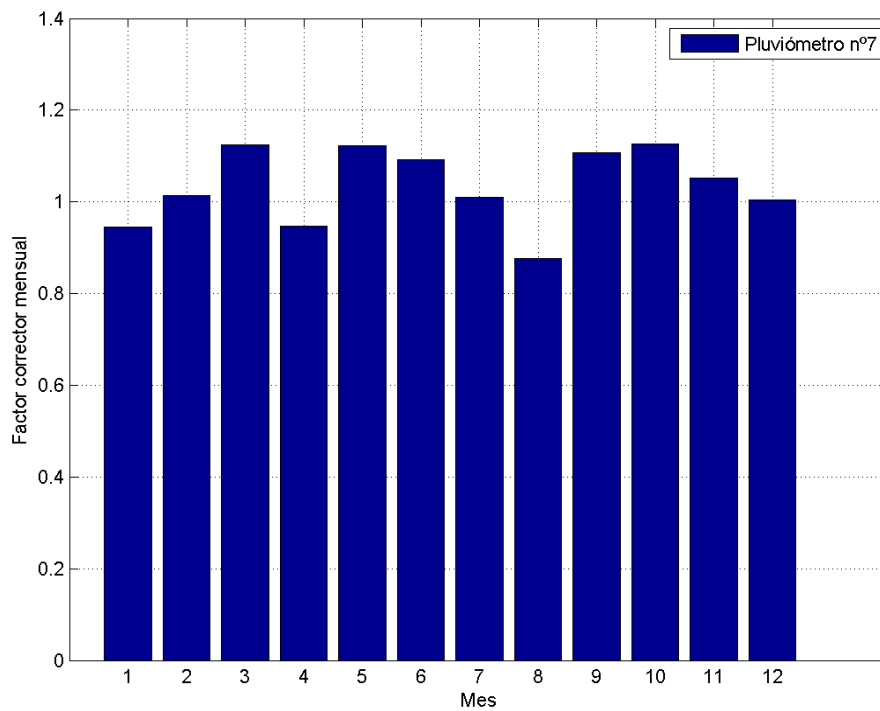


Figura 21. Comparación de datos de precipitación de TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 7. Factores correctores a escala mensual.

2. RESULTADOS POR SUBCUENCAS

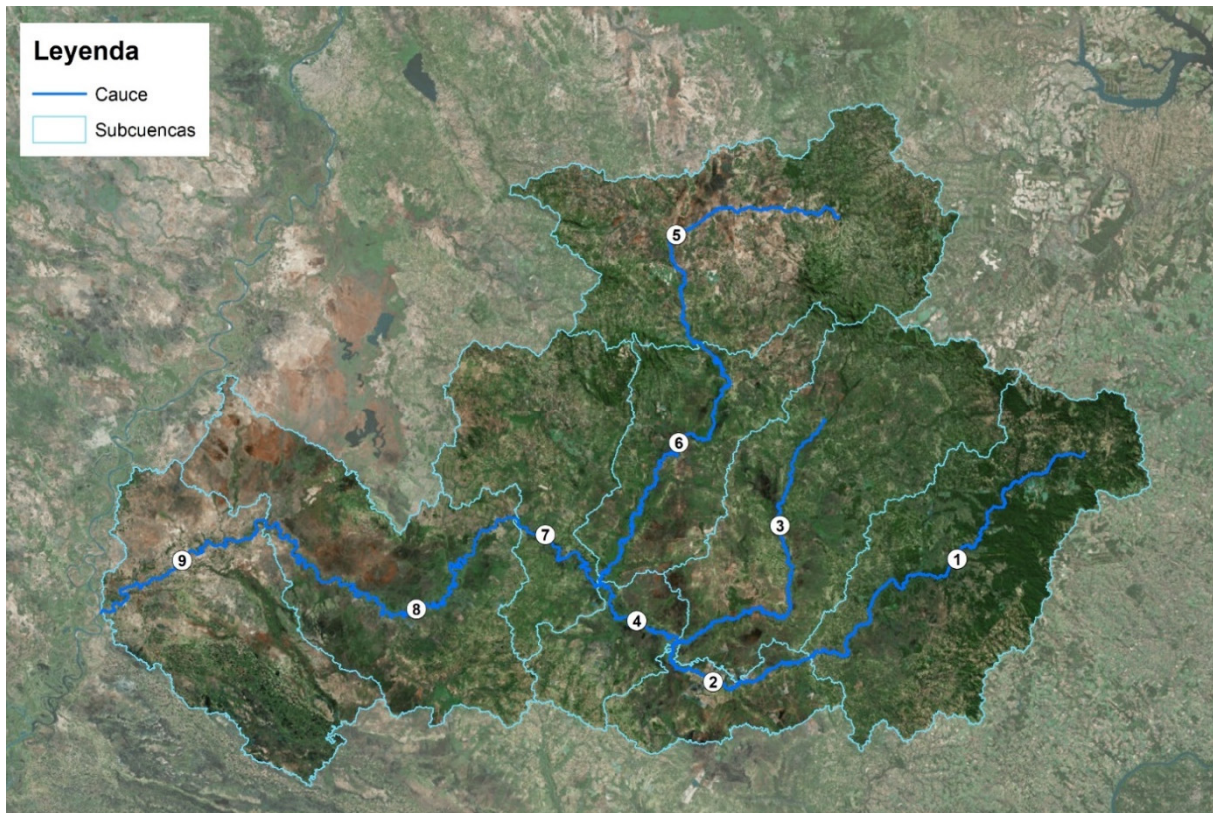


Figura 22. Comparación de datos de precipitación de TRMM e instrumentales para el pluviómetro nº 7. Factores correctores a escala mensual.

SUBCUENCA	NOMBRE EXTENSO-DESCRIPCIÓN
SC-1	Alto Tebicuary I (hasta Yuty aprox.)
SC-2	Alto Tebicuary II (hasta confluencia del Pirapó)
SC-3	Cuenca del Pirapó
SC-4	Medio Tebicuary I
SC-5	Alto Tebicuary Mi (hasta Iturbe aprox.)
SC-6	Bajo Tebicuary Mi
SC-7	Medio Tebicuary II (hasta Villa Florida)
SC-8	Bajo Tebicuary I
SC-9	Bajo Tebicuary II

Tabla 1. Hidrotoponimia utilizada en cada subcuenca.

2.1. Subcuenca 1

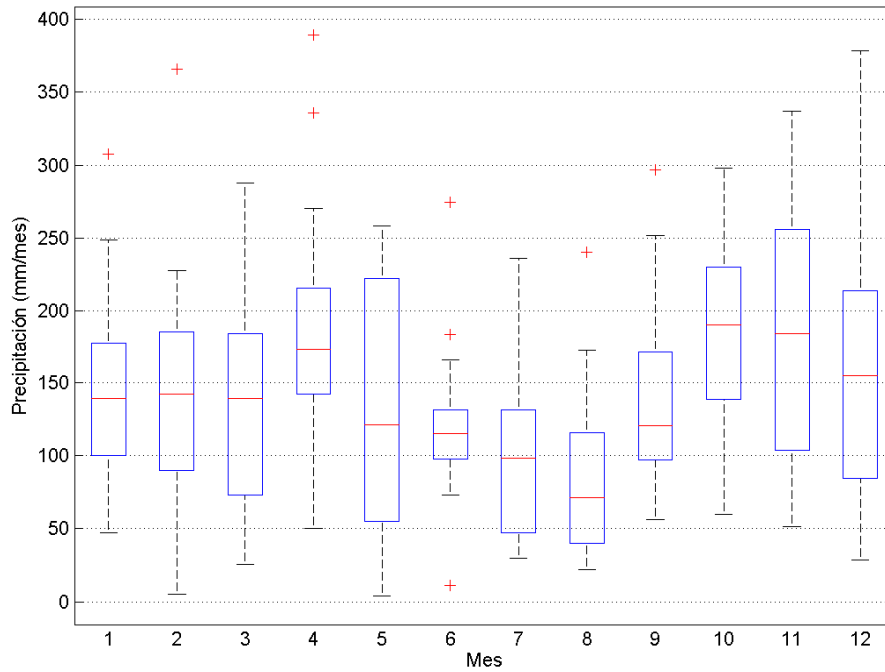


Figura 23. Rangos de valores de la precipitación media mensual para la subcuenca nº 1.

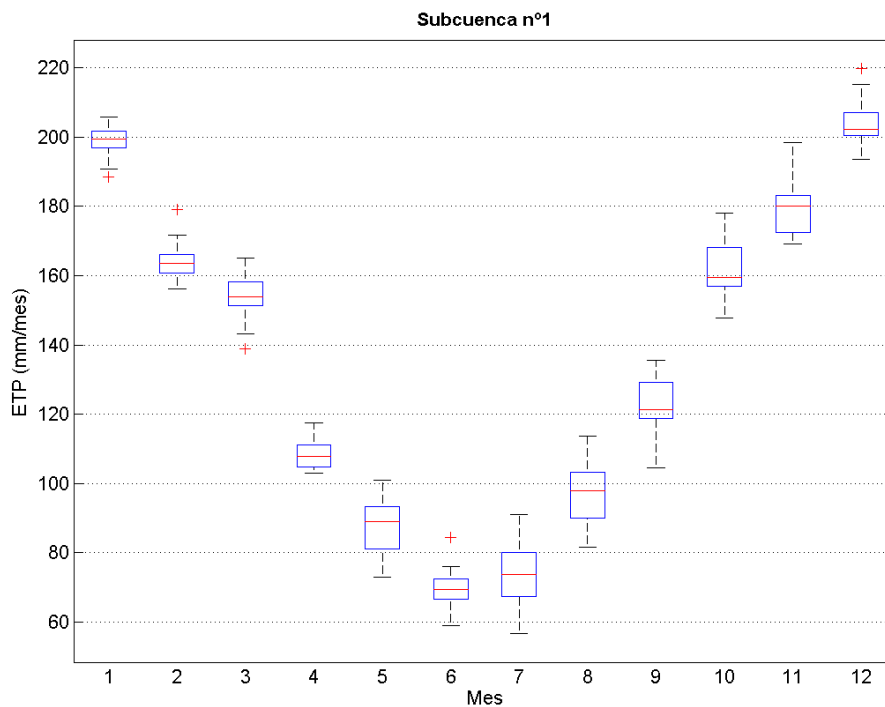


Figura 24. Rangos de valores de la ETP media mensual para la subcuenca nº 1.

2.2. Subcuenca 2

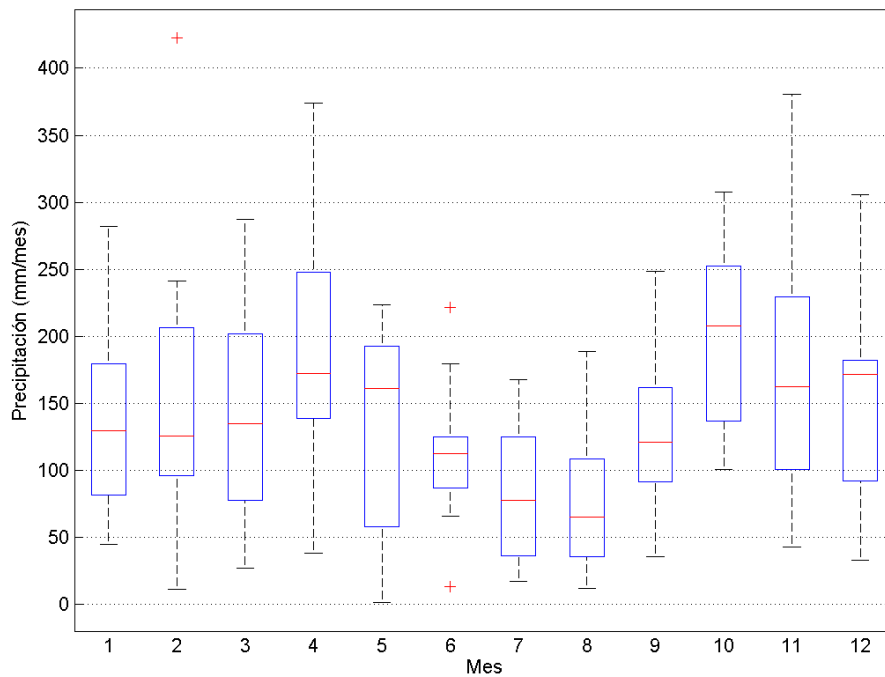


Figura 25. Rangos de valores de la precipitación media mensual para la subcuenca nº 2.

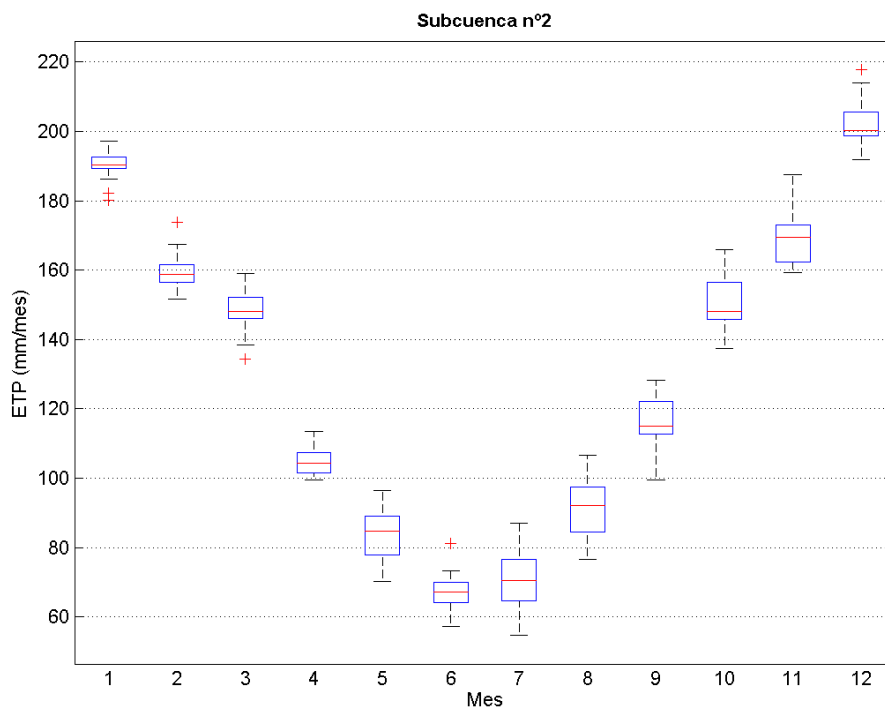


Figura 26. Rangos de valores de la precipitación media mensual para la subcuenca nº 2.

2.3. Subcuenca 3

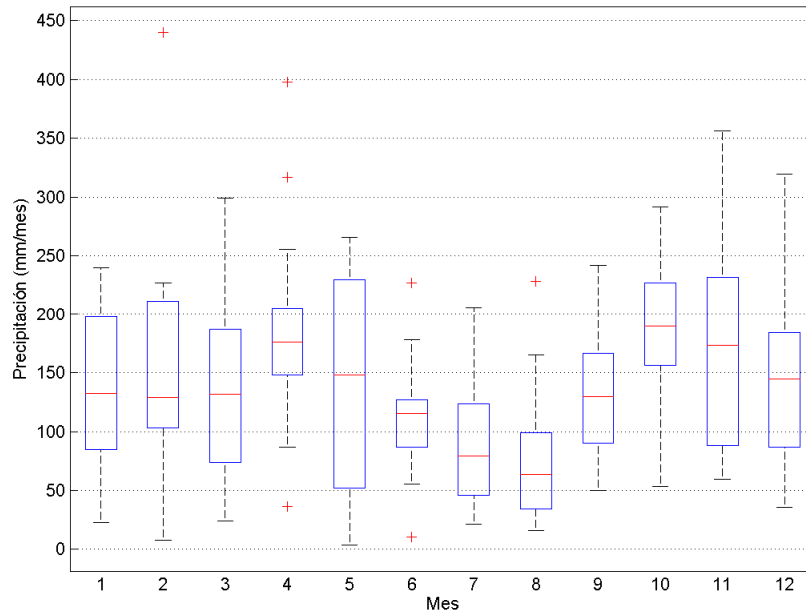


Figura 27. Rangos de valores de la precipitación media mensual para la subcuenca nº 3.

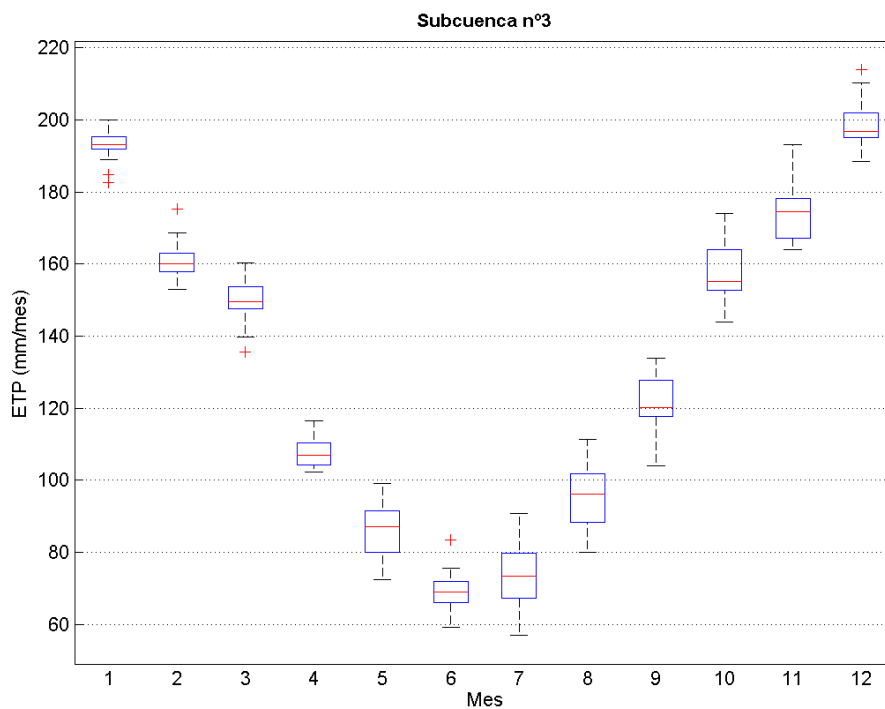


Figura 28. Rangos de valores de la precipitación media mensual para la subcuenca nº 3.

2.4. Subcuenca 4

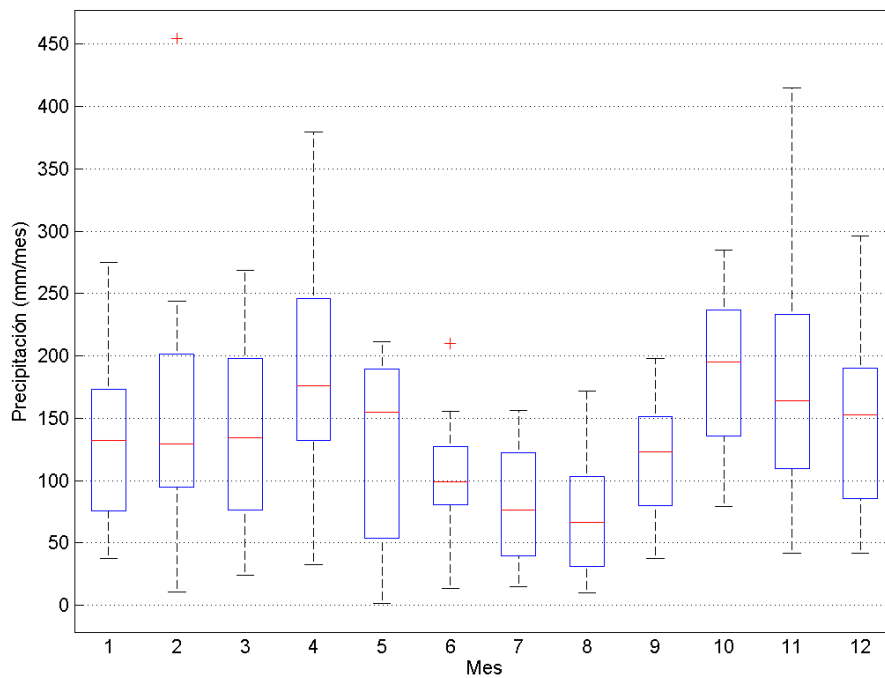


Figura 29. Rangos de valores de la precipitación media mensual para la subcuenca nº 4.

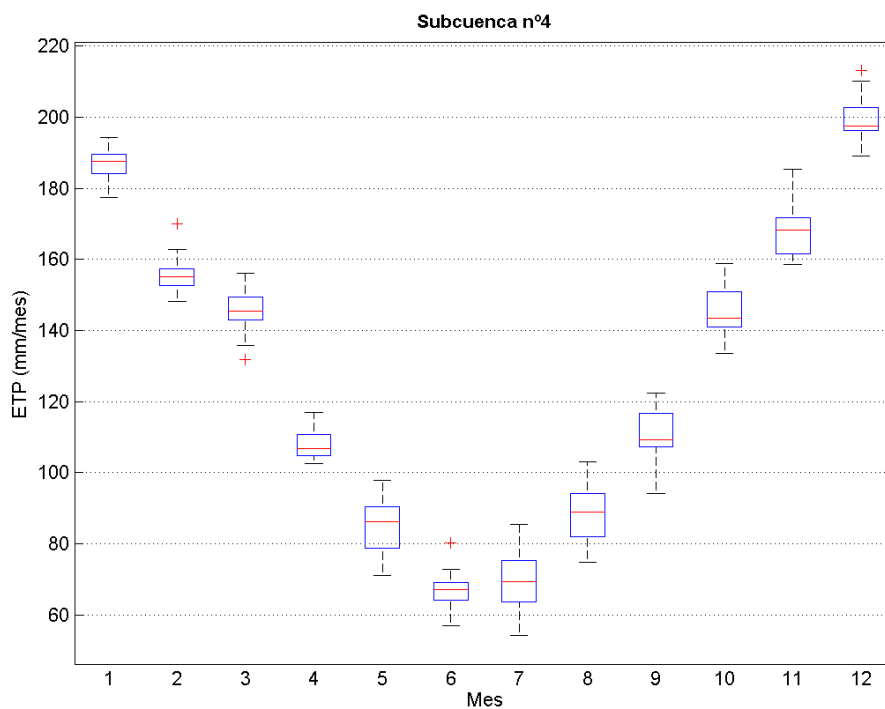


Figura 30. Rangos de valores de la precipitación media mensual para la subcuenca nº 4.

2.5. Subcuenca 5

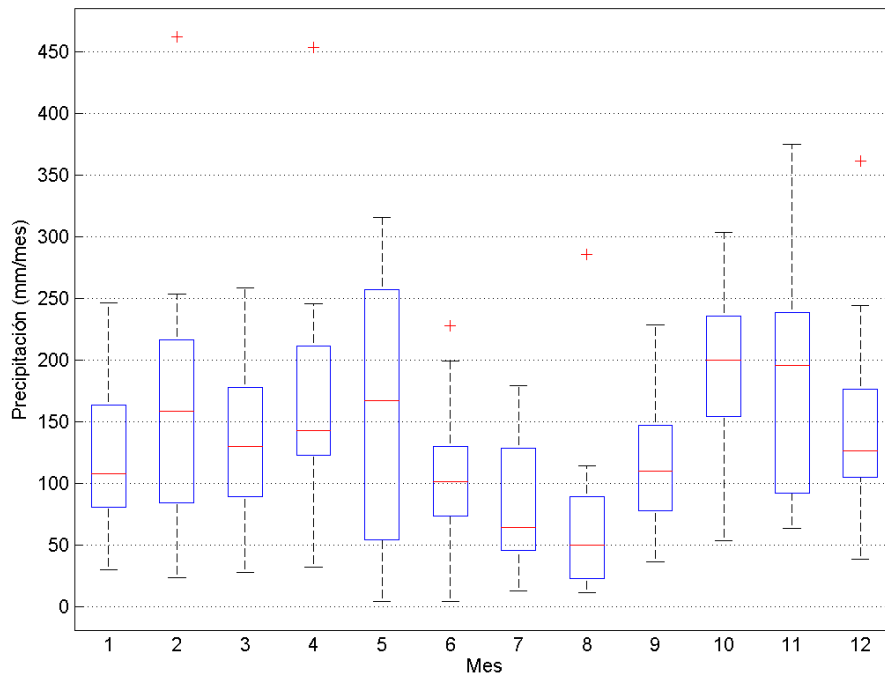


Figura 31. Rangos de valores de la precipitación media mensual para la subcuenca nº 5.

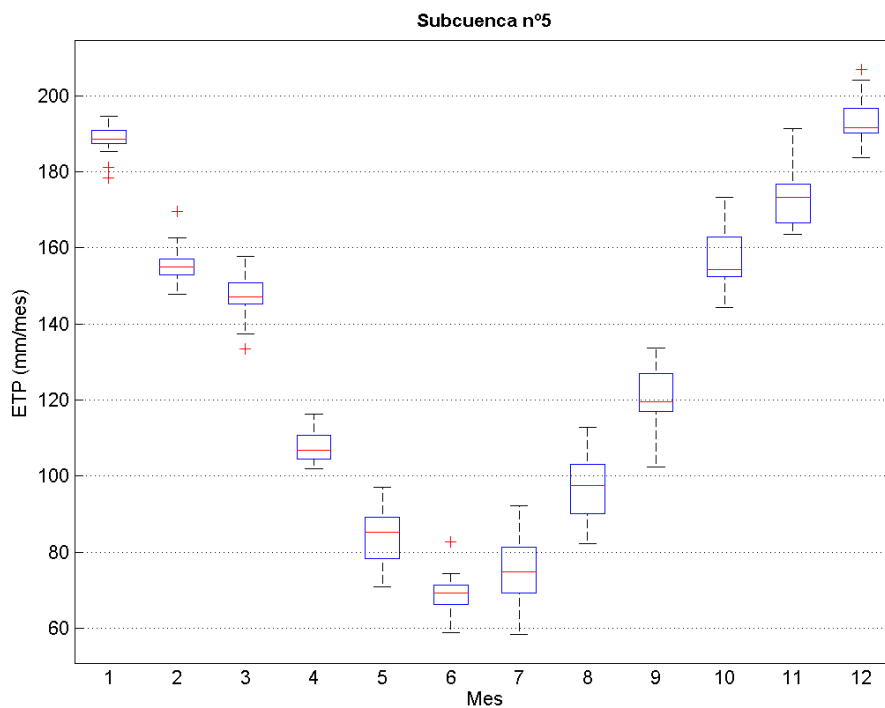


Figura 32. Rangos de valores de la precipitación media mensual para la subcuenca nº 5.

2.6. Subcuenca 6

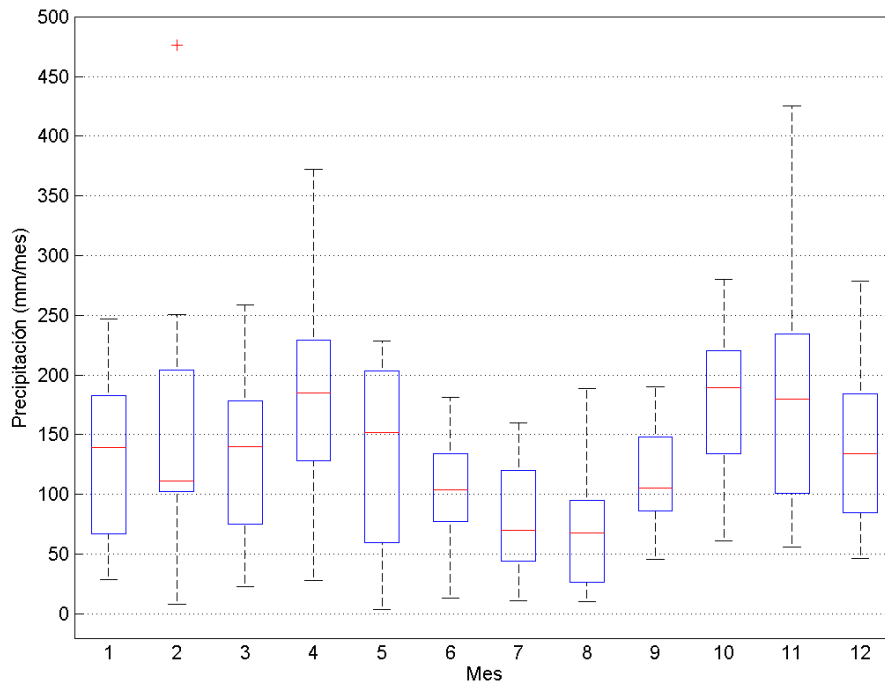


Figura 33. Rangos de valores de la precipitación media mensual para la subcuenca nº 6.

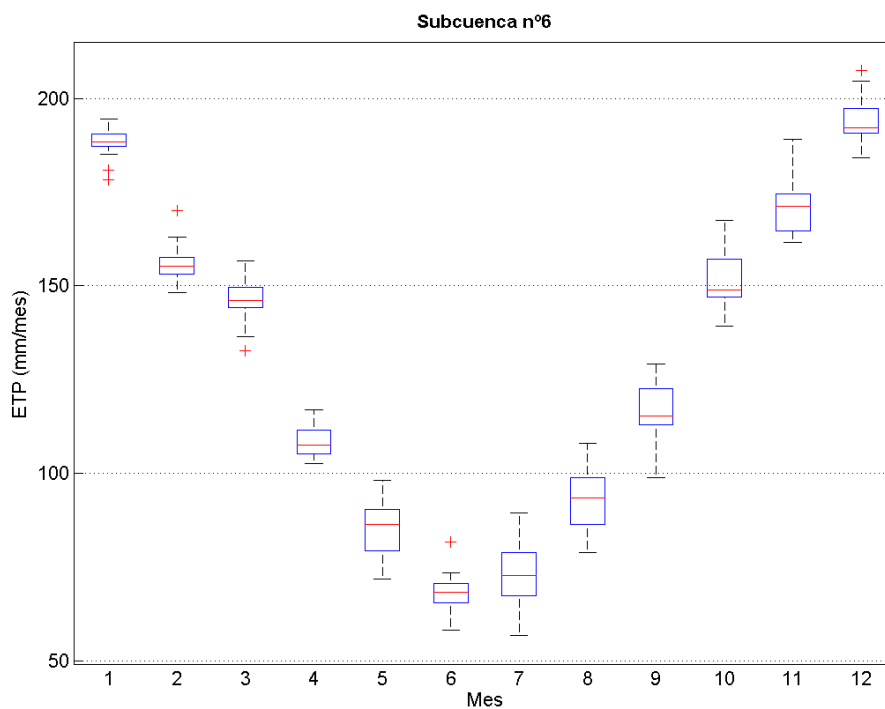


Figura 34. Rangos de valores de la precipitación media mensual para la subcuenca nº 6.

2.7. Subcuenca 7

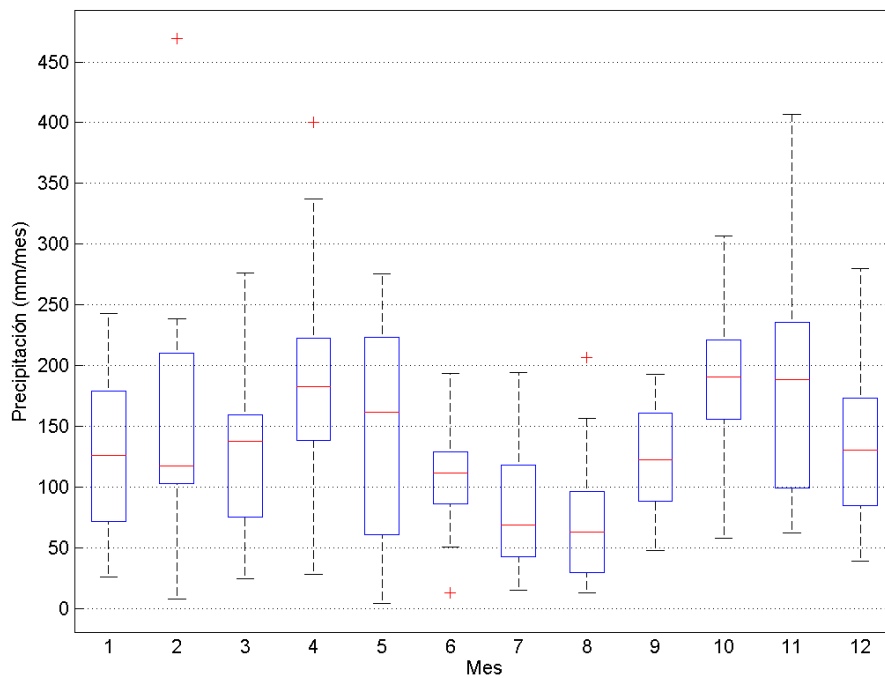


Figura 35. Rangos de valores de la precipitación media mensual para la subcuenca nº 7.

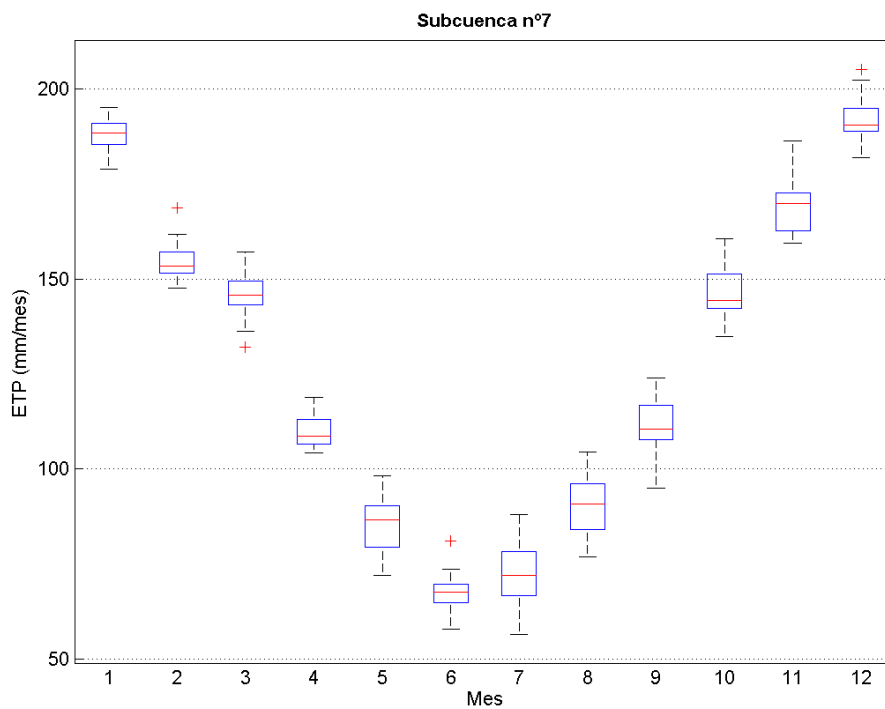


Figura 36. Rangos de valores de la precipitación media mensual para la subcuenca nº 7.

2.8. Subcuenca 8

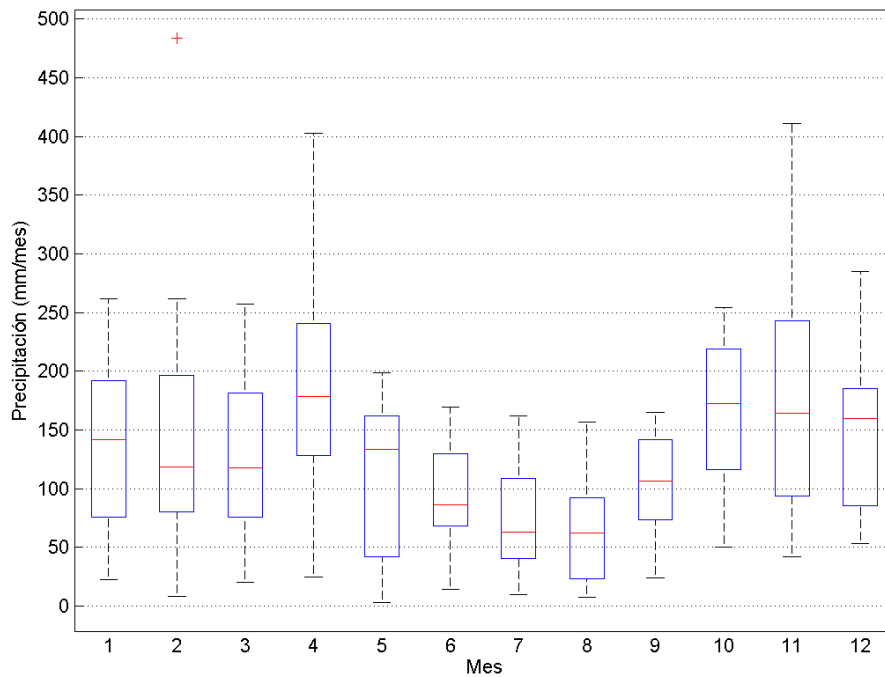


Figura 37. Rangos de valores de la precipitación media mensual para la subcuenca nº 8.

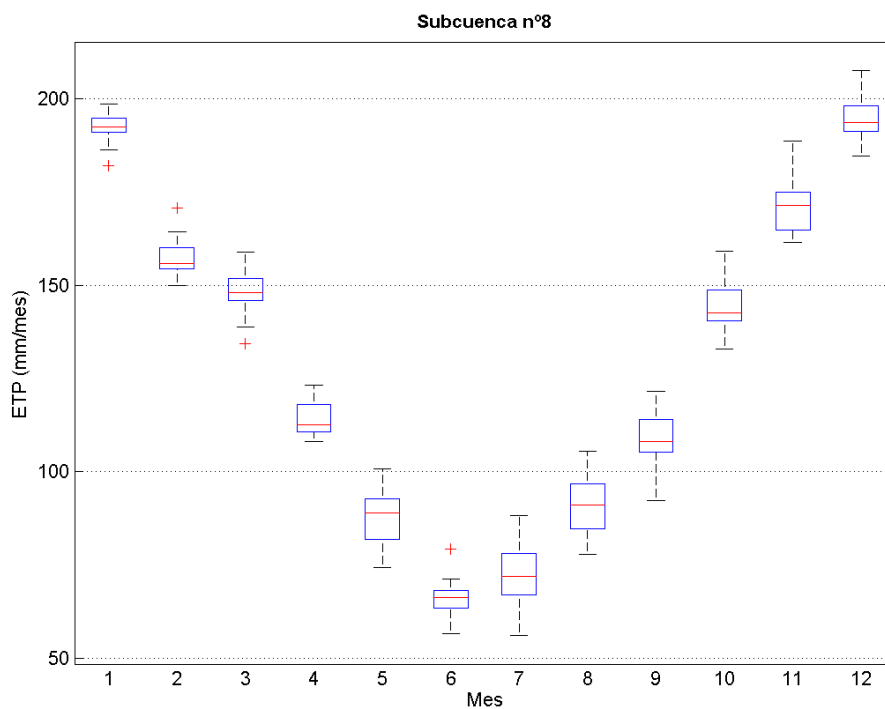


Figura 38. Rangos de valores de la precipitación media mensual para la subcuenca nº 8.

2.9. Subcuenca 9

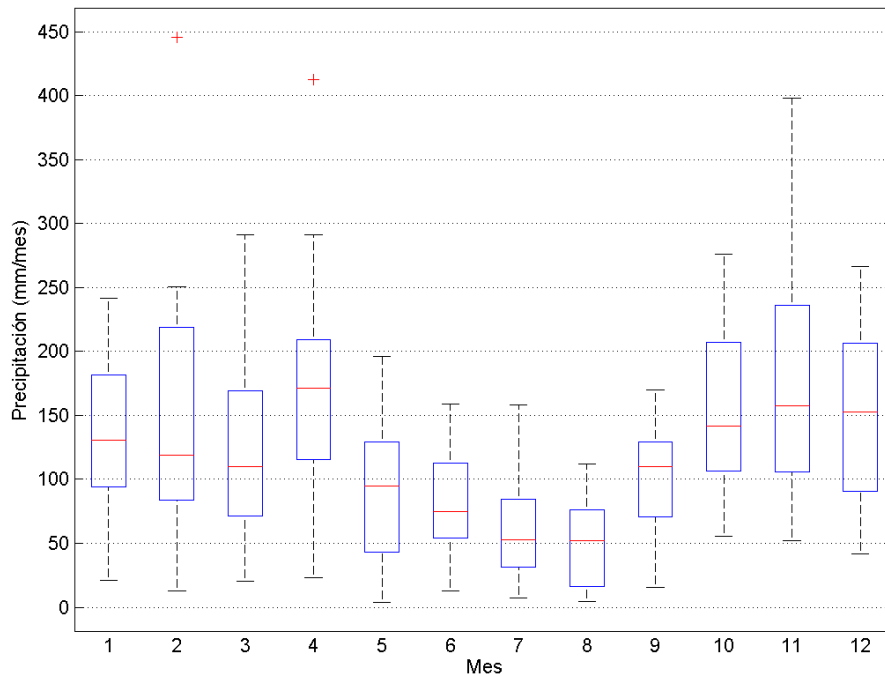


Figura 39. Rangos de valores de la precipitación media mensual para la subcuenca nº 9.

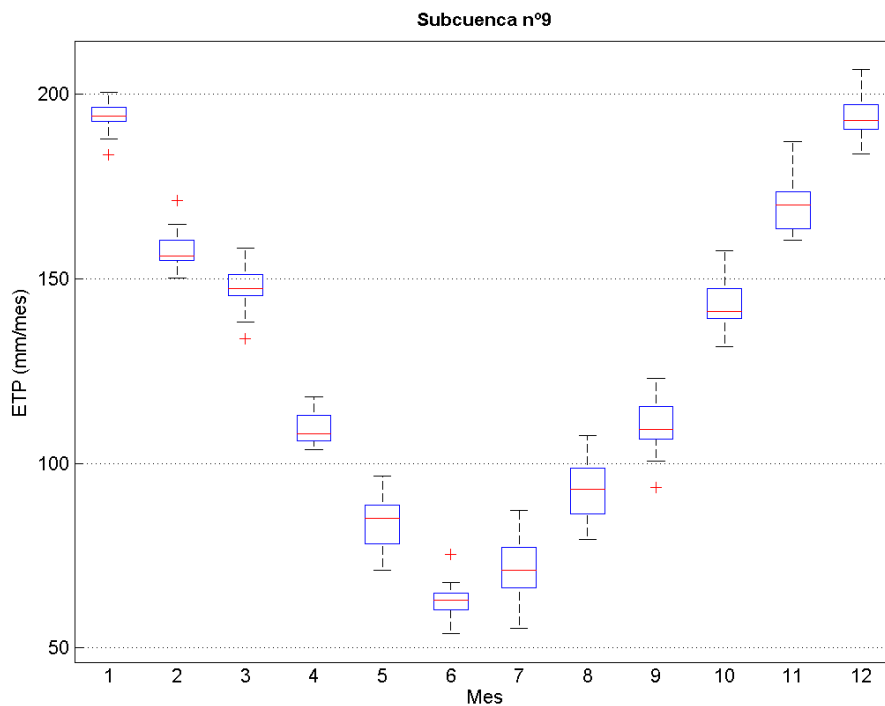


Figura 40. Rangos de valores de la precipitación media mensual para la subcuenca nº 9.

2.10. Cuenca del Tebicuary

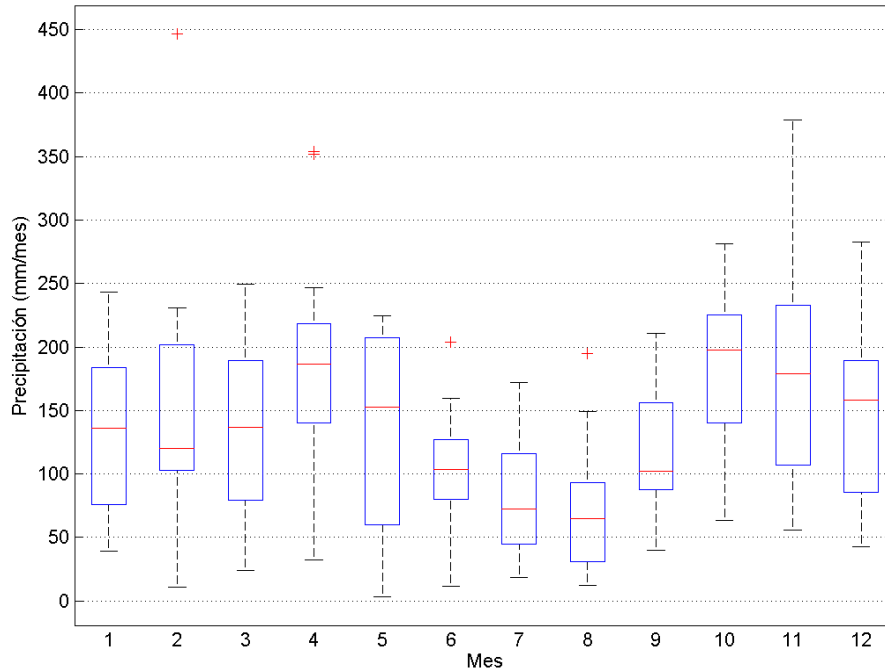


Figura 41. Rangos de valores de la precipitación media mensual para la cuenca del Tebicuary.

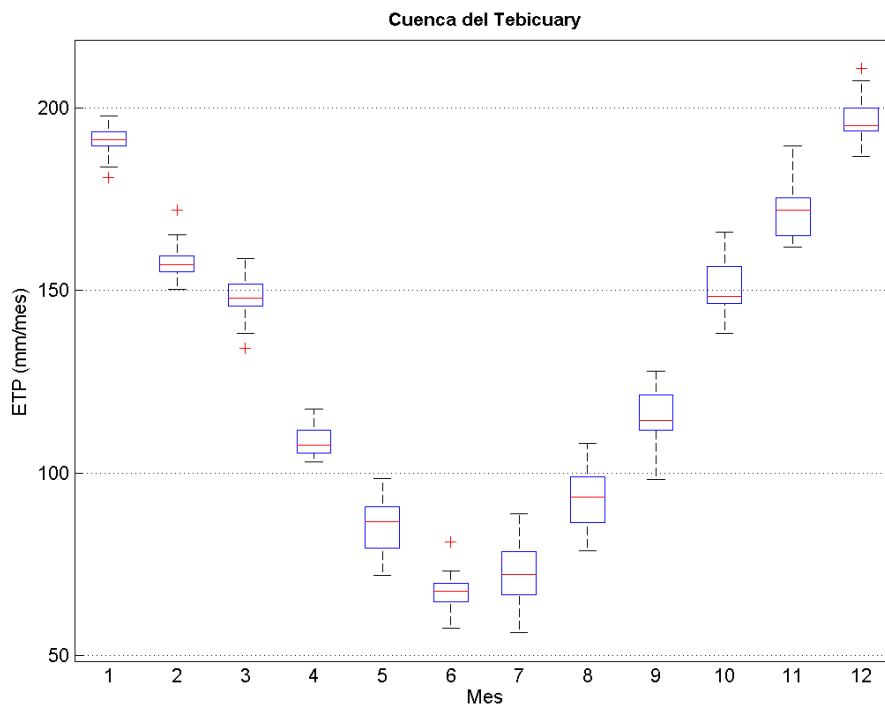


Figura 42. Rangos de valores de la precipitación media mensual para la cuenca del Tebicuary.

APÉNDICE 3

REGÍMENES DE CAUDALES POR SUBCUENCAS

1. RÉGIMEN DE CAUDALES POR SUBCUENCAS

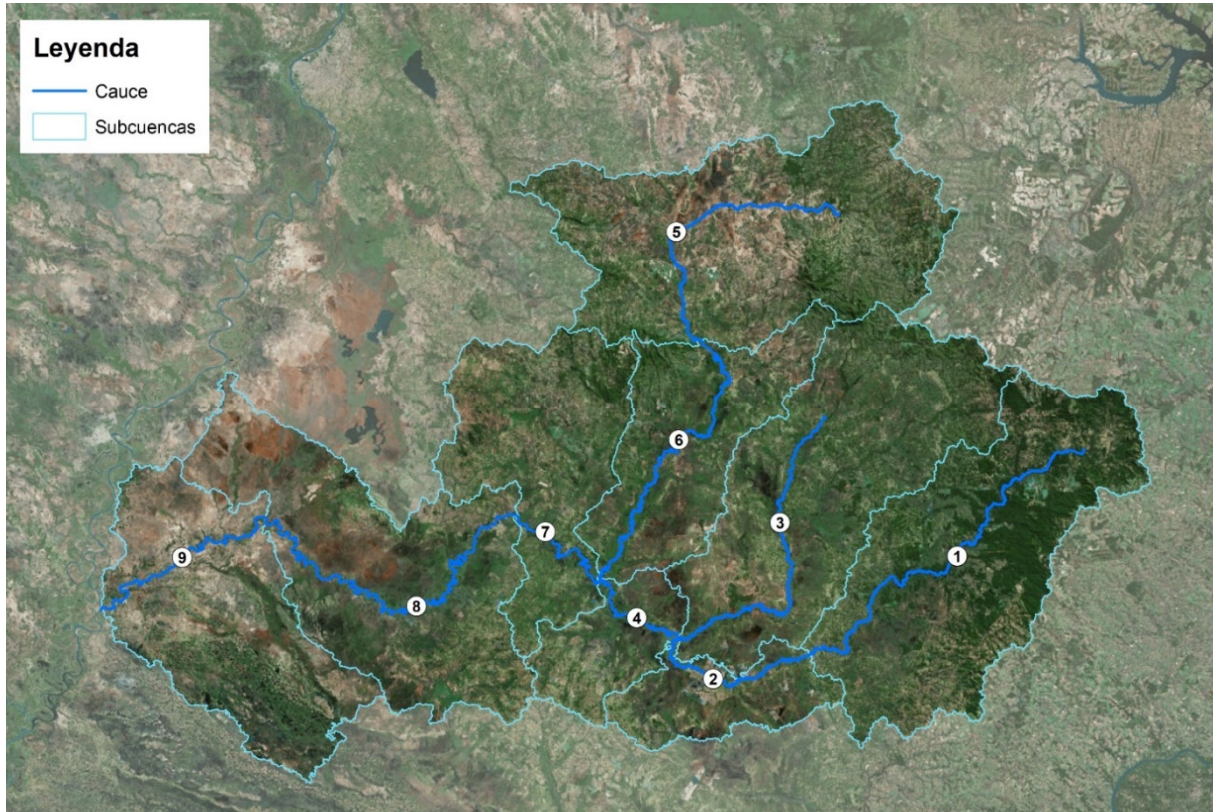


Figura 1. Subcuencas consideradas para el modelado de la cuenca del Tebicuary.

SUBCUENCA	NOMBRE EXTENSO-DESCRIPCIÓN
SC-1	Alto Tebicuary I (hasta Yuty aprox.)
SC-2	Alto Tebicuary II (hasta confluencia del Pirapó)
SC-3	Cuenca del Pirapó
SC-4	Medio Tebicuary I
SC-5	Alto Tebicuary Mi (hasta Iturbe aprox.)
SC-6	Bajo Tebicuary Mi
SC-7	Medio Tebicuary II (hasta Villa Florida)
SC-8	Bajo Tebicuary I
SC-9	Bajo Tebicuary II

Tabla 1. Hidrotoponimia utilizada en cada subcuenca.

1.1. Subcuenca 1

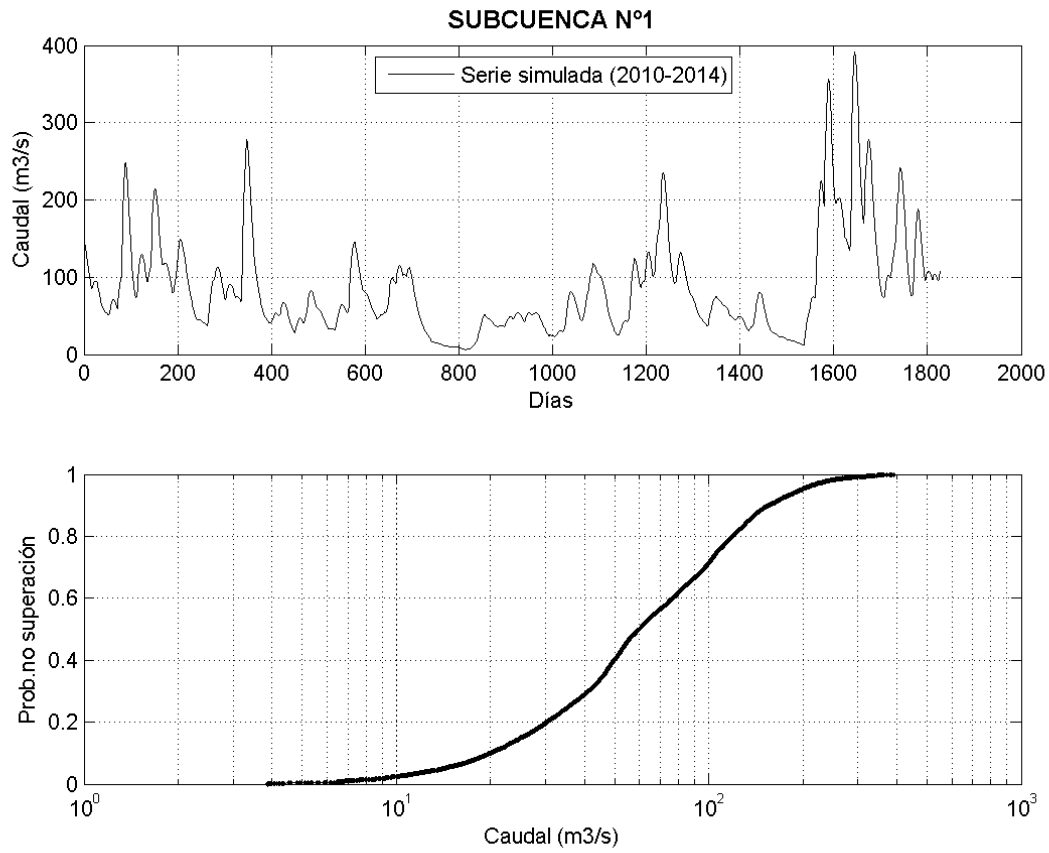


Figura 2. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-1.

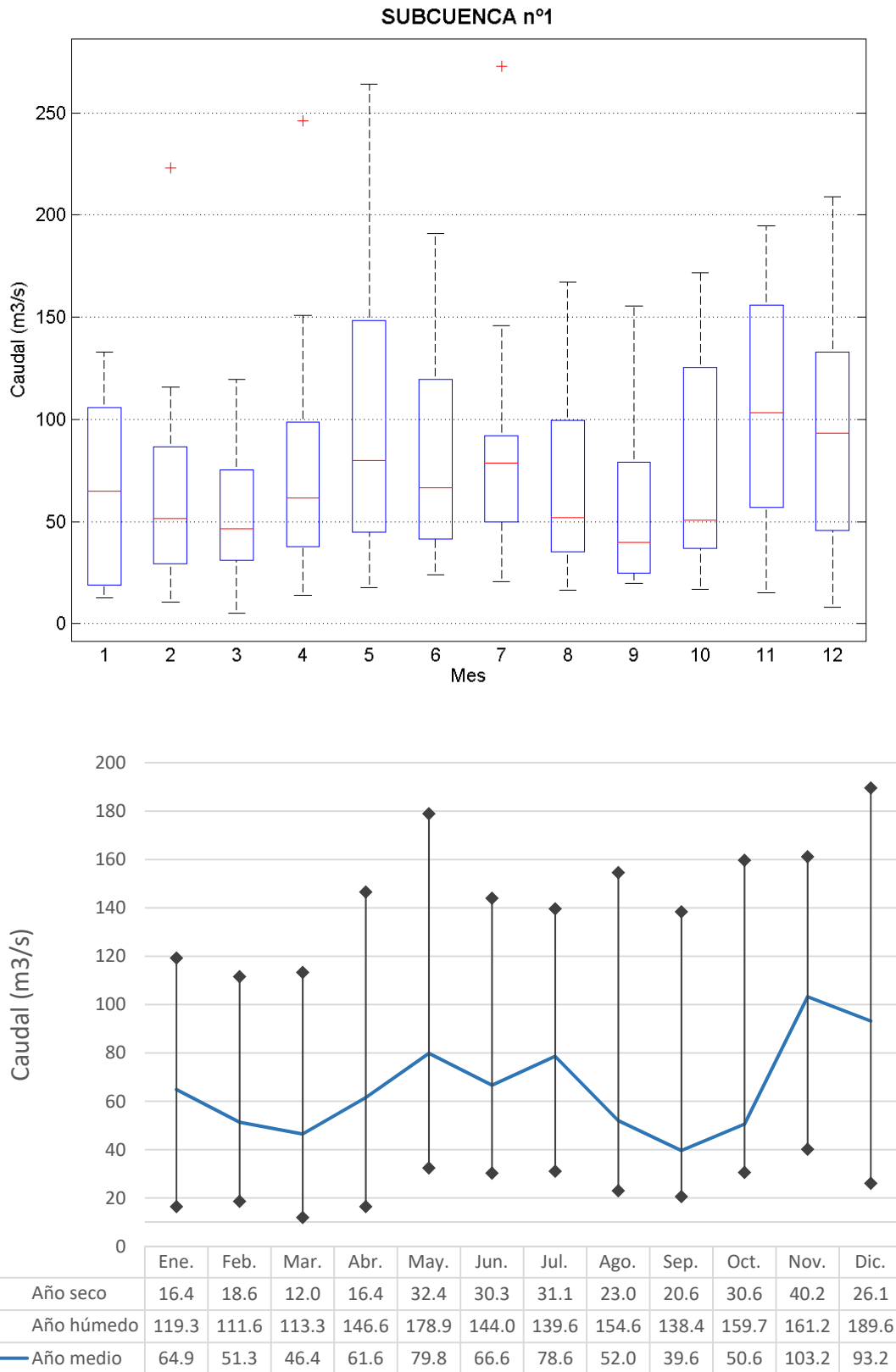


Figura 3. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-1.

1.2. Subcuenca 2

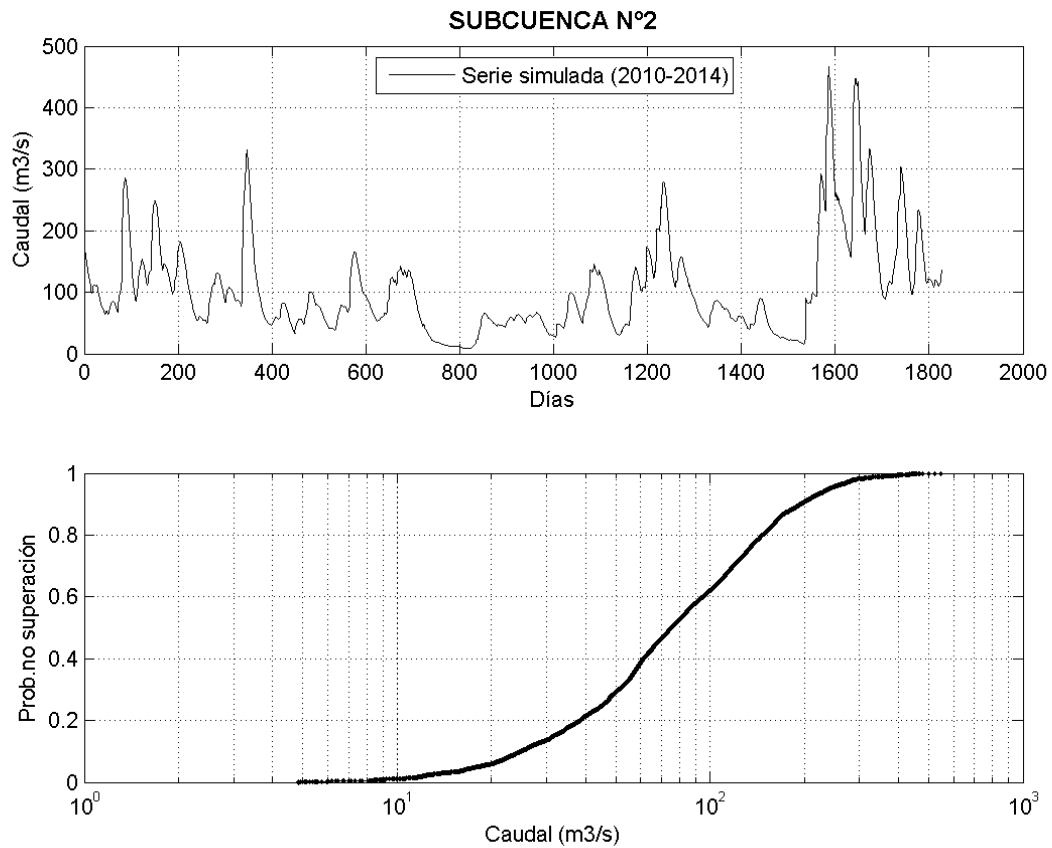


Figura 4. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-2.

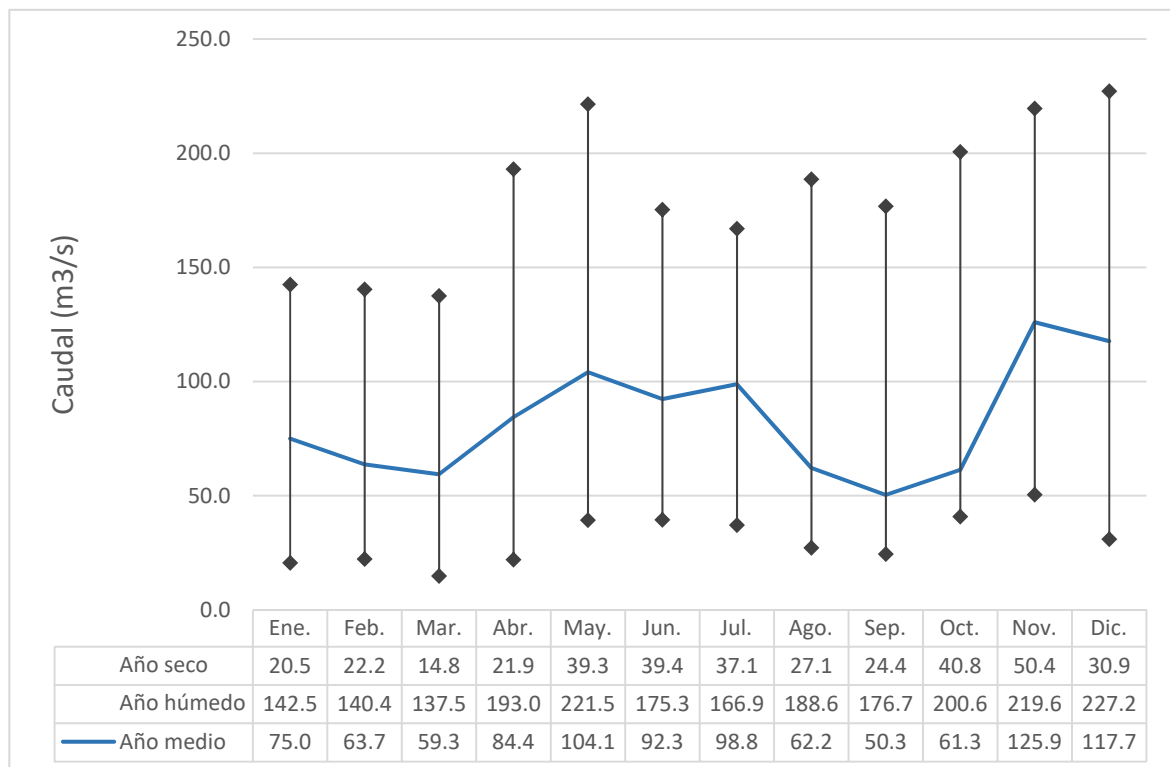
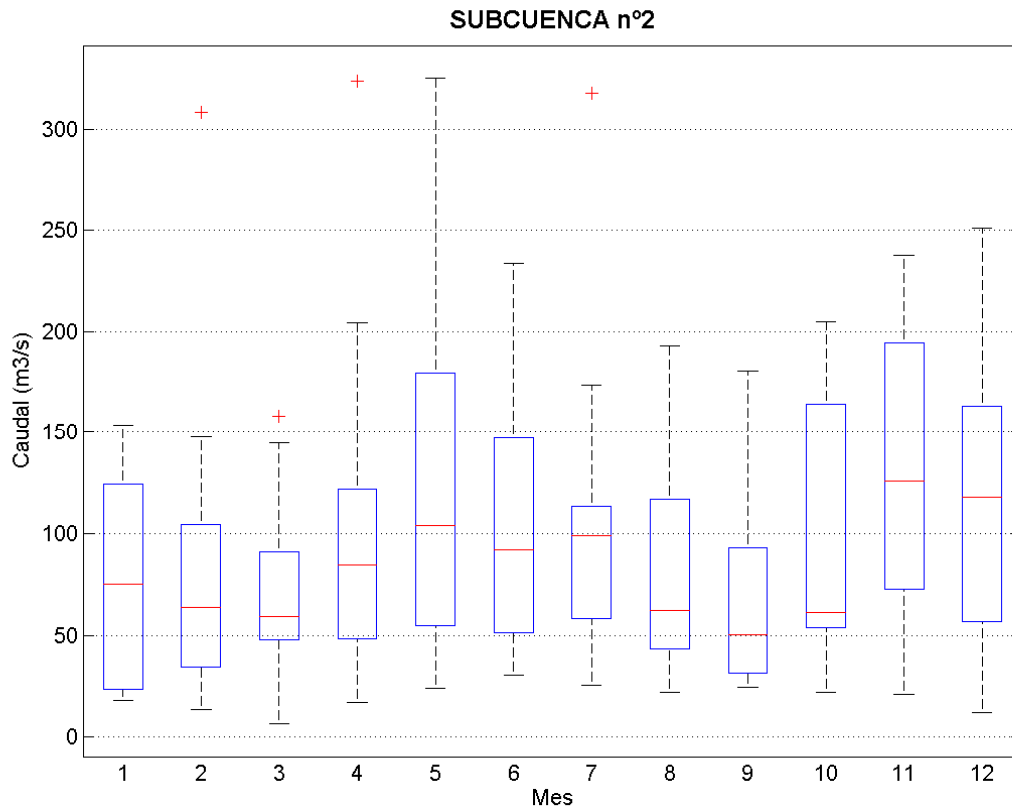


Figura 5. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-2.

1.3. Subcuenca 3

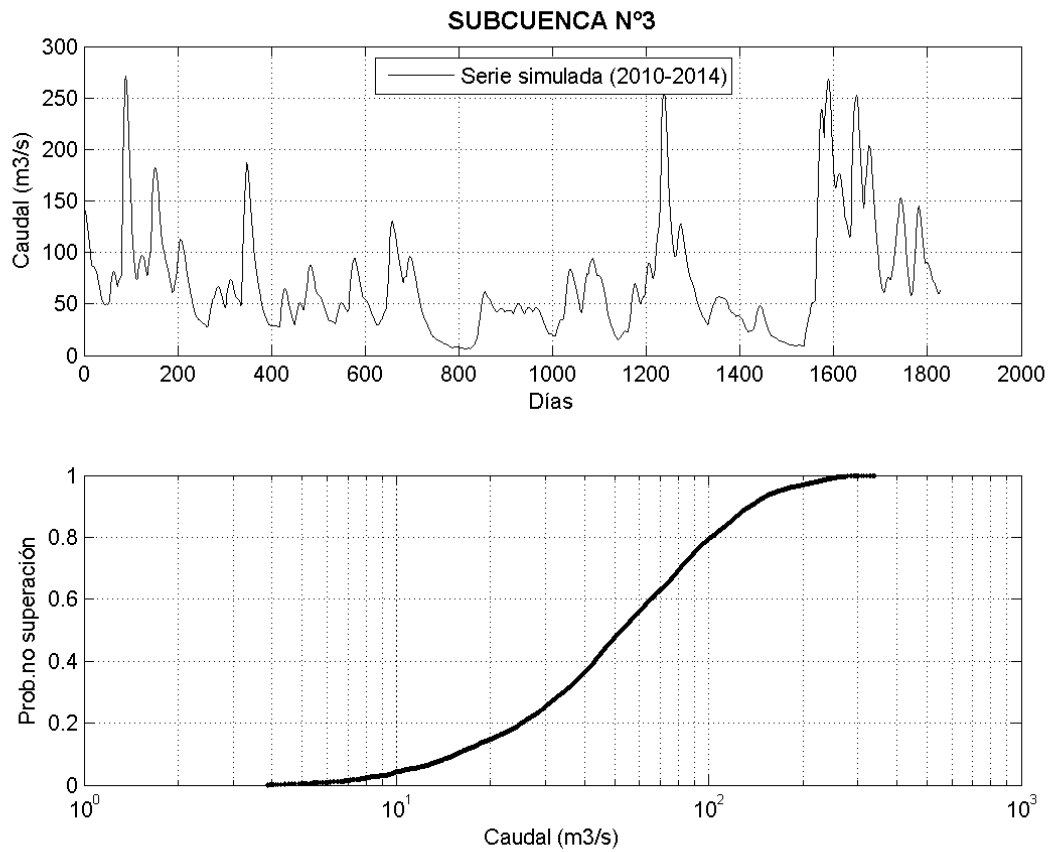


Figura 6. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-3.

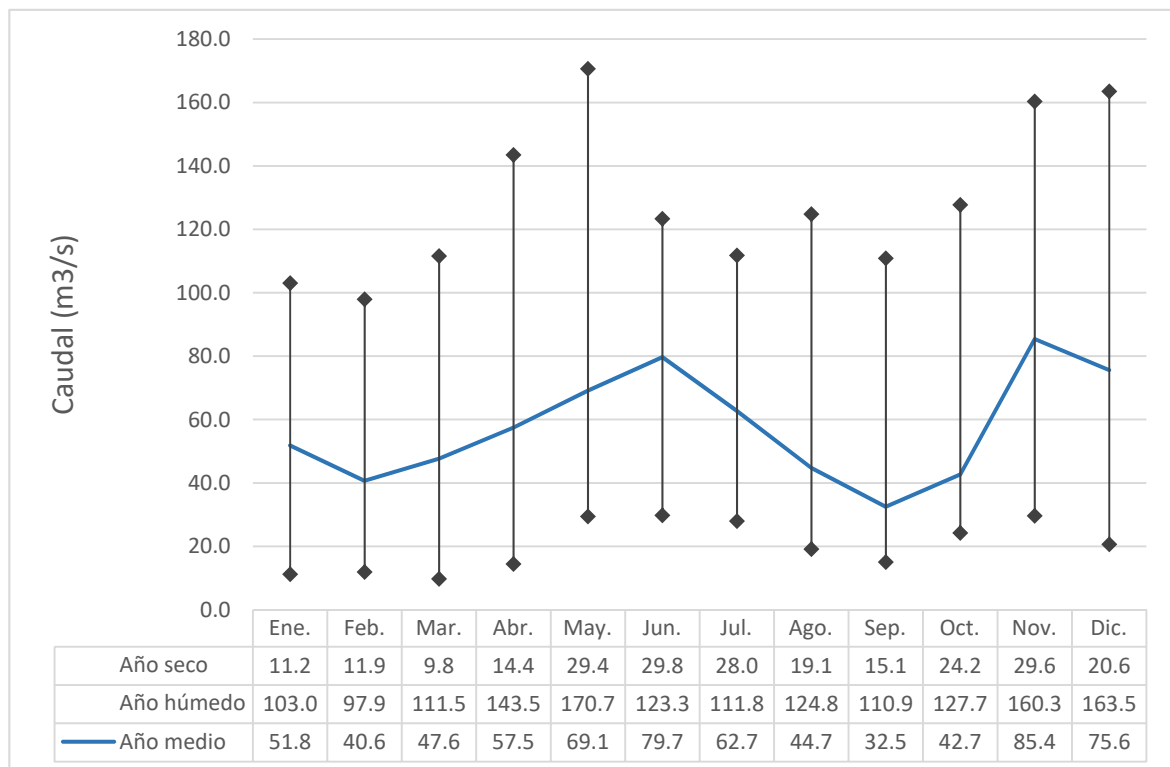
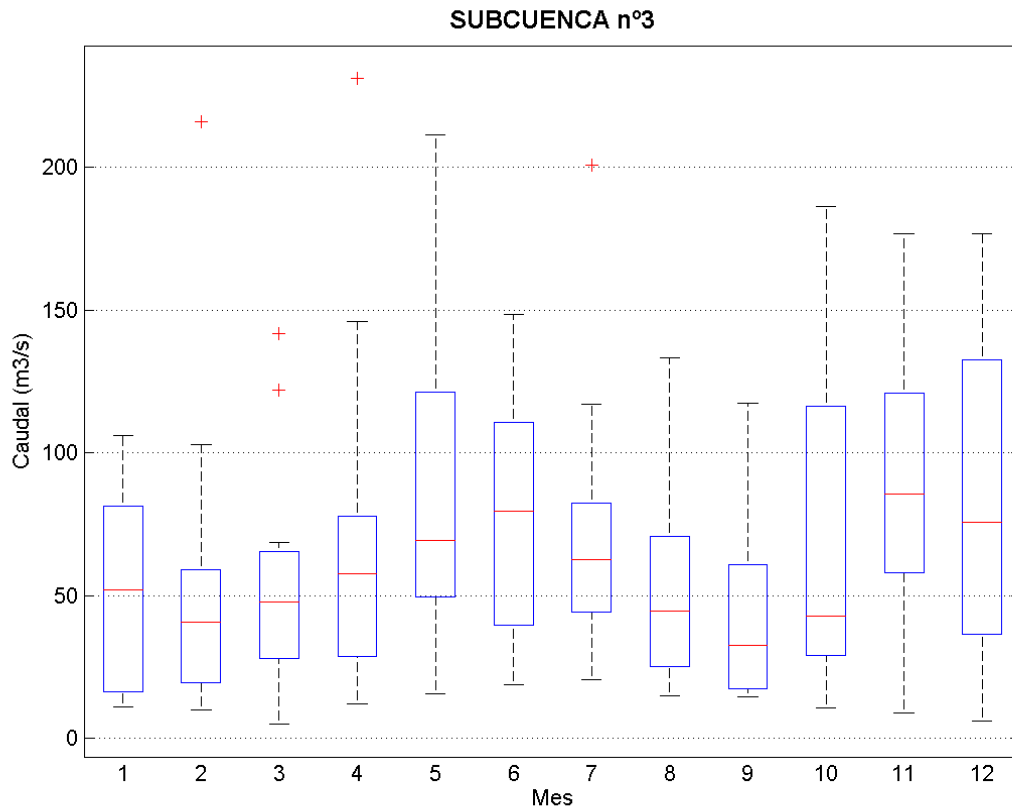


Figura 7. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-3.

1.4. Subcuenca 4

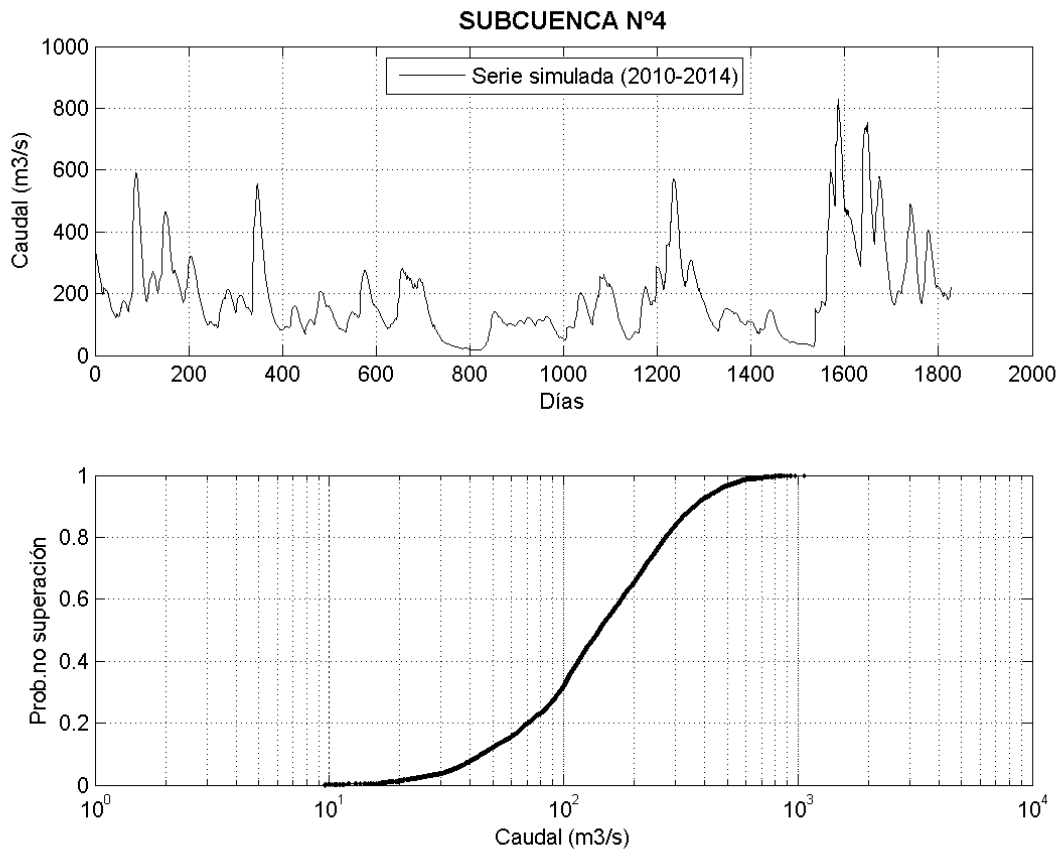


Figura 8. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-4.

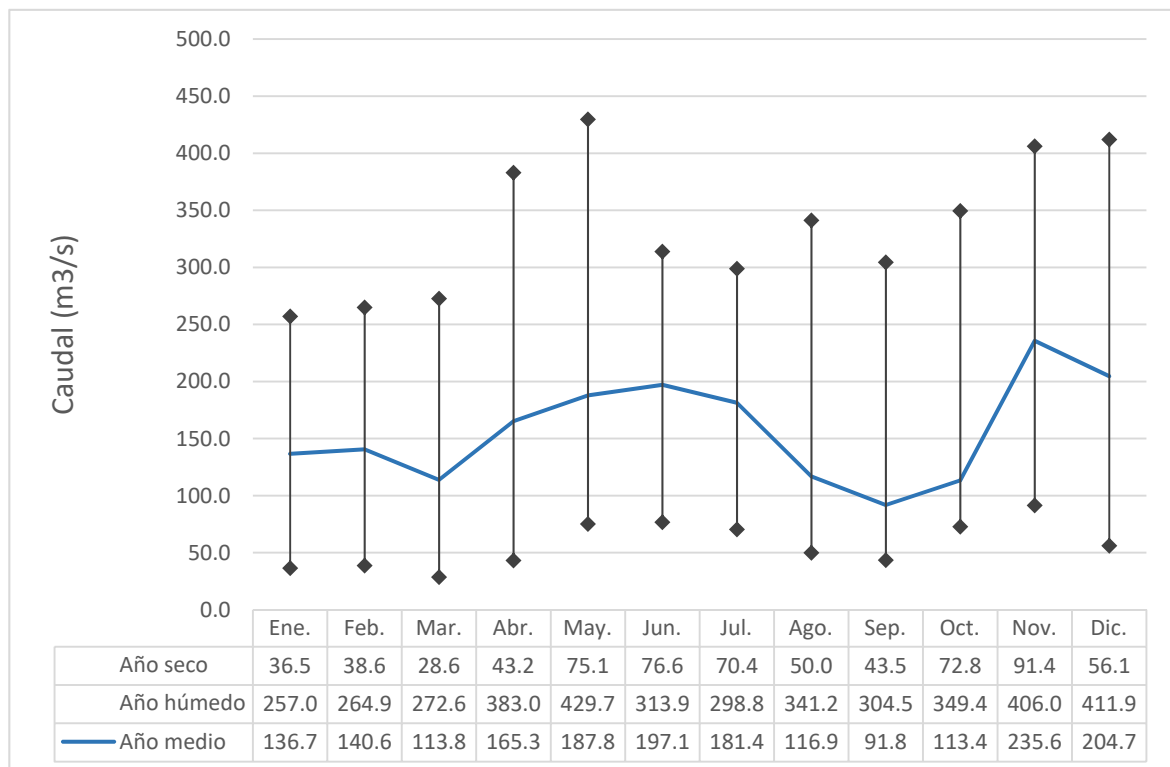
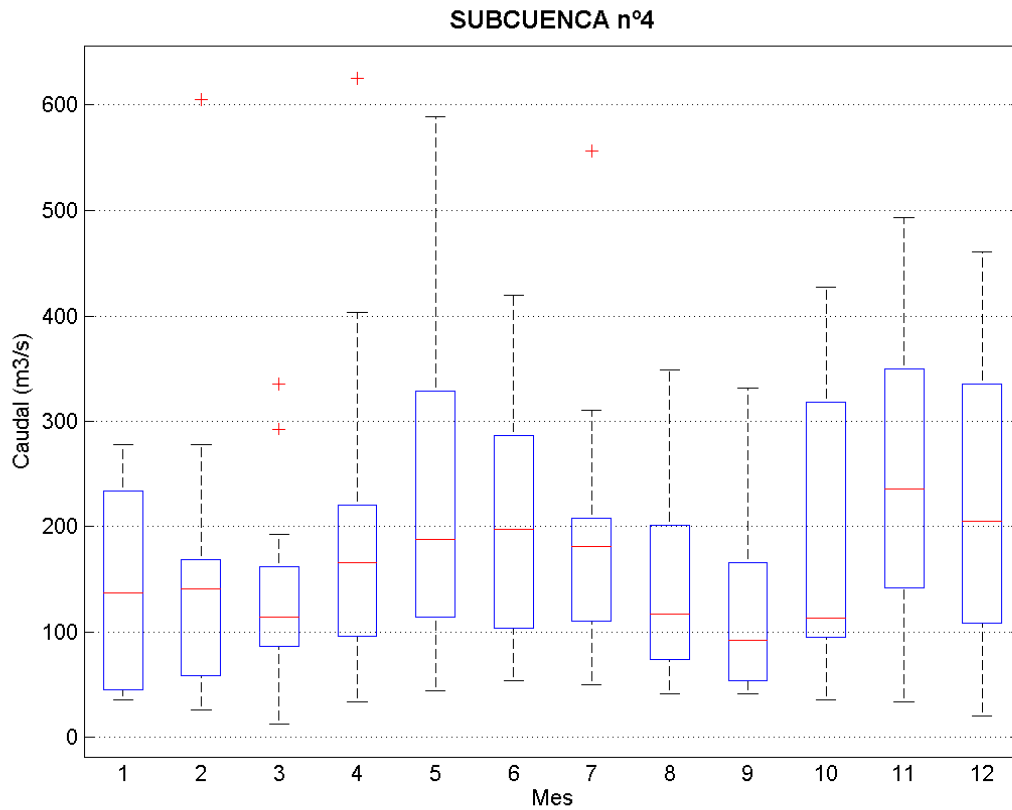


Figura 9. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-4.

1.5. Subcuenca 5

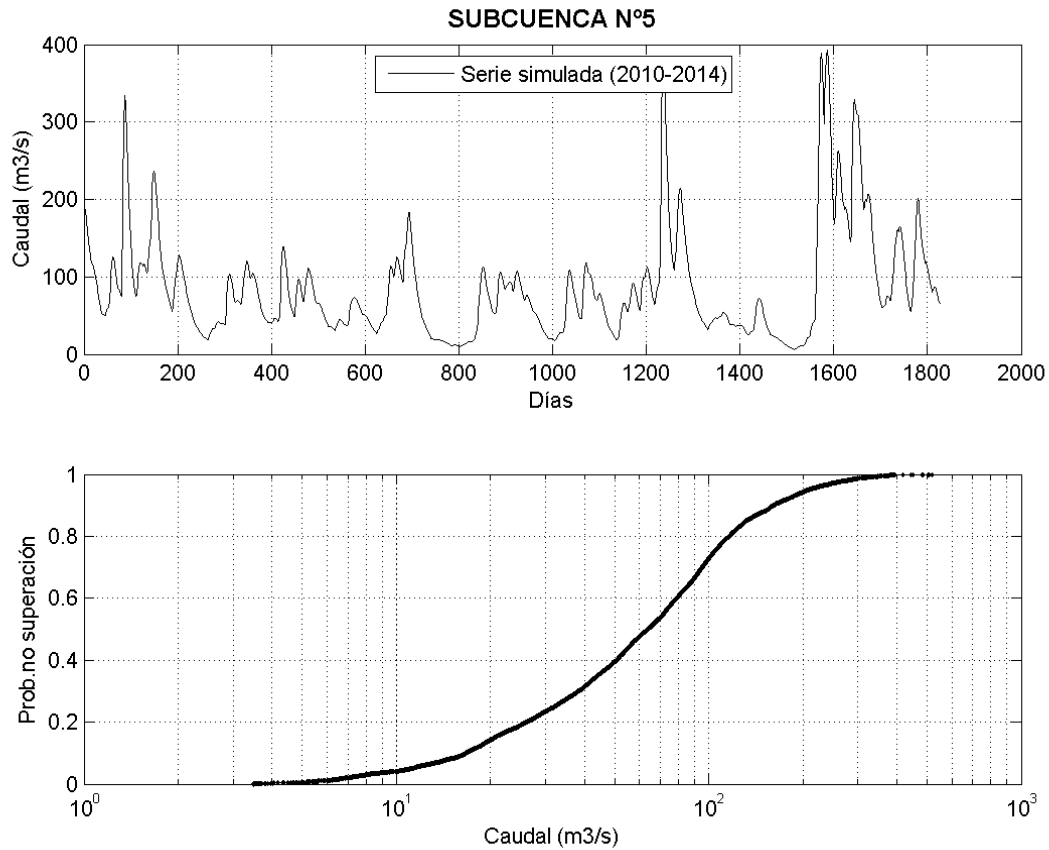


Figura 10. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-5.

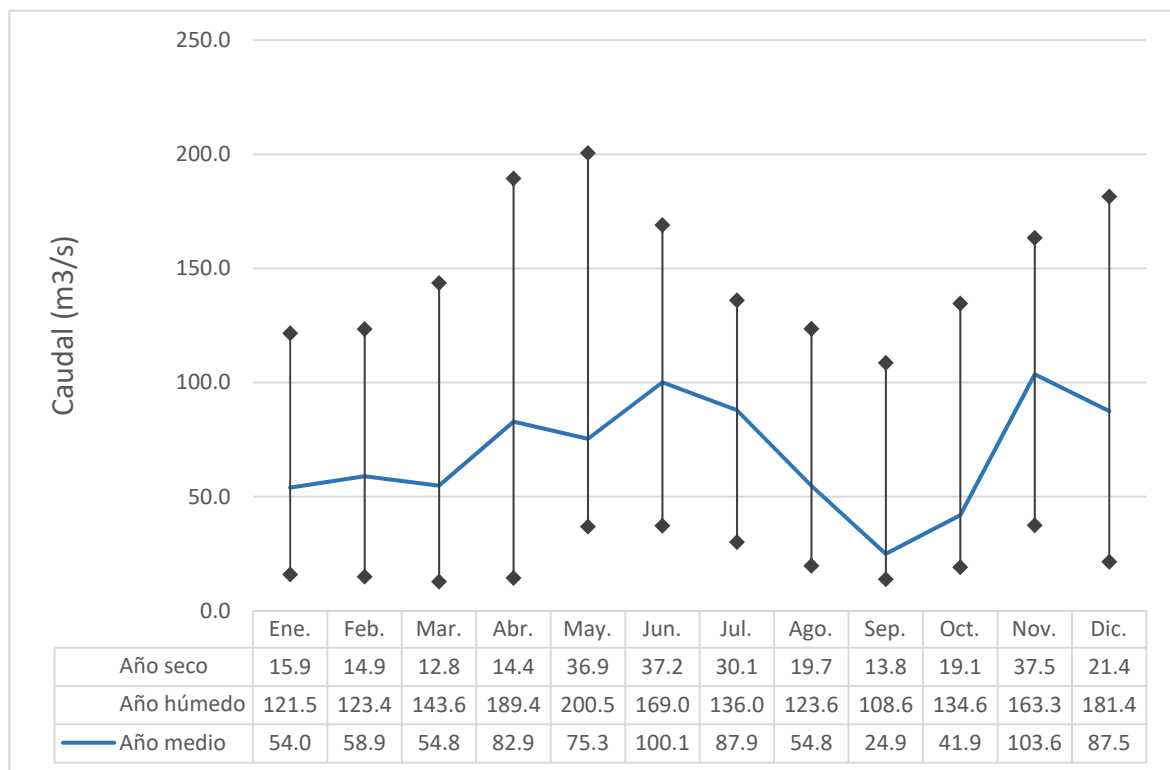
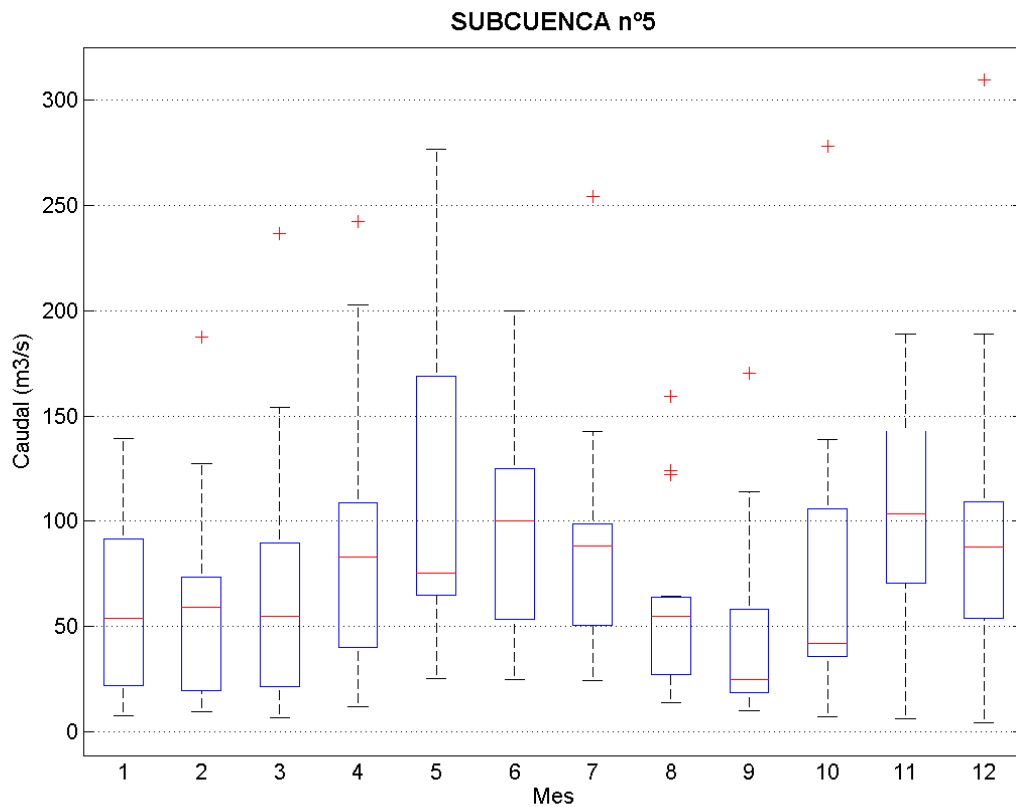


Figura 11. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-5.

1.6. Subcuenca 6

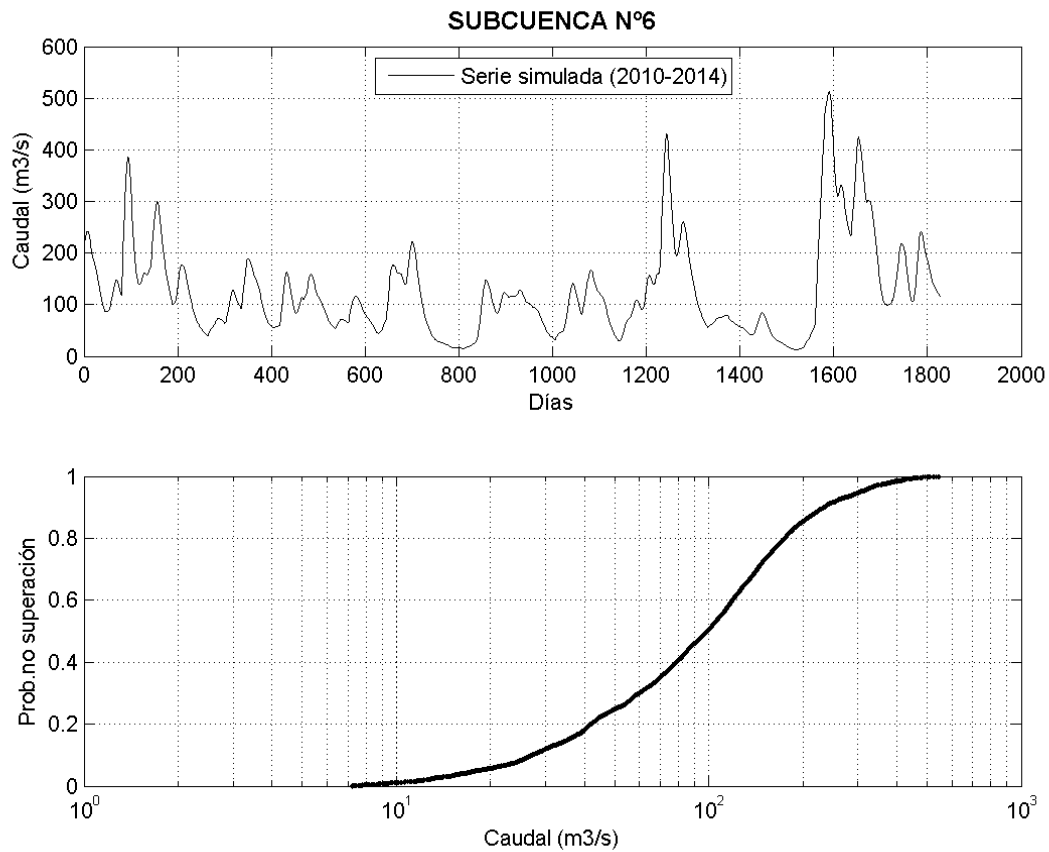


Figura 12. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-6.

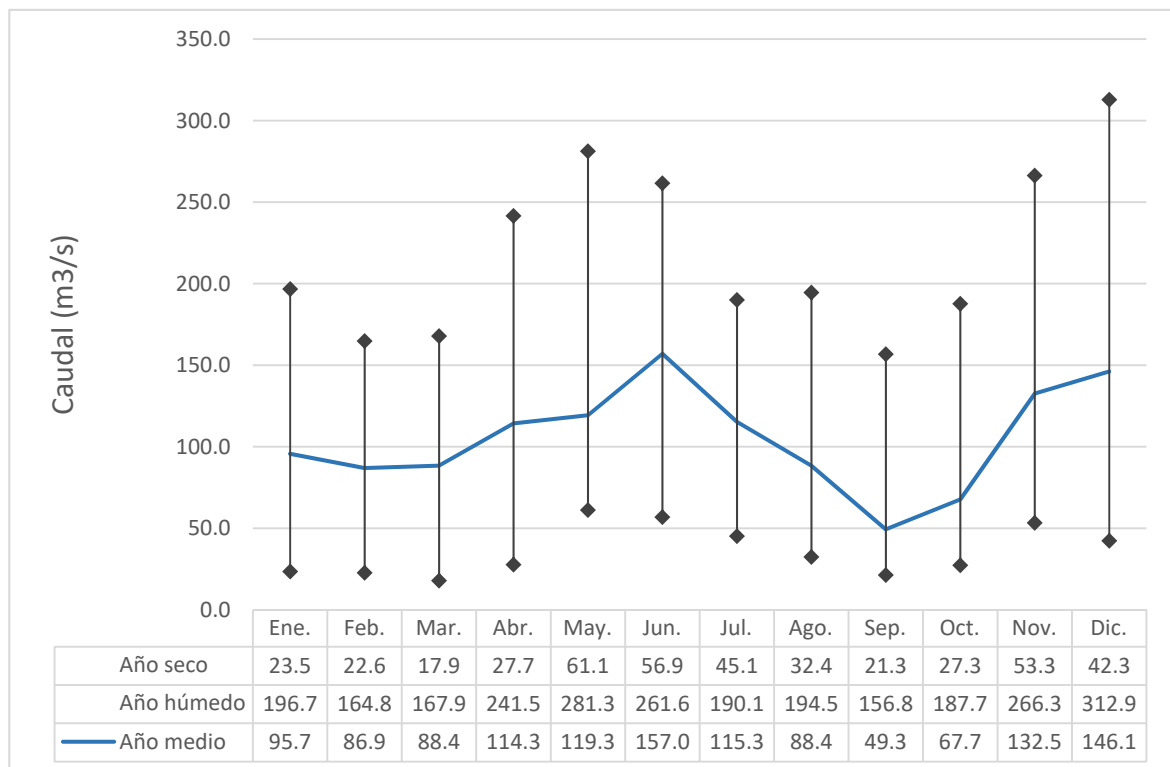
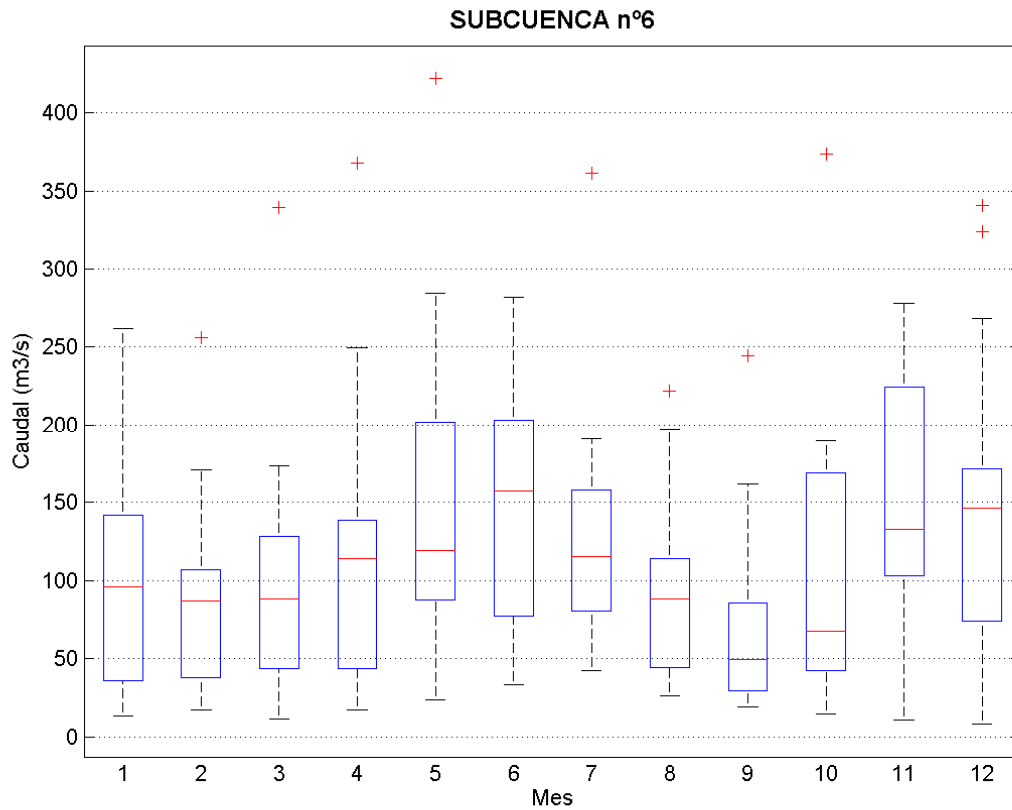


Figura 13. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-6.

1.7. Subcuenca 7

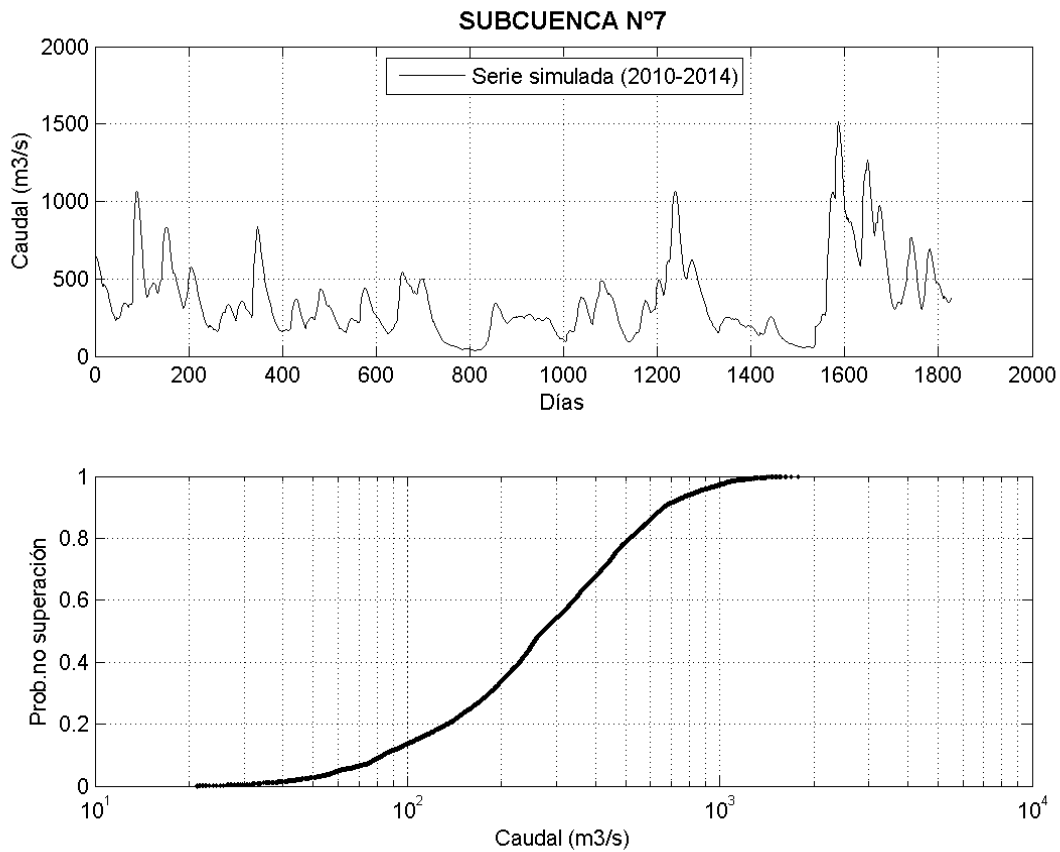


Figura 14. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-7.

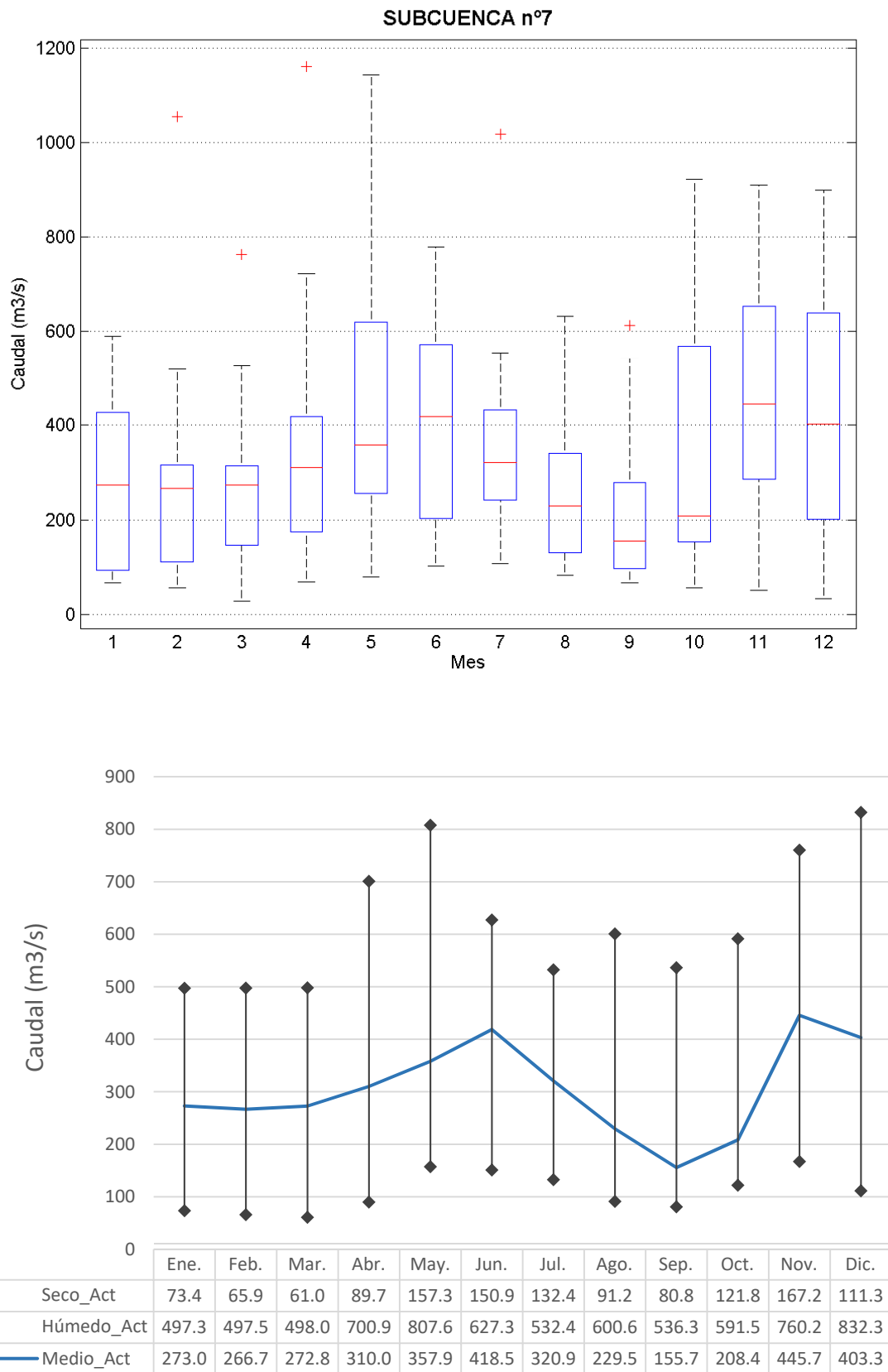


Figura 15. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-7.

1.8. Subcuenca 8

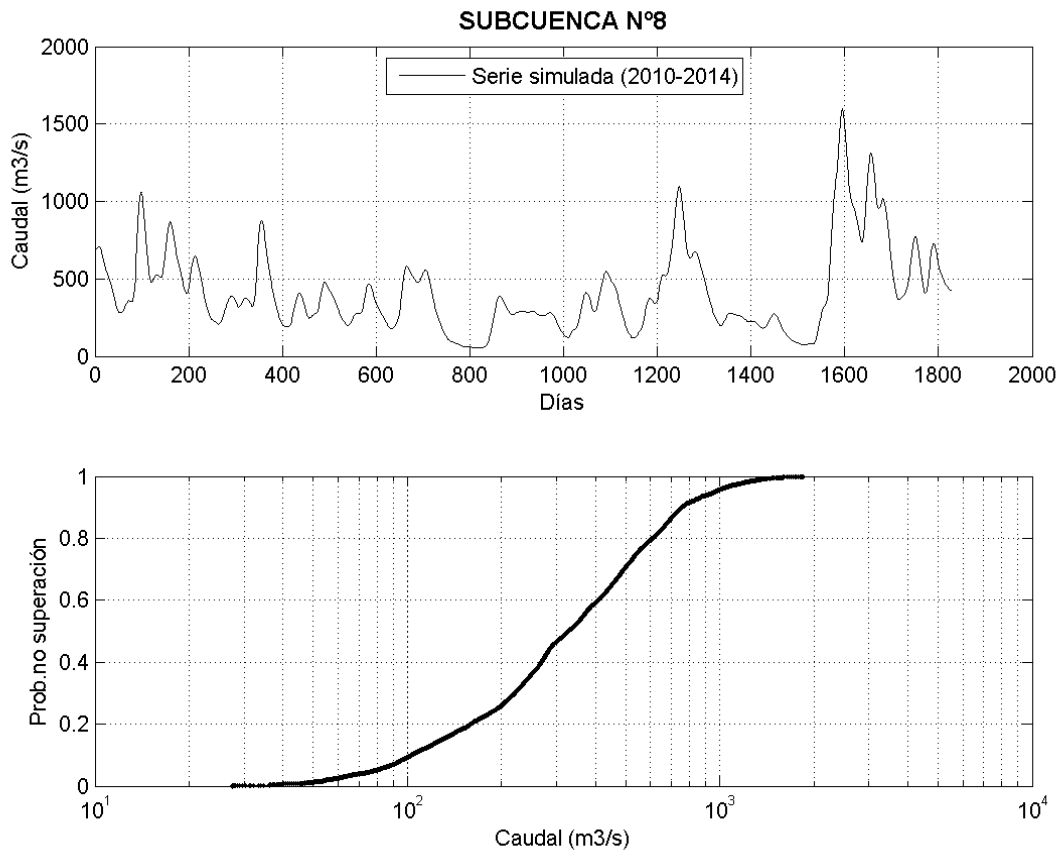


Figura 16. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-8.

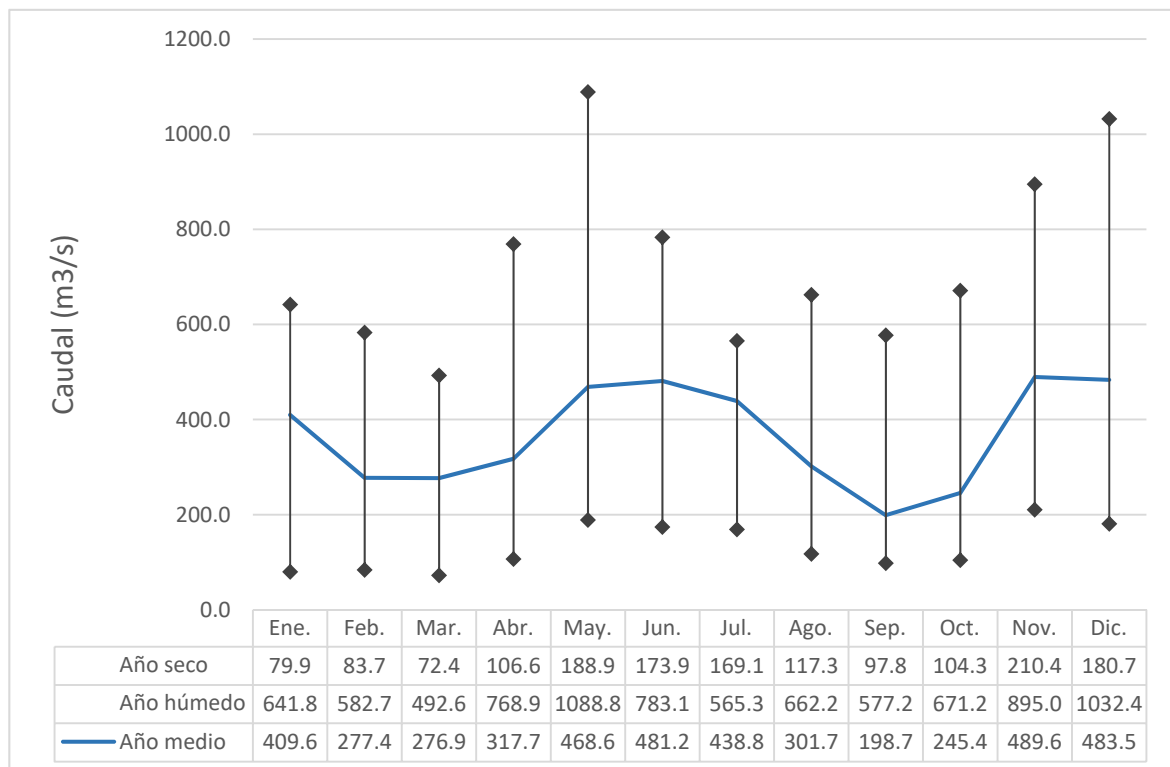
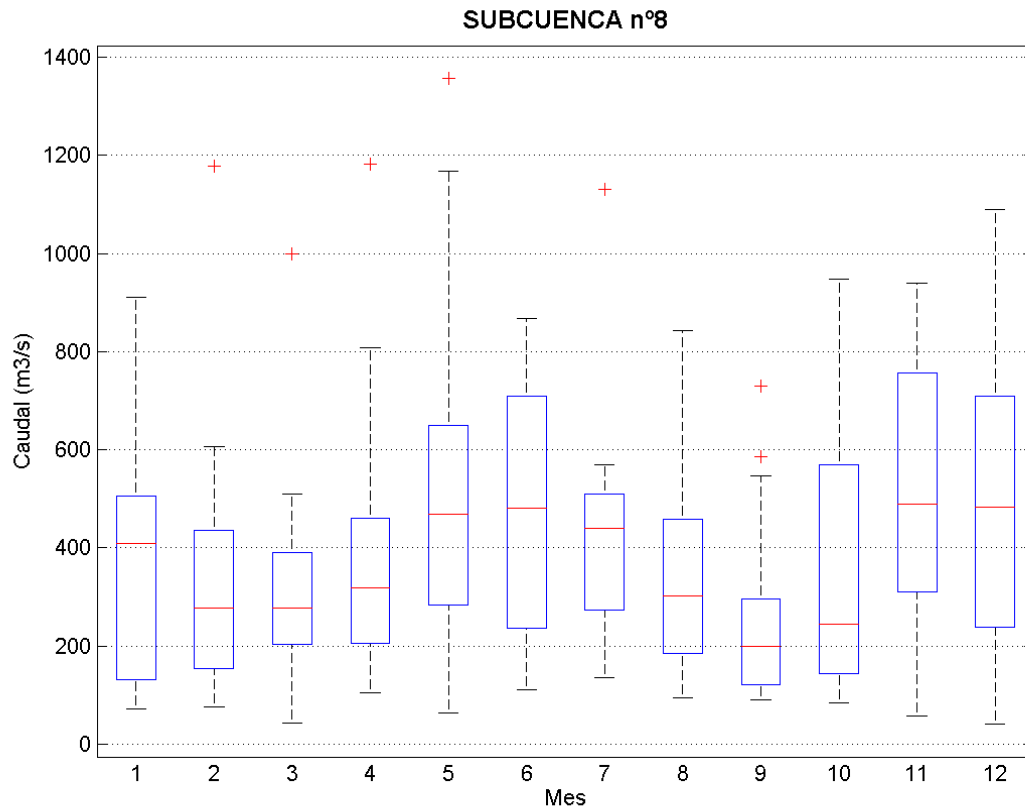


Figura 17. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-8.

1.9. Subcuenca 9

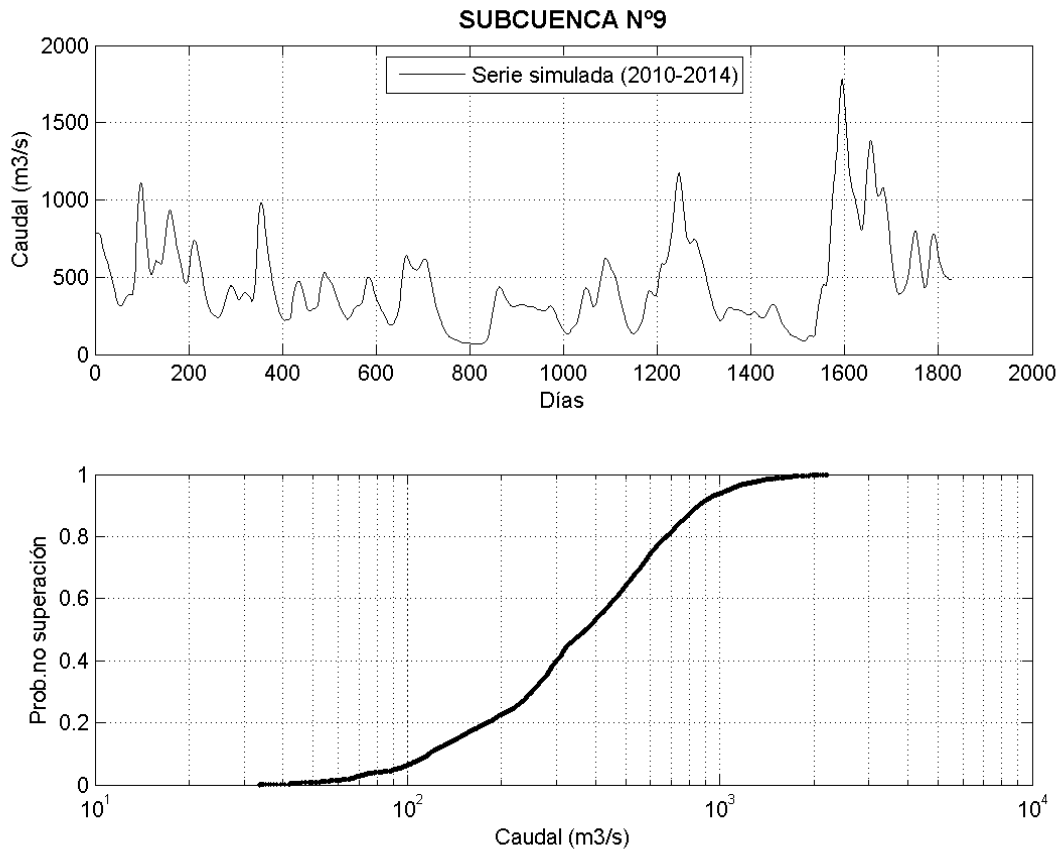


Figura 18. Serie de 5 años y curva de caudales acumulados para la situación actual en la SC-9.

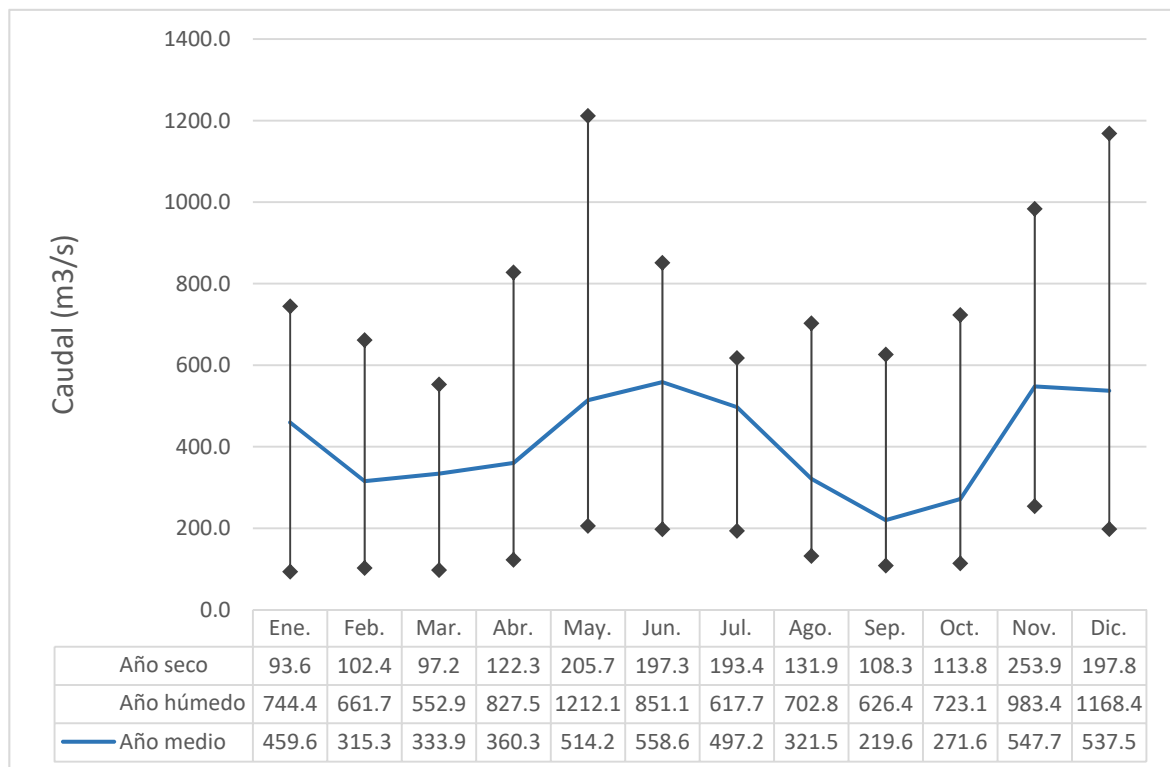
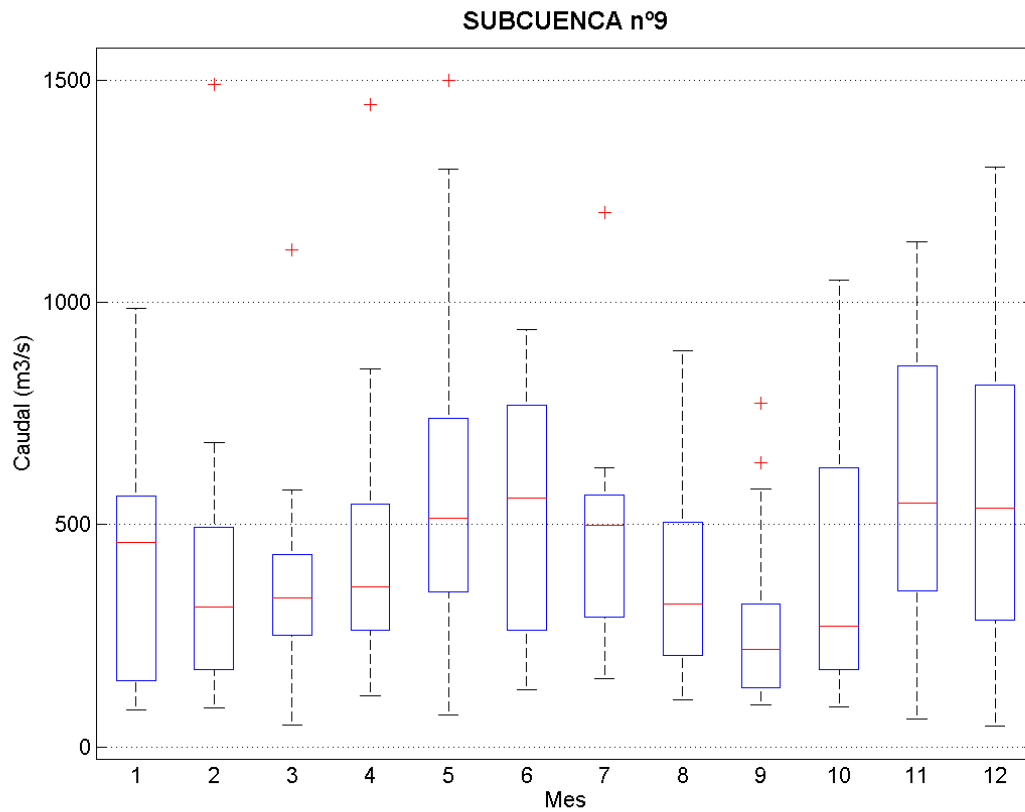


Figura 19. Caudales medios mensuales para un año seco, medio y húmedo en la SC-9.