



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TRABAJO DE FIN DE MASTER

Optimización de la gestión del recurso y las avenidas en la
cuenca del río Narmada (India)

Presentado por

Ortín León, Antonio

Para la obtención del

Master Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Curso: 2019/2020

Fecha: Febrero 2020

Tutor: Joaquín Andreu Álvarez

Cotutor: Abel Solera Solera

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1 Optimización de recursos hídricos	1
1.2 Descripción del problema	3
1.3 Objetivos del trabajo	3
2. Definición del problema	4
2.1 Caracterización de la cuenca del río Narmada	4
2.2 Descripción del sistema a estudiar	7
2.2.1 Tramos de río	7
2.2.2 Embalses	8
2.2.3 Demandas	8
2.2.4 Aportaciones	8
2.3 Datos de entrada al modelo	9
2.3.1 Datos físicos del modelo	9
2.3.2 Series hidro-meteorológicas	9
2.3.3 Demandas	12
2.3.4 Datos de operación	13
2.4 Escenario de optimización	17
2.4.1 Reglas de operación de los embalses	17
2.4.2 Reglas de reparto del déficit entre las unidades de demanda	17
2.4.3 Función objetivo	19
2.4.4 Formulación del balance en los nudos	20
2.4.5 Unidades de trabajo	20
3. Modelo desarrollado con OPTIGES	21
3.1 OPTIGES	21
3.2 OPTIGES-TPV	21
3.2.1 Descripción del software	21
4. Análisis del funcionamiento del sistema	24
4.1 Resolución año a año	24
4.1.1 Resultados de la optimización	24
4.1.2 Embalse de Bargi	26
4.1.3 Embalse de Tawa	28
4.1.4 Tramo de río 12	30
4.1.5 Embalse ISP	31
4.1.6 Embalse OSP	32
4.1.7 Tramo 15	33
4.1.8 Embalse SSP	33
4.1.9 Cumplimiento de las reglas de reparto de déficit	35
4.2 Resolución cada dos años	35
4.2.1 Resultados de la optimización	36
4.2.2 Embalse de Bargi	37
4.2.3 Embalse de Tawa	38
4.2.4 Embalse ISP	38

ÍNDICE

4.2.5	Embalse OSP	39
4.2.6	Embalse SSP	39
5.	Modelo desarrollado con software comercial (MATLAB)	40
5.1	Elección del software comercial.....	40
5.2	Herramientas de optimización.....	41
5.3	Formulación del problema de optimización	41
5.3.1	Definición de los términos de las ecuaciones.....	41
5.3.2	Cambio de variable por igualdad de déficit en las demandas	43
5.3.3	Ecuaciones de balance en los embalses y nudos.....	44
5.3.3.1	Restricciones en forma de inecuación.....	45
5.3.4	Función objetivo	46
5.4	Estructura de la función fmincon	46
5.4.1	Argumentos de entrada.....	46
5.4.2	Argumentos de salida	47
5.5	Adaptación del problema a la estructura de fmincon	47
5.5.1	Restricciones lineales con iteraciones externas	47
5.5.2	Restricciones no lineales.....	49
5.5.3	Problemas de convergencia.....	51
5.5.4	Validación de la programación de la optimización.....	52
5.6	Optimización global.....	56
5.6.1	Herramientas de optimización global.....	56
5.6.2	Adaptación del problema a la estructura de patternsearch.....	56
6.	Conclusiones	57
7.	Referencias	59
ANEXO I.	Ficheros de MATLAB	61
	Fichero Optimización fmincon para todo el sistema.....	62
	Fichero Optimización patternsearch para todo el sistema	67
	Función nonlcon_Narmada de restricciones no lineales para todo el sistema.....	72
	Fichero Optimización fmincon para el embalse de Bargi.....	75
	Función nonlcon_Bargi de restricciones no lineales para el embalse de Bargi	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cuenca del río Narmada. Fuente: Narmada Control Authority.....	5
Figura 2. Monzón en la India. Fuente: Wikipedia.org	6
Figura 3. Esquema topológico de la cuenca del río Narmada. Fuente: Narmada Control Authority 7	
Figura 4. Serie de aportaciones en periodos de 10 días. Elaboración propia	10
Figura 5. Distribución intra-anual de las aportaciones en periodos de 10 días. Elaboración propia	10
Figura 6. Aportaciones anuales. Elaboración propia.....	11
Figura 7. Datos de evaporación y precipitación para cada uno de los embalses. Elaboración propia	11
Figura 8. Evaporación neta para cada uno de los embalses. Elaboración propia	12
Figura 9. Distribución intranual de las demandas en periodos de 10 días. Elaboración propia	13
Figura 10. Caudal máximo Q110. Elaboración propia	15
Figura 11. Caudales ecológicos en periodos de 10 días. Elaboración propia.....	16
Figura 12. Topología del sistema implementada en Aquatool+. Fuente: Modelo facilitado por los tutores	22
Figura 13. Desglose de las componentes de la función objetivo optimizando 1 año con OPTIGES-TPV. Elaboración propia	25
Figura 14. Balance en el embalse de Bargi optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días. Elaboración propia	26
Figura 15. Balance en el embalse de Bargi optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días escala ampliada. Elaboración propia	27
Figura 16. Análisis del tramo 10 optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días. Elaboración propia	28
Figura 17. Balance en el embalse de Bargi optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días. Elaboración propia	29
Figura 18. Balance en el embalse de Bargi optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días escala ampliada. Elaboración propia	29
Figura 19. Análisis del tramo 11 optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días. Elaboración propia	29
Figura 20. Caudal ecológico en el tramo de río 12 respecto a los tramos 10 y 11 en periodos de 10 días. Elaboración propia	30
Figura 21. Análisis del balance en el nudo 7 optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días. Elaboración propia	30
Figura 22. Balance en el embalse ISP optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días. Elaboración propia	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 23. Balance en el embalse ISP optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días escala ampliada. Elaboración propia.....	32
Figura 24. Balance en el embalse OSP optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días. Elaboración propia	32
Figura 25. Balance en el embalse OSP optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días escala ampliada. Elaboración propia.....	33
Figura 26. Análisis del nudo 5 y el tramo 15 optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días. Elaboración propia	33
Figura 27. Balance en el embalse SSP optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días. Elaboración propia	34
Figura 28. Balance en el embalse SSP optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días escala ampliada. Elaboración propia.....	34
Figura 29. Cumplimiento de las reglas de reparto de déficit con OPTIGES-TPV. Elaboración propia	35
Figura 30. Comparativa del volumen embalsado en Bargi optimizando 1 y 2 años con OPTIGES-TPV. Elaboración propia	38
Figura 31. Comparativa del volumen embalsado en Tawa optimizando 1 y 2 años con OPTIGES-TPV. Elaboración propia	38
Figura 32. Comparativa del volumen embalsado en ISP optimizando 1 y 2 años con OPTIGES-TPV. Elaboración propia	38
Figura 33. Comparativa del volumen embalsado en OSP optimizando 1 y 2 años con OPTIGES-TPV. Elaboración propia	39
Figura 34. Comparativa del volumen embalsado en SSP optimizando 1 y 2 años con OPTIGES-TPV. Elaboración propia	39
Figura 35. Esquema topológico simplificado del sistema. Elaboración propia	42
Figura 36. Ajuste curva Volumen-Superficie para el embalse de Bargi. Elaboración propia	49
Figura 37. Resultados obtenidos en ISP con fmincon. Elaboración propia	51
Figura 38. Comparación de los resultados en Bargi optimizando con fmincon para este embalse, y con OPTIGES-TPV para todo el sistema año a año. Elaboración propia.....	53
Figura 39. Figura 38. Comparación de los resultados en Bargi optimizando con fmincon para este embalse, y con OPTIGES-TPV para todo el sistema año a año en periodos de 10 días escala ampliada. Elaboración propia.....	54
Figura 40. Comparación de los resultados en el tramo de río 10 optimizando con fmincon para este embalse, y con OPTIGES-TPV para todo el sistema año a año. Elaboración propia	54
Figura 41. Comparación de los resultados en el tramo de río 10 optimizando con fmincon para este embalse, y con OPTIGES-TPV para todo el sistema año a año en periodos de 10 días escala ampliada. Elaboración propia.....	55
Figura 42. Cumplimiento de las reglas de reparto de déficit en fmincon. Elaboración propia.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 43. Estructura del vector de resultados y distribución de las variables en las distintas ecuaciones. Elaboración propia	61
--	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Capacidad de los embalses del sistema. Elaboración propia	8
Tabla 2. Volumen inicial del almacenamiento en los embalses para el primer año. Elaboración propia	9
Tabla 3. Elevaciones clave para el almacenamiento de los embalses. Elaboración propia	14
Tabla 4. Valores que definen Q_{110max} . Elaboración propia	15
Tabla 5. Capacidad máxima de tramos de río. Elaboración propia	16
Tabla 6. Demandas con igualdad de déficit. Elaboración propia	18
Tabla 7. Valores de la función objetivo optimizando 1 año con OPTIGES-TPV. Elaboración propia	25
Tabla 8. Valores de la función objetivo optimizando 2 años con OPTIGES-TPV. Elaboración propia	37

1. Introducción

En el presente trabajo se aborda un problema de optimización de la gestión de un sistema de recursos hídricos situado en la cuenca del río Narmada, en la India. Está basado en una necesidad real, planteada por el gobierno de la India en el seno de un proyecto más amplio denominado Proyecto Nacional de Hidrología.

El objetivo del trabajo es evaluar herramientas y metodologías que permitan obtener la decisiones óptimas para cada uno de los años hidrológicos del período 2008/2017 en lo que se refiere a caudales circulantes por los ríos, y caudales entregados a las demandas consuntivas, tratando de dar la máxima satisfacción a los objetivos de protección frente a avenidas (caudales máximos en los ríos), preservación de ecosistemas acuáticos (caudales ecológicos en los ríos), y satisfacción de las demandas (caudales suministrados).

En el trabajo se utilizarán, y evaluarán, dos metodologías. Una de ellas está basada en la utilización del módulo OPTIGES del entorno de desarrollo de Sistemas Soporte de Decisión AQUATOOL, y la otra está basada en la formulación de un modelo de optimización ad-hoc para el caso de estudio, y su resolución mediante un algoritmo de optimización perteneciente al *Optimization Toolbox* de MATLAB.

También se realizará un análisis detallado del funcionamiento del sistema a partir de los resultados obtenidos, para comprender por qué la gestión propuesta es óptima.

A continuación se realiza una breve introducción a la optimización de recursos hídricos, al problema que se planteará con más detalle en otros apartados, y a los objetivos del trabajo

1.1 Optimización de recursos hídricos

Para el estudio de sistemas de recursos se suelen utilizar modelos de simulación, que permiten representar mejor la realidad, por su gran flexibilidad y su capacidad para modelar elementos del sistema que tengan una gran complejidad (Lerma et al., 2014).

Sin embargo, con el desarrollo de las técnicas y los algoritmos de optimización, se ha extendido su uso para comprender el funcionamiento de los sistemas, analizando qué tipo de gestión es la óptima a la hora de cumplir unos objetivos concretos.

Estos objetivos suelen ser la atención a las demandas, el cumplimiento de los requerimientos de caudales ecológicos, la producción hidroeléctrica, o la gestión de las avenidas, entre otros. Estos objetivos se combinan de forma ponderada en una función multiobjetivo mediante costes o penalizaciones asociados a los incumplimientos, constituyendo así la función objetivo que el algoritmo optimizador debe minimizar.

Una forma común de abordar este tipo de problemas es analizando la gestión óptima de un sistema para un periodo concreto de una serie histórica, utilizando las aportaciones al

sistema como entradas al modelo. Los resultados obtenidos representan la gestión que se hubiera realizado de forma ideal por un gestor omnisciente que tuviera conocimiento previo de los recursos disponibles con los que se iba a contar, así como la magnitud de las demandas y otros requerimientos, además de conocer en profundidad todos los elementos que forman el sistema y su funcionamiento (Salis et al., 2006).

Otra forma de plantear este tipo de problemas es utilizando como entradas al modelo unas series futuras basadas en predicciones. En estos casos la validez de los resultados estará también influenciada no solo por la solvencia del optimizador, sino por la incertidumbre de estas predicciones.

En general, para este tipo de problemas, se detectan dos paradigmas que llevarán a una escalada en la complejidad de estos modelos de optimización.

Por una parte, la cantidad de condicionantes a tener en cuenta serán más, y más exigentes. Al enfoque inicial de atención a las demandas, se añaden los requerimientos ambientales, con cada vez más peso. Otros aspectos a tener en cuenta serán la aparición de nuevas demandas o el incremento de las existentes por el crecimiento de la población, las nuevas necesidades de producción hidroeléctrica para sustituir a los combustibles fósiles en la lucha frente al cambio climático, y la resolución de problemas de escasez estructural, que empeoran en muchos casos por una tendencia de disminución de los recursos existentes.

Por otra parte, la gran incertidumbre existente, tanto por los cambios que se están produciendo en las aportaciones, véase el caso del denominado efecto 80 (Pérez-Martín et al., 2013) en la cuenca del Júcar, como por la necesidad de modelar sistemas en otras ubicaciones geográficas donde no se cuenta con grandes registros de datos o se duda la calidad de los mismos.

Del análisis de las técnicas de optimización disponibles, se extrae que la más favorable para este tipo de problemas suele ser la programación línea, aunque se ha comprobado que, en caso de problemas más complejos, con sistemas multi-embalse, la técnica más eficiente es la red de flujo (Lerma et al., 2014), aunque a veces pueden necesitar de simplificaciones a la hora de definir las restricciones del problema (Ilch, 2009).

Un problema muy común en el análisis de estos sistemas es que a menudo existen componentes a modelar que no se pueden linealizar (Ilch, 2008), que por su propia definición son no lineales, y en estos casos se debe recurrir a optimización no lineal, aumentando la complejidad de la resolución del problema y teniendo que hacer frente a los problemas de convergencia del optimizador hacia una solución (Haro et al., 2012).

Aun así, independientemente del funcionamiento interno del optimizador, un aspecto que se debe tener en cuenta es la necesidad de desarrollar herramientas que, si bien internamente son complejas, cuenten con un interfaz sencillo y amigable que permita

que los distintos implicados en la asignación del recurso (altos cargos de la administración, representantes municipales, agricultores, empresarios, organizaciones ecologistas o los ciudadanos de a pie) sean capaces de comprender e incluso realizar modificaciones en la gestión, sin tener conocimientos avanzados en recursos hídricos, como se hizo en el caso del análisis del Trasvase Júcar-Vinalopó (Andreu et al., 2009).

1.2 Descripción del problema

El problema estudiado en este trabajo se corresponde con la optimización de un sistema de recursos hídricos en la cuenca del río Narmada, en la India.

Para estudiar el sistema se cuenta con las series de datos de nueve años hidrológicos, desde julio de 2008 hasta junio de 2017, además de todos los datos relativos a todos los elementos que componen el sistema.

El origen de este trabajo es una licitación del gobierno de la India en el que se solicitaba apoyo de consultoría para construir un modelo de optimización de la cuenca del río Narmada. Dentro de los distintos requisitos de la licitación, se planteaba este problema con un esquema simplificado de la cuenca. La idea de la licitación, no de este problema particular, era construir un modelo que permitiera realizar una gestión en tiempo real a partir de mediciones de datos y de predicciones. Estas predicciones que alimentarían al modelo serían generadas con modelos ARMA o redes neuronales, y se generarían año a año, ya que plantear predicciones con horizontes más largos no es asumible por la gran incertidumbre existente.

El problema plantea una serie de reglas de gestión y de restricciones particulares en los distintos elementos del sistema, pero en general destacan dos aspectos que lo hacen distinto a otros problemas más comunes en la optimización de recursos hídricos. Limitando en gran medida la utilización de los softwares de optimización disponibles en el mercado.

Por un lado, el paso de tiempo del problema, que se plantea con periodos de tiempo de 10 días (escala decenal), al ser la escala en la que se trabaja en la cuenca de estudio, y en la que se encuentran los datos suministrados.

Y por otro lado la integración conjunta de la gestión del recurso y de las avenidas dentro de un mismo modelo. Este segundo factor necesita también del primero, ya que en un estudio a escala mensual, no es habitual integrar la gestión de las avenidas, ya que aunque la punta de caudal se extendiera a lo largo de varios días, su efecto quedaría diluido al realizar el promedio mensual (Ilich, 2006).

1.3 Objetivos del trabajo

A la hora de afrontar este trabajo, se cuenta con el modelo previamente implementado en el Sistema de Soporte a la Decisión AQUATOOL, que utilizando el módulo OPTIGES-

TPV, una adaptación del módulo de optimización OPTIGES que permite modelar todos los requisitos de este problema, los cuales se enunciarán en apartados posteriores.

A partir de aquí, los objetivos que se plantean para este trabajo son:

- Describir y caracterizar el caso de estudio.
- Resolver el problema con OPTIGES-TPV y realizar un análisis del funcionamiento del sistema a través de los resultados de la optimización.
- Resolver el problema mediante optimización no lineal utilizando un software comercial que cuente con herramientas de optimización, formulando el problema y adaptando esta formulación a la estructura interna de las herramientas de optimización disponibles.
- Analizar las diferencias entre los dos distintos enfoques del problema para determinar cuál sería más adecuado a la hora de abordar un problema de este tipo desde un trabajo de consultoría, y para la generalización del uso de la herramienta a una representación más detallada del SRH del río Narmada, o bien a otro SRH en otra cuenca de la India.

2. Definición del problema

En el siguiente trabajo se aborda un problema de optimización en la cuenca del río Narmada. Dicho problema tiene su origen en una licitación del Ministerio de Recursos Hídricos, dependiente del Gobierno de la India, en la que solicita servicios de consultoría para la gestión integrada de la estimación del recurso y la operación de los embalses en la cuenca del río Narmada, dentro del marco del Proyecto Hidrológico Nacional.

Según recoge la documentación de la licitación, uno de los requisitos para optar a dicho contrato es la resolución de un problema de optimización basado en un modelo simplificado del sistema de explotación. En este trabajo se estudia la resolución de este problema.

2.1 Caracterización de la cuenca del río Narmada

El río Narmada es el quinto río más largo de la India, y el más largo de los que fluyen hacia el oeste. Nace en Amarkantak (Madhya Pradesh), en la cordillera Maikala, a una elevación de 900 metros sobre el nivel del mar, y fluye a través de 1312 km hacia el este, desembocando en el golfo de Cambay (mar Árabe), 50 km al este de la ciudad de Bharuch, en el estado de Gujarat.

Su cuenca se extiende una superficie de 98796 km², dentro de los estados de Madhya Pradesh, Maharashtra y Gujarat. Está limitada por las cordilleras de Vindhayas al norte, Maikala al este, Saptura al sur, y al oeste por el mar Árabe. Tiene forma alargada, con una longitud máxima de 953 km y un ancho máximo de 234 km.

La cuenca tiene cinco zonas fisiográficas bien definidas:

- Las áreas montañosas superiores que cubren los distritos de Shahdol, Mandla, Durg, Balaghat y Seoni.
- Las planicies superiores que cubren los distritos de Jabalpur, Narsimhapur, Sagar, Damoh, Chhindwara, Hoshangabad, Betul, Raisen y Sehore.
- Las planicies medias que cubren los distritos de East Nimar, parte del oeste de Nimar, Dewas, Indore y Dhar.
- Las zonas montañosas más bajas que cubren parte del oeste de Nimar, Jhabua, Dhulia y partes de Baroda.
- La parte inferior que cubre principalmente los distritos de Broach y parte de Baroda.

Las regiones montañosas son bastante boscosas. Las llanuras superior, media e inferior son áreas amplias y fértiles muy adecuadas para el cultivo. La cuenca de Narmada se compone principalmente de suelos negros. Las llanuras costeras en Gujarat están compuestas de arcillas aluviales con una capa de suelos negros en la superficie.

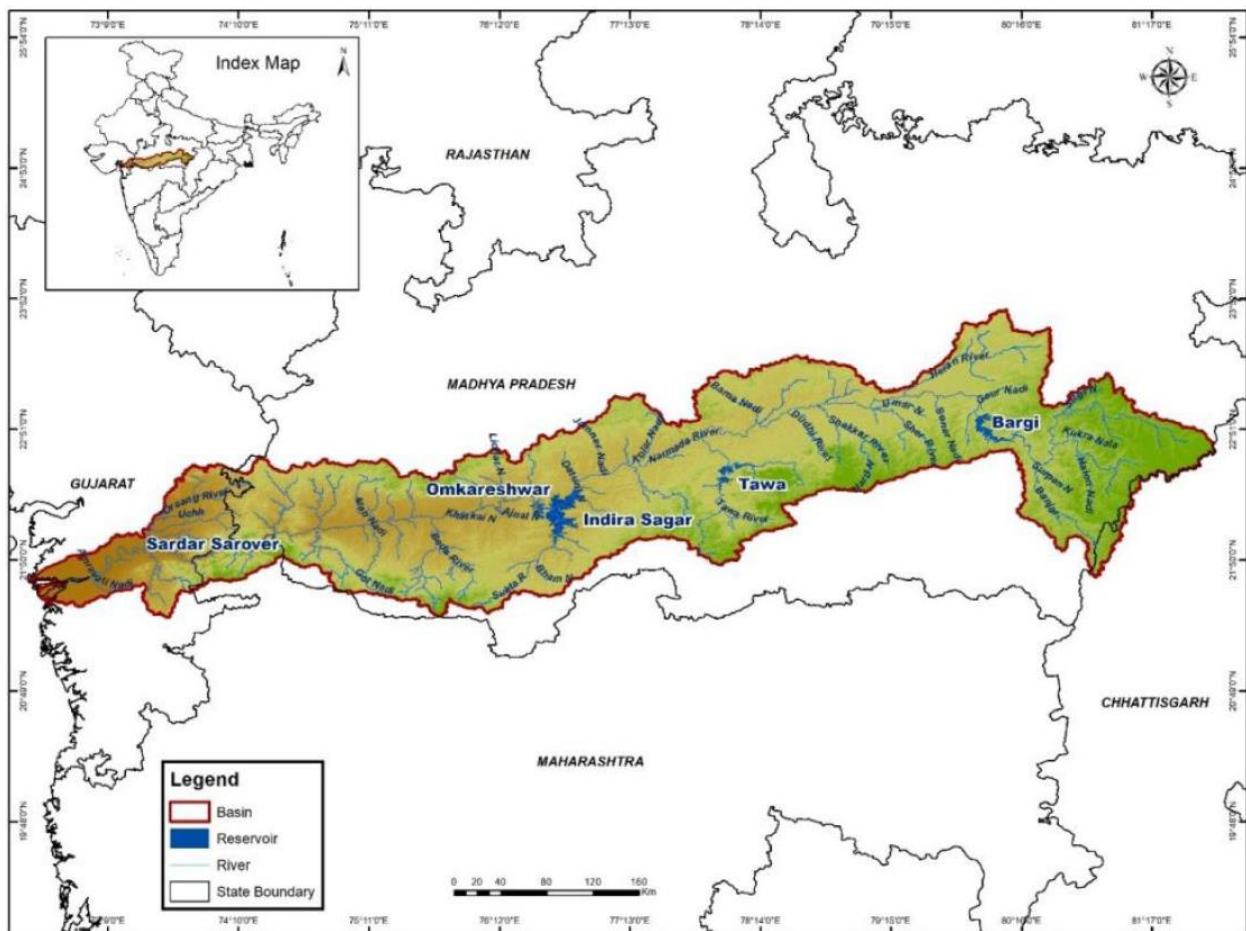


Figura 1. Cuenca del río Narmada. Fuente: Narmada Control Authority

El trópico de Cáncer cruza la cuenca de Narmada en el área de las planicies superiores y una gran parte de la cuenca se encuentra justo debajo de esta línea. El clima de la cuenca es húmedo y tropical, aunque a menudo se producen extremos de calor y frío. En el año,

se diferencian cuatro estaciones distintas: clima frío, clima cálido, monzón del suroeste y monzón posterior.

En clima frío, la temperatura media anual varía de 17 °C a 20 °C y en clima cálido de 30 °C a 32 °C. En el monzón del suroeste, la temperatura oscila entre 27 °C y 30 °C. En la temporada posterior al monzón, se experimentan temperaturas entre 25 °C y 27,5 °C.

El año hidrológico comienza el 1 de julio y termina el 30 de junio.

Casi el 90% de la lluvia se recibe durante los cinco meses del monzón de junio a octubre, aproximadamente el 60% se recibe en los dos meses de julio y agosto (los dos primeros meses del año hidrológico).

La lluvia es intensa en las zonas de colinas altas y planicies superiores de la cuenca. Disminuye gradualmente hacia las llanuras inferiores y las zonas montañosas más bajas y nuevamente aumenta hacia la costa y las zonas situadas al sudoeste de la cuenca.

En las zonas montañosas superiores, la precipitación anual es, en general, de más de 1400 mm, pero en algunas partes llega a 1650 mm. En las planicies superiores, la precipitación anual disminuye a menos de 1000 mm con una zona de alta precipitación alrededor de Pachmarhi, donde la precipitación anual excede los 1800 mm. En las llanuras inferiores, la precipitación anual disminuye hacia el este, alcanzando los valores mínimos (menos de 650 mm) alrededor de Barwani, siendo esta la parte más árida de la cuenca. En las áreas de colinas más bajas, la precipitación anual nuevamente aumenta a poco más de 750 mm.



Figura 2. Monzón en la India. Fuente: Wikipedia.org

Como se observa en esta figura, el monzón que tiene influencia en la zona de la cuenca del Narmada es el del sudoeste, del que se indica un comienzo el 15 de junio.

2.2 Descripción del sistema a estudiar

El esquema simplificado de la cuenca que plantea el problema se puede observar en la siguiente imagen. Si bien mantiene a grandes rasgos la forma del sistema, las distancias no se corresponden con las reales, como se puede observar comparando esta figura con la anterior. Se trata por tanto de un esquema conceptual donde se concentran todos los elementos.

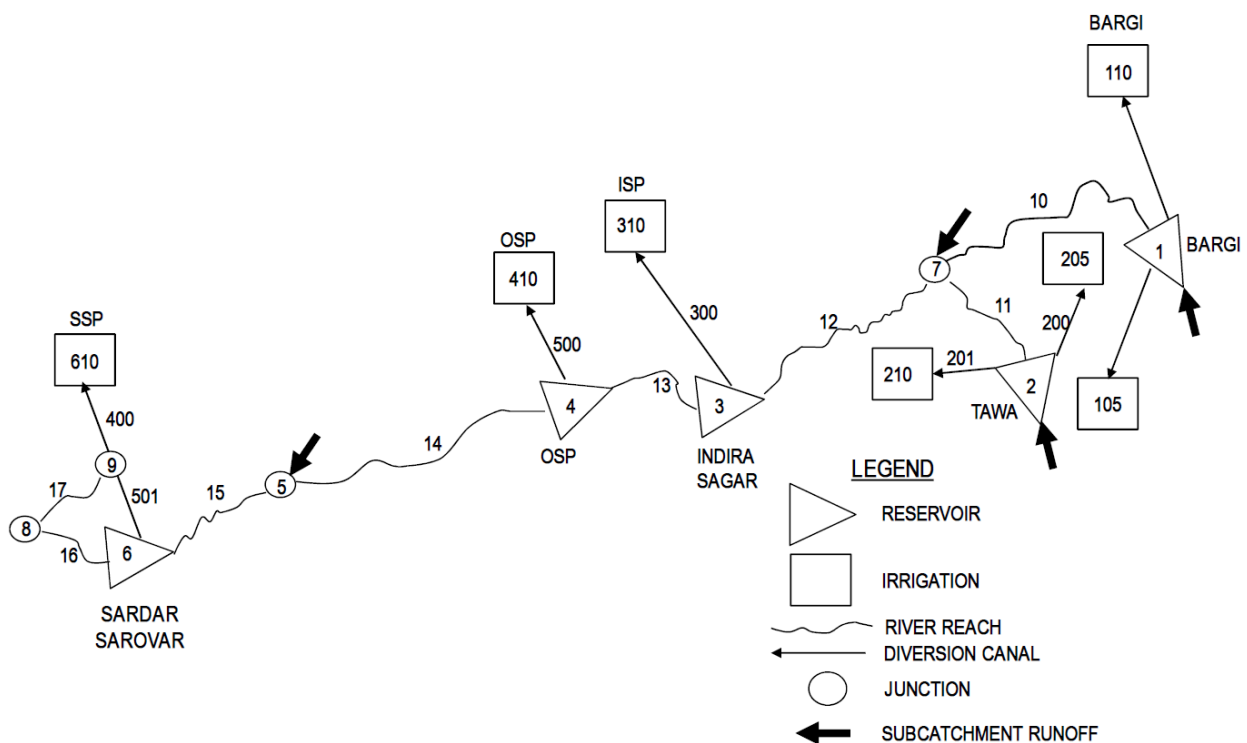


Figura 3. Esquema topológico de la cuenca del río Narmada. Fuente: Narmada Control Authority

2.2.1 Tramos de río

Se incluyen ocho tramos de río. Algunos de ellos cuentan con caudales ecológicos y/o caudales máximos asociados a la capacidad del cauce, que en caso de verse superados producen inundaciones.

Seis de estos tramos se encuentran en el río Narmada, el tramo 11 en el río Tawa, afluente por la margen izquierda, y el 17, sin contar con información al respecto en la documentación, tras analizar la zona mediante imágenes de satélite se cree que se corresponde con un un tramo en el que existe una pequeña suelta (que tiene un valor constante) para alimentar una cascada y posiblemente también un aprovechamiento hidroeléctrico.

2.2.2 Embalses

Existen cinco embalses, cuatro de ellos en el río Narmada y otro en el Tawa.

Embalse	Capacidad (hm ³)
Bargi	4785.7
Tawa	2310.6
Indira Sagar (ISP)	13360.8
Omkareshwar (OSP)	1246.3
Sardar Sarovar (SSP)	11909.9

Tabla 1. Capacidad de los embalses del sistema. Elaboración propia

Los embalses de Bargi (1) y Tawa (2) son los de cabecera, donde se regulan las entradas al sistema. El ISP (3) es el de mayor capacidad, que está situado en el centro y tiene un gran peso en el funcionamiento global del sistema. El OSP (4) tiene una baja capacidad debido a que su función es la producción hidroeléctrica, de forma que mantiene una cota constante, no regula caudales. El SSP (6), también de gran capacidad, es el último embalse del sistema y desde él se suministra a la demanda de mayor magnitud (D610), que se corresponde con el canal del Narmada.

2.2.3 Demandas

El modelo cuenta con siete demandas. Dos se suministran desde Bargi (D105 y D110), otras dos desde Tawa (D205 y D210), una desde el ISP (D310), otra desde el OSP (D410) aunque en la práctica esos caudales se regulan desde el ISP ya que el OSP cuenta con volumen constante, y una desde el SSP (D610), que como se ha indicado se corresponde con el canal del Narmada.

El canal del Narmada cuenta con una longitud de 460 km en su tramo principal, y todos los ramales que parten de él suman una longitud de 750 km. Con sus aguas se riegan 2.129.000 ha de cultivos, y además abastece a 135 núcleos urbanos y 8215 pueblos.

2.2.4 Aportaciones

Las aportaciones, condiciones de contorno de entrada al sistema, se sitúan en cuatro puntos, dos de ellas en los embalses de cabecera (A1 en Bargi y A2 en Tawa), otra en el nudo 7 (A7) y otra en el nudo 5 (A5).

2.3 Datos de entrada al modelo

A continuación, se describen todos los datos de entrada al modelo, facilitados en la documentación por la Narmada Control Authority (NCA).

2.3.1 Datos físicos del modelo

Se proporcionan las curvas Cota-Superficie-Volumen (CSV) de cada embalse. Las capacidades de los embalses ya han sido descritas previamente.

La capacidad de los tramos de río y canales no se encuentra limitada, en el caso de los primeros es lo habitual asumiendo que producirán pérdidas por inundación cuando se supere la capacidad del cauce, y en el de los segundos se tiene en cuenta que las infraestructuras están dimensionadas para poder derivar los caudales correspondientes con las demandas en cada periodo de tiempo.

Por último, se facilitan los datos iniciales de almacenamiento en los embalses para el primero de los años a estudiar (en el resto de los casos el volumen inicial se corresponderá con el volumen final del año anterior).

Embalse	Vo (hm ³)
Bargi	2632
Tawa	1424.82
Indira Sagar (ISP)	10420
Omkareshwar (OSP)	944.536
Sardar Sarovar (SSP)	5290

Tabla 2. Volumen inicial del almacenamiento en los embalses para el primer año. Elaboración propia

2.3.2 Series hidro-meteorológicas

Series de aportaciones

Se facilitan las series de aportaciones en los cuatro puntos previamente señalados.

Cabe destacar, y este es uno de los factores determinantes de este problema, que los datos facilitados no se encuentran en escala mensual o diaria como es habitual en recursos hídricos, sino que se corresponden con valores de agrupaciones en decenas (10 días). Por ello se hará referencia en todo el trabajo a la escala decenal.

Por tanto se cuenta con 36 valores registrados para cada año, y un total de 9 años. En esta escala se presentan también las distintas series numéricas que también son datos de entrada al modelo.

Se indica que estas series han sido obtenidas del balance de los embalses a partir de los datos históricos registrados.

En la siguiente figura se observa cómo las aportaciones son mayores al comienzo del año hidrológico, en los meses correspondientes con el monzón (en concreto el del sudoeste que es el que tiene mayor influencia en esta zona de la India).

También se aprecia cómo las aportaciones de mayor magnitud son las que se introducen en el nudo 7, correspondientes con toda la superficie alta y media de la cuenca (excluyendo las subcuencas vertientes a los embalses de Bargi y Tawa). Esta zona es muy extensa y la que concentra un mayor acumulado de precipitación, por lo que es lógico que las aportaciones sean mayores.

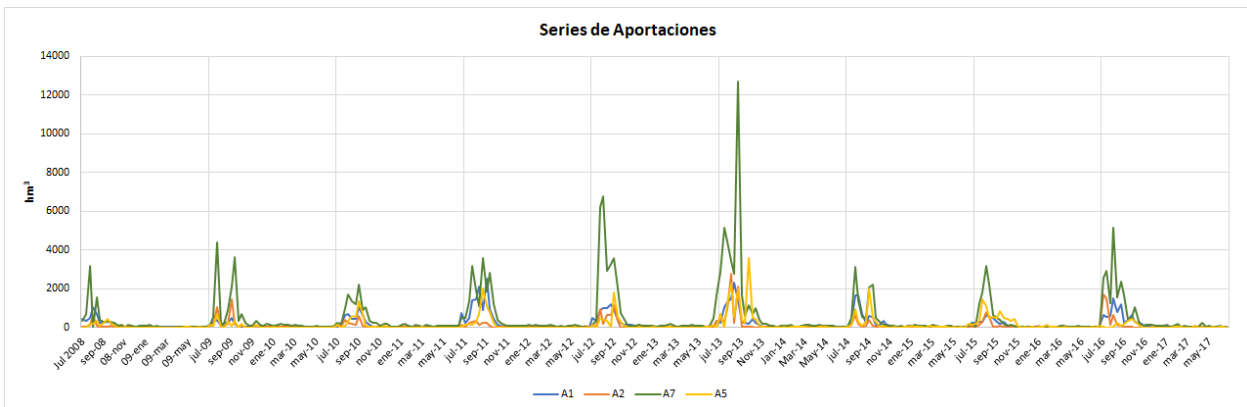


Figura 4. Serie de aportaciones en periodos de 10 días. Elaboración propia

Analizando en detalle la distribución intra-anual, obtenida como la media para los nueve años en cada periodo decenal, se observa, a parte de las distintas magnitudes de las aportaciones en cada punto, ya comentadas previamente, cómo las aportaciones mayores se producen aquellos meses en los que tiene lugar el monzón, comenzando a mitad de junio con una baja intensidad, alcanzando sus máximos en julio y agosto, y finalizando en octubre.

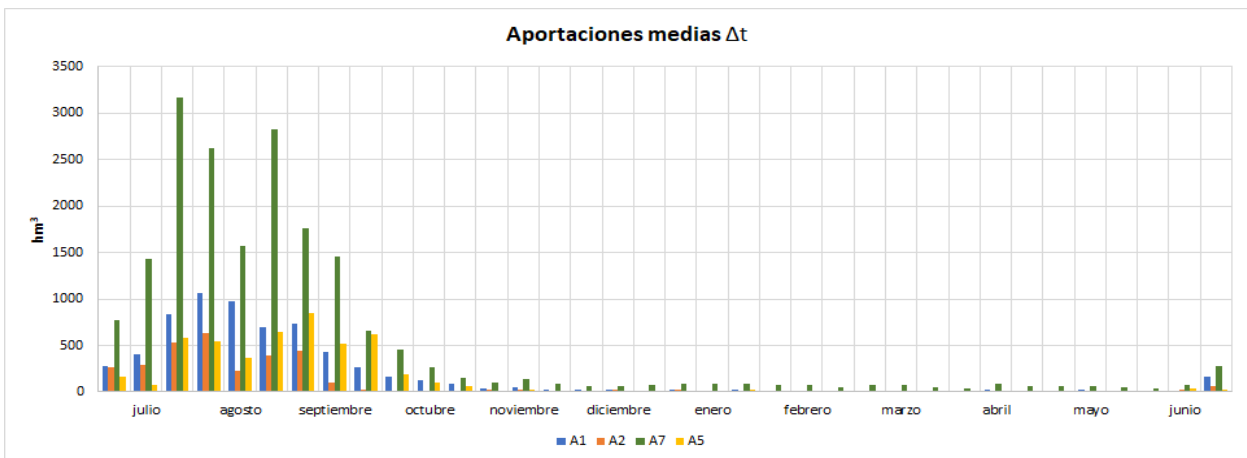


Figura 5. Distribución intra-anual de las aportaciones en periodos de 10 días. Elaboración propia

Se aprecia también que en el resto del año las aportaciones que en este caso tendrán su origen en la descarga de los acuíferos, también son mayores en el caso del nudo 7.

Por último, analizando los acumulados de aportación para cada año en cada punto, se observa cómo los de mayor aportación son los tres años centrales en el global de la serie, por el gran peso de la aportación en el nudo 7, y que en general la distribución se reproduce también en el resto de cuencas.

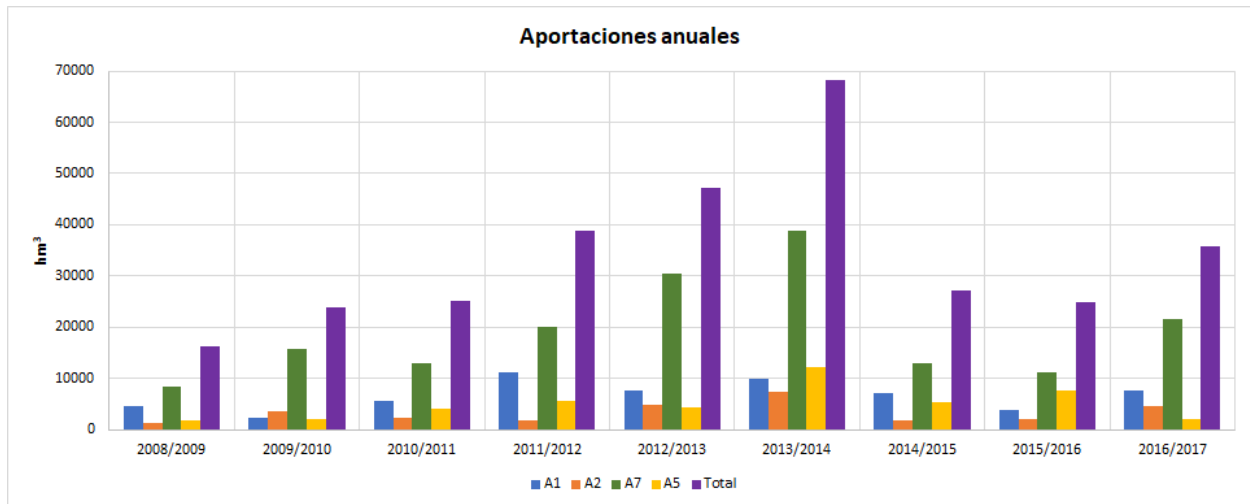


Figura 6. Aportaciones anuales. Elaboración propia

Series de evaporación y precipitación

Se facilitan las estimaciones de las series de evaporación y precipitación en cada uno de los embalses para cada uno de los nueve años de estudio, en mm, que se transforman en volumen multiplicando por la superficie de la lámina de agua en el embalse.

A continuación, se muestra un gráfico con la media anual de las series de evaporación y precipitación para cada uno de los embalses. En el siguiente gráfico se muestra la evaporación neta, obtenida como la diferencia entre la evaporación y la precipitación.

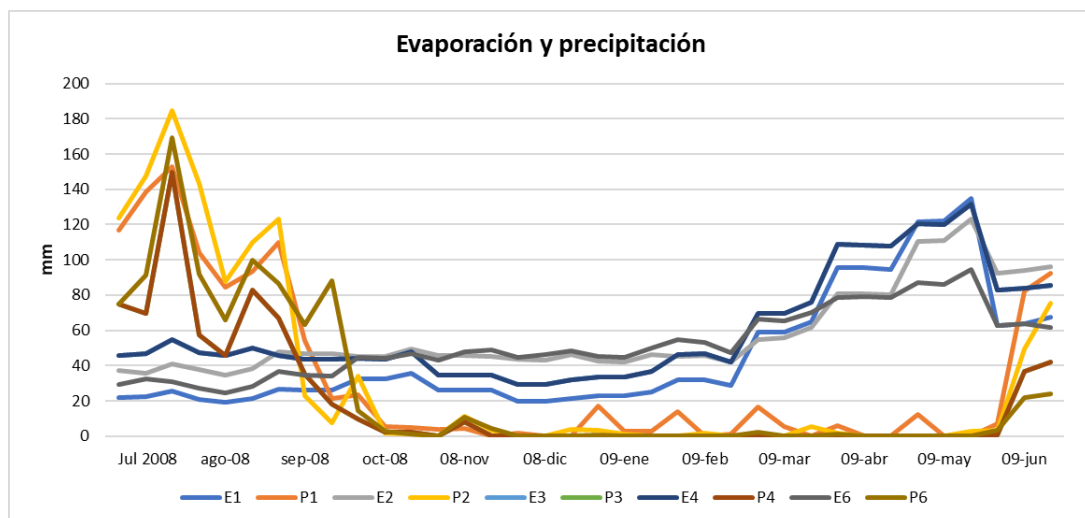


Figura 7. Datos de evaporación y precipitación para cada uno de los embalses. Elaboración propia

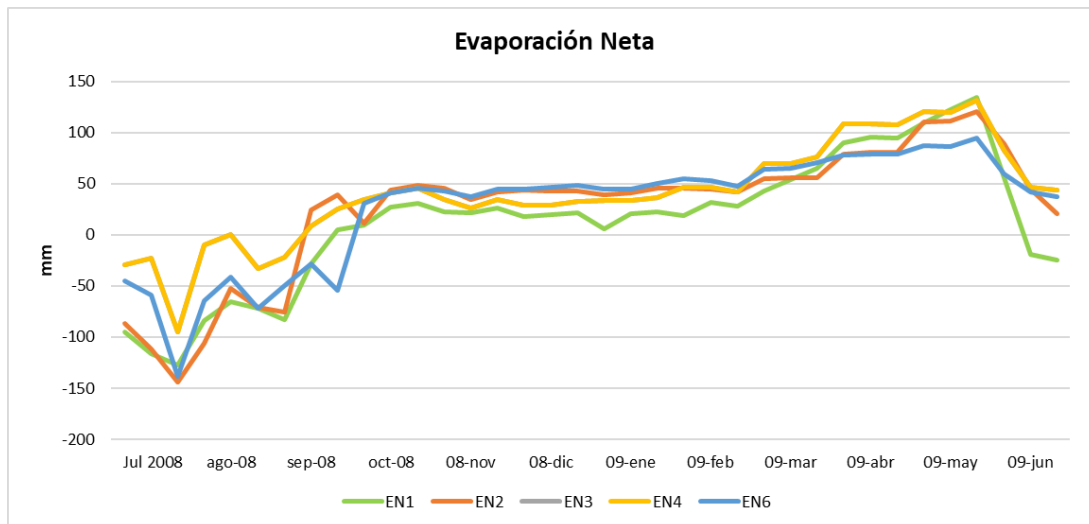


Figura 8. Evaporación neta para cada uno de los embalses. Elaboración propia

Se aprecia que a rangos generales la distribución de estas variables es bastante similar a lo largo de la cuenca, en los distintos embalses. Además se observa que los datos para dos embalses son coincidentes, y es el caso de los embalses ISP (3) y OSP (4), que se encuentran uno aguas abajo del otro.

En cuanto al análisis de la evaporación neta, se aprecia que en junio, con el comienzo del monzón, hasta septiembre, la precipitación tiene un mayor peso, mientras que en el resto de los ocho meses la evaporación es superior a la precipitación. Cabe señalar también que la mayor entrada de volumen a los embalses por este parámetro coincide cuando también las entradas en forma de aportación o caudal desde un tramo de río es también mayor, durante el monzón, mientras que las mayores evaporaciones se producen los meses que las aportaciones son menores.

2.3.3 Demandas

Las demandas son invariables a escala anual dentro del periodo de estudio.

En la siguiente figura se muestra la distribución intra-anual de las mismas, para cada una de las unidades de demanda. Se observa que en el caso de las seis primeras demandas la distribución es muy similar, presentando dos máximos, uno a final de agosto y otro a final de diciembre. En cada una de las demandas tiene mayor o menor peso relativo cada uno de estos dos máximos, y destaca que en el caso de la demanda D205 solo se produce el segundo.

La gran diferencia se produce en la demanda D610 (que en el gráfico se representa en una escala reducida un 50%). Su mayor magnitud y su distribución menos suavizada tiene origen en la gran importancia a nivel de abastecimiento urbano y regadío que tiene el canal del Narmada, y a la complejidad de cada uno de los sistemas que alimenta, respectivamente.

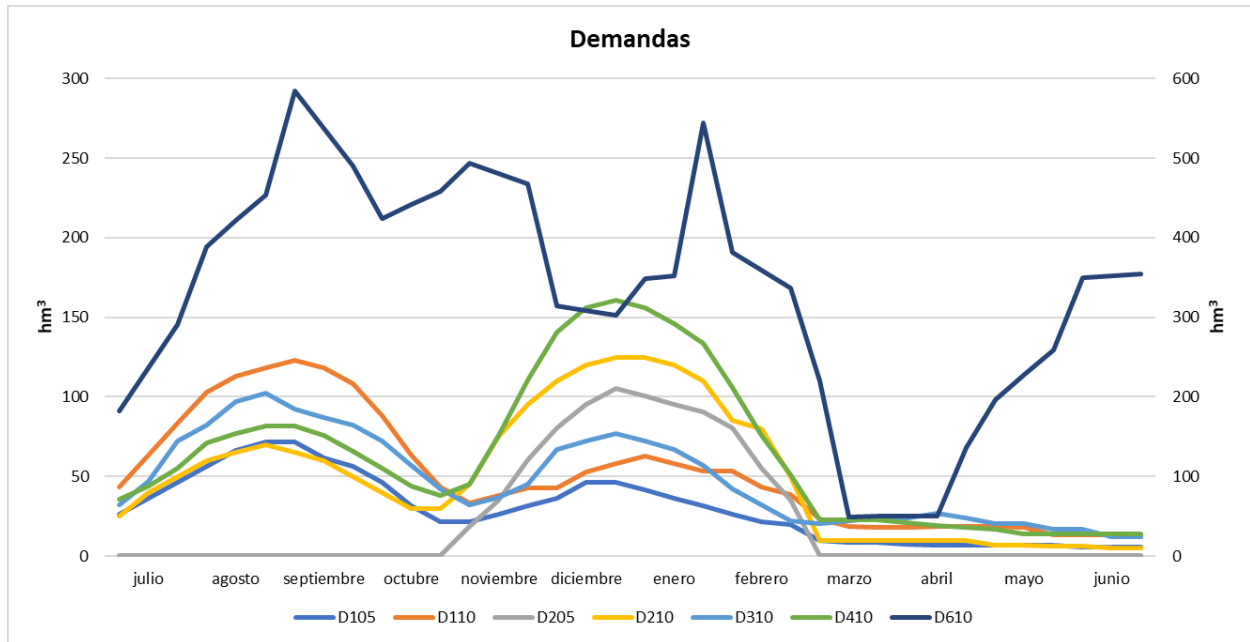


Figura 9. Distribución intranual de las demandas en periodos de 10 días. Elaboración propia

2.3.4 Datos de operación

Estos datos, que también son inputs al modelo, serán la base de las distintas restricciones que tendrá que cumplir el problema de cara a su resolución.

Paso de tiempo de la simulación

Como se ha apuntado previamente, el paso de tiempo de los datos, y por tanto del problema, es de 10 días. De esta forma se hará referencia en esta memoria a la escala decenal (decenas de días) del problema.

El año hidrológico comienza el 1 de julio y termina el 30 de junio, como también se ha indicado previamente.

Elevaciones clave para el almacenamiento

Para cada uno de los embalses se definen cuatro niveles de llenado, expresados en elevación (cota) de la lámina de aguas sobre el nivel del mar.

- Nivel de Zona Muerta (Dead Storage Water Level). La zona muerta de un embalse se corresponde con los volúmenes que no resultan operativos de cara a la gestión de los recursos almacenados. En la práctica no se considera que un embalse está vacío cuando su volumen es nulo, sino cuando la cota de la lámina de agua se encuentra por debajo de los órganos de toma o desagüe de la presa. Cuando el nivel del embalse se sitúa por debajo de esta elevación, ni se producen desembalses ni se suministra a las demandas.

- Nivel de suministro completo (Full Supply Water Level). Nivel máximo en cuanto a la gestión del recurso. El resto de volumen disponible se reserva solo como resguardo para laminar las avenidas.
- Nivel máximo del embalse (Maximum Water Level). Nivel máximo del embalse.
- Nivel mínimo al final del año hidrológico (Minimum Water Level on June 30th). Nivel correspondiente con el volumen mínimo que debe tener el embalse al final del año hidrológico. Esta reserva tiene su fundamento en garantizar que hay suficiente volumen para suministrar a las demandas durante las dos primeras semanas de la estación del monzón en caso de que su comienzo se retrase.

Embalse	Nivel Zona Muerta (m)	Nivel de Suministro Completo (m)	Nivel de Zona Muerta (m)	Nivel Mínimo
Bargi	425.70	422.76	406.00	409.00
Tawa	356.66	355.40	334.24	336.45
ISP	263.35	262.13	243.23	245.00
OSP	199.62	196.60	196.60	196.60
SSP	140.21	138.68	110.64	110.64

Tabla 3. Elevaciones clave para el almacenamiento de los embalses. Elaboración propia

En los datos de la tabla se observa que, en el caso del OSP, por su carácter de aprovechamiento hidroeléctrico, como se ha descrito previamente, el nivel se mantiene constante durante toda la operación del embalse, y sólo se permite que su volumen aumente para ayudar a laminar las avenidas reduciendo el caudal circulante aguas abajo del mismo.

Suministros desde el embalse de Bargi

Desde el embalse de Bargi se suministra a dos demandas (D105 y D110), a través de dos canales. En este caso existe una limitación física a tener en cuenta y es que la cota del punto de toma no es la misma para los dos canales. La cota del canal derecho, correspondiente con la demanda D110, es de 406 metros, y se encuentra seis metros por encima de la del canal izquierdo, correspondiente con la demanda D105, que es de 400 metros. Este factor es determinante debido a una política de gestión de igualdad de déficit entre las dos demandas que será descrita en un apartado posterior.

Si se impone que el déficit, y de la misma forma el suministro, sea el mismo, cuando la cota de la lámina de agua en el embalse de Bargi esté por debajo de 406 metros, el suministro a la demanda D110 será del 0% ya que no se podrá tomar agua desde el canal

de derivación, y por tanto el suministro a la demanda D105 también deberá ser del 0% (por ello se marca como el nivel de zona muerta en el embalse de Bargi como 406 metros, entendiéndose que tampoco se pueden realizar desembalses si no se alcanza dicha cota).

En caso de que se supere la cota de 406, se podrá comenzar a suministrar a la demanda D110, y así también a la D105. La cuestión es que, si bien el canal de D105 tendrá margen de cota para realizar ese suministro, el canal de D110 no podrá captar el 100% de la demanda de forma automática una vez que se supere este valor, sino que la capacidad de captación vendrá influenciada por la cota de la lámina de agua mediante la siguiente relación.

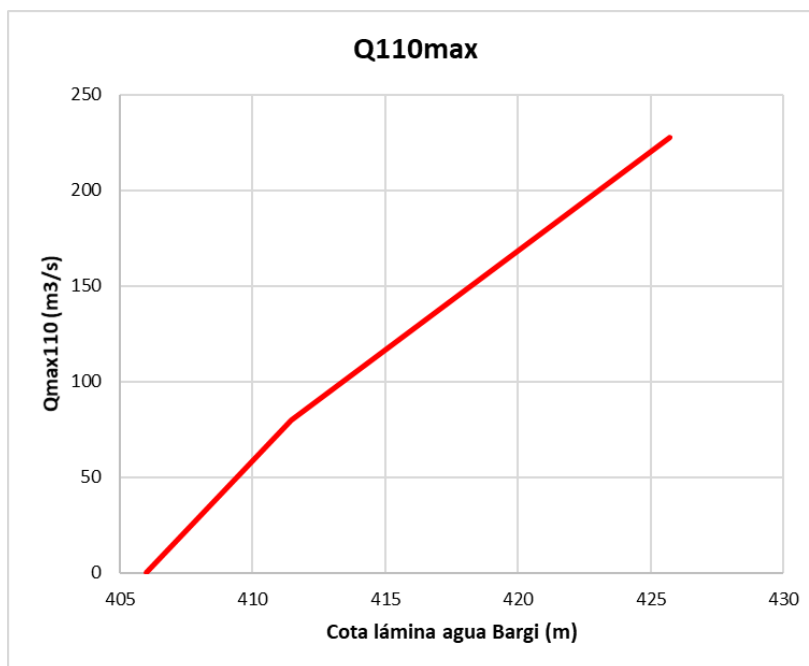


Figura 10. Caudal máximo Q110. Elaboración propia

Este factor limitará el suministro que se puede realizar a la demanda, pero al final el caudal vendrá influenciado por el reparto que realice el optimizador para minimizar la función objetivo, valor que quedará limitado superiormente mediante esta relación.

Elevación (m)	Caudal (m^3/s)
406.00	0.00
411.48	80.00
425.70	227.44

Tabla 4. Valores que definen Q110max. Elaboración propia

Gestión de avenidas

Los modelos de gestión y optimización se han desarrollado habitualmente para estudiar la operación de los embalses en lo relativo al recurso en los regímenes de caudales habituales. El paso de tiempo de 10 días no permite un estudio con precisión de las avenidas, pero las reglas de operación sí suelen contemplar resguardos durante el monzón cuando la probabilidad de que se produzcan inundaciones es alta.

Una forma de establecer esta gestión en las avenidas, que es la que propone el problema, se corresponde con definir la capacidad máxima en los tramos de río críticos donde el desborde de los mismos puede producir grandes daños. Se facilitan los siguientes datos.

Tramo de río	Capacidad máxima (m ³ /s)
10	4000
11	2800
15	7600

Tabla 5. Capacidad máxima de tramos de río. Elaboración propia

Requerimientos de caudales

Se plantean unos requerimientos de desembalses ya sea por el establecimiento de caudales ecológicos aguas abajo de los embalses, o por acuerdos de reparto de caudales entre distintos estados.

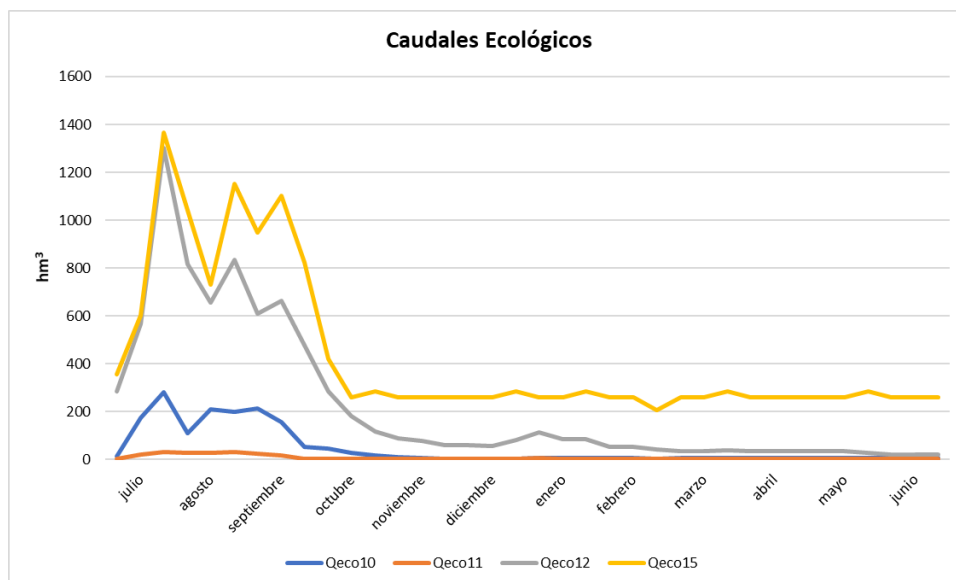


Figura 11. Caudales ecológicos en periodos de 10 días. Elaboración propia

Se indica que estos caudales ecológicos se han obtenido como una fracción del caudal en régimen natural, variando entre el 0.1 y el 0.3 a lo largo del año hidrológico.

En el gráfico se muestra el valor medio de los caudales ecológicos establecidos para los nueve años. En general el caudal ecológico en cada tramo de río es el mismo en todos los casos, pero existe algún año en el que debido a la ocurrencia de avenidas de gran magnitud estas se incluyen en el caudal ecológico.

2.4 Escenario de optimización

El escenario está basado en escala decenal, con 36 pasos de tiempo para cada año hidrológico, con comienzo el 1 de julio y final el 30 de junio.

2.4.1 Reglas de operación de los embalses

- El nivel de los embalses debe estar entre el nivel de zona muerta y el nivel de suministro completo durante todos los pasos de tiempo. Solo cuando sea el caso de avenidas, se podrán almacenar volúmenes en la zona de resguardo hasta alcanzar el nivel máximo del embalse, de forma que laminando la punta se reduzca el caudal desembalsado hacia los tramos en los que se ha establecido una capacidad máxima del cauce.
- El nivel de los embalses debe acabar el año hidrológico con un volumen igual o superior al establecido para el 30 de junio.
- La prioridad de cara a la gestión de los desembalses es la reducción de los caudales que superen la capacidad de los cauces. La segunda prioridad es la de mantener los requerimientos de caudales establecidos. La tercera prioridad se corresponde con el suministro a las unidades de demanda.
- Las pérdidas por evaporación neta (Evaporación – Precipitación) se deben aplicar a la superficie de la lámina de agua existente en cada paso de tiempo.
- La operación de los embalses se realiza a partir de predicciones para un año hidrológico, por lo que el problema debe ser resuelto de forma anual para cada uno de los nueve años en los que se cuenta con datos.

2.4.2 Reglas de reparto del déficit entre las unidades de demanda

En el caso de que no exista disponibilidad suficiente de recurso hídrico para satisfacer a la totalidad de las demandas, se establece:

Igualdad de déficit para cada paso de tiempo

El déficit relativo para cada paso de tiempo dentro de un mismo año hidrológico debe ser el mismo en cada paso de tiempo. Es decir, que el porcentaje de suministro durante todo el año se corresponderá con el más desfavorable de cada uno de los pasos de tiempo.

$$\text{Déficit} = \frac{\text{Demanda} - \text{Suministro}}{\text{Demanda}}$$

Esta regla de reparto del déficit a lo largo del año trata de evitar que por suministrar el 100% de una demanda en un paso de tiempo, en otros ya no haya agua disponible y se produzca un déficit mayor.

Esta regla tendría más sentido si los embalses solo se operaran para satisfacer las demandas, pero la menor prioridad de esta componente, asociada a la existencia de avenidas en las que se alcance el volumen máximo del embalse, puede dar lugar a que, porque durante el periodo seco no quede agua embalsada para satisfacer el 100% de una demanda, al haberse producido desembalses para cumplir con los requerimientos de caudales ecológicos aguas abajo (que tienen una mayor prioridad), se imponga durante todos los pasos de tiempo un déficit que también debería aplicarse al principio del año hidrológico donde quizá el embalse esté lleno y vertiendo grandes caudales por la gestión de una avenida.

Aun así, en este trabajo se está resolviendo el problema concreto planteado, con todos los condicionantes planteados, y, en principio, no es objeto del mismo hacer un análisis de las posibles mejoras que se pueden realizar sobre las reglas de gestión planteadas para mejorar el funcionamiento del sistema.

Igualdad de déficit entre parejas de demandas

Además de una regla de igualdad de déficit a escala temporal, se establece otra a escala espacial. En ella se requiere que el déficit en cada uno de los pasos de tiempo deberá ser el mismo para cada pareja de unidades de demanda que reciben el suministro desde el mismo embalse.

Cabe destacar que, aunque la demanda D410 se suministre físicamente desde el OSP, la incapacidad de este para regular los caudales por su nivel constante para el aprovechamiento hidroeléctrico, hace que los caudales suministrados a esta demanda procedan del ISP, por lo que en la práctica D310 y D410 se suministran desde el mismo embalse.

Embalse	Demandas con igualdad de déficit
Bargi	D105-D110
Tawa	D205-D210
ISP	D310-D410

Tabla 6. Demandas con igualdad de déficit. Elaboración propia

Cabe señalar que la conjunción de estas dos reglas de reparto termina forzando a que solo exista un valor del déficit para estas parejas de demandas a lo largo de todo el año hidrológico.

2.4.3 Función objetivo

La función objetivo es el elemento básico del problema de optimización. En ella se implementan de forma matemática las directrices o criterios que se quieren tener en cuenta a la hora de optimizar la gestión del sistema.

La forma en la que se expresen esas directrices, así como los pesos que se asignen a cada uno de los elementos de la función, será determinante a la hora de resolver la optimización y ofrecer una solución al problema.

Como se ha indicado previamente, se prioriza en primer lugar la no superación de las capacidades máximas de los cauces, en segundo lugar el cumplimiento de los caudales ecológicos, y en último lugar el suministro a las unidades de demanda.

Superación de caudales máximos en tramos de río

Se penaliza con \$1000 por cada metro cúbico por segundo de caudal en que se supera la capacidad del cauce en cada uno de los tramos de río en los que previamente se ha establecido este condicionante.

$$1000 \cdot \sum_{\Delta t=1}^{\Delta t=36} [\max(Q_{10} - Q_{max10}, 0) + \max(Q_{11} - Q_{max11}, 0) + \max(Q_{15} - Q_{max15}, 0)]$$

Con esta formulación matemática se penaliza esta superación en cada paso de tiempo a lo largo del mismo año hidrológico.

Incumplimiento de los caudales ecológicos

Se penaliza con \$100 por cada metro cúbico por segundo de caudal en que se no se alcanza el requerimiento de caudal ecológico en cada uno de los tramos de río en los que previamente se ha establecido este condicionante.

$$100 \cdot \sum_{\Delta t=1}^{\Delta t=36} [\max(Q_{eco10} - Q_{10}, 0) + \max(Q_{eco11} - Q_{11}, 0) + \max(Q_{eco12} - Q_{121}, 0) + \max(Q_{eco15} - Q_{15}, 0)]$$

No suministro a las unidades de demanda

Se penaliza con \$10 por cada metro cúbico por segundo de caudal en que el suministro no cumple con la demanda establecida en cada una de las unidades de demanda.

$$10 \cdot \sum_{\Delta t=1}^{\Delta t=36} [\max(D_{105} - Q_{105}, 0) + \max(D_{110} - Q_{110}, 0) + \max(D_{205} - Q_{205}, 0) + \max(D_{210} - Q_{210}, 0) + \max(D_{310} - Q_{310}, 0) + \max(D_{410} - Q_{410}, 0) + \max(D_{610} - Q_{610}, 0)]$$

Los pesos de las penalizaciones son estimaciones de los daños o pérdidas producidas en caso de no cumplirse los requerimientos establecidos, expresados en dólares, que vienen dados en el enunciado del problema. Pero estos valores deben entenderse como una aproximación, un orden de magnitud, ya que es muy difícil poner valor económico al incumplimiento de un caudal ecológico, o los daños producidos en cada ubicación geográfica no serán los mismo para una misma magnitud de superación de la capacidad del cauce.

Por ello se puede denominar a este modelo de optimización como pseudo-económico.

2.4.4 Formulación del balance en los nudos

Las ecuaciones fundamentales que regirán la formulación del problema serán las ecuaciones de balance en los nudos. En particular las que serán objeto de optimización serán las de los embalses, en las que se debe tener en cuenta el almacenamiento, ya que lo que se pretende optimizar es la gestión de los mismos.

En cada nudo correspondiente con una confluencia de dos tramos de río o un punto de introducción de aportación, la ecuación de balance simplemente igualará los flujos entrantes con los salientes.

En el caso de las ecuaciones de balance en los embalses, se incluye el almacenamiento (cambio de volumen), y asociado a la existencia de un volumen aparece el término de la evaporación neta.

El problema plantea la siguiente ecuación de balance para los embalses:

$$V - V_{\Delta t-1} = Q_{in} - Q_{out} - E_N \cdot \left(\frac{S + S_{\Delta t-1}}{2} \right)$$

Donde el V se corresponde con el volumen, Q_{in} con los caudales de entrada al embalse, Q_{out} con los caudales de salida del embalse, ya sea hacia un tramo de río o hacia una derivación para atender una demanda, E_N con la evaporación neta (diferencia entre evaporación y precipitación), y S la superficie del embalse asociada al volumen existente en ese paso de tiempo.

Cabe destacar que, si los datos de aportación a cada uno de los embalses se han obtenido mediante un cálculo del balance del embalse a partir de datos de volúmenes y salidas, en dichos datos de aportación ya se habrían tenido en cuenta las pérdidas por evaporación neta. Aun así, de nuevo se indica que el problema se va a resolver tal y como ha sido planteado por el organismo de cuenca.

2.4.5 Unidades de trabajo

Por último, ante la dualidad de unidades en las que se facilitan los datos y los condicionantes del problema, expresados en m^3/s y hm^3 (por cada periodo decenal), y que la definición del problema deja a libre elección del técnico la elección de la unidad de trabajo, se eligen unidades de volúmenes al ser la práctica habitual en cuanto a la gestión del recurso.

De esta forma se establece como unidad de trabajo el $hm^3/10$ días.

3. Modelo desarrollado con OPTIGES

A la hora de abordar este trabajo, se cuenta con el problema implementado en el software para desarrollo de Sistemas Soportes a la Decisión (SSD) AQUATOOL (Solera, 2015). La optimización del sistema se resuelve utilizando el módulo de optimización OPTIGES-TPV (Solera 2020), versión del módulo OPTIGES (Andreu, 1998) que permite el uso de tiempos de paso a escala variable, desde diaria a mensual. En este caso se utilizarán 36 períodos de tiempo dentro de un año.

3.1 OPTIGES

Tal como se indica en la descripción del software, el módulo OPTIGES, resuelve el problema del reparto mensual del agua de una cuenca. Para ello, realiza la optimización de este reparto para un periodo de tiempo de uno o varios años. De este modo calcula el reparto óptimo del recurso en cada periodo sin apenas necesidad de datos, prácticamente solo la descripción física de la cuenca: conexiones, embalses, y demandas. Esto supone una gran ventaja para su uso en sistemas de los que se dispone de reducida información o cuando se pretende obtener conclusiones generales a escala anual. Por el contrario, la gestión mensual que simula no es directamente comparable a la realidad, ya que en la realidad no se conoce con antelación cuales van a ser los recursos en el futuro. Por ello requiere del usuario un esfuerzo adicional de interpretación de resultados para traducirlos a conclusiones útiles para la gestión. Una manera eficaz de validar esta interpretación es tratarla y perfeccionarla con el uso del módulo SIMGES, el modelo general para la Simulación de la Gestión de Cuencas integrado en Aquatool.

El modelo ha sido programado en FORTRAN y está disponible en versiones ejecutables bajo entorno Windows, no obstante, también es posible su utilización en otros sistemas operativos.

3.2 OPTIGES-TPV

3.2.1 Descripción del software

El programa ha sido diseñado para ser utilizado como complemento al uso de los módulos de análisis de AQUATOOL: SIMGES y OPTIGES.

La forma más sencilla de desarrollar un modelo de cálculo para su análisis con el programa OPTIGES-TPV es configurar un esquema de usuario con el interface de usuario AQUATOOL+ para su proceso con SIMGES u OPTIGES. Una vez completado este esquema y validado para su simulación en escala mensual con el programa seleccionado se puede proceder a introducir cambios en el mismo para su análisis en otras escalas de tiempo o reproducir la simulación u optimización de forma similar a como lo hace el programa original.

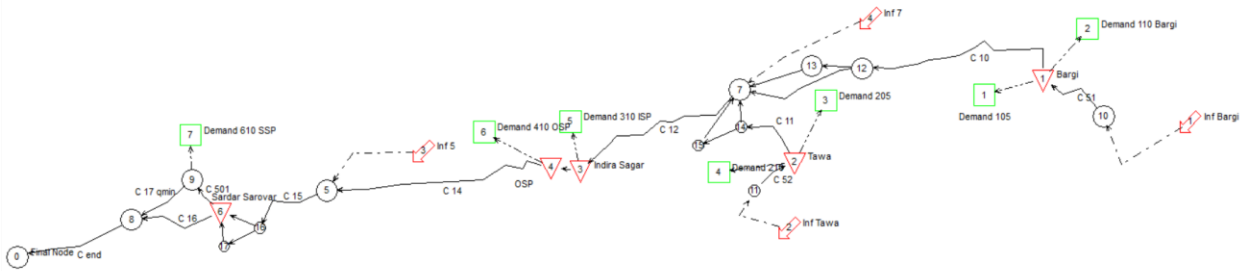


Figura 12. Topología del sistema implementada en Aqatool+. Fuente: Modelo facilitado por los tutores

El modelo configura, a partir del esquema del usuario y en base a los datos físicos y de prioridades proporcionados sobre el sistema, una red de flujo interna, mucho más compleja que el esquema del usuario. La confección de esta red y su posterior optimización mediante el uso de un algoritmo de redes de flujo conservativas sirve para:

- Introducir la dimensión temporal. La red de flujo interna es una multiplicación del esquema del usuario que abarca los N años del período a optimizar. Las redes de un mes y la del siguiente están unidas por arcos de transferencia de agua de un mes a otro debidos a los elementos de almacenamiento.
- Contemplar las restricciones físicas del sistema: mantenimiento del balance de masas, de la ecuación de continuidad, capacidades máximas de las conducciones, de los embalses, etc...
- Introducir las prioridades entre las distintas demandas y tomas, y entre los distintos niveles de las mismas, incluidas las demandas de caudal mínimo en tramos de río.
- Encontrar aquella solución de gestión que satisface al máximo las demandas teniendo en cuenta las mencionadas prioridades en caso de escasez.

Esta red interna del modelo no trasciende al usuario en ningún momento, salvo que esté interesado en ello.

La función objetivo planteada es lineal y trata de minimizar la suma ponderada de déficits de caudales ecológicos, déficits de suministro a zonas de demanda (dando prioridad al suministro superficial frente al subterráneo), y maximizar el volumen almacenado en embalses, al final de cada período de optimización elegido.

Dado que las restricciones del problema (balance cero en los nudos, caudales máximos y flujos positivos) son también lineales, y el esquema de cuenca se convierte en una red de flujo conservativa, se utiliza para la optimización el algoritmo de resolución de redes de flujo conservativas Out-of-Kilter. No obstante, para resolver algunas cuestiones como el cálculo de las evaporaciones de embalses, el mantenimiento de iguales niveles de déficit,

y otras, se recurre a realizar iteraciones hasta alcanzar convergencia, como se describe más adelante.

En resumen, OPTIGES-TPV cuenta con los siguientes elementos y procesos no considerados en los módulos clásicos SIMGES y OPTIGES:

Calcular con un paso de tiempo inferior al mes

Los modelos desarrollados para SIMGES y OPTIGES contienen datos en escala mensual como 12 datos correspondientes al año promedio. Este programa puede utilizar los mismos datos mensuales, repartiéndolos uniformemente en el paso de tiempo que corresponda, así como leer series temporales en la escala de cálculo definida.

Control de crecidas en tramos de río

Se define el control de crecidas como un caudal máximo tolerado en un tramo de río. Para su simulación la red de flujo incluye un arco de exceso sobre el caudal máximo con una elevada penalización.

Además, para el caso de que se incumpla el máximo caudal autorizado, el proceso iterativo define en la red de flujo un arco adicional para laminación de crecidas, en el cual itera modificando su capacidad máxima con el objetivo de minimizar el máximo valor de caudal alcanzado por encima del límite para considerarlo crecida.

Tomas de embalse limitadas por la cota

Para la simulación de tomas de embalse a cotas altas se define el elemento “toma de embalse” en este se limita su capacidad por una función de la cota de embalse relativa a la cota de toma. El proceso iterativo recalcula en cada paso de tiempo su capacidad según la cota promedio del embalse entre el inicio y fin del paso de tiempo.

A efectos de conexión hacia aguas abajo, este elemento se conecta como cualquier nudo.

Control de niveles en embalses

La gestión de embalses se define mediante los volúmenes de gestión diseñados para SIMGES u OPTIGES (según el modelo de cálculo escogido en AQUATOOL). Y se puede ampliar con la definición de un “embalse muerto” y una “capacidad”. Los costes para la función objetivo de cada tramo se definen tal que:

- La diferencia entre el embalse mínimo y el embalse muerto se entiende como un mínimo de gestión que podría utilizarse para fines ambientales y un volumen de embalse por debajo de la cota de toma que no es accesible en ningún modo.
- El volumen de embalse por encima del “máximo de gestión” hasta la “capacidad” se entiende como el resguardo para control de crecidas, que solo debiera usarse en tales circunstancias.

Control de suministros iguales en tomas de demandas isoprioritaria

Esta utilidad permite ordenar al optimizador que iguale el % de la asignación a las tomas de igual prioridad durante todo el periodo de optimización, con independencia de que en algunos pasos de tiempo se pudiera entregar más agua sin penalizar a otros objetivos. Esto reduce la eficiencia en la optimización del reparto de agua, pero tiene sentido para demandas agrarias cuya asignación se establece al principio de la campaña de riego y esto implica una superficie de siembra. En este caso la asignación inicial habría de mantenerse durante todo el periodo de cultivo.

Este control se realizará en el proceso iterativo y solo se hará para los números de prioridad para los que se ha pedido.

Como se observa, el módulo OPTIGES-TPV ha sido desarrollado para poder resolver el problema en cuestión que se está estudiando en este trabajo, aunque con la intención de que se pueda aplicar en otros muchos casos de estudio.

4. Análisis del funcionamiento del sistema

Se procede, por tanto, a analizar el funcionamiento del sistema a partir de los resultados obtenidos con OPTIGES-TPV.

4.1 Resolución año a año

En primera instancia se ha resuelto el problema año a año, tal y como lo solicita la definición del problema.

4.1.1 Resultados de la optimización

A continuación, se adjunta una tabla resumen en la que se muestran los valores de la función objetivo para cada una de las tres componentes a evaluar, para cada uno de los años estudiados.

Año Hidrológico	Valores de la Función Objetivo			Total
	Avenidas	Caudales Ecológicos	Demandas	
2008/09	-	-	16.185	16.185
2009/10	-	-	49.007	49.007
2010/11	-	-	32.303	32.303
2011/12	-	-	35.318	35.318
2012/13	-	-	15.813	15.813

2013/14	3.926.961	-	37.743	3.964.704
2014/15	-	-	35.299	35.299
2015/16	-	-	26.025	26.025
2016/17	-	-	16.191	16.191
Total	3.926.961	-	263.884	4.190.845

Tabla 7. Valores de la función objetivo optimizando 1 año con OPTIGES-TPV. Elaboración propia

Se observa que nunca se producen incumplimientos por superación de los caudales máximos en los tramos de río ni por no cumplimiento de los caudales ecológicos, con la excepción del sexto año en el que si se produce incumplimiento por avenidas. En cambio, sí que se incumple el suministro a algunas demandas todos los años.

Estudiando más en detalle los incumplimientos, componente a componente de la función objetivo, se obtiene la siguiente gráfica.

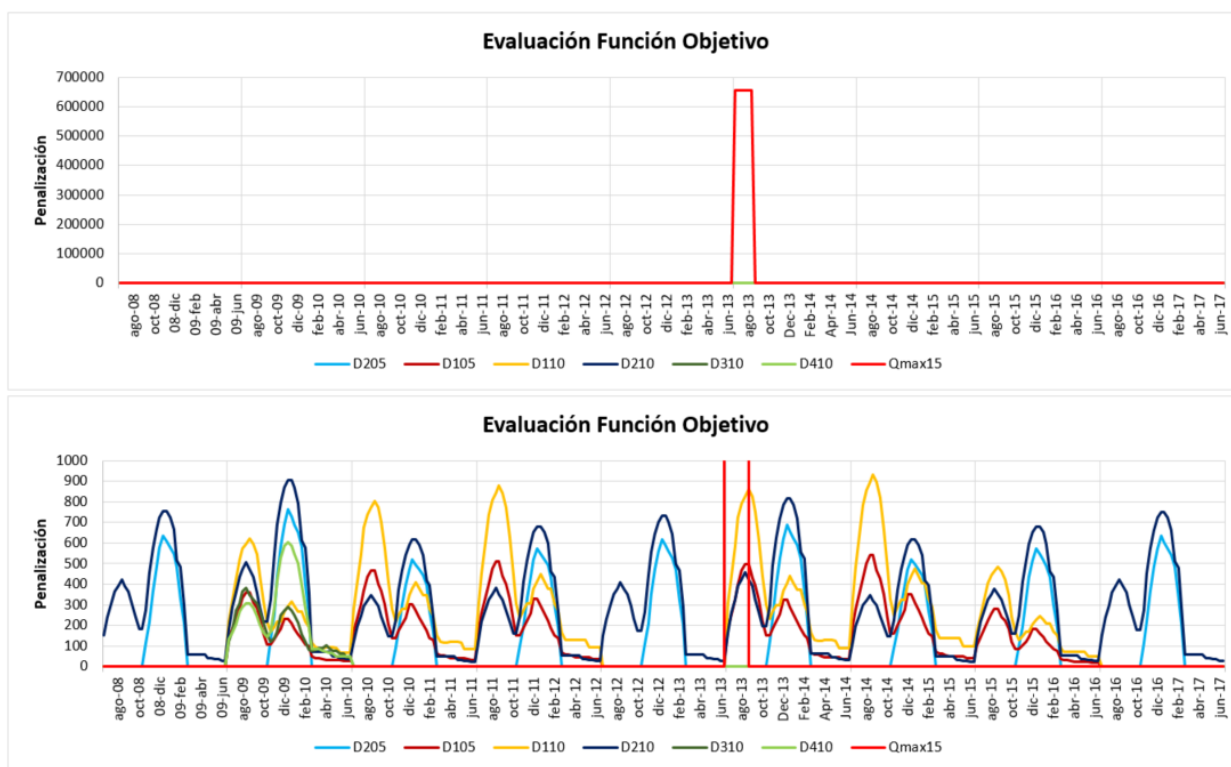


Figura 13. Desglose de las componentes de la función objetivo optimizando 1 año con OPTIGES-TPV. Elaboración propia

Señalar que la penalización correspondiente a la superación de los caudales máximos previamente identificada se produce en el tramo de río 15, al comienzo de sexto año, y presenta un valor superior en cinco órdenes de magnitud al resto de penalizaciones.

El resto de penalizaciones se corresponden con déficits en las demandas, produciéndose incumplimientos en todas menos en la D610. En las demandas que se suministran desde el ISP (D310 y D410) solo se producen en el segundo año hidrológico, en las que se suministran desde Bargi (D105 y D110), todos los años excepto el primero y el quinto y el último, y en las que se suministran desde Tawa (D205 y D210) todos los años.

Se procede a analizar los resultados obtenidos en todo el sistema, desde aguas arriba hacia aguas abajo, con el objetivo de comprender el funcionamiento del sistema y detectar el origen de estos incumplimientos en la función objetivo.

4.1.2 Embalse de Bargi

En el siguiente gráfico se muestran las distintas componentes del balance del embalse de Bargi, para los nueve años.

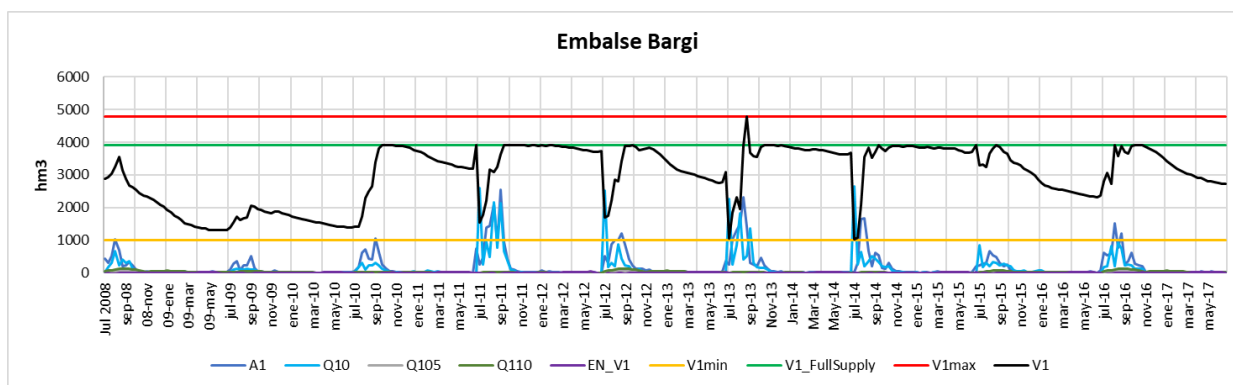


Figura 14. Balance en el embalse de Bargi optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días. Elaboración propia

Se observa cómo el volumen se mantiene siempre entre los niveles de zona muerta y suministro completo, con excepción de en el sexto año donde se produce un pico al comienzo del año hidrológico, coincidiendo con el momento en el que aguas abajo, en el tramo 15, se está produciendo el incumplimiento del caudal máximo. En este aspecto se observa cómo se materializa una de las reglas de gestión previamente enunciadas, que cuando aguas abajo de un embalse se está incumpliendo un caudal máximo en un tramo de río (aunque no sea en el tramo inmediatamente aguas abajo), el embalse almacena por encima del volumen de suministro completo pudiendo alcanzar el volumen máximo para reducir los caudales en dicho tramo y que el incumplimiento sea menor.

Para analizar el resto de componentes se grafican las de menor magnitud en otro gráfico a una escala en la que se puedan visualizar.

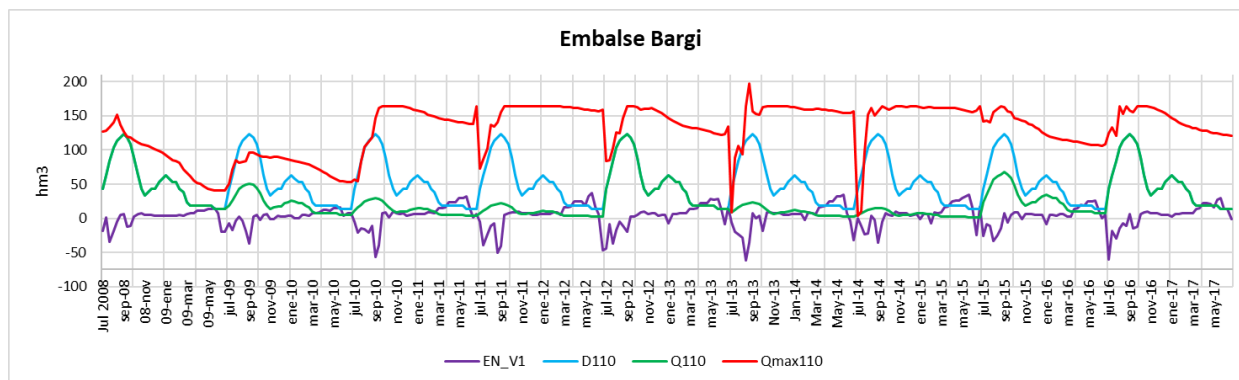


Figura 15. Balance en el embalse de Bargi optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días escala ampliada. Elaboración propia

En este gráfico se muestra la evaporación neta, el valor de la demanda D110, los caudales suministrados a esta demanda y el máximo establecido para el canal derecho en función de la cota de la lámina de agua en el embalse para cada paso de tiempo. No se muestra el caudal de suministro a la demanda D105 ya que es análogo al de D110.

Se observa que, si bien es la variable de menor magnitud, la evaporación neta tiene una magnitud considerable, tanto durante el inicio del año hidrológico donde los volúmenes entran al embalse en forma de precipitación, como en el resto del año que salen en forma de evaporación.

Respecto a la atención a las demandas, es un buen ejemplo cómo al optimizar durante un solo año, para el primer año se produce un suministro del 100% a las demandas, pero esto merma las reservas del embalse, y ya el segundo año, tras no recibir aportes suficientes, comienza el año lastrado por ese volumen final del año previo y en este caso no es capaz de cumplir con la totalidad del suministro produciendo déficit.

En el caso del tercer año, la casuística es distinta, ya que, si bien el embalse recupera volumen, se sigue produciendo déficit. La explicación a este suceso es que en el comienzo del año, antes de que se produzcan las grandes entradas al embalse, el suministro a la demanda D110 se ve limitado por la condición de Q110max, produciéndose déficit para ese paso de tiempo, y por tanto este déficit se conserva a lo largo de todos los pasos de tiempo del año hidrológico, tanto para D110 como para D105. Este es un claro ejemplo de situación es la que esta regla de reparto de déficit durante todo el año, expresada de forma estricta, puede perjudicar a la explotación del sistema.

A continuación se analiza el caudal del tramo de río 10, con respecto al cumplimiento de la limitación por avenidas y el requerimiento de caudal ecológico.

En este caso se observa algo un tanto contradictorio. En cuanto al caudal máximo del tramo, en ningún momento se alcanzan valores cercanos al mismo, y en cuanto al caudal ecológico, es cumplido en todos los pasos de tiempo de los cuatro años. La cuestión es, ¿por qué se producen desembalses de forma que el caudal en el tramo 10 es superior al

caudal ecológico, mientras que el embalse tiene capacidad disponible para almacenar esos volúmenes? La respuesta a esta pregunta podría ser que en la función objetivo no se favorece ni penaliza el almacenamiento de volúmenes, por lo que hay cuestiones que podrían plasmarse en distintas soluciones. Pero analizando en detalle, se observa que se están produciendo desembalses superiores al caudal ecológico que a su vez están provocando incumplimientos del suministro a las demandas, y este hecho sí que está penalizado en la función objetivo. Este suceso será fundamentado en próximos apartados, ya que viene condicionado por requerimientos que se encuentra aguas abajo.

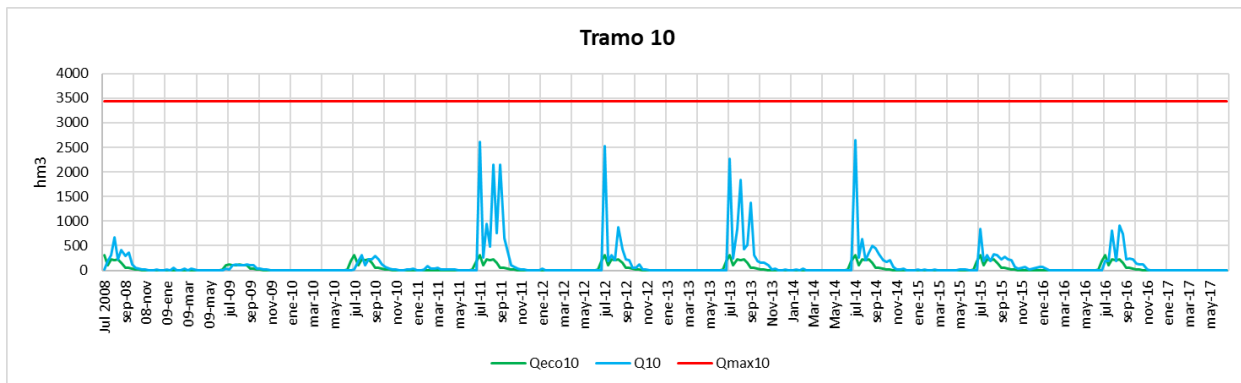


Figura 16. Análisis del tramo 10 optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días. Elaboración propia

Por último, se realiza una reflexión. Y es que, volviendo al primer gráfico, se observa cómo el cálculo independiente año a año, tiene una gran influencia en la optimización del sistema, ya que en muchos casos no se producen grandes desembalses durante la segunda mitad de los años hidrológicos, ya que no son requeridos por la función objetivo, pero luego en el primer paso de tiempo del siguiente año se producen grandes desembalses para poder absorber los caudales procedentes del monzón, como se observa en el caso de 2012 y 2014.

4.1.3 Embalse de Tawa

Se procede en el análisis de la misma forma que en Bargi. Se esperan comportamientos similares ya que también es un embalse de cabecera, aunque en este no se cuenta con un factor limitante del suministro a las demandas como era el caso del canal derecho de Bargi.

Observando el gráfico se llega a las mismas conclusiones que para Bargi. Aquí también se lamina en la medida de lo posible la punta que se produce en el tramo de río 15 al comienzo del sexto año. Como gran diferencia se podría destacar que en este caso el embalse sí que acaba casi todos los años hidrológicos con volúmenes bajos. Este factor se debe a que el volumen es inferior al de Tawa y su regulación de caudales no va más allá del año hidrológico, por lo tanto se podría decir que no se trata de un embalse hiperanual.

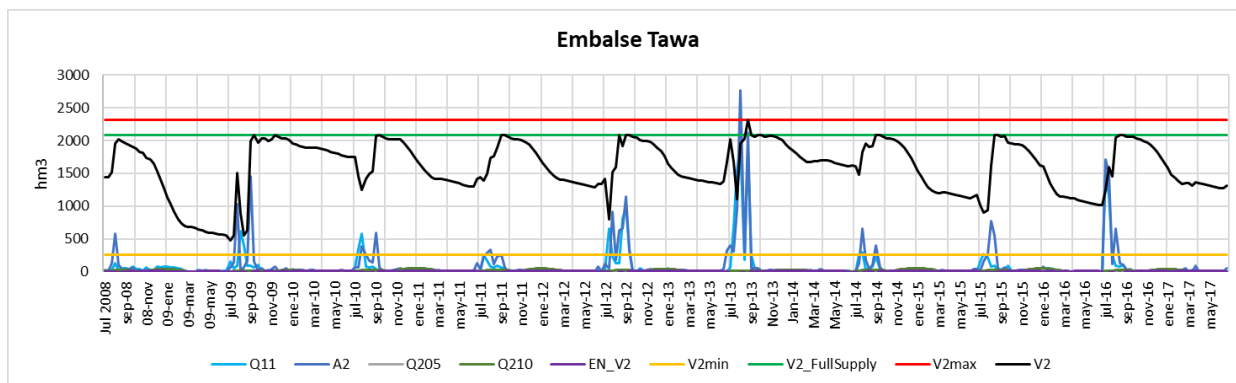


Figura 17. Balance en el embalse de Bargi optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días. Elaboración propia

También llama la atención cómo se vacía al comienzo del segundo año hidrológico, tras absorber una punta, y que después no se alcance el volumen máximo. Esto indica que ese vaciado no tiene su origen, o al menos no únicamente, en la necesidad de crear disponibilidad de volumen para absorber la punta que llega a continuación. Este comportamiento también se explica más adelante.

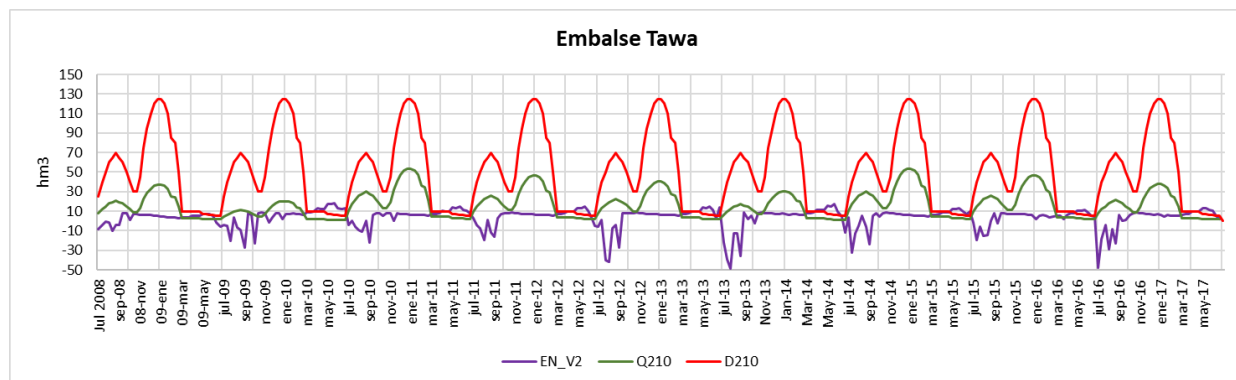


Figura 18. Balance en el embalse de Bargi optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días escala ampliada. Elaboración propia

En cuanto a los déficits en el suministro a las demandas, en este caso vienen condicionados por el valor de suministro más desfavorable dentro del año hidrológico.

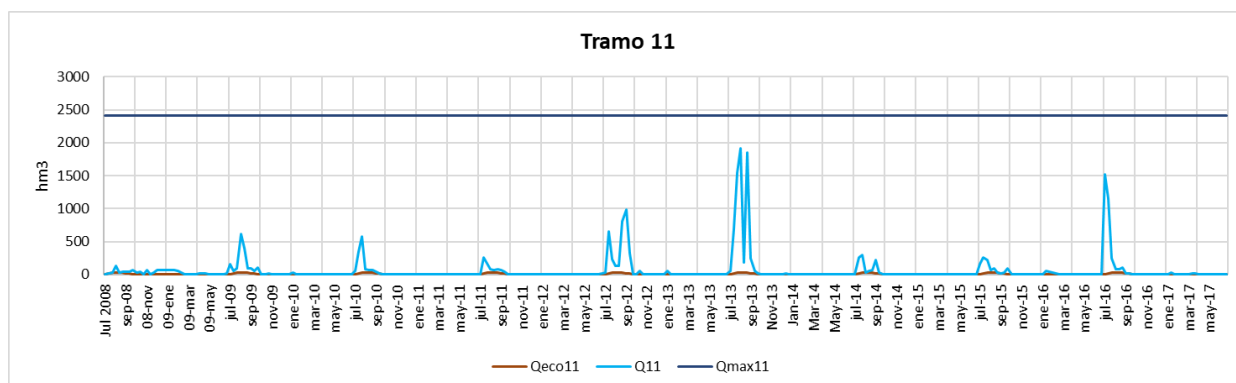


Figura 19. Análisis del tramo 11 optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días. Elaboración propia

En este caso sí que se produce un caudal pico que se acerca a la capacidad máxima del cauce (perteneciente al mismo evento que produce el incumplimiento en el tramo 15), pero de nuevo no se supera ese límite, y se satisfacen en todo momento los caudales ecológicos.

4.1.4 Tramo de río 12

En tramo de río 12, tras realizar un análisis detallado, se observa un comportamiento muy particular. Lo primero a destacar es la gran magnitud de su caudal ecológico, sobre todo si se compara con los establecidos en los tramos 10 y 11.

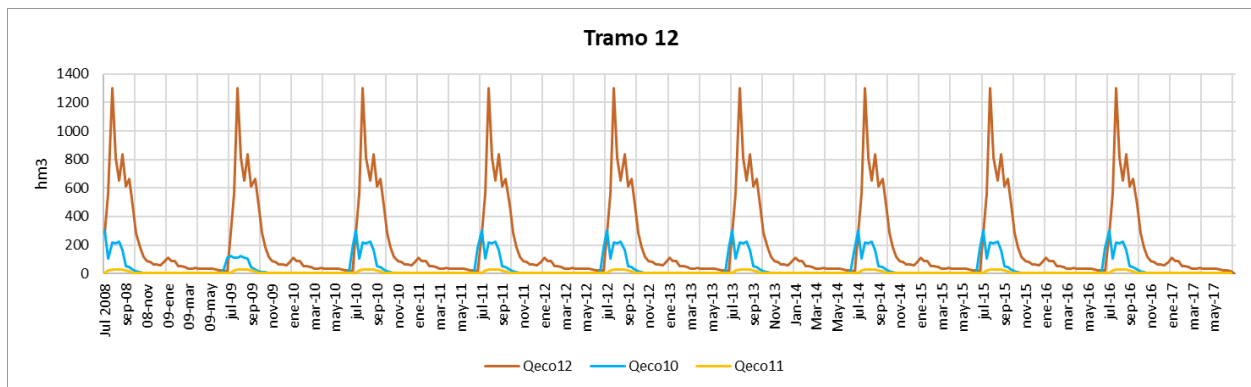


Figura 20. Caudal ecológico en el tramo de río 12 respecto a los tramos 10 y 11 en periodos de 10 días. Elaboración propia

Si desde aguas abajo se está requiriendo el cumplimiento de este caudal ecológico, es esperable que se produzcan esos desembalses superiores a los caudales ecológicos de los tramos 10 y 11 como se había observado previamente. Pero también es cierto que en el nudo 7, donde confluyen los tramos 10 y 11, y del que parte el tramo 12, también se recibe una aportación.

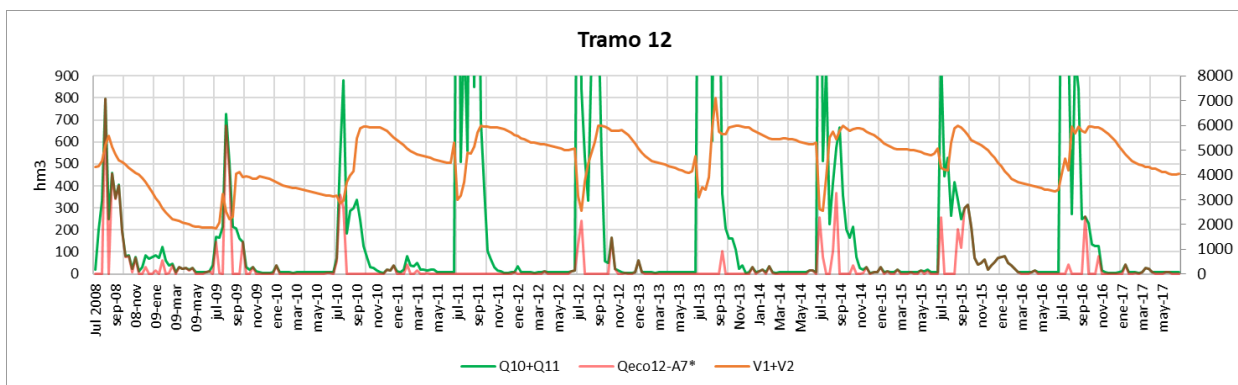


Figura 21. Análisis del balance en el nudo 7 optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días. Elaboración propia

En el siguiente gráfico se estudia este comportamiento. Se representa como variable el requerimiento de caudal ecológico una vez sustraídos los caudales procedentes de la aportación del nudo 7. Estos requerimientos son los que deben ser resueltos desde los embalses de Bargi y Tawa.

Cuando se produce el solape entre la suma de los caudales procedentes de estos embalses (Q10+Q11), y este requerimiento de caudal ecológico desde los mismos (Qeco12-A7*), la línea adquiere tonos marrones. Comparándola con la evolución del volumen de los embalses, se observa por ejemplo cómo los dos primeros años estos embalses se vacían para cumplir con este requerimiento. Aquí se observa claramente el origen de la gran suelta en el embalse de Tawa en verano de 2009.

Por lo tanto, es el cumplimiento del caudal ecológico en el tramo 12 el que en muchas ocasiones rige los desembalses de Bargi y Tawa, aunque ello suponga un menor suministro a las demandas que se abastecen desde estos embalses, ya que la penalización por incumplimiento del caudal ecológico es mayor.

4.1.5 Embalse ISP

El embalse ISP es el elemento central del sistema, y el más determinante en cuanto a almacenamiento y por tanto regulación.

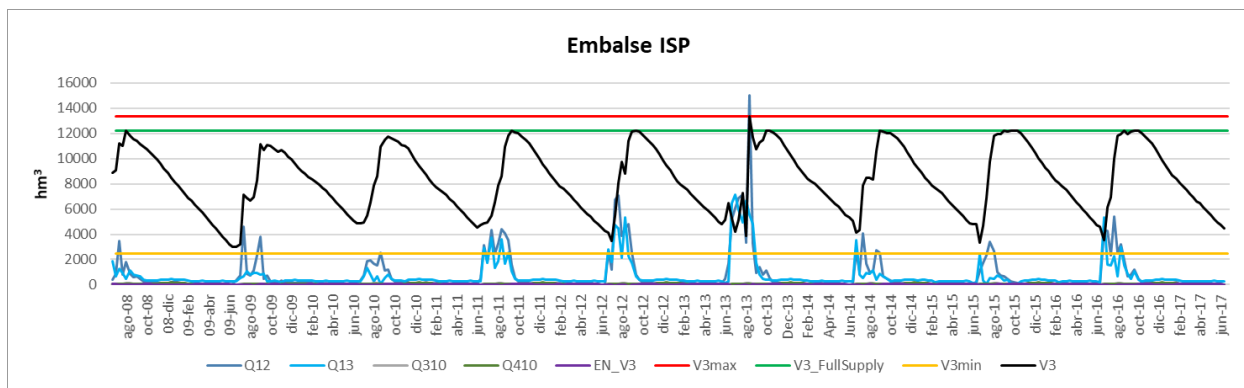


Figura 22. Balance en el embalse ISP optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días. Elaboración propia

Se observan el mismo comportamiento que en los anteriores, y aquí ya sí se aprecia la punta de entrada que produce el incumplimiento del caudal máximo. Procedente de los embalses de Bargi y Tawa, que la han laminado todo lo posible hasta agotar su capacidad, aunque esta capacidad de laminación es limitada al no preverse este fenómeno en la gestión del año anterior, y sobre todo del punto de aportación 7, donde ya no existe capacidad de laminación de la punta.

Debido a que el embalse OSP tampoco tiene mucha capacidad de laminación por tener un volumen de operación constante, si el ISP no es capaz de laminar la punta, se producirá incumplimiento en el tramo 15.

En el resto de los años no se necesita usar ese volumen de resguardo, por lo que no se producen incumplimientos del caudal máximo en el tramo de río 15.

Analizando las componentes del balance con una menor magnitud, se observa como la evaporación neta en este caso presenta valores absolutos más altos, ya que por la magnitud del embalse la superficie es mayor.

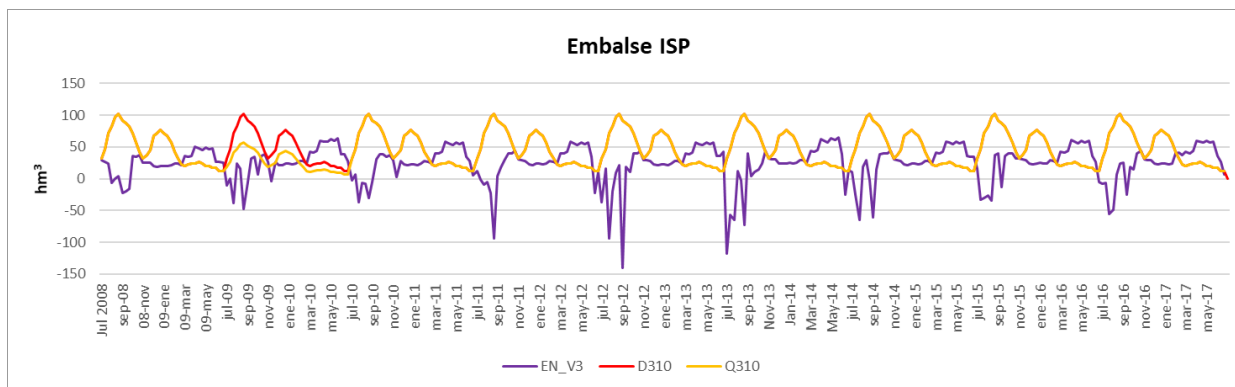


Figura 23. Balance en el embalse ISP optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días escala ampliada. Elaboración propia

En cuanto a la atención a las demandas, sólo se produce déficit el segundo año. Este incumplimiento tiene su motivación en el bajo nivel en el que se comienza el año hidrológico, sumado con unas bajas aportaciones también en el inicio, por lo que se produce déficit en los primeros pasos de tiempo y este se extiende a lo largo de todo el año. Este es otro de los casos donde la regla de reparto de déficit a lo largo del año hidrológico lleva a que se produzcan reducciones en los suministros pudiendo ser posibles sin afectar significativamente a la gestión del sistema.

4.1.6 Embalse OSP

El tramo 14 no se considera relevante en cuanto al análisis de los resultados ya que en él no se marcan requerimientos de caudal máximo o ecológico, y es que en la práctica el embalse OSP es un contraembalse del ISP y este tramo se encuentra anegado por el OSP.

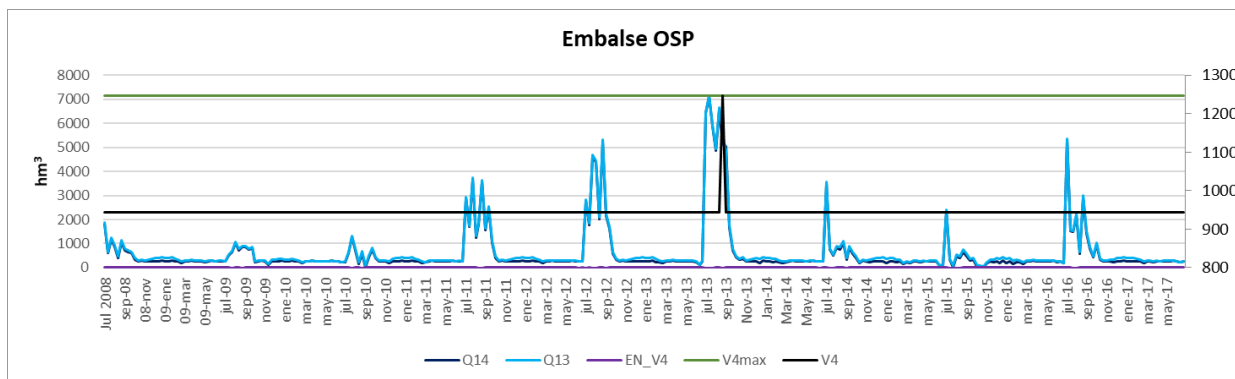


Figura 24. Balance en el embalse OSP optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días. Elaboración propia

Analizando el balance del embalse, se comprueba que el nivel es constante excepto durante la punta que produce el incumplimiento del caudal máximo en el tramo de río 15, situado inmediatamente aguas abajo, momento en el que utiliza su resguardo para laminar la magnitud de esta punta. En el gráfico se representan a una escala distinta los volúmenes.

El caudal de entrada (Q13) es algo superior al de salida (Q14), siendo la diferencia entre ambos el suministro a la demanda D410, que como se ha indicado en la práctica se suministra desde ISP. Es decir, en cada paso de tiempo de ISP sale un volumen destinado de recurso hacia esa demanda, que simplemente pasa por OSP pero no se almacena en él. Por lo tanto, la demanda D410 se satisface de la misma forma que la D310 por la regla de igualdad de déficit.

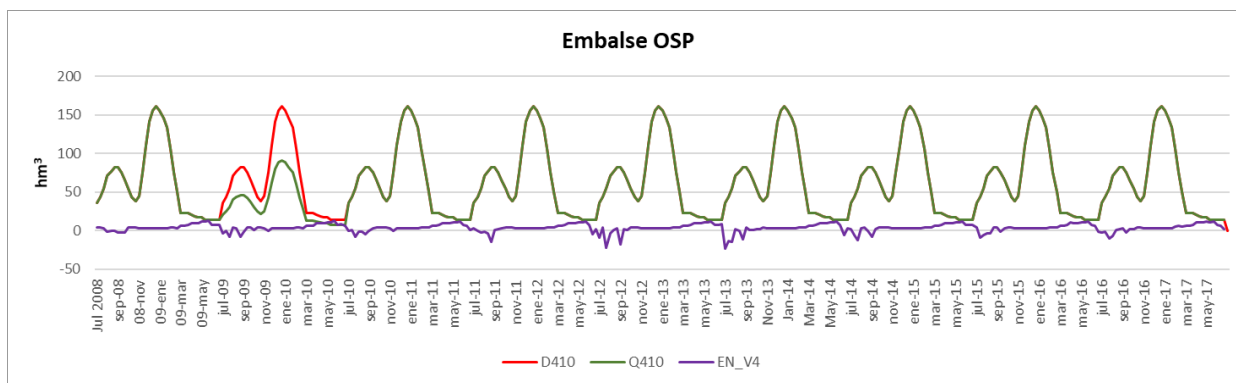


Figura 25. Balance en el embalse OSP optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días escala ampliada. Elaboración propia

Con la evaporación neta sucede lo contrario que en el ISP, en este caso es donde menos relevancia tiene por la menor superficie que presenta el embalse.

4.1.7 Tramo 15

Analizando lo que sucede en el tramo 15, y también el balance del nudo 5, se observa en primer lugar cómo Q15 se corresponde con Q14 incrementado por el aporte de A5. Llama la atención como desde el ISP desembalsan caudales complementarios a los procedentes de A5 para que el caudal máximo durante el incumplimiento sea constante, siendo esta la forma en la que consigue minimizar la penalización de forma más satisfactoria.

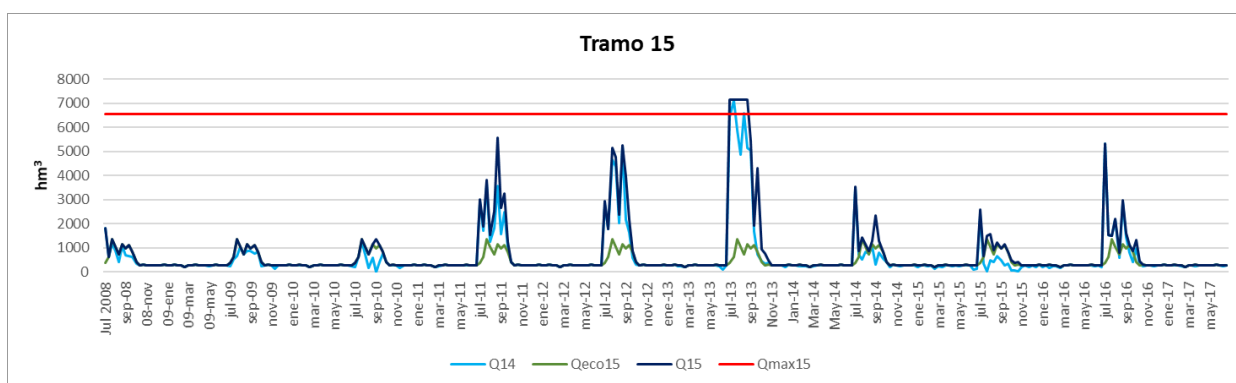


Figura 26. Análisis del nudo 5 y el tramo 15 optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días. Elaboración propia

4.1.8 Embalse SSP

En el último embalse del sistema la gestión se encuentra más holgada, tanto para el recurso como para las avenidas. En el caso de las avenidas es trivial que no existan

problemas ya que no existen limitaciones de caudal máximo en el tramo situado aguas abajo. Por esto mismo nunca se supera el nivel de suministro completo.

En cuanto al recurso, la gran demanda de caudal ecológico en el tramo 15, como las aportaciones introducidas en el nudo 5, llevan a que el embalse presente grandes volúmenes durante todo el periodo de estudio.

Además, según la definición de la función objetivo, este embalse solo tiene la responsabilidad de suministrar a la demanda D610 (Canal del Narmada), por lo que habiendo recurso disponible, nunca se produce déficit. También hay que tener en cuenta que por la definición del problema desde el tramo 510, a parte de a la demanda D610, también se suministran los 17 m³/s para el tramo 17, pero este requerimiento presenta una magnitud muy reducida respecto a los valores que se manejan para el resto de variables.

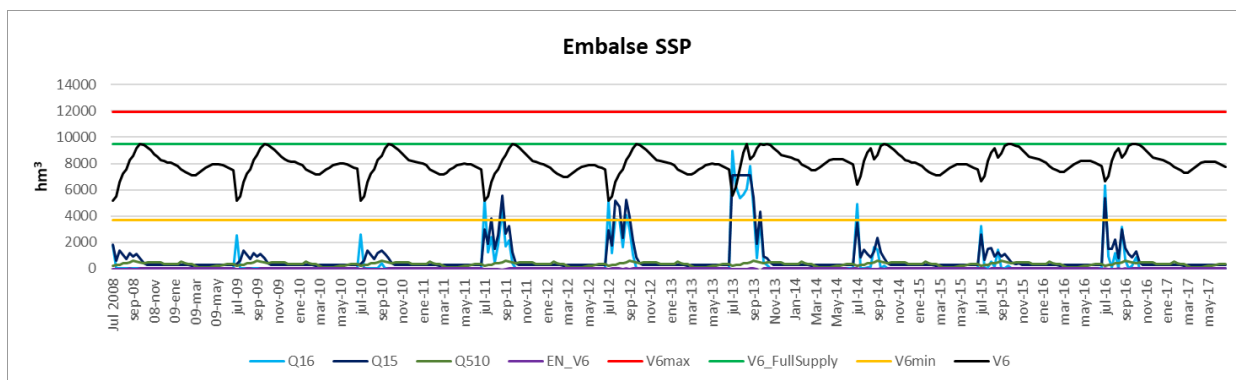


Figura 27. Balance en el embalse SSP optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días. Elaboración propia

En cuanto a la evaporación neta, se observa que de nuevo esta variable tiene un gran peso debido a la gran extensión en superficie del embalse.

También se observa cómo el caudal que se deriva en el nudo 9 hasta la demanda D610 es proporcional al que procede de 510, con la diferencia de esos 17 m³/s que se derivan por el tramo 17.

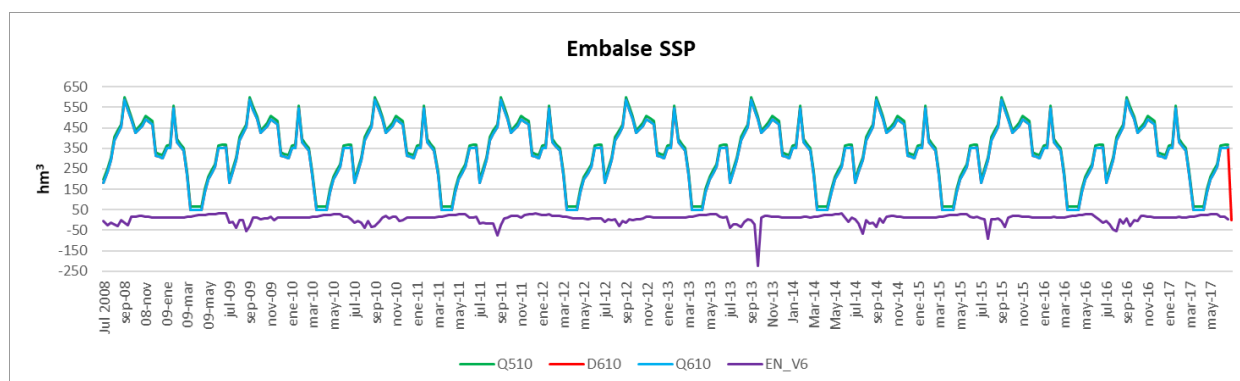


Figura 28. Balance en el embalse SSP optimizando 1 año con OPTIGES-TPV en periodos de 10 días escala ampliada. Elaboración propia

Por último, se apunta que el caudal que se suelta desde el SSP hacia el tramo de río 16 no viene condicionado por la función objetivo y por tanto el optimizador lo puede resolver de distintas formas posibles, ya que no se incentiva ni penaliza el almacenamiento en los embalses.

De la misma forma puede suceder en la cabecera del sistema, donde en ciertas ocasiones puede ser indiferente realizar las sueltas para cumplir con el caudal ecológico en el tramo 12 desde Bargi o Tawa, y queda a merced de lo que decida el algoritmo que resuelve el problema.

Para controlar estas prioridades se deberían añadir más condicionantes a la función objetivo.

4.1.9 Cumplimiento de las reglas de reparto de déficit

Se concluye el análisis de los resultados validando el cumplimiento de las reglas de reparto de déficit, ya que son la única restricción que no ha sido comprobada a lo largo de los puntos anteriores.

Graficando el déficit en cada una de las demandas para todo el periodo de estudio, se observa cómo se cumple la regla de igualdad de déficit en las parejas de demandas, ya que existe un solape global en cada pareja. También se puede comprobar que se cumple la regla de reparto de igualdad de déficit dentro de un mismo año ya que se aprecia cómo la representación gráfica los valores del déficit se corresponde con una línea recta para cada uno de los años hidrológicos objeto de estudio.

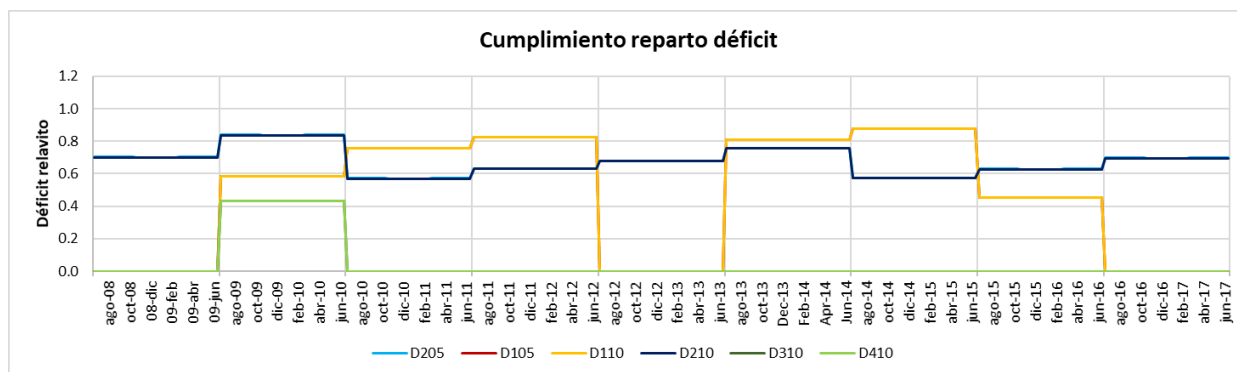


Figura 29. Cumplimiento de las reglas de reparto de déficit con OPTIGES-TPV. Elaboración propia

4.2 Resolución cada dos años

Si bien el problema tal como se plantea por el organismo de cuenca del Narmada ha sido resuelto, a lo largo del análisis de los resultados se han observado distintas formas de mejorar la optimización de forma que se obtuviera una gestión más racional del sistema.

Como se ha indicado previamente, no es objeto del trabajo realizar mejoras en el planteamiento del problema, aunque existe una solución que mejoraría en gran medida los resultados y se puede implementar en OPTIGES-TPV de forma muy sencilla.

Esta solución es resolver la optimización cada dos años, en lugar de año a año, de forma que se tendría en cuenta en la resolución cómo afecta el reparto al año siguiente y el valor de las variables para el último paso de tiempo sería más favorable al ser utilizado como partida en el siguiente año hidrológico.

Por lo tanto se procede optimizando cada dos años, quedándose con los resultados del primero de los años. Es decir, se optimizan los dos primeros años y se toman como resultados definitivos los obtenidos para el primer año. A continuación, se optimizan el segundo y el tercer año, de forma que en el segundo año, las condiciones iniciales serían más favorables, y se almacenan como resultados definitivos los del segundo año. Y así sucesivamente. La última optimización se realiza para los dos últimos años y en ese caso sí se toman como definitivos los resultados obtenidos para los dos años.

Con esta modificación en la resolución del problema se prevé reducir el incumplimiento del caudal máximo en el tramo de río 15 para el sexto año hidrológico, y mejorar la atención a las demandas.

4.2.1 Resultados de la optimización

A continuación se muestra de nuevo la tabla en la que se resumen los valores de la función objetivo para cada una de las tres componentes a evaluar, para cada uno de los años estudiados.

Año Hidrológico	Valores de la Función Objetivo			Total
	Avenidas	Caudales Ecológicos	Demandas	
2008/09	-	-	28.790	28.790
2009/10	-	-	21.377	21.377
2010/11	-	-	14.256	14.256
2011/12	-	-	19.820	19.820
2012/13	-	-	27.166	27.166
2013/14	-	-	30.688	30.688

2014/15	-	-	31.466	31.466
2015/16	-	-	13.572	13.572
2016/17	-	-	13.469	13.469
Total	-	-	200.604	200.604

Tabla 8. Valores de la función objetivo optimizando 2 años con OPTIGES-TPV. Elaboración propia

Con la nueva optimización se comprueba lo previamente vaticinado, ya que se lamina toda la punta que previamente se producía en el tramo de río 15, siendo en este caso nula la penalización por avenidas.

De forma global para los nueve años también se reduce la penalización por déficit en las demandas, aunque esta mejora no se produce para todos los años, ya que por una lado una mayor previsión puede hacer que se reserve agua para suministrar a una unidad demanda, pero también puede hacer que no se produzca este suministro para atender de forma más satisfactoria otros requerimientos con mayor prioridad. Esto se observa los dos primeros años hidrológicos, en el primero la penalización empeora porque antes se gastaban todos los recursos disponibles, pero en el segundo mejora notablemente al preverse que si se suministraba más el primer año no quedaría recurso para el segundo. De forma media entre estos dos años sí se produce mejora.

También destaca el caso del quinto año, en el que empeora el suministro a las demandas porque con la previsión de la gran avenida los embalses se vacían el año anterior, factor que previamente no se tenía en cuenta y tenía como consecuencia el incumplimiento del condicionante con mayor penalización.

A continuación, se compara el volumen obtenido para la optimización de dos años en cada uno de los embalses, con los obtenidos para la optimización de un año, analizando la causa de las diferencias existentes. Solo se estudia esta variable ya que en rasgos generales el funcionamiento del sistema es el mismo, a diferencia de que en este caso el reparto del recurso se hace de una forma un poco más óptima.

4.2.2 Embalse de Bargi

En el caso del embalse de Bargi, se observa cómo la optimización de dos años suaviza la evolución del volumen. En los dos primeros años es más conservador, mientras que en el resto realiza más desembalses para evitar llegar al máximo por avenidas. Este comportamiento resulta exitoso en el sexto año, donde por una mayor capacidad disponible, por la gestión del año previo, se permite colaborar con la laminación de la punta que causaba penalización en el tramo 15 y sin ni siquiera tener que alcanzar el volumen máximo del embalse.

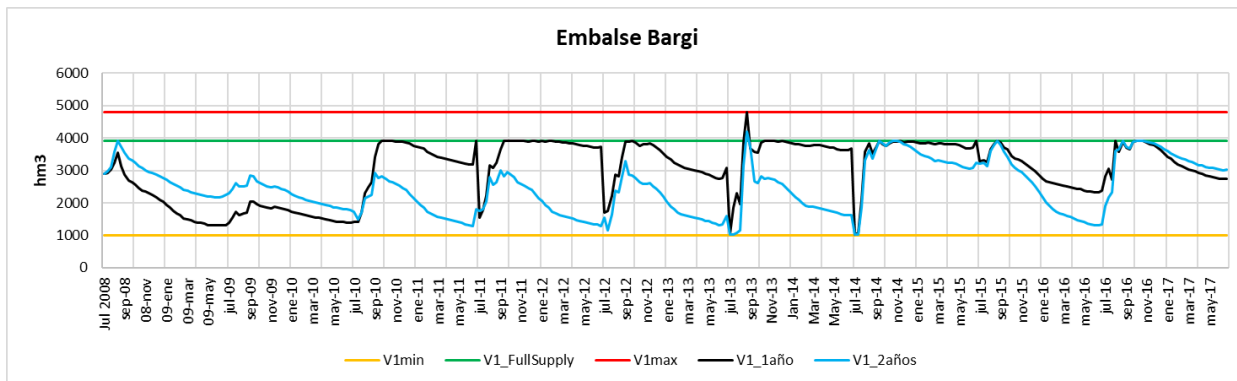


Figura 30. Comparativa del volumen embalsado en Bargi optimizando 1 y 2 años con OPTIGES-TPV. Elaboración propia

4.2.3 Embalse de Tawa

En el embalse de Tawa se vuelve a apreciar este comportamiento, consistente en dejar un mayor resguardo al final del año hidrológico para evitar problemas al año siguiente.

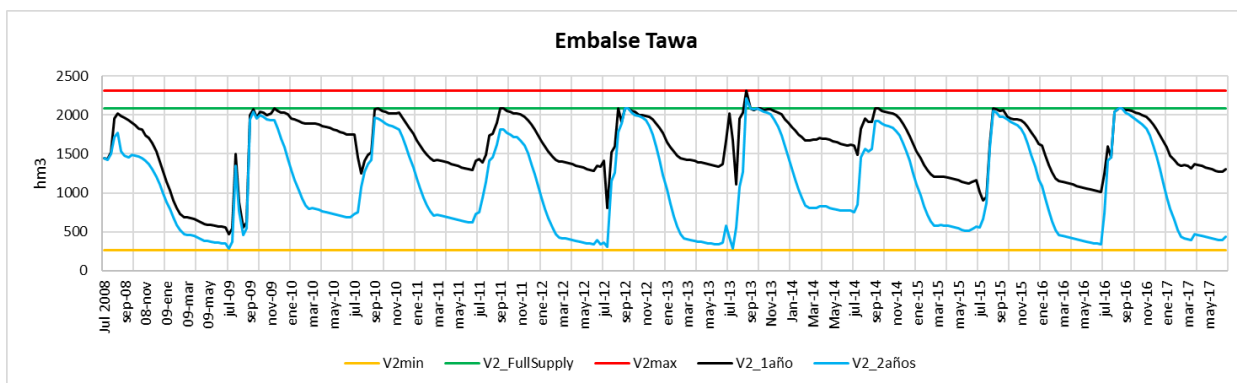


Figura 31. Comparativa del volumen embalsado en Tawa optimizando 1 y 2 años con OPTIGES-TPV. Elaboración propia

4.2.4 Embalse ISP

En el embalse ISP, las diferencias son menos significativas, aunque la que sí se destaca es el vaciado del embalse al final del quinto año hidrológico para evitar la penalización por avenidas en el sexto año, factor determinante y que supone la mayor mejora de una optimización respecto a la otra.

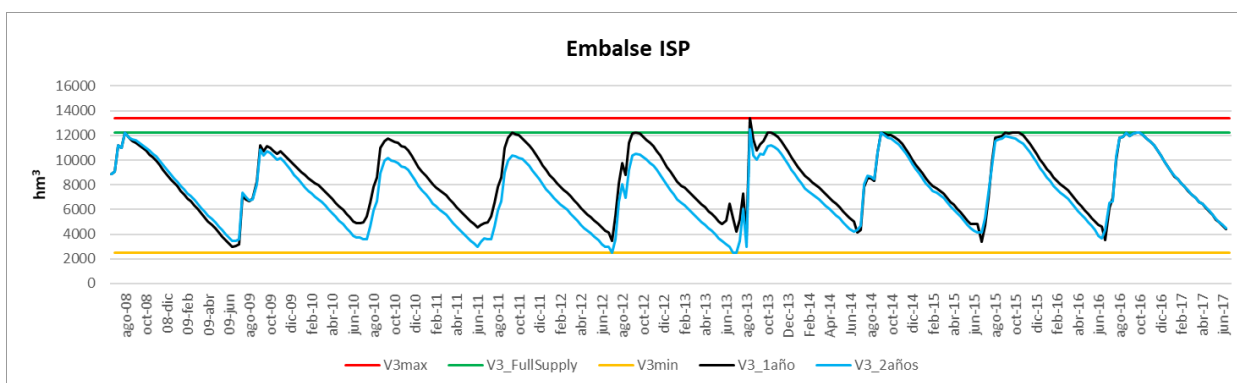


Figura 32. Comparativa del volumen embalsado en ISP optimizando 1 y 2 años con OPTIGES-TPV. Elaboración propia

4.2.5 Embalse OSP

En el embalse OSP la única diferencia es que al no producirse el incumplimiento por la gestión del resto de embalses, la contribución que realiza para laminar esta punta es mucho más reducida.

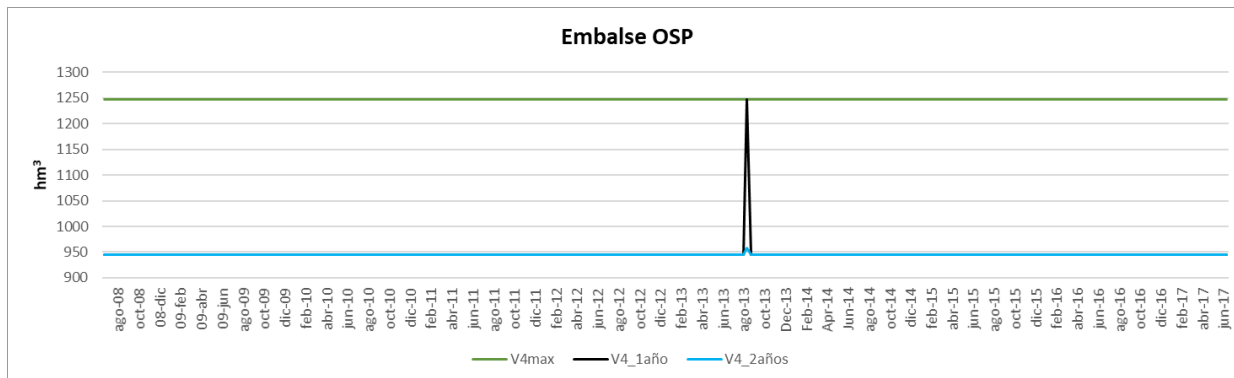


Figura 33. Comparativa del volumen embalsado en OSP optimizando 1 y 2 años con OPTIGES-TPV. Elaboración propia

4.2.6 Embalse SSP

Por último, en el SSP, y quizá sea este uno de los casos más ilustrativos, se observa cómo la gestión de este embalse es más libre, ya que una vez que se satisface la demanda D610 el resto del recurso puede retenerse o desembalsarse.

En el caso de optimizar cada dos años pero solo almacenar los resultados del primero, puede resultar más complejo comprender la gestión que se está realizando, pero en este caso se ejemplariza muy bien cómo para cada dos años el optimizador reserva una mayor cantidad de recurso para el segundo año, y haciéndolo sucesivamente para todos los años, sólo se alcanza el llenado del embalse en el último año, cuando sí se muestran los dos años optimizados conjuntamente.

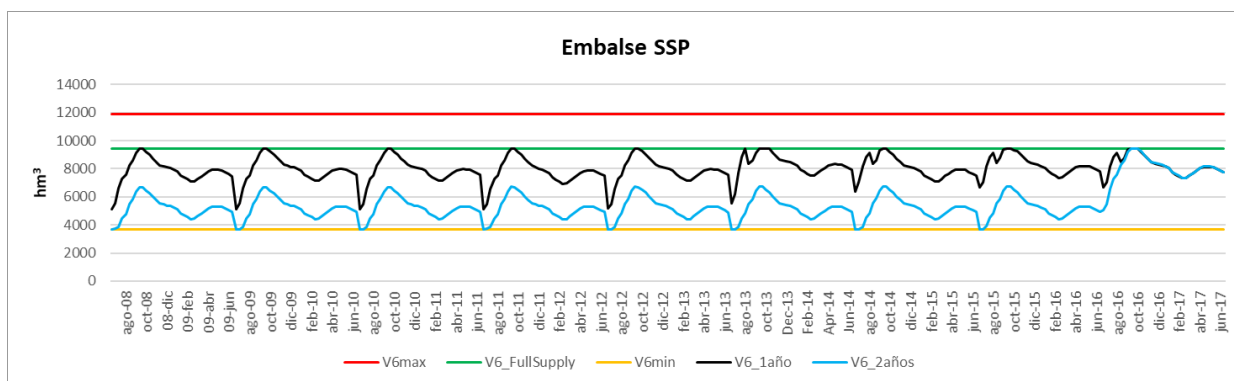


Figura 34. Comparativa del volumen embalsado en SSP optimizando 1 y 2 años con OPTIGES-TPV. Elaboración propia

5. Modelo desarrollado con software comercial (MATLAB)

Uno de los principales objetivos de este trabajo es el desarrollo de un modelo ad hoc para el caso concreto de estudio, planteando una formulación que materialice el funcionamiento del sistema integrando todos los requerimientos particulares del problema y utilizando un software comercial que cuente con herramientas de optimización.

El objetivo en sí es, el desarrollo de la formulación, su adaptación a la estructura del optimizador utilizado, y la posterior comparativa de los resultados con los previamente analizados, obtenidos con OPTIGES-TPV.

Se pretende utilizar una herramienta sin conocimientos previos, con la que el programador del problema no esté familiarizado, para comprobar la complejidad de la resolución de un problema de este tipo, con la ventaja de contar con funciones y algoritmos de optimización ya definidos, que se deben aprender a manejar, pero sin profundizar en su funcionamiento interno.

5.1 Elección del software comercial

Dentro de las distintas opciones de softwares de desarrollo de aplicaciones de optimización, y los distintos lenguajes posibles, se elige utilizar MATLAB, por su extendido uso en aplicaciones ingenieriles, la gran documentación de consulta disponible, y sobre todo por contar con un módulo de optimización con gran número de funciones que se adaptan a distintos tipos de problemas.

MATLAB (MATrix LABoratory) es un sistema de cómputo numérico, desarrollado por MatWorks, que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, macOS y GNU/Linux.

Entre sus prestaciones básicas se hallan la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes).

Si bien MATLAB no es un software libre, para este trabajo se cuenta con una licencia proporcionada por la Universidad Politécnica de Valencia para todos sus estudiantes, de forma que se puede acceder a todos los contenidos y herramientas del software, además de contar con el apoyo del servicio técnico de MatWorks.

5.2 Herramientas de optimización

MATLAB cuenta con una caja de herramientas (toolbox) de optimización. Como indica su propia documentación:

“Optimization Toolbox proporciona funciones para hallar parámetros que minimicen o maximicen los objetivos y respeten las restricciones. Esta toolbox incluye solvers para la programación lineal (LP), la programación lineal entera mixta (MILP), la programación cuadrática (QP), la programación no lineal (NLP), los mínimos cuadrados lineales con restricciones, los mínimos cuadrados no lineales y las ecuaciones no lineales. Puede definir su problema de optimización con funciones y matrices, o bien especificando expresiones de variables que reflejen la matemática subyacente.”

A la hora de elegir la función de optimización, se deben tener en cuenta las características de la función objetivo y de las restricciones.

En el caso de que la función objetivo sea no lineal, como sucede para este problema ya que incorpora la función máximo, se recomienda utilizar la función *fmincon*.

A continuación, se formulan las ecuaciones y restricciones a través de las cuáles se define el problema, posteriormente se describe la estructura de la función *fmincon*, y a continuación se explica cómo se ha adaptado la formulación del problema a esta estructura.

5.3 Formulación del problema de optimización

El problema se define fundamentalmente por las ecuaciones de balance en cada uno de los embalses y nudos. Estas se complementan por una serie de expresiones que tienen como objetivo garantizar el cumplimiento de todas las restricciones descritas en la caracterización del problema.

La ecuación de balance de un embalse, previamente enunciada en la definición del problema, establece que la variación de volumen en un paso de tiempo es igual a la diferencia entre los volúmenes entrantes y salientes durante ese periodo de tiempo. En el caso de los nudos que no son embalses, sería una particularización de la ecuación de balance del embalse, en la que la diferencia de volumen es nula ya que no existe capacidad de almacenamiento.

5.3.1 Definición de los términos de las ecuaciones

En primer lugar, se diseña el esquema topológico simplificado que se utiliza para definir el sistema. En la siguiente figura se resumen los elementos del mismo.

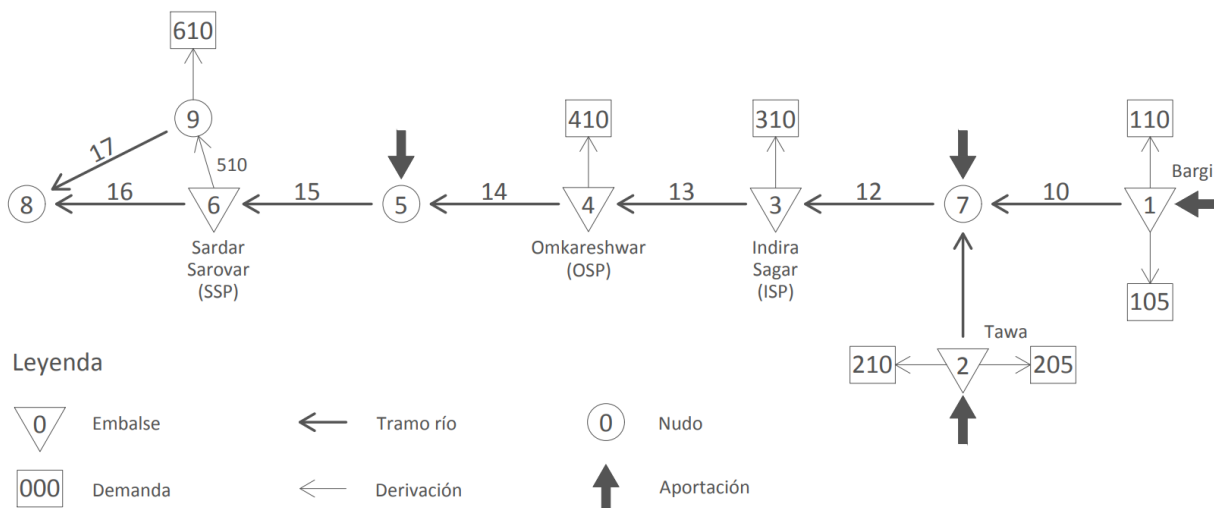


Figura 35. Esquema topológico simplificado del sistema. Elaboración propia

Las ecuaciones de balance estarán formadas por dos tipos de variables:

Datos del problema

- Volumen de los embalses al inicio del primer año.
- Aportaciones. Tal como se facilitan los datos, a la serie de aportaciones en el nudo A7 se le deben sustraer la aportación en los embalses de cabecera (A1 y A2), para obtener la aportación real del nudo. De la misma forma a la aportación A5 se le debe restar la A7.

$$A7^* = A7 - A1 - A2$$

$$A5^* = A5 - A7$$

- Demandas. Se formulan como DXXX siendo XXX el código numérico de la unidad de demanda.
- Evaporación y precipitación. Ambas series se expresan combinadas para cada uno de los embalses como evaporación neta.

$$ENX = EX - PX$$

donde X se corresponde con el código numérico del embalse

- Caudal del tramo de río 17. La definición del problema establece que el caudal de este tramo será para todos los pasos de tiempo de 17 m³/s, por lo que se introduce como dato en las ecuaciones de balance para que esté implícito en la formulación del problema.

VARIABLES DE CÁLCULO

- Volumen de los embalses. Se formula como VX siendo X el código numérico del embalse.
- Superficie de los embalses. Se formula como SX siendo X el código numérico del embalse. En realidad no es una variable de cálculo, ya que es función del volumen del

embalse para cada paso de tiempo, pero en la descripción de la formulación se muestra como superficie para dar sentido al balance.

- Caudales en los tramos de río. Se formulan como QXX siendo XX el código numérico del tramo de río.
- Caudales en las derivaciones. Se formulan como QXXX siendo XXX el código numérico de la demanda a la que abastecen. Caso particular el del Q510, correspondiente con la derivación con este código.

5.3.2 Cambio de variable por igualdad de déficit en las demandas

El planteamiento del problema impone que, para todas las demandas, el déficit (y por tanto el suministro) sea el mismo en cada uno de los 36 intervalos de tiempo dentro de un mismo año. A su vez establece esta igualdad de déficit para las parejas de demandas que se atienden desde un mismo embalse: D105 y D110, D205 y D210, D310 y D410 (en este último caso el suministro se realiza desde dos embalses, pero en el caso del OSP, al tener como uso principal la producción hidroeléctrica, no almacena caudales, por lo que en realidad se podría decir que la demanda 410 se atiende desde el embalse Indira Sagar).

Este requerimiento se podría implementar mediante una serie de ecuaciones que impusieran esta condición, de forma que se necesitarían 36 ecuaciones para igualar el déficit en cada una de las parejas, y a su vez 35 para igualar el déficit en cada periodo temporal para una de las dos demandas de cada pareja y para la demanda que es independiente, sumando un total de 248 ecuaciones.

Para reducir la complejidad del problema, el número de ecuaciones, y también el número de variables, se propone expresar el suministro mensual a cada demanda en función del suministro anual, ya que este será proporcional al valor de la demanda mensual manteniéndose el mismo déficit para cada periodo de tiempo. Se expresaría de la siguiente forma:

$$Q_{105_{\Delta t}} = \alpha_{105_{\Delta t}} \cdot Q_{105_{anual}}$$

$$\alpha_{105_{\Delta t}} = \frac{D_{105_{\Delta t}}}{D_{105_{anual}}}$$

De la misma forma, ya que el porcentaje de suministro es el mismo es para cada pareja de demandas, se puede expresar una en forma de otra:

$$\frac{Q_{105_{\Delta t}}}{D_{105_{\Delta t}}} = \frac{Q_{110_{\Delta t}}}{D_{110_{\Delta t}}}$$

$$Q_{110_{\Delta t}} = \frac{D_{110_{\Delta t}}}{D_{105_{\Delta t}}} \cdot Q_{105_{\Delta t}} = \frac{D_{110_{\Delta t}}}{D_{105_{\Delta t}}} \cdot \alpha_{105_{\Delta t}} \cdot Q_{105_{anual}}$$

Introduciendo unos cambios de variable:

$$\beta_{105} = D_{105_{anual}}$$

$$\gamma_{110_{105_{\Delta t}}} = \frac{D_{110_{\Delta t}}}{D_{105_{\Delta t}}}$$

$$SUMX = \frac{Q105_{anual}}{D105_{anual}} = \frac{Q110_{anual}}{D110_{anual}}$$

Donde SUM se corresponde con el porcentaje de suministro para cada paso de tiempo, y X se corresponde con el embalse desde el que se suministra a unidad de demanda.

Se pueden expresar los caudales suministrados a las demandas D105 y D110, y al resto de forma análoga, como:

$$Q105_{\Delta t} = \alpha_{105_{\Delta t}} \cdot \beta_{105} \cdot SUM1$$

$$Q110_{\Delta t} = \alpha_{105_{\Delta t}} \cdot \beta_{110} \cdot \gamma_{110_{105_{\Delta t}}} \cdot SUM1$$

De esta forma, para cada una de las tres parejas de demandas 72 variables quedan reducida a una (SUM), mientras que en el caso de la demanda 610 son 36 variables las que quedan simplificadas en una, y además se evita introducir las ecuaciones previamente planteadas al estar su objetivo cumplido con esta formulación, quedando las reglas de igualdad de déficit implícitas dentro del planteamiento del problema.

5.3.3 Ecuaciones de balance en los embalses y nudos

Se muestran resaltadas las variables de cálculo.

Embalse de Bargi

$$V1_{\Delta t} - V1_{\Delta t-1} = A1_{\Delta t} - Q10_{\Delta t} - Q105_{\Delta t} - Q110_{\Delta t} - EN1_{\Delta t} \cdot \left(\frac{S1_{\Delta t} - S1_{\Delta t-1}}{2} \right)$$

Embalse de Tawa

$$V2_{\Delta t} - V2_{\Delta t-1} = A2_{\Delta t} - Q11_{\Delta t} - Q205_{\Delta t} + Q210_{\Delta t} - EN2_{\Delta t} \cdot \left(\frac{S2_{\Delta t} - S2_{\Delta t-1}}{2} \right)$$

Nudo 7

$$0 = Q10_{\Delta t} + Q11_{\Delta t} + (A7^*_{\Delta t}) - Q12_{\Delta t}$$

Embalse Indira Sagar

$$V3_{\Delta t} - V3_{\Delta t-1} = Q12_{\Delta t} - Q13_{\Delta t} - Q310_{\Delta t} - EN3_{\Delta t} \cdot \left(\frac{S3_{\Delta t} - S3_{\Delta t-1}}{2} \right)$$

Embalse OSP

$$V4_{\Delta t} - V4_{\Delta t-1} = Q13_{\Delta t} - Q14_{\Delta t} - Q410_{\Delta t} - EN4_{\Delta t} \cdot \left(\frac{S4_{\Delta t} - S4_{\Delta t-1}}{2} \right)$$

Nudo 5

$$0 = Q14_{\Delta t} + (A5^*_{\Delta t}) - Q15_{\Delta t}$$

Embalse Sardar Sarovar

$$V6_{\Delta t} - V6_{\Delta t-1} = Q15_{\Delta t} - Q16_{\Delta t} - Q501_{\Delta t} - EN6_{\Delta t} \cdot \left(\frac{S6_{\Delta t} - S6_{\Delta t-1}}{2} \right)$$

Nudo 9

$$0 = Q501_{\Delta t} - Q17 - Q610_{\Delta t}$$

Estas ocho ecuaciones se pueden simplificar a cinco, una para cada embalse, sustituyendo la expresión de los caudales procedentes de nudos donde no hay variación de volumen en el embalse situado aguas abajo, como caudal de entrada. También se realiza el cambio de variable en el suministro a las demandas.

Embalse de Bargi

$$V1_{\Delta t} - V1_{\Delta t-1} = A1_{\Delta t} - Q10_{\Delta t} - \alpha105_{\Delta t} \cdot (\beta105 + \beta110 \cdot \gamma110_{105_{\Delta t}}) \cdot SUM1 - EN1_{\Delta t} \cdot \left(\frac{S1_{\Delta t} - S1_{\Delta t-1}}{2} \right)$$

Embalse de Tawa

$$V2_{\Delta t} - V2_{\Delta t-1} = A2_{\Delta t} - Q11_{\Delta t} - \alpha205_{\Delta t} \cdot (\beta205 + \beta210 \cdot \gamma210_{205_{\Delta t}}) \cdot SUM2 - EN2_{\Delta t} \cdot \left(\frac{S2_{\Delta t} - S2_{\Delta t-1}}{2} \right)$$

Embalse Indira Sagar

$$V3_{\Delta t} - V3_{\Delta t-1} = Q10_{\Delta t} + Q11_{\Delta t} + A7^*_{\Delta t} - Q13 - \alpha310_{\Delta t} \cdot \beta310 \cdot SUM3 - EN3_{\Delta t} \cdot \left(\frac{S3_{\Delta t} - S3_{\Delta t-1}}{2} \right)$$

Embalse OSP

$$V4_{\Delta t} - V4_{\Delta t-1} = Q13_{\Delta t} - Q14_{\Delta t} - \alpha310_{\Delta t} \cdot \beta410 \cdot \gamma410_{310_{\Delta t}} \cdot SUM3 - EN4_{\Delta t} \cdot \left(\frac{S4_{\Delta t} - S4_{\Delta t-1}}{2} \right)$$

Embalse Sardar Sarovar

$$V6_{\Delta t} - V6_{\Delta t-1} = Q14_{\Delta t} + A5^*_{\Delta t} - Q16_{\Delta t} - Q17 - \alpha610_{\Delta t} \cdot \beta610 \cdot SUM6 - EN6_{\Delta t} \cdot \left(\frac{S6_{\Delta t} - S6_{\Delta t-1}}{2} \right)$$

En cada inicio de año ($\Delta t=1$), para cada embalse, el volumen del periodo anterior se establece como:

- El dato facilitado por el problema para el primer año.
- El volumen final en el último periodo de tiempo del año anterior.

Las ecuaciones contienen en todos los casos los coeficientes correspondientes al ajuste de unidades de todos los términos, de forma que cada uno de estos se expresa en volumen en hectómetros cúbicos para ese periodo ($hm^3/10días$).

5.3.3.1 Restricciones en forma de inecuación

Se incluyen además dos restricciones al problema en forma de inecuación, una que limita el caudal suministrado por el canal 110 desde el embalse de Bargi al establecido en el problema según la cota de la lámina de agua en dicho embalse, y otra que establece, para cada embalse, que el volumen almacenado en el último periodo para cada uno de los años sea igual o superior al que establece el problema (Minimum Water Level on June 30th).

$$\alpha105_{\Delta t} \cdot \beta110 \cdot \gamma110_{105_{\Delta t}} \cdot SUM1 \leq Q110max_{\Delta t}$$

$$V1_{36} \geq V1min_{June\ 30th}$$

$$V2_{36} \geq V2min_{June\ 30th}$$

$$V3_{36} \geq V3min_{June\ 30th}$$

$$V_{4_{36}} \geq V_{4min_{\text{June 30th}}}$$

$$V_{6_{36}} \geq V_{6min_{\text{June 30th}}}$$

5.3.4 Función objetivo

La función objetivo a minimizar, es la descrita en la definición del problema. Cuenta con algunas de las variables de cálculo presentes en las restricciones, aunque no todas, como es el caso, por ejemplo, del Q13, que como se vio en el análisis de los resultados obtenidos con OPTIGES-TPV, no cuenta con ninguna penalización.

La función objetivo integra dos nuevas variables dato del problema, la capacidad máxima de los tramos de río 10, 11 y 15, y las series de caudales ecológicos de los tramos de río 10, 11, 12 y 15.

Solo se realiza una modificación respecto a la función objetivo propuesta por el problema. Para garantizar que el volumen de cada uno de los embalses solo supere el nivel de suministro completo en caso de esto contribuya a minimizar los caudales circulantes aguas abajo y reduzca o anule la penalización por caudales máximos, se añaden unos términos adicionales a la función objetivo, que se tendrán en cuenta durante la optimización, pero no se incluirán a la hora de presentar los valores definitivos de la función objetivo.

$$\delta \cdot \sum_{\Delta t=1}^{\Delta t=36} [\max(V1 - V1_{FS}, 0) + \max(V2 - V2_{FS}, 0) + \max(V3 - V3_{FS}, 0) + \max(V4 - V4_{FS}, 0) + \max(V6 - V6_{FS}, 0)]$$

Donde el valor del coeficiente δ , deberá ser inferior a 1000 pero superior a 100.

5.4 Estructura de la función *fmincon*

Tal como la define MATLAB, la estructura de la función *fmincon* es la siguiente.

$$[x, fval] = fmincon(fun, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, nonlcon, options)$$

Cuenta con diez argumentos de entrada, y dos de salida, que se describen a continuación.

5.4.1 Argumentos de entrada

- fun. Función objetivo a minimizar.
- x0. Punto inicial, desde el que se comienza a buscar el resultado.
- A y b. Matriz de restricciones y vector de términos independientes de desigualdades lineales. Se definen tal que:

$$A \cdot x \leq b$$

- Aeq y beq. Matriz de restricciones y vector de términos independientes de igualdades lineales. Se definen tal que:

$$Aeq \cdot x = beq$$

- lb y ub. Límites inferior y superior de las variables del problema (variables de cálculo).

- *nonlcon*. Función de las restricciones no lineales. Contiene dos vectores de funciones, *c* para las desigualdades y *ceq* para las igualdades.
- *options*. Opciones de la optimización, distintos parámetros del optimizador que se pueden configurar, entre ellos la elección del algoritmo de resolución, el número máximo de evaluaciones de la función objetivo o las tolerancias.

5.4.2 Argumentos de salida

- *x*. Vector que contiene las variables de cálculo del problema, es decir, los resultados de la optimización.
- *fval*. Valor de la función objetivo al finalizar la optimización.

5.5 Adaptación del problema a la estructura de *fmincon*

A la hora de implementar el problema con la estructura de la función *fmincon*, se han realizado diversos enfoques, ya que la rigidez de la estructura dificulta la formulación de ciertos aspectos del problema.

En todos los casos ha habido elementos comunes, siendo el más destacado la función objetivo, que ha permanecido invariable tal como se ha descrito previamente.

A continuación, se describen estos enfoques a través de los cuales se ha tratado de implementar el problema con todos sus condicionantes.

5.5.1 Restricciones lineales con iteraciones externas

En primer lugar, se ha abordado la programación del problema a través de restricciones lineales, utilizando los elementos *A*, *b*, *Aeq* y *beq*.

- En *Aeq* y *beq* se han introducido las 180 ecuaciones de balance, 36 para cada embalse.
- En *A* y *b* las restricciones en forma de inecuación.
- El límite inferior de las variables se ha definido como cero en todos los casos, excepto para el embalse OSP, en el que se ha establecido como valor mínimo del volumen el habitual durante su explotación.
- El límite superior se ha definido como el volumen máximo para los volúmenes de los embalses, la demanda total para el suministro a las demandas, e infinito para los caudales en los tramos de río.
- El valor inicial de las variables se ha definido de distintas formas durante el desarrollo del problema, pero en general para los volúmenes se han propuesto los correspondientes con los niveles de suministro completo, para los suministros el suministro global, y para los tramos del río el valor del caudal ecológico en caso de existir, o un valor aproximado a partir de este dato.
- En cuanto a las opciones del optimizador, en un principio se han utilizado las configuradas por defecto, que cuentan con el algoritmo *interior-point*.

La cuestión a considerar en este caso, y en general a lo largo de la implementación del problema en MATLAB, ha sido el cálculo de la superficie en cada paso de tiempo.

En primer lugar, se ha planteado un cálculo iterativo fuera de *fmincon*, un bucle en el que, con una superficie inicial, se resuelve el problema, y con los volúmenes obtenidos se calcula la superficie asociada con una función que interpola la variable a partir de la tabla Cota-Volumen-Superficie facilitada para cada embalse, y con esta superficie se vuelve a resolver la optimización, y así sucesivamente. Con este planteamiento se cuantifica el término de la superficie en las ecuaciones de balance, y también se puede obtener el caudal máximo Q_{110max} , condicionado en cada paso de tiempo por el nivel del embalse de Bargi.

De la misma forma se ha impuesto la condición de volumen de zona muerta, añadiendo una estructura fuera de *fmincon* que para los casos en los que el volumen de un embalse descendiera del nivel de zona muerta, se anularan los caudales salientes del embalse hacia los tramos de río o las derivaciones.

Respecto al comportamiento de estas dos estructuras iterativas fuera del optimizador, la segunda rápidamente se ha detectado como ineficiente ya que para cada iteración se producen unas condiciones distintas, de forma que unas veces se anulan unos caudales que en otros casos sí se permiten, no se produce una convergencia hacia una solución inamovible, sino que se entra en bucles en los que se avanza y retrocede sin llegar a converger.

Por lo tanto, se ha planteado otra forma de materializar esta limitación. Se propone establecer como límite inferior para el volumen de los embalses su volumen correspondiente con el nivel de zona muerta. Esta aproximación impide que ocurra una situación en la que al alcanzar un embalse el nivel de zona muerta, no reciba entradas de caudal, o las que reciba sean inferiores a la evaporación registrada en el embalse, y de forma que el volumen pase a ser inferior al correspondiente con el nivel de zona muerta, y por tanto no se puedan extraer caudales del embalse. Se considera asumible no poder representar esta situación, ya que simplemente se está favoreciendo levemente el almacenamiento en el embalse cuando los volúmenes descienden drásticamente para evitar que se alcance este volumen mínimo. En consecuencia, con este planteamiento se añade una regla de gestión adicional a tener en cuenta durante la optimización del sistema.

Tras realizar esta corrección, integrando una de las dos estructuras iterativas dentro de *fmincon*, siguen existiendo problemas de convergencia hacia una solución, por lo que finalmente se descarta esta metodología, y se propone intentar reproducir el problema íntegramente dentro de *fmincon*.

5.5.2 Restricciones no lineales

La introducción de restricciones no lineales, evitada en primera instancia, aumenta la complejidad del problema y hace más difícil que el optimizador converja hacia una solución.

A la hora de introducir el término de la superficie en las ecuaciones de balance, así como el Q110max en las restricciones con forma de desigualdad, se plantean dos metodologías.

La función *nonlcon*, argumento de entrada de las restricciones no lineales a *fmincon*, tiene como argumentos de salida los vectores de funciones *c* y *ceq*, como se ha descrito previamente.

Estos vectores contienen funciones que a su vez pueden llamar a otras funciones, programadas por el usuario o ya implementadas en MATLAB. Esto permite, por ejemplo, utilizar la función *interp1*, con la que, a partir de dos series de datos correspondientes con dos variables, ofreciendo un valor de la primera variable, calcula el valor de la segunda mediante interpolación lineal. De esta forma se puede integrar en la estructura de *fmincon* el cálculo de la superficie ofreciendo resultados exactos.

Otra metodología planteada, que tiene por objetivo evitar tener que llamar a otra función dentro de *nonlcon*, es la aproximación de la relación entre el volumen y la superficie mediante una función polinómica. Estas relaciones se han obtenido graficando las curvas Volumen-Superficie para cada embalse, y ajustando un polinomio agregando una línea de tendencia en Excel. En general la aproximación obtenida es muy buena, teniendo en cuenta que solo se ha ajustado la parte en la que el volumen es superior al correspondiente con el nivel de zona muerta, ya que ajustar toda la curva generaba un error mucho más grande y los valores inferiores a la zona muerta no son de interés al haber establecido este nivel como límite inferior al volumen de los embalses. De la misma forma se ha ajustado la curva que define la restricción Q110max.

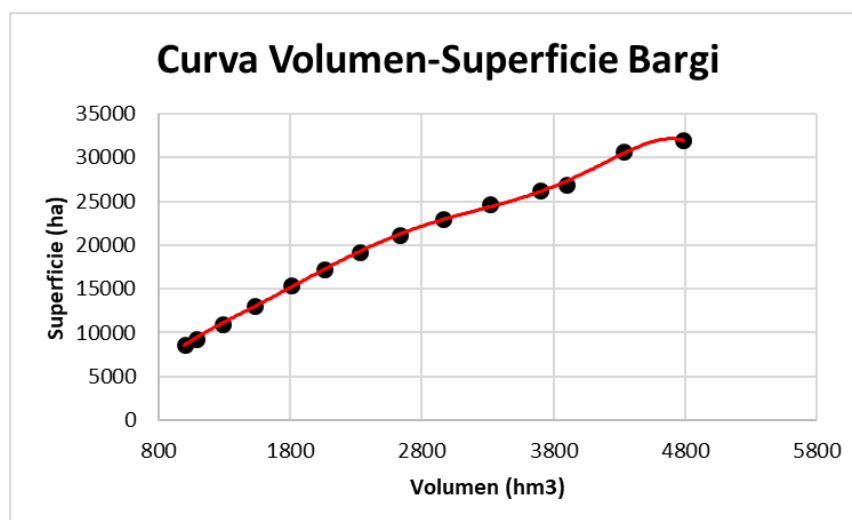


Figura 36. Ajuste curva Volumen-Superficie para el embalse de Bargi. Elaboración propia

El objetivo de esta segunda metodología es comparar la diferencia de coste computacional entre llamar a una función dentro del vector de ecuaciones o no tener que hacerlo al representar esa función mediante un polinomio.

En cuanto al ajuste por polinomios, no es exacto, pero sí bastante preciso, sobre todo teniendo en cuenta que el ajuste entre puntos mediante interpolación lineal tampoco representa firmemente la realidad, también es una aproximación. El principal problema que presenta es alcanzar polinomios de hasta sexto grado, con un gran número de decimales, llegando a alcanzar las treinta cifras, y siendo todas ellas necesarias para que el cálculo mantenga esa precisión previamente ajustada.

Tras realizar diversas pruebas, se confirma lo esperado, que la primera metodología con la función *interp1* supone un mayor coste computacional, y por tanto un aumento en el tiempo de cálculo, pero se concluye que la diferencia no es tan significativa como para utilizar el ajuste polinómico, mucho más farragoso.

Se muestra a continuación como ejemplo, cómo se acaba definiendo esta restricción, para el caso de la ecuación de balance del embalse de Bargi. El resto del código puede ser consultado en el Anexo I.

```
% Para Embalse 1 (Bargi)
idx = 1:36;

if year==1
xt = [2632;x(1:35)];
else
xt = [V1(36*(year-1));x(1:35)];
end

var = ( interp1(V(1:20,1),S(1:20,1),x(idx)) +...
interp1(V(1:20,1),S(1:20,1),xt) )/2;

ceq(idx) = x(idx) - xt - A1(idx) +...
alfa105(idx).*(1+D110(idx)./D105(idx)).*x(37) + x(idx+37) +...
(10^-5)*(E1(idx)-P1(idx)).*var;
```

Cabe señalar que, en todo momento a lo largo del desarrollo del modelo, se ha programado un fichero que resuelve la optimización para un año, y se ha creado un bucle que optimiza el problema para cada año cambiando los datos de entrada.

En el código mostrado en primer lugar se realiza un cambio de variable, de forma que se simplifica la programación, evitando indicar en todos los elementos que se están definiendo 36 ecuaciones de balance, una para cada paso de tiempo.

En segundo lugar, se establece el volumen inicial del embalse, que en el primer año es dato, y para los siguientes se corresponde con el volumen final resultado de la optimización del año anterior.

A continuación, se define otro cambio de variable en el que se formula el término del promedio de las superficies.

Por último, se muestra la ecuación de balance, definida como igual a cero por la estructura de ceq, por lo que al volumen de un paso de tiempo se le resta el del paso de tiempo anterior, además de restarle las entradas al embalse (en este caso la aportación A1), y se le suman las salidas del embalse (en este caso los caudales Q105 y Q110, el caudal Q10 y la evaporación neta).

Por lo tanto, el problema queda definido por la función objetivo, la función *nonlcon* de restricciones no lineales, los límites inferiores y superiores lb y ub, y el punto de partida x0. Finalmente no se utilizan las restricciones lineales de igualdad o desigualdad.

5.5.3 Problemas de convergencia

Una vez que el problema ha sido implementado y la formulación se adapta a todos los condicionantes del mismo, se procede al cálculo y a la verificación de los resultados de la optimización.

De nuevo se observan problemas de convergencia, obteniéndose resultados, pero que no cumplen las restricciones impuestas por las ecuaciones de balance.

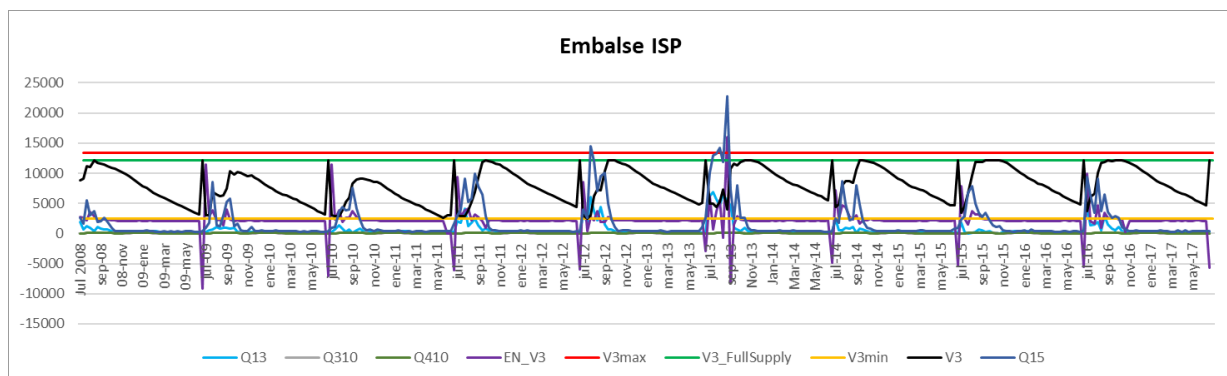


Figura 37. Resultados obtenidos en ISP con *fmincon*. Elaboración propia

Como ejemplo se muestran los resultados obtenidos en el ISP, donde claramente se observa que la evaporación neta presenta valores que no se corresponden con los volúmenes existentes. Comprobando el valor de las restricciones ceq, correspondientes con las ecuaciones de balance, no se obtienen valores nulos, como debería de ocurrir si se hubiera producido convergencia en el problema. Estos errores en el balance se presentan en los cinco embalses, y para casi la totalidad de los pasos de tiempo, presentando valores tanto positivos como negativos, y que alcanzan la magnitud de los centenares de miles de hectómetros cúbicos.

Tras analizar el funcionamiento de la optimización depurando el optimizador durante la ejecución y observando la evolución de la misma, así como consultando la documentación disponible e incluso consultando el problema con el servicio técnico de MathWorks, se

llega a la conclusión de que *fmincon* no es capaz de hacer frente a un problema tan complejo como este al introducirse restricciones no lineales, ya que se ha observado que el problema se produce durante el cálculo de la evaporación neta..

En última instancia incluso se han incluido los resultados de OPTIGES-TPV como valores iniciales para la optimización de un año, por ser los que se esperan más similares a los que debería calcular el optimizador programado, para establecer estos valores de las variables como punto de partida de la optimización. Aun así, el optimizador no ha sido capaz de converger.

Dada la complejidad del mismo y el hecho de que la función objetivo no sea derivable, todo indica que *fmincon* no es la herramienta más adecuada para la resolución de este problema. Si bien aparentemente el programa desarrollado funciona, le es difícil encontrar un resultado aceptable porque las condiciones de contorno son muy sensibles a los cambios en las variables.

5.5.4 Validación de la programación de la optimización

Para confirmar que el problema de convergencia se debe a la magnitud del problema, y no a un error en el código o el planteamiento del mismo, se resuelve de forma simplificada, como se ha hecho en ocasiones anteriores, solo para el caso del embalse de Bargi, reduciendo considerablemente la complejidad del problema.

En este caso sí se ha logrado la convergencia del optimizador, y el resultado obtenido sí cumple con las ecuaciones de balance y las demás restricciones.

Se procede a continuación a analizar los resultados obtenidos y compararlos con los calculados por OPTIGES-TPV.

Para el caso del balance del embalse de Bargi, se observa en primera instancia que con *fmincon* no se supera el nivel de suministro completo, ya que al no contar con las condiciones de contorno impuestas aguas abajo, no se necesita laminar ninguna punta de caudal.

Esta optimización ha tenido como condicionantes los caudales máximos en el tramo de río 10, que no se han visto superados, el caudal ecológico en el tramo de río 10, que se ha satisfecho en todos los pasos de tiempo para los nueve años de estudio, y las demandas D105 y D110, en las que sí ha habido incumplimientos de suministro en algunos años. Se destaca que también se ha introducido de forma satisfactoria la condición de que el caudal derivado hacia D110 no supere el caudal máximo impuesto por la capacidad de toma del canal de la margen derecha.

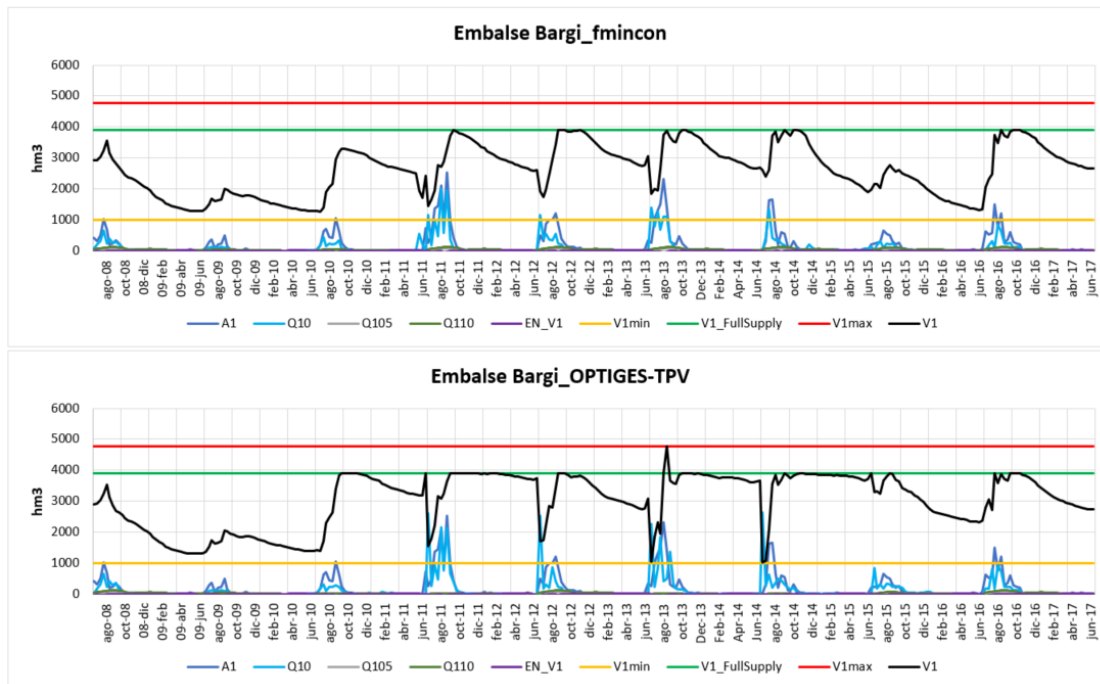


Figura 38. Comparación de los resultados en Bargi optimizando con fmincon para este embalse, y con OPTIGES-TPV para todo el sistema año a año. Elaboración propia

Continuando con la comparativa de los resultados, destaca la gran similitud entre los resultados obtenidos los dos primeros años para el almacenamiento en el embalse. A partir del tercer año comienzan a aparecer diferencias debido a la no existencia de condicionantes aguas abajo, sobre todo la presencia del caudal ecológico en el tramo de río 12, factor que se comprobó que regía en gran medida los desembalses de Bargi, así como de Tawa, y por supuesto la no necesidad de laminar las crecidas en el tramo de río 15.

En cuanto al suministro a las demandas, se observa en el siguiente gráfico, en el que se analiza el caso de la demanda D110, teniendo en cuenta que la situación para la demanda D105 es equivalente por la regla de igualdad de déficit, que solo se producen incumplimientos durante el segundo, el tercer y el octavo año hidrológico.

En este caso esos incumplimientos solo pueden deberse a dos factores, o a la falta de recursos en el embalse para suministrar los caudales, o a la limitación de caudal máximo en el caso del canal derecho, que a su vez afecta a los suministros en del canal izquierdo.

Con una rápida observación al gráfico se aprecia que, para el segundo año, el déficit tiene su origen en la falta de recursos en el embalse (que casi se vacía al final de este año hidrológico). En el tercer y el octavo año hidrológico sí se observa como el límite a Q110 impone que no se realice el suministro completo al principio del año, y por tanto este déficit se extienda al resto de los pasos de tiempo.

En cuanto a la evaporación neta se observa una distribución similar, motivada porque no existen grandes diferencias en el término de superficie.

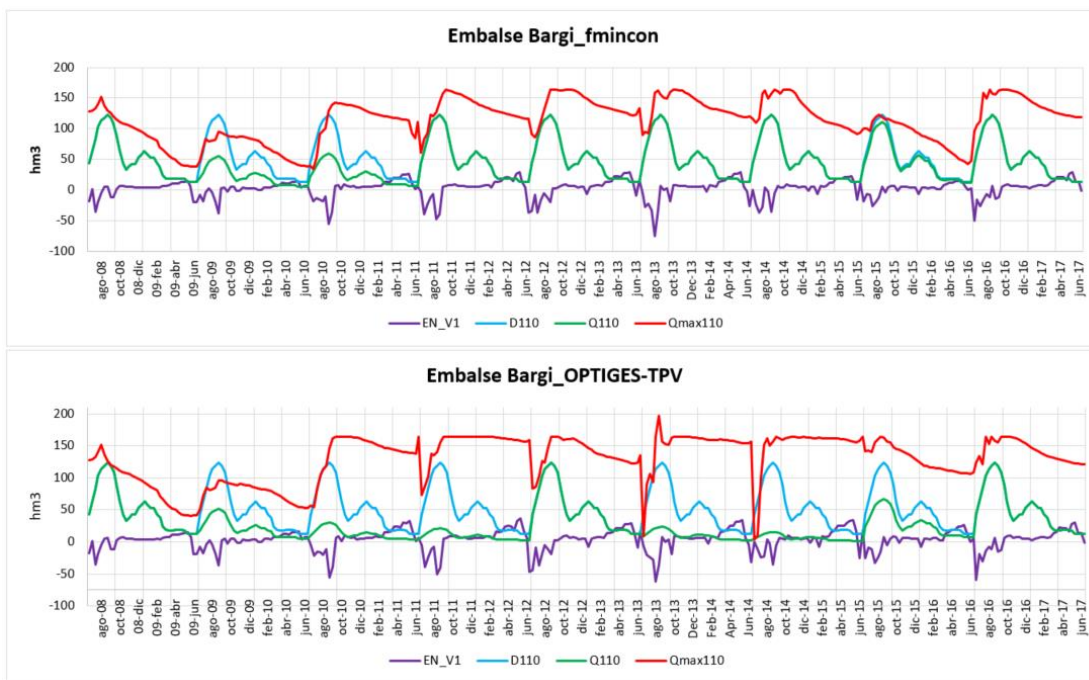


Figura 39. Figura 38. Comparación de los resultados en Bargi optimizando con fmincon para este embalse, y con OPTIGES-TPV para todo el sistema año a año en periodos de 10 días escala ampliada. Elaboración propia

Por último, analizando el funcionamiento del tramo de río 10, se observa cómo se reducen los caudales punta en los años centrales, de mayor aportación, ya que en este caso no se debe generar resguardo en el embalse para laminar las avenidas y que estas no afecten aguas abajo del embalse al tramo de río 15.

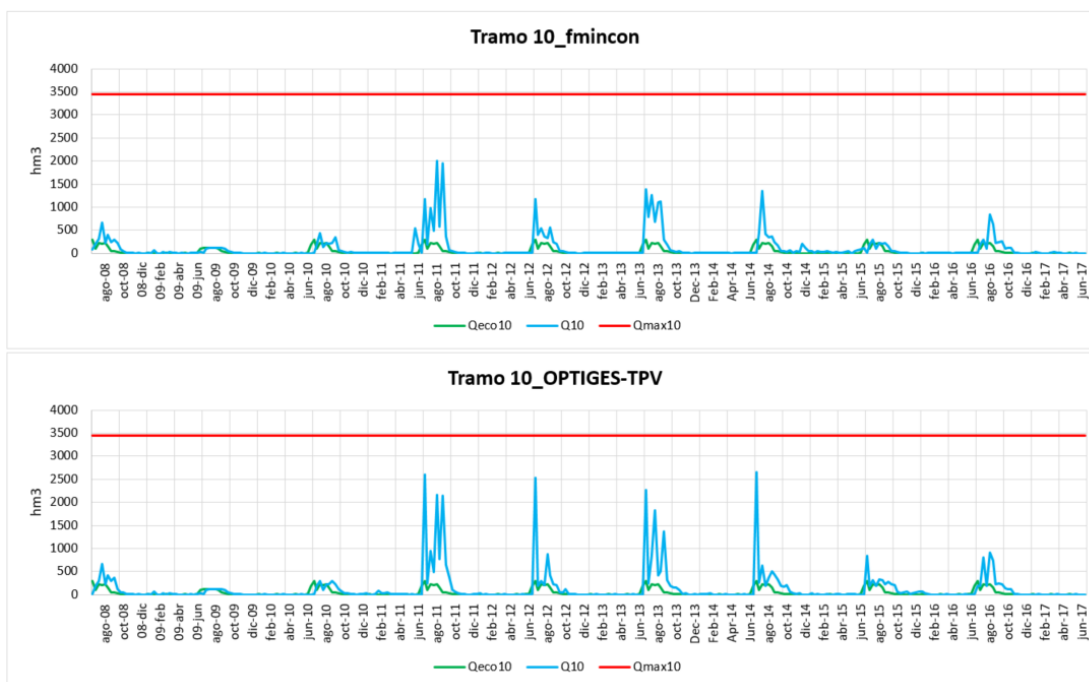


Figura 40. Comparación de los resultados en el tramo de río 10 optimizando con fmincon para este embalse, y con OPTIGES-TPV para todo el sistema año a año. Elaboración propia

Además, ampliando la escala para poder analizar los caudales base, se observa cómo con OPTIGES-TPV se producen más desembalses que en los resultados obtenidos con *fmincon*, y esta diferencia tiene su explicación en que como se apuntó en el análisis de los resultados, gran parte de los caudales que circulan por el tramo de río 10 no tienen por objetivo cumplir con el caudal ecológico de este tramo de río, sino el del tramo de río situado aguas abajo, el 12. Al no contar con este requerimiento en el problema resuelto con *fmincon*, no se producen estas sueltas.

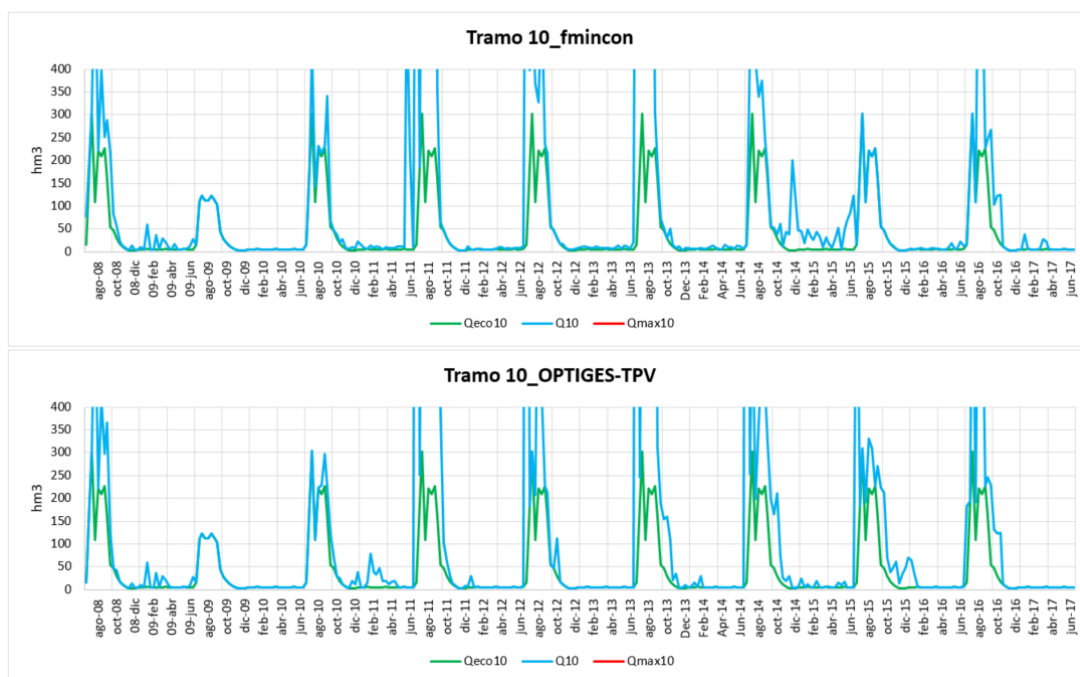


Figura 41. Comparación de los resultados en el tramo de río 10 optimizando con *fmincon* para este embalse, y con OPTIGES-TPV para todo el sistema año a año en periodos de 10 días escala ampliada. Elaboración propia

Se acaba la validación del modelo de optimización para el embalse de Bargi programado con *fmincon*, verificando el cumplimiento de las reglas de reparto del déficit.

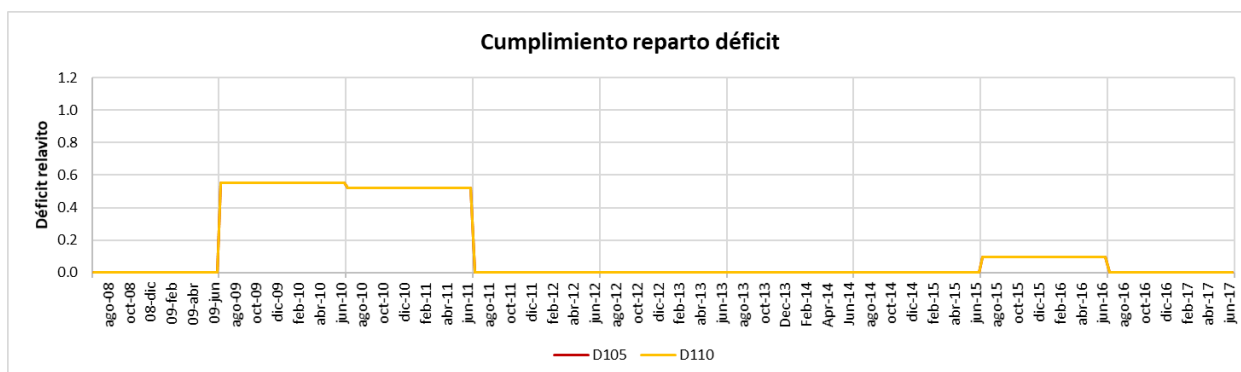


Figura 42. Cumplimiento de las reglas de reparto de déficit en *fmincon*. Elaboración propia

De esta forma, se concluye que el planteamiento desarrollado, así como la programación del problema, son correctos, si bien es la complejidad del sistema la que imposibilita la convergencia.

Hay que tener en cuenta que no es solo que el tamaño o la complejidad del problema se multiplique por cinco, ya que no se resuelven cinco balances de embalses de forma individual, sino que existen interrelaciones entre muchas variables, que se encuentran concatenadas a través de las distintas ecuaciones. Ya se comprobó en los resultados cómo la punta de caudal al principio del sexto año hidrológico condicionaba toda la operación de los embalses situados aguas arriba: Bargi, Tawa, ISP y OSP. Por lo tanto, la complejidad del problema no aumenta proporcionalmente en la medida que se amplía el sistema, sino que esta se dispara, y más teniendo en cuenta que se resuelven 36 pasos de tiempo a la vez, y que a su vez dependen unos de otros.

Como última comprobación, se prueba a optimizar la cabecera, es decir, los embalses de Bargi y Tawa en conjunto, y de nuevo, el problema no converge. Esta prueba permite valorar en qué medida se ve superada *fmincon* para afrontar este problema.

5.6 Optimización global

Desde el servicio técnico de MathWorks se propone como una posible solución la utilización de una función de optimización más compleja, recurriendo al Global optimization toolbox, donde se sugiere utilizar la función *patternsearch*, ya que esta función es la que recomienda la guía de usuario de la toolbox para problemas en los que la función objetivo sea no suavizada (no derivable).

5.6.1 Herramientas de optimización global

Según la información proporcionada por MathWorks:

“*Global Optimization Toolbox* proporciona funciones que buscan soluciones globales a problemas que contienen máximos o mínimos múltiples. Esta toolbox ofrece solvers de sustituto, búsqueda de patrones, algoritmo genético, enjambre de partículas, recocido simulado, multiarranque y búsqueda global. Puede utilizar estos solvers para problemas de optimización en los que la función objetivo o de restricción sea continua, discontinua o estocástica, no posea derivadas o bien incluya simulaciones o funciones de tipo caja negra.”

De las distintas funciones de optimización que ofrece la toolbox, se elige *patternsearch*.

5.6.2 Adaptación del problema a la estructura de *patternsearch*

La función *patternsearch* cuenta con la misma estructura de entradas y salidas que la función *fmincon*, por lo que la adaptación del problema a la estructura de la función no supone un trabajo adicional.

Las únicas modificaciones que se deben llevar a cabo son las relativas a las opciones de la optimización, ya que al utilizar aplicaciones de optimización global el tiempo de cálculo aumenta considerablemente, por lo que se habilita la computación paralela, de forma

que MATLAB utilice todos los núcleos del ordenador en paralelo (en este caso cuatro núcleos), de forma que se reduzca el tiempo de cálculo. También se aumenta considerablemente el número máximo de evaluaciones de la función objetivo, hasta diez millones.

Al ejecutar el optimizador se comprueba que el tiempo de cálculo ha aumentado exponencialmente, y una vez se detiene, se comprueba que el resultado obtenido no cumple las ecuaciones de balance que han sido introducidas como restricción. Por lo tanto, se concluye que esta herramienta tampoco es suficientemente potente como para afrontar el problema que se está proponiendo.

Se detiene aquí la tarea del desarrollo de un modelo de optimización no lineal utilizando el software comercial MATLAB, al no haberse podido resolver el problema con las funciones y algoritmos disponibles, y al considerar que comenzar desde cero de nuevo, utilizando otro software queda fuera del alcance de este trabajo.

Finalmente se ha conseguido verificar que la formulación del problema, así como su implementación en las herramientas de optimización se ha realizado de forma correcta, pero estas herramientas se han visto superadas por la complejidad del problema a resolver.

En el Anexo I se adjuntan los ficheros finales.

6. Conclusiones

Tras el desarrollo de este trabajo, se llega a las siguientes conclusiones.

- El problema, tal como está planteado en la definición proporcionada por el Proyecto Nacional de Hidrología, deja sin definir adecuadamente distintos aspectos de gestión, y algunas de las restricciones establecidas podrían mejorarse para obtener una gestión más óptima del sistema.
- Se ha comprobado que el modelo desarrollado con el módulo OPTIGES-PTV del entorno AQUATOOL produce buenos resultados de gestión óptima anual, y que pueden mejorarse si la optimización se realiza con períodos horizontes más largos, por ejemplo de dos años.
- Por lo que se refiere al desarrollo y uso de un modelo de optimización ad hoc formulado mediante la *toolbox* de optimización de MATLAB, si bien se ha comprobado que el problema ha sido correctamente formulado, las herramientas utilizadas no han sido capaces de converger durante la optimización del sistema completo. Por tanto, se propone, para resolver este problema mediante optimización no lineal, la utilización de otros softwares, funciones y algoritmos más potentes que sean capaces de afrontar la complejidad del problema.
- Con la experiencia adquirida en este trabajo, se puede afirmar que, desde el enfoque de la práctica profesional de consultoría, para la que en un principio estaba definido

este problema, es ineficiente desarrollar un código de optimización desde cero, como se ha pretendido en este trabajo. En cambio, disponer de herramientas de desarrollo de Sistemas de Soporte a la Decisión, permiten abordar de manera asequible este tipo de trabajos, y como se ha comprobado en este caso concreto, permiten obtener resultados válidos pese a la gran complejidad del problema.

- El exhaustivo análisis de los resultados de la gestión óptima que se ha efectuado en este trabajo, ha contribuido a un mejor conocimiento del comportamiento del sistema de recursos hídricos del río Narmada, lo cual permitiría abordar una reformulación de los planteamientos de gestión para un mejor rendimiento del sistema.

7. Referencias

- Andreu, J., A. Solera, D. Haro, 1998. Modelo OPTIGES de Optimización de la Gestión de Esquemas de Recursos Hídricos, Manual del Usuario Versión 3.0.
- Ilich, Nesa. (2006). Comments by Nesa Ilich, Member IWRA, on “WEAP21 — A Demand, Priority, and Preference-Driven Water Planning Model: Part 1” by David Yates, Jack Sieber, David Purkey, and Annette Huber-Lee. Published in Water International Volume 30, Number 4.
- Salis, Francesca & Sechi, Giovanni & Zuddas, Paola. (2006). Optimization model for the conjunctive use of conventional and marginal waters. Drought Management and Planning for Water Resources. Chapter four, 73-117.
- Ilich, Nesa. (2008). Shortcomings of linear programming in optimizing river basin allocation. Water Resources Research.
- Andreu, J., M. A. Pérez, J. Paredes, and A. Solera. 2009. Participatory analysis of the Jucar-Vinalopo (Spain) water conflict using a Decision Support System. In R.S. Anderssen et al. (eds), 18th IMACS World Congress - MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation. ISBN: 978-0-9758400-7-8, pp. 3230-3236.
- Andreu, J., J. Ferrer-Polo, M. A. Pérez, and A. Solera. 2009. Decision Support System for Drought Planning and Management in the Jucar River Basin, Spain. In R.S. Anderssen et al. (eds), 18th IMACS World Congress - MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation. ISBN: 978-0-9758400-7-8, pp. 3223-3229.
- Ilich, Nesa. (2009). Limitations of Network Flow Algorithms in River Basin Modeling. Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE.
- D. Haro, J. Paredes, A. Solera, Andreu, J., 2012. A Model for Solving the Optimal Water Allocation Problem in River Basins with Network Flow Programming When Introducing Non-Linearities. Water Resources Management.
- Pérez-Martín MA, Thurston W, Estrela T, del-Amo P (2013) Cambios en las series hidrológicas de los últimos 30 años y sus causas. El Efecto 80. In: Valles-Moran et al. (Ed) III Jornadas de Ingeniería del Agua. Barcelona, 1:527–534.
- N. Lerma, A. Solera, Andreu, J., J. Paredes, G. Sechi, R. Zucca (2014). Comparativa de la herramienta para el desarrollo de Sistemas Soporte a la Decisión para los sistemas de recursos de Cerdeña, Italia. Aplicaciones de Sistemas de Soporte a la Decisión en Planificación y Gestión Integradas de Cuencas Hidrográficas. Capítulo 8, 85-94.
- A. Solera, J. Paredes, Andreu, J., 2015. AQUATOOL+ Entorno de desarrollo de sistemas de ayuda a la decisión en materia de planificación de la gestión de cuencas hidrográficas incluyendo utilización conjunta y criterios de calidad de aguas, Manual del Usuario Versión 1.0.

MathWorks, 2019. Optimization Toolbox User's Guide R2019b.

MathWorks, 2019. Global Optimization Toolbox User's Guide R2019b.

Ministry of Water Resources, Government of India, 2019. Request for Expression of Interest (REOI) for Consultancy Services for "WATER ACCOUNTING AND INTEGRATED RESERVOIR OPERATIONS FOR NARMADA RIVER BASIN" for National Hydrology Project.

A. Solera, Andreu, J., J. Paredes, 2020, "Manual de usuario del modelo OPTIGES-PTV", en prensa. Universidad Politécnica de Valencia.

ANEXO I. Ficheros de MATLAB

En el presente Anexo se adjuntan los ficheros de optimización programados para el desarrollo de este trabajo. Son los siguientes:

- Fichero Optimización *fmincon* para todo el sistema
- Fichero Optimización *patternsearch* para todo el sistema
- Función *nonlcon_Narmada* de restricciones no lineales para todo el sistema
- Fichero Optimización *fmincon* para el embalse de Bargi
- Función *nonlcon_Bargi* de restricciones no lineales para el embalse de Bargi

A continuación se adjunta una tabla resumen de los componentes del vector de resultados x , desglosando el orden de cada una de estas variables dentro del mismo (primera fila de la tabla), como complemento para entender el código.

En el cuerpo de la tabla, se detalla qué variables de cálculo se incluyen en cada una de las ecuaciones de balance, y la numeración de las mismas, que suman 180, por los 36 pasos de tiempo para cada embalse.

Ecuación	V1	SUM1	Q10	V2	SUM2	Q11	V3	SUM3	Q13	V4	Q14	V6	SUM6	Q16
	1 36	37 37	38 73	74 109	110 110	111 146	147 182	183 183	184 219	220 255	256 291	292 327	328 328	329 364
1--36	1/-1	1	1											
37--72				1/-1	1	1								
73--108			-1			-1	1/-1	1	1					
109--144								1	-1	1/-1	1			
145--180											-1	1/-1	1	1

Figura 43. Estructura del vector de resultados y distribución de las variables en las distintas ecuaciones. Elaboración propia

Fichero Optimización *fmincon* para todo el sistema

```

%Carga de los datos de entrada
load Narmada_data.mat

%Bucle que optimiza de forma independiente los 9 años
for year=1:9

    disp(year)%Muestra el año que está calculando durante la simulación

    %Se asignan los datos de entrada correspondientes a cada año
    idx = 1+36*(year-1):36+36*(year-1);
    A1=A1tot(idx);
    A2=A2tot(idx);
    A5=A5tot(idx);
    A7=A7tot(idx);

    alfa105=alfa105tot(idx);
    alfa205=alfa205tot(idx);
    alfa310=alfa310tot(idx);
    alfa610=alfa610tot(idx);

    D105=D105tot(idx);
    D110=D110tot(idx);
    D205=D205tot(idx);
    D210=D210tot(idx);
    D310=D310tot(idx);
    D410=D410tot(idx);
    D610=D610tot(idx);

    Qeco10=Qeco10tot(idx);
    Qeco11=Qeco11tot(idx);
    Qeco12=Qeco12tot(idx);
    Qeco15=Qeco15tot(idx);

    E1=E1tot(idx);
    E2=E2tot(idx);
    E3=E3tot(idx);
    E4=E4tot(idx);

```

```

E6=E6tot(idx);

P1=P1tot(idx);
P2=P2tot(idx);
P3=P3tot(idx);
P4=P4tot(idx);
P6=P6tot(idx);

if year==1
    V1=zeros(324,1);
    V2=zeros(324,1);
    V3=zeros(324,1);
    V4=zeros(324,1);
    V6=zeros(324,1);
end

%Matrices de coeficientes y términos independientes en forma de inecuación y ecuación, respectivamente
A=[];
b=[];
Aeq=[];
beq=[];

%Valores mínimos de las variables
lb=zeros(364,1);

%Se establece como valor mínimo para los volúmenes de los embalses el Dead Storage Level
lb(1:36,1)=997.52;
lb(74:109,1)=259.93;
lb(147:182,1)=2497.001;
lb(220:255,1)=944.536;
lb(292:327,1)=3700.657;

%Valores máximos de las variables
ub=zeros(364,1);
%Ecuación 1
ub(1:36,1)=4785.68;
ub(37)=sum(D105(1:36));
ub(38:73,1)=Inf;
%Ecuación 2

```

```

ub(74:109,1)=2310.55;
ub(110)=sum(D205(1:36));
ub(111:146,1)=Inf;
%Ecuación 3
ub(147:182,1)=13360.80;
ub(183)=sum(D310(1:36));
ub(184:219)=Inf;
%Ecuación 4
ub(220:255,1)=1246.32;
ub(256:291,1)=Inf;
%Ecuación 5
ub(292:327)=11909.85;
ub(328)=sum(D610(1:36));
ub(329:364,1)=Inf;

%Valores de partida
x0=zeros(364,1);
x0(1:36,1)=3902.536;
x0(37,1)=sum(D105(1:36,1)+D110(1:36,1));
x0(38:73,1)=Qeco10(1:36,1);
x0(74:109,1)=2080.953;
x0(110,1)=sum(D205(1:36,1)+D210(1:36,1));
x0(111:146,1)=Qeco11(1:36,1);
x0(147:182,1)=12205.423;
x0(183,1)=sum(D310(1:36,1)+D410(1:36,1));
x0(184:219,1)=Qeco11(1:36,1)+Qeco12(1:36,1);
x0(220:255,1)=944.536;
x0(256:291,1)=Qeco15(1:36,1);
x0(292:327,1)=9459.961;
x0(328,1)=sum(D610(1:36,1));
x0(329:364,1)=Qeco15(1:36,1);

x0=x0_OPTIGES_1YEAR(:,year);%Activando esta línea de código, el valor de partida es la solución de OPTIGES-
TPV optimizando para 1 año

%Función Objetivo a minimizar, alterada respecto a la original de forma que se penaliza la superación del
volumen de FullSupply, de forma que solo se permite para laminar los picos de crecidas
Fobj = @(x) sum( ...
    (1000/0.864)*(max(x(38:73,1)-(4000*0.864),0)) + ...

```



```

(1000/0.864) * (max(x(111:146,1)-(2800*0.864),0)) + ...
(1000/0.864) * (max(x(256:291,1)+A5(1:36,1)-A7(1:36,1) - (7600*0.864),0)) + ...
(100/0.864) * (max(Qeco10(1:36,1)-x(38:73,1),0))+...
(100/0.864) * (max(Qeco11(1:36,1)-x(111:146,1),0)) + ...
(100/0.864) * (max(Qeco12(1:36,1)-x(38:73,1)-x(111:146,1),0)) + ...
(100/0.864) * (max(Qeco15(1:36,1)-x(256:291,1)+A5(1:36,1)-A7(1:36,1),0)) + ...
(10/0.864) * (max((D105(1:36,1)-alfa105(1:36,1).*x(37,1)),0)) + ...
(10/0.864) * (max((D110(1:36,1)-alfa105(1:36,1).*(D110(1:36,1)./D105(1:36,1)).*x(37,1)),0)) + ...
(10/0.864) * (max((D205(1:36,1)-alfa205(1:36,1).*x(110,1)),0)) + ...
(10/0.864) * (max((D210(1:36,1)-alfa205(1:36,1).*(D210(1:36,1)./D205(1:36,1)).*x(110,1)),0)) + ...
(10/0.864) * (max((D310(1:36,1)-alfa310(1:36,1).*x(183,1)),0)) + ...
(10/0.864) * (max((D410(1:36,1)-alfa310(1:36,1).*(D410(1:36,1)./D310(1:36,1)).*x(183,1)),0)) + ...
(10/0.864) * (max((D610(1:36,1)-alfa610(1:36,1).*x(328,1)),0)) + ...
500*max(x(1:36,1)-3902.536,0)+...
500*max(x(74:109,1)-2080.953,0) + ...
500*max(x(147:182,1)-12205.423,0) + ...
500*max(x(220:255,1)-944.536,0) + ...
500*max(x(292:327,1)-9459.961,0) ...
);

%Restricciones no lineales
nonlcon=@(x) nonlcon_Narmada(x,A1,A2,A7,A5,alfa105,alfa205, ...
    alfa310,alfa610,D105,D110,D205,D210,D310,D410,E1,P1,E2,P2,E3,P3,E4,P4,E6,P6,CSV,year,V1,V2,V3,V4,V6);

%Opciones de fmincon
options.MaxFunEvals = 1000000; %Número máximo de evaluaciones de la función objetivo
options.Algorithm='active-set'; %Por defecto usa el interior point,también se puede usar el active-set y
el sqp

%Optimización con Fmincon
[x,fval,exitflag,output]=patternsearch(Fobj,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,options);

disp(fval)%Muestra el valor de la función objetivo

%Almacenamiento de los resultados
V1(idx,1)=x(1:36);
V2(idx,1)=x(74:109);
V3(idx,1)=x(147:182);
V4(idx,1)=x(220:255);

```

```
V6(idx,1)=x(292:327);

Q105(idx,1)=alfa105(1:36).*x(37);
Q110(idx,1)=alfa105(1:36).*(D110(1:36).*x(37)./D105(1:36));
Q205(idx,1)=alfa205(1:36).*x(110);
Q210(idx,1)=alfa205(1:36).*(D210(1:36).*x(110)./D205(1:36));
Q310(idx,1)=alfa310(1:36).*x(183);
Q410(idx,1)=alfa310(1:36).*(D410(1:36).*x(183)./D310(1:36));
Q610(idx,1)=alfa610(1:36).*x(328);

Q10(idx,1)=x(38:73);
Q11(idx,1)=x(111:146);
Q13(idx,1)=x(184:219);
Q14(idx,1)=x(256:291);
Q16(idx,1)=x(329:364);

end

Q12=Q10+Q11+A7tot-A1tot-A2tot;
Q15=Q14+A5tot-A7tot;
Q17=zeros(324,1)+17*0.864;
Q510=Q610+Q17;
Qend=Q16+Q17;
```

Fichero Optimización *patternsearch* para todo el sistema

```
%Carga de los datos de entrada
load Narmada_data.mat

%Bucle que optimiza de forma independiente los 9 años
for year=1:9

    disp(year)%Muestra el año que está calculando durante la simulación

    %Se asignan los datos de entrada correspondientes a cada año
    idx = 1+36*(year-1):36+36*(year-1);
    A1=A1tot(idx);
    A2=A2tot(idx);
    A5=A5tot(idx);
    A7=A7tot(idx);

    alfa105=alfa105tot(idx);
    alfa205=alfa205tot(idx);
    alfa310=alfa310tot(idx);
    alfa610=alfa610tot(idx);

    D105=D105tot(idx);
    D110=D110tot(idx);
    D205=D205tot(idx);
    D210=D210tot(idx);
    D310=D310tot(idx);
    D410=D410tot(idx);
    D610=D610tot(idx);

    Qeco10=Qeco10tot(idx);
    Qeco11=Qeco11tot(idx);
    Qeco12=Qeco12tot(idx);
    Qeco15=Qeco15tot(idx);

    E1=E1tot(idx);
    E2=E2tot(idx);
    E3=E3tot(idx);
    E4=E4tot(idx);
```

```

E6=E6tot(idx);

P1=P1tot(idx);
P2=P2tot(idx);
P3=P3tot(idx);
P4=P4tot(idx);
P6=P6tot(idx);

if year==1
    V1=zeros(324,1);
    V2=zeros(324,1);
    V3=zeros(324,1);
    V4=zeros(324,1);
    V6=zeros(324,1);
end

%Matrices de coeficientes y términos independientes en forma de inecuación y ecuación, respectivamente
A=[];
b=[];
Aeq=[];
beq=[];

%Valores mínimos de las variables
lb=zeros(364,1);

%Se establece como valor mínimo para los volúmenes de los embalses el Dead Storage Level
lb(1:36,1)=997.52;
lb(74:109,1)=259.93;
lb(147:182,1)=2497.001;
lb(220:255,1)=944.536;
lb(292:327,1)=3700.657;

%Valores máximos de las variables
ub=zeros(364,1);
%Ecuación 1
ub(1:36,1)=4785.68;
ub(37)=sum(D105(1:36));
ub(38:73,1)=Inf;
%Ecuación 2

```

```

ub(74:109,1)=2310.55;
ub(110)=sum(D205(1:36));
ub(111:146,1)=Inf;
%Ecuación 3
ub(147:182,1)=13360.80;
ub(183)=sum(D310(1:36));
ub(184:219)=Inf;
%Ecuación 4
ub(220:255,1)=1246.32;
ub(256:291,1)=Inf;
%Ecuación 5
ub(292:327)=11909.85;
ub(328)=sum(D610(1:36));
ub(329:364,1)=Inf;

%Valores de partida, se parte del Full Supply level para los embalses, la demanda anual para los
suministros anuales y el caudal ecológico para los caudales en los tramos de río
x0=zeros(364,1);
x0(1:36,1)=3902.536;
x0(37,1)=sum(D105(1:36,1)+D110(1:36,1));
x0(38:73,1)=Qeco10(1:36,1);
x0(74:109,1)=2080.953;
x0(110,1)=sum(D205(1:36,1)+D210(1:36,1));
x0(111:146,1)=Qeco11(1:36,1);
x0(147:182,1)=12205.423;
x0(183,1)=sum(D310(1:36,1)+D410(1:36,1));
x0(184:219,1)=Qeco11(1:36,1)+Qeco12(1:36,1);
x0(220:255,1)=944.536;
x0(256:291,1)=Qeco15(1:36,1);
x0(292:327,1)=9459.961;
x0(328,1)=sum(D610(1:36,1));
x0(329:364,1)=Qeco15(1:36,1);

x0=x0_OPTIGES_1YEAR(:,year); %Activando esta línea de código, el valor de partida es la solución de
OPTIGES-TPV optimizando para 1 año

%Función Objetivo a minimizar, alterada respecto a la original de forma que se penaliza la superación del
volumen de FullSupply, de forma que solo se permite para laminar los picos de crecidas
Fobj = @(x) sum( ...

```

```

(1000/0.864) * (max(x(38:73,1)-(4000*0.864),0)) + ...
(1000/0.864) * (max(x(111:146,1)-(2800*0.864),0)) + ...
(1000/0.864) * (max(x(256:291,1)+A5(1:36,1)-A7(1:36,1) - (7600*0.864),0)) + ...
(100/0.864) * (max(Qeco10(1:36,1)-x(38:73,1),0))+...
(100/0.864) * (max(Qeco11(1:36,1)-x(111:146,1),0)) + ...
(100/0.864) * (max(Qeco12(1:36,1)-x(38:73,1)-x(111:146,1),0)) + ...
(100/0.864) * (max(Qeco15(1:36,1)-x(256:291,1)+A5(1:36,1)-A7(1:36,1),0)) + ...
(10/0.864) * (max((D105(1:36,1)-alfa105(1:36,1).*x(37,1)),0)) + ...
(10/0.864) * (max((D110(1:36,1)-alfa105(1:36,1).*(D110(1:36,1)./D105(1:36,1)).*x(37,1)),0)) + ...
(10/0.864) * (max((D205(1:36,1)-alfa205(1:36,1).*x(110,1)),0)) + ...
(10/0.864) * (max((D210(1:36,1)-alfa205(1:36,1).*(D210(1:36,1)./D205(1:36,1)).*x(110,1)),0)) + ...
(10/0.864) * (max((D310(1:36,1)-alfa310(1:36,1).*x(183,1)),0)) + ...
(10/0.864) * (max((D410(1:36,1)-alfa310(1:36,1).*(D410(1:36,1)./D310(1:36,1)).*x(183,1)),0)) + ...
(10/0.864) * (max((D610(1:36,1)-alfa610(1:36,1).*x(328,1)),0)) + ...
200*max(x(1:36,1)-3902.536,0)+...
200*max(x(74:109,1)-2080.953,0) + ...
200*max(x(147:182,1)-12205.423,0) + ...
200*max(x(220:255,1)-944.536,0) + ...
200*max(x(292:327,1)-9459.961,0) ...
);

%Restricciones no lineales
nonlcon=@(x) nonlcon_Narmada(x,A1,A2,A7,A5,alfa105,alfa205, ...
    alfa310,alfa610,D105,D110,D205,D210,D310,D410,E1,P1,E2,P2,E3,P3,E4,P4,E6,P6,CSV,year,V1,V2,V3,V4,V6);

%Opciones de patternsearch
options = optimoptions('patternsearch');
options.UseParallel = true;
options.MaxFunctionEvaluations = 10000000;

%Optimización con patternsearch
[x,fval,exitflag,output] = patternsearch(Fobj,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,options);

disp(fval) %Muestra el valor de la función objetivo

%Almacenamiento de los resultados
V1(idx,1)=x(1:36);
V2(idx,1)=x(74:109);
V3(idx,1)=x(147:182);

```

```

V4(idx,1)=x(220:255);
V6(idx,1)=x(292:327);

Q105(idx,1)=alfa105(1:36).*x(37);
Q110(idx,1)=alfa105(1:36).*(D110(1:36).*x(37)./D105(1:36));
Q205(idx,1)=alfa205(1:36).*x(110);
Q210(idx,1)=alfa205(1:36).*(D210(1:36).*x(110)./D205(1:36));
Q310(idx,1)=alfa310(1:36).*x(183);
Q410(idx,1)=alfa310(1:36).*(D410(1:36).*x(183)./D310(1:36));
Q610(idx,1)=alfa610(1:36).*x(328);

Q10(idx,1)=x(38:73);
Q11(idx,1)=x(111:146);
Q13(idx,1)=x(184:219);
Q14(idx,1)=x(256:291);
Q16(idx,1)=x(329:364);

xfinal(1+364*(year-1):364+364*(year-1),1)=x(1:364);

end

%%

Q12=Q10+Q11+A7tot-A1tot-A2tot;
Q15=Q14+A5tot-A7tot;
Q17=zeros(324,1)+17*0.864;
Q510=Q610+Q17;
Qend=Q16+Q17;

```

Función *nonlcon_Narmada* de restricciones no lineales para todo el sistema

```

function [c,ceq] =
nonlcon_Narmada(x,A1,A2,A7,A5,alfa105,alfa205,alfa310,alfa610,D105,D110,D205,D210,D310,D410,E1,P1,E2,P2,E3,P3,E
4,P4,E6,P6,CSV,year,V1,V2,V3,V4,V6,year)

%Se vectorizan las columnas de la tabla CSV
V(1:20,1)=CSV(1:20,3);
V(21:39,1)=CSV(1:19,6);
V(40:59,1)=CSV(1:20,9);
V(60:74,1)=CSV(1:15,12);
V(75:94,1)=CSV(1:20,15);

S(1:20,1)=CSV(1:20,2);
S(21:39,1)=CSV(1:19,5);
S(40:59,1)=CSV(1:20,8);
S(60:74,1)=CSV(1:15,11);
S(75:94,1)=CSV(1:20,14);

ceq=zeros(180,1);

% Para Embalse 1 (Bargi)
idx = 1:36;

%if year==1
xt = [2632;x(1:35)];
%else
%xt = [V1(36*(year-1));x(1:35)];
%end

var = ( interp1(V(1:20,1),S(1:20,1),x(idx)) + interp1(V(1:20,1),S(1:20,1),xt) )/2;

ceq(idx) = x(idx) - xt - A1(idx) + alfa105(idx).*(1+D110(idx)./D105(idx)).*x(37) + x(idx+37) + (10^-
5)*(E1(idx)-P1(idx)).*var;

% Para Embalse 2 (Tawa)
if year==1
xt = [1424.82;x(74:108)];

```



```

else
xt = [V2(36*(year-1));x(74:108)];
end

var2 = ( interp1(V(21:39,1),S(21:39,1),x(idx+73)) + interp1(V(21:39,1),S(21:39,1),xt) )/2;

ceq(idx) = x(idx+73) - xt - A2(idx) + alfa205(idx).*(1+D210(idx)./D205(idx)).*x(110) + x(idx+110) + (10^-
5)*(E2(idx)-P2(idx)).*var2;

% Para Embalse 3 (ISP)
if year==1
xt = [10420;x(147:181)];
else
xt = [V3(36*(year-1));x(147:181)];
end

var3 = ( interp1(V(40:59,1),S(40:59,1),x(idx+146)) + interp1(V(40:59,1),S(40:59,1),xt) )/2;

ceq(idx) = x(idx+146) - xt - x(idx+37) - x(idx+110) - A7(idx) + A1(idx) + A2(idx) + alfa310(idx).*x(183) +
x(idx+183) + (10^-5)*(E3(idx)-P3(idx)).*var3;

% Para Embalse 4 (OSP)
if year==1
xt = [944.536;x(220:254)];
else
xt = [V4(36*(year-1));x(220:254)];
end

var4 = ( interp1(V(60:74,1),S(60:74,1),x(idx+219)) + interp1(V(60:74,1),S(60:74,1),xt) )/2;

ceq(idx) = x(idx+219) - xt - x(idx+183) + alfa310(idx).*(D410(idx)./D310(idx)).*x(183) + x(idx+255) + (10^-
5)*(E4(idx)-P4(idx)).*var4;

% Para Embalse 5 (SSP)
if year==1
xt = [5290;x(292:326)];
else
xt = [V6(36*(year-1));x(292:326)];
end

```

```

var6 = ( interp1(V(75:94,1),S(75:94,1),x(idx+219)) + interp1(V(75:94,1),S(75:94,1),xt) )/2;

ceq(idx) = x(idx+291) - xt - x(idx+255) - A5(idx) + A7(idx) + alfa610(idx).*x(328) + x(idx+328) + (10^-
5)*(E6(idx)-P6(idx)).*var6;

% Para Q110<Q110max

idx = 1:36;
c = zeros(41,1);

c(idx) = alfa105(idx).*(D110(idx)./D105(idx)).*x(37) - interp1([999,1596.8,4785.7],[0,69.12,196.508],x(idx));

% Para Volumen embalse final año hidrológico > Volumen mínimo 30 junio

c(37)= 1288.61-x(36);
c(38)= 340.16-x(109);
c(39)= 2987.5-x(182);
c(40)= 944.536-x(255);
c(41)= 3700.657-x(327);

end

```

Fichero Optimización *fmincon* para el embalse de Bargi

```
%Carga de los datos de entrada
load Narmada_data.mat

%Bucle que optimiza de forma independiente los 9 años
for year=1:9

    disp(year)%Muestra el año que está calculando durante la simulación

    %Se asignan los datos de entrada correspondientes a cada año
    idx = 1+36*(year-1):36+36*(year-1);
    A1=A1tot(idx);

    alfa105=alfa105tot(idx);

    D105=D105tot(idx);
    D110=D110tot(idx);

    Qeco10=Qeco10tot(idx);

    E1=E1tot(idx);
    P1=P1tot(idx);

    if year==1
        V1=zeros(324,1);
    end

    %Matrices de coeficientes y términos independientes en forma de inecuación y ecuación, respectivamente
    A=[];
    b=[];
    Aeq=[];
    beq=[];

    %Valores mínimos de las variables
    lb=zeros(73,1);

    %Se establece como valor mínimo para los volúmenes de los embalses el Dead Storage Level
    lb(1:36,1)=997.52;
```

```

%Valores máximos de las variables
ub=zeros(73,1);
%Ecuación 1
ub(1:36,1)=4785.68;
ub(37)=sum(D105(1:36));
ub(38:73,1)=Inf;

%Valores de partida, se parte del Full Supply level para los embalses, la demanda anual para los
suministros anuales y el caudal ecológico para los caudales en los tramos de río
x0=zeros(73,1);
x0(1:36,1)=3902.536;
x0(37,1)=sum(D105(1:36,1)+D110(1:36,1));
x0(38:73,1)=Qeco10(1:36,1);

x0=x0_OPTIGES_1YEAR(1:73,year); %Activando esta línea de código, el valor de partida es la solución de
OPTIGES-TPV optimizando para 1 año

%Función Objetivo a minimizar, alterada respecto a la original de forma que se penaliza la superación del
volumen de FullSupply, de forma que solo se permite para laminar los picos de crecidas
Fobj = @(x) sum( ...
    (1000/0.864)*(max(x(38:73,1)-(4000*0.864),0)) + ...
    (100/0.864)*(max(Qeco10(1:36,1)-x(38:73,1),0))+...
    (10/0.864)*(max((D105(1:36,1)-alfa105(1:36,1).*x(37,1)),0)) + ...
    (10/0.864)*(max((D110(1:36,1)-alfa105(1:36,1).*(D110(1:36,1)./D105(1:36,1)).*x(37,1)),0)) + ...
    500*max(x(1:36,1)-3902.536,0)...
);
%Restricciones no lineales
nonlcon=@(x) nonlcon_Bargi(x,A1,alfa105,D105,D110,E1,P1,CSV,year,V1);

%Opciones de fmincon
options.MaxFunEvals = 100000; %Número máximo de evaluaciones de la función objetivo
options.Algorithm='active-set'; %Por defecto usa el interior point,también se puede usar el active-set y
el sqp

%Optimización con Fmincon
[x,fval]=fmincon(Fobj,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,options);

disp(fval) %Muestra el valor de la función objetivo

```

```
%Almacenamiento de los resultados
V1(idx,1)=x(1:36);

Q105(idx,1)=alfa105(1:36).*x(37);
Q110(idx,1)=alfa105(1:36).*(D110(1:36).*x(37)./D105(1:36));

Q10(idx,1)=x(38:73);

end
```

Función *nonlcon_Bargi* de restricciones no lineales para el embalse de Bargi

```

function [c,ceq] = nonlcon_Bargi(x,A1,alfa105,D105,D110,E1,P1,CSV,year,V1)

V(1:20,1)=CSV(1:20,3);

S(1:20,1)=CSV(1:20,2);

ceq=zeros(36,1);

% Para Embalse 1 (Bargi)
idx = 1:36;

if year==1
xt = [2632;x(1:35)];
else
xt = [V1(36*(year-1));x(1:35)];
end

var = ( interp1(V(1:20,1),S(1:20,1),x(idx)) + interp1(V(1:20,1),S(1:20,1),xt) )/2;

ceq(idx) = x(idx) - xt - A1(idx) + alfa105(idx).*(1+D110(idx)./D105(idx)).*x(37) + x(idx+37) + (10^-
5)*(E1(idx)-P1(idx)).*var;

% Para Q110<Q110max

idx = 1:36;
c = zeros(37,1);

c(idx) = alfa105(idx).*(D110(idx)./D105(idx)).*x(37) - interp1([999,1596.8,4785.7],[0,69.12,196.508],x(idx));

% Para Volumen embalse final año hidrológico > Volumen mínimo 30 junio

c(37)= 1288.61-x(36);

end

```