



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

NOTA TÉCNICA SOBRE LA APLICACIÓN DE LA REGLA DE EXPLOTACIÓN DEL TRASVASE TAJO-SEGURA EN SITUACIÓN HIDROLÓGICA EXCEPCIONAL (NIVEL 3)

Abril de 2019

CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS

PASEO BAJO DE LA VIRGEN
DEL PUERTO, 3
28005 MADRID
TEL: 91 335 79 00
FAX: 91 335 79 22



ES09/6695

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	SITUACIONES HIDROLÓGICAS EXCEPCIONALES RECIENTES	2
2.1	PERIODO DE AGOSTO DE 2015 A FEBRERO DE 2016	5
2.2	PERIODO DE ENERO A JUNIO DE 2017	7
2.3	RESUMEN	12
3	CRITERIOS E INDICADORES PARA ESTABLECER LOS MÉTODOS DE OPERACIÓN	13
4	DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS Y APLICACIÓN A LAS SITUACIONES HIDROLÓGICAS EXCEPCIONALES RECIENTES	16
4.1	MÉTODO DE OPERACIÓN ESTÁNDAR	16
4.2	SUMINISTRO EXCLUSIVO PARA ABASTECIMIENTO	20
4.3	REDUCCIÓN LINEAL DEL SUMINISTRO	24
4.4	REDUCCIÓN ESCALONADA DEL SUMINISTRO	28
4.5	MÉTODO ADAPTATIVO	32
4.6	MÉTODO LINEAL 1/3	37
5	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	40
6	COMPROBACIÓN CON EL PERIODO DE TRASVASE COMPLETO	44
6.1	EVOLUCIÓN DE LAS RESERVAS	45
6.2	VOLÚMENES TRASVASADOS	47
6.3	COMPORTAMIENTO EN LAS PRINCIPALES CRISIS DEL SISTEMA ANTERIORES A 2015	52
7	SELECCIÓN DEL MÉTODO A APLICAR	57
8	MÉTODO PROPUESTO	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de las reservas en Entrepeñas-Buendía desde la entrada en vigor de la regla vigente. Meses en situación hidrológica excepcional (nivel 3).....	4
Figura 2. Resultados de la aplicación trimestral de la regla y volúmenes de trasvase mensuales autorizados desde julio de 2015.....	5
Figura 3. Evolución de las reservas efectivas en Entrepeñas-Buendía y trasvases autorizados en el periodo de agosto de 2015 a febrero de 2016.....	7
Figura 4. Evolución de las reservas efectivas en Entrepeñas-Buendía desde la entrada en vigor de la regla vigente.....	12
Figura 5. Disponibilidad trimestral y trasvases mensuales autorizados desde julio de 2015.....	15
Figura 6. Método de operación estándar.....	17
Figura 7. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el método estándar entre julio de 2015 y febrero de 2016.....	18
Figura 8. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el método estándar entre enero y junio de 2017.....	19
Figura 9. Resultados de la aplicación del método de operación estándar.....	20
Figura 10. Procedimiento de operación con suministro exclusivo para abastecimiento.....	21
Figura 11. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el procedimiento de operación con suministro exclusivo para abastecimiento entre julio de 2015 y febrero de 2016.....	22
Figura 12. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el procedimiento de operación con suministro exclusivo para abastecimiento entre enero y junio de 2017.....	23
Figura 13. Resultados de la aplicación del procedimiento de operación con suministro exclusivo para abastecimiento.....	24
Figura 14. Procedimiento de reducción lineal del suministro.....	25
Figura 15. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el procedimiento de reducción lineal del suministro entre julio de 2015 y febrero de 2016.....	26
Figura 16. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el procedimiento de reducción lineal del suministro entre enero y junio de 2017.....	27
Figura 17. Resultados de la aplicación del procedimiento de reducción lineal del suministro.....	28
Figura 18. Procedimiento de reducción escalonada del suministro.....	29
Figura 19. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el procedimiento de reducción escalonada del suministro entre julio de 2015 y febrero de 2016.....	30
Figura 20. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el procedimiento de reducción escalonada del suministro entre enero y junio de 2017.....	31
Figura 21. Resultado de la aplicación del procedimiento de reducción escalonada del suministro.....	32
Figura 22. Sensibilidad al volumen máximo mensual trasvasado en febrero de 2017.....	33
Figura 23. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el procedimiento adaptativo entre julio de 2015 y febrero de 2016.....	35
Figura 24. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el procedimiento adaptativo entre enero y junio de 2017.....	35
Figura 25. Resultados de la aplicación del procedimiento adaptativo.....	36
Figura 26. Formulación mixta escalonada-lineal equivalente al procedimiento adaptativo.....	37
Figura 27. Método lineal 1/3.....	38
Figura 28. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el método lineal 1/3 entre julio de 2015 y febrero de 2016.....	39
Figura 29. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el método lineal 1/3 entre enero y junio de 2017.....	39
Figura 30. Resultado de la aplicación del método lineal 1/3.....	40
Figura 31. Resultados de la aplicación trimestral de la regla, volúmenes de trasvase mensuales autorizados y propuesta de trasvases con los diferentes procedimientos aplicados entre agosto de 2015 y febrero de 2016.....	41
Figura 32. Resultados de la aplicación trimestral de la regla, volúmenes de trasvase mensuales autorizados y propuesta de trasvases con diferentes criterios entre enero y junio de 2017.....	43

Figura 33. Volúmenes reales embalsados a primeros de mes en el sistema Entrepeñas-Buendía desde el comienzo de la operación del ATS y volúmenes resultantes de la aplicación de los métodos analizados.	45
Figura 34. Aportaciones acumuladas durante los últimos doce meses a Entrepeñas y Buendía desde el comienzo de la operación del ATS.	46
Figura 35. Trasvases mensuales realizados desde la entrada en servicio del trasvase.	47
Figura 36. Trasvases mensuales con el método estándar.	48
Figura 37. Trasvases mensuales con el procedimiento de suministro exclusivo para abastecimiento.	48
Figura 38. Trasvases mensuales con el procedimiento de reducción lineal del suministro.	49
Figura 39. Trasvases mensuales con el procedimiento de reducción escalonada del suministro.	49
Figura 40. Trasvases mensuales con el método adaptativo.	50
Figura 41. Trasvases mensuales con el método lineal 1/3.	50
Figura 42. Volúmenes mensuales trasvasados durante la crisis de los noventa (periodo septiembre 1991-enero 1996).	53
Figura 43. Volúmenes mensuales de trasvase resultantes de la aplicación de los diferentes procedimientos en la crisis de los noventa (periodo septiembre 1991-enero 1996).	54
Figura 44. Volúmenes mensuales trasvasados durante la crisis de la primera década de este siglo (periodo junio 2005-enero 2010).	55
Figura 45. Volúmenes mensuales de trasvase resultantes de la aplicación de los diferentes procedimientos en la crisis de la primera década de este siglo (periodo junio 2005-enero 2010). Promedio en todos los casos 11 hm ³ /mes.	56
Figura 46. Trasvase mensual en función de la disponibilidad trimestral según los diferentes métodos ensayados. Remarcado el método propuesto.	60
Figura 47. Trasvase mensual en función de la disponibilidad trimestral según el método propuesto.	61



CEDEX

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Existencias conjuntas (hm ³) en Entrepeñas y Buendía que definen las situaciones hidrológicas excepcionales (nivel 3).....	2
Tabla 2. Régimen transitorio del nivel de referencia para la definición de excedentes trasvasables.	3
Tabla 3. Aplicación de la regla de explotación a comienzos de enero de 2017	8
Tabla 4. Aplicación de la regla de explotación a comienzos de febrero de 2017	9
Tabla 5. Aplicación de la regla de explotación a comienzos de marzo de 2017	9
Tabla 6. Aplicación semestral de la regla de explotación a comienzos de abril de 2017.....	10
Tabla 7. Aplicación de la regla de explotación a comienzos de mayo de 2017.....	11
Tabla 8. Principales datos de la crisis de agosto de 2015 a febrero de 2016.....	13
Tabla 9. Principales datos de la crisis de enero a junio de 2017.....	13
Tabla 10. Disponibilidad trimestral y trasvase mensual resultante.....	25
Tabla 11. Aplicación trimestral de la regla de explotación a comienzos de febrero de 2017.....	33
Tabla 12. Balance trimestral en Entrepeñas-Buendía con trasvase máximo mensual de 14 hm ³ a partir de febrero de 2017.....	34
Tabla 13. Resultados de los diferentes métodos aplicados en el periodo comprendido entre agosto de 2015 y febrero de 2016.....	41
Tabla 14. Resultados de los diferentes procedimientos aplicados en el periodo comprendido entre enero y junio de 2017.....	42
Tabla 15. Indicadores de explotación relacionados con las reservas y las aportaciones acumuladas.....	46
Tabla 16. Indicadores de explotación relacionados con los volúmenes trasvasados.	51
Tabla 17. Indicadores de explotación relacionados con los volúmenes trasvasados destinados a abastecimiento.	51
Tabla 18. Indicadores de explotación relacionados con los volúmenes trasvasados destinados a regadío.....	52
Tabla 19. Indicadores de explotación relacionados con la evolución de las reservas y los volúmenes trasvasados.	58
Tabla 20. Indicadores de explotación relacionados con los volúmenes trasvasados destinados a abastecimiento.	58
Tabla 21. Indicadores de explotación relacionados con los volúmenes trasvasados destinados a regadío.....	58
Tabla 22. Clasificación de los procedimientos analizados de acuerdo con los indicadores de explotación.	59
Tabla 23. Posiciones obtenidas en la clasificación de los diferentes procedimientos de acuerdo con los indicadores de explotación y posición promedio resultante.	59

1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la normativa que regula el funcionamiento del trasvase Tajo-Segura, el sistema se encuentra en situación hidrológica excepcional, o de nivel 3, cuando las existencias conjuntas en Entrepeñas y Buendía son superiores o iguales a 400 hm³, y no superan, a comienzos de mes, unos valores que varían mensualmente entre 586 y 688 hm³.

En esta situación, la Ministra para la Transición Ecológica puede autorizar discrecionalmente y de forma motivada un trasvase de hasta 20 hm³/mes, previo informe de la Comisión Central de Explotación del Acueducto Tajo-Segura. Esta autorización es preferentemente trimestral, lo que supone que en situación de nivel 3 la regla de explotación se aplique generalmente por trimestres.

Debido a la discrecionalidad de la autorización, no se conocen de antemano los volúmenes a trasvasar en las situaciones de nivel 3, a diferencia de lo que sucede en las situaciones de nivel 1 y 2, en las que los trasvases están fijados en 60 y 38 hm³/mes, respectivamente. Esta falta de concreción hace que se plantee de forma recurrente el problema de qué volumen trasvasar cuando el sistema se encuentra en nivel 3¹. La decisión, en la que pueden influir muchos factores, es difícil que se sustraiga a las coyunturas propias de cada momento y puede incorporar ciertas dosis de subjetividad.

Para evitarlo, en la medida de lo posible, la Comisión Central de Explotación del Acueducto Tajo-Segura acordó acometer un estudio que permitiera identificar un procedimiento objetivo de aplicación de la regla de explotación del trasvase en situación hidrológica excepcional y encargar dicho estudio al Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. El objeto de esta nota técnica es presentar los resultados del estudio realizado.

El documento comienza con una detallada descripción de las situaciones hidrológicas excepcionales recientemente experimentadas por el sistema, que servirán de escenario de pruebas para ensayar el funcionamiento de los métodos que se proponen posteriormente. Este planteamiento tiene la ventaja de permitir una primera comparación de los resultados obtenidos mediante cada método con las decisiones que realmente se tomaron en situaciones conocidas recientes, pudiendo valorar con mayor facilidad de interpretación las ventajas e inconvenientes de haber adoptado decisiones diferentes de las que en su momento fueron adoptadas.

A continuación se definen los criterios y los indicadores que serán empleados para identificar y seleccionar los métodos de aplicación de la regla en la situación de nivel 3.

Estos métodos se describen en el capítulo siguiente y se aplican a las situaciones hidrológicas excepcionales recientes descritas en el capítulo inicial. Tras ello, se

¹ La cuestión del volumen trasvasable en nivel 3 ya fue analizada en el documento *El sistema de cabecera del Tajo y el trasvase Tajo-Segura*, elaborado por Francisco Cabezas en 2013. En este documento se ensayaba lo que sucedería si se adoptaba un criterio restrictivo en este nivel, consistente en limitar el envío durante todo el año para cumplir las necesidades estrictas de abastecimiento (evaluadas en 8,4 hm³/mes en origen), y alcanzar el máximo de 20 hm³/mes solo en el periodo de junio a septiembre, donde las necesidades de riego son mayores, lo que supone considerar que los envíos en nivel 3 no son fijos todo el año, sino que pueden variar estacionalmente.



CEDEX

comparan los resultados obtenidos, lo que permite disponer de una primera orientación sobre los métodos más adecuados.

Se procede a continuación a comprobar el funcionamiento de los diferentes métodos con el periodo de trasvase completo, simulando lo que habría sucedido en caso de que hubieran sido aplicados durante los 38 años hidrológicos completos de servicio del trasvase. Esta comprobación se efectúa analizando cómo habría sido la evolución de las reservas en Entrepeñas y Buendía y los volúmenes mensuales que habrían podido trasvasarse en cada caso. Este análisis permite determinar, por ejemplo, las probabilidades de que el sistema se encuentre en cada uno de los cuatro niveles de explotación previstos, obtener estadísticas de los trasvases que se habrían realizado y su distribución por usos, caracterizar la regularidad de los envíos o calcular la garantía de los trasvases para abastecimiento urbano, todo ello según cada uno de los métodos evaluados.

Se analiza también en este capítulo con cierto detalle el comportamiento de cada uno de los métodos en las importantes crisis que sufrió el trasvase en la década de los noventa y en la primera década de este siglo.

Tras llevar a cabo todos estos análisis, en el documento se selecciona y se propone finalmente el método que se considera más adecuado para aplicar la regla de explotación del trasvase Tajo-Segura en situación hidrológica excepcional con la información disponible.

2 SITUACIONES HIDROLÓGICAS EXCEPCIONALES RECIENTES

Según la normativa del trasvase Tajo-Segura, el sistema se encuentra en situación hidrológica excepcional cuando las existencias conjuntas en Entrepeñas y Buendía son superiores o iguales a 400 hm³, y no superan, a comienzos de mes, los siguientes valores:

Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
613	609	605	602	597	591	586	645	673	688	661	631

Tabla 1. Existencias conjuntas (hm³) en Entrepeñas y Buendía que definen las situaciones hidrológicas excepcionales (nivel 3).

Entre abril de 2014 y enero de 2018 el trasvase estuvo sujeto a un régimen transitorio en el que el nivel de referencia para la determinación de los excedentes trasvasables pasó de 240 a 400 hm³, y la curva de definición de situaciones hidrológicas excepcionales se elevó de forma escalonada y simultánea hasta alcanzar los niveles actualmente vigentes.

El régimen transitorio para alcanzar el umbral de 400 hm³ se implantó gradualmente según lo indicado en la tabla siguiente.

Año	Mes de entrada en vigor	Volumen (hm ³)
2014	Abril ²	272
2015	Enero	304
2016	Enero	336
2017	Enero	368
2018	Enero	400

Tabla 2. Régimen transitorio del nivel de referencia para la definición de excedentes trasvasables.

Desde la entrada en vigor de la regla vigente, en octubre de 2014, el sistema Entrepeñas-Buendía no ha estado nunca en nivel 1. Se ha encontrado 14 meses en situación de nivel 2 (de octubre de 2014 a enero de 2015, de marzo a mayo de 2015, junio de 2016, de mayo a julio de 2018 y de diciembre de 2018 a febrero de 2019), 28 meses en situación de nivel 3 (febrero de 2015, de junio a diciembre de 2015, de febrero a mayo de 2016, de julio 2016 a mayo de 2017, abril de 2018 y de agosto a noviembre de 2018) y 11 meses en situación de nivel 4 (enero de 2016, y de junio de 2017 a marzo de 2018).

En la figura siguiente se han señalado los 28 meses en los que el sistema se ha encontrado en situación de nivel 3. En ella se aprecian claramente los sucesivos escalones del régimen transitorio.

² Corresponde a la fecha de entrada en vigor del plan hidrológico del Tajo, momento en el que, según la Ley 21/2013 entonces vigente, el nivel inicial de 240 se debía elevar 32 hm³.

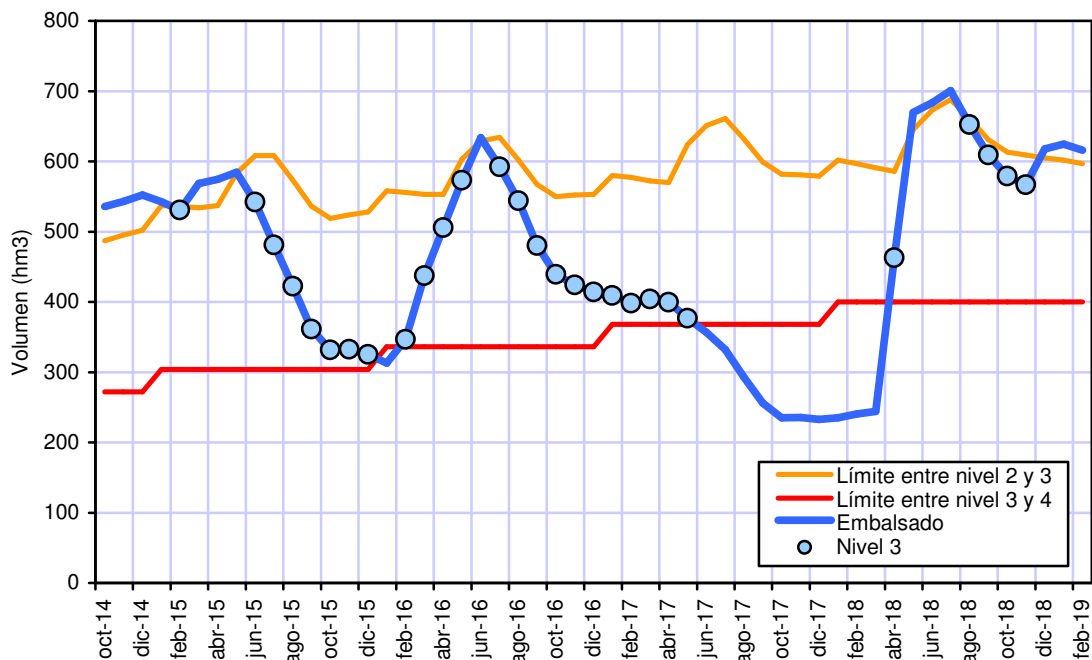


Figura 1. Evolución de las reservas en Entrepeñas-Buendía desde la entrada en vigor de la regla vigente. Meses en situación hidrológica excepcional (nivel 3)³.

Durante este periodo se han producido dos situaciones de crisis como consecuencia de la falta de disponibilidad de recursos trasvasables. Estas situaciones pueden apreciarse en la figura siguiente, en la que se muestran los volúmenes máximos trasvasables en cada periodo de tres meses como consecuencia de las aplicaciones trimestrales de la regla desde julio de 2015 llevadas a cabo para cada reunión de la Comisión y los correspondientes volúmenes mensuales autorizados.

³ Desde noviembre de 2016 se representa el volumen de embalse efectivo. Desde diciembre de 2018 el volumen embalsado corresponde a la nueva batimetría realizada.

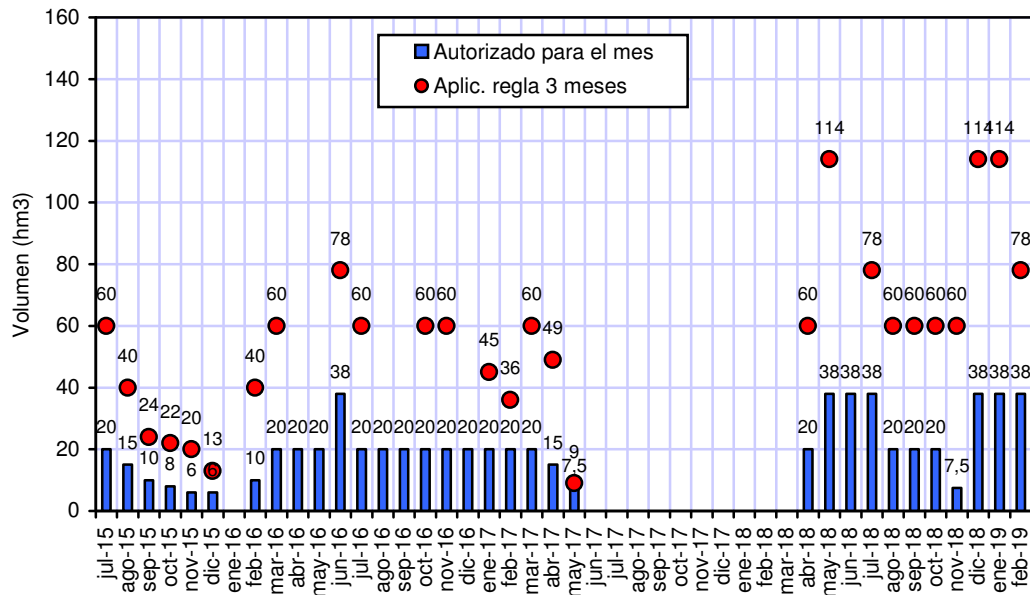


Figura 2. Resultados de la aplicación trimestral de la regla y volúmenes de trasvase mensuales autorizados desde julio de 2015.

La primera situación corresponde al periodo comprendido entre agosto de 2015 y febrero de 2016. En ese mes de agosto el sistema ya no contaba con la máxima disponibilidad trimestral y los recursos trasvasables se fueron reduciendo paulatinamente hasta alcanzar el nivel 4 en enero de 2016. En febrero el sistema se empezó a recuperar y se mantuvo en nivel 3 hasta la siguiente crisis, con un breve paso por el nivel 2 en junio de 2016.

La segunda situación corresponde a los meses comprendidos entre enero y mayo de 2017, tras los que se produjo una grave crisis hídrica, con diez meses consecutivos en nivel 4 sin posibilidad de realizar trasvase alguno. En este periodo se produjo una racha de aportaciones extraordinariamente bajas que se prolongó desde mayo de 2017 hasta febrero de 2018, en la que todos los meses se registraron las aportaciones mínimas históricas desde la entrada en operación del trasvase (salvo septiembre, que tuvo la segunda más baja). En marzo y abril se produjeron unas aportaciones muy importantes y el sistema se recuperó, alcanzando el nivel 2 en el mes de mayo.

A continuación se analizan con cierto detalle estos dos periodos con objeto de utilizarlos posteriormente para el análisis y contraste de los procedimientos que se proponen para la aplicación de la regla en situación hidrológica excepcional.

2.1 PERIODO DE AGOSTO DE 2015 A FEBRERO DE 2016

A comienzos de agosto de 2015 el sistema almacenaba unos 402 hm³ y el umbral no trasvasable se situaba entonces en 304 hm³. La aplicación trimestral de la regla permitía deducir que el sistema se mantendría en nivel 3 durante todo el trimestre, pero no sería posible trasvasar el volumen máximo mensual de 20 hm³ durante los tres meses, sino tan solo 40 hm³ en el trimestre. La secuencia mensual de trasvases obtenida (20-20-0) no permitiría asegurar el tercer mes el mínimo de 7,5 hm³ para abastecimientos urbanos.



CEDEX

La Comisión, en su reunión de 20 de agosto, acordó proponer 15 hm³ y revisar en septiembre la evolución de la coyuntura hidrológica a fin de elaborar la propuesta de trasvase para dicho mes. Tras ello, mediante la Orden AAA/1750/2015, de 21 de agosto, se autorizó el trasvase de 15 hm³ para el mes de agosto de 2015.

A comienzos de septiembre las reservas efectivas descendieron a unos 352 hm³ y la aplicación trimestral de la regla ponía de manifiesto que solo podrían trasvasarse 24 hm³ en el periodo, con una secuencia (20-4-0) que no aseguraría el suministro a los abastecimientos urbanos ni en octubre ni en noviembre.

La Comisión, en su reunión de 10 de septiembre acordó proponer un trasvase de 10 hm³, manteniendo la toma de decisiones mensual. Este trasvase fue autorizado mediante la Orden AAA/1869/2015, de 10 de septiembre.

Al comenzar el mes siguiente, octubre de 2015, las reservas habían descendido aún más, situándose en unos 332 hm³. La disponibilidad trimestral, de acuerdo con la aplicación de la regla, era de 22 hm³, con un secuencia mensual de 20-0-2 que impediría garantizar el abastecimiento urbano en noviembre y diciembre, pero que apuntaba un posible inicio de recuperación este último mes. La Comisión, en su reunión de 23 de octubre, acordó proponer un trasvase de 8 hm³, que fue autorizado mediante la Orden AAA/2252/2015, de 27 de octubre.

Las reservas continuaron descendiendo y a comienzos de noviembre se situaban en 324 hm³. La disponibilidad trimestral era tan solo de 20 hm³, con una secuencia mensual de 20-0-0. En su reunión de 20 de noviembre, la Comisión acordó proponer un trasvase de 6 hm³, que fue autorizado mediante la Orden AAA/2499/2015, de 25 de noviembre.

A comienzos de diciembre las reservas eran de 318 hm³ y la disponibilidad trimestral se reducía a 13 hm³ (13-0-0). La Comisión, reunida el 11 de diciembre, acordó proponer un trasvase de 6 hm³ que fue finalmente autorizado por medio de la Orden AAA/2787/2015, de 18 de diciembre.

A principios de enero, el umbral de reservas no trasvasables, de acuerdo con lo establecido en el régimen transitorio, se elevó hasta 336 hm³ y las reservas efectivas descendieron hasta 313 hm³, por lo que el sistema entró en nivel 4, sin posibilidad de realizar trasvase alguno.

En febrero la situación mejoró. Las reservas se elevaron hasta 347 hm³ y la disponibilidad trimestral llegó a 40 hm³, con una secuencia mensual de 10-14-16, que indicaba el inicio de un proceso de recuperación. En esta situación, la Comisión, en su reunión de 8 de febrero acordó proponer un trasvase mensual de 10 hm³, coincidente con el excedente mensual disponible. Este trasvase fue autorizado mediante la Orden AAA/145/2016, de 9 de febrero.

En marzo la situación, aunque se mantenía en nivel 3, se normalizó en cierta medida: las reservas ascendieron a 437 hm³ y la disponibilidad trimestral alcanzó el valor máximo de 60 hm³ (20-20-20). La Comisión, en su reunión de 2 de marzo acordó elevar a la Ministra una propuesta de trasvase de 20 hm³/mes para los meses de marzo, abril y mayo, volviendo a la decisión de carácter trimestral. Esta propuesta fue autorizada mediante la Orden AAA/289/2016, de 3 de marzo.

La mejoría continuó y en junio, con unas reservas efectivas de 630 hm³, el sistema pasó a nivel 2.

En resumen, en el periodo comprendido entre agosto de 2015 y febrero de 2016, al que se puede circunscribir esta crisis, la secuencia de trasvases mensuales fue 15-10-8-6-6-0-10. Es decir, se trasvasó un volumen total durante la crisis de 55 hm³, de los que 42 se destinaron al abastecimiento urbano y 13 a regadíos.

En la siguiente figura se muestra la evolución durante la crisis de las reservas efectivas y los trasvases mensuales autorizados.

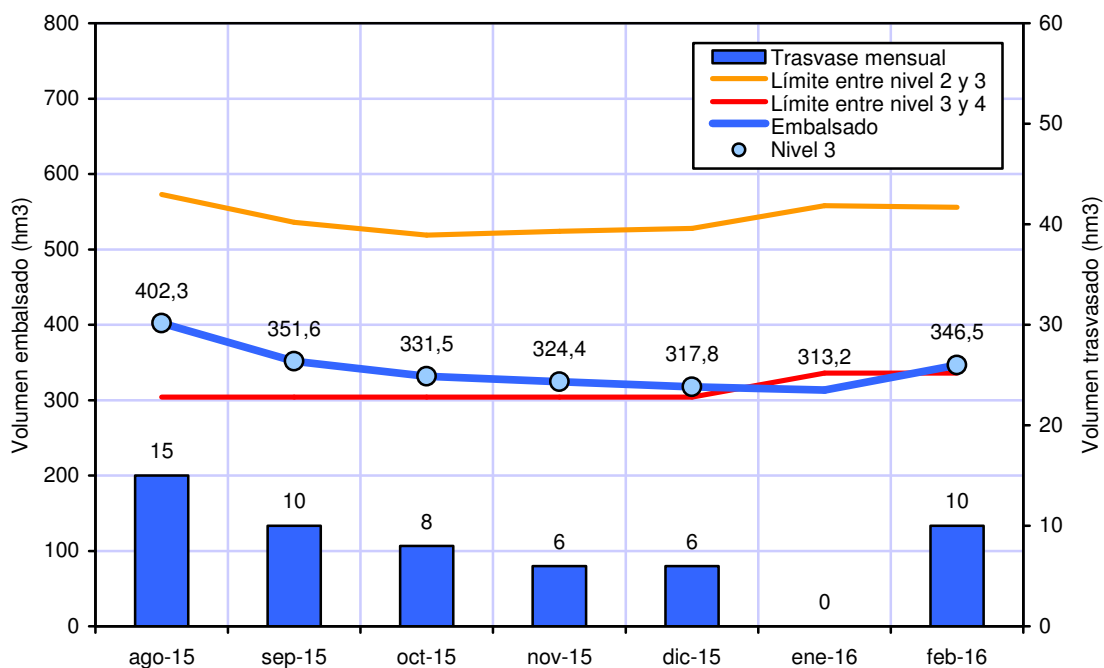


Figura 3. Evolución de las reservas efectivas en Entrepeñas-Buendía y trasvases autorizados en el periodo de agosto de 2015 a febrero de 2016.

Como puede apreciarse, en esta crisis las restricciones respecto al máximo volumen trasvasable de 20 hm³ se activaron desde agosto, primer mes en que la disponibilidad trimestral no era la máxima posible.

2.2 PERIODO DE ENERO A JUNIO DE 2017

El Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX empezó a elaborar los informes de situación en enero de 2017, tras el acuerdo de la Comisión Central de Explotación del Acueducto Tajo-Segura de 18 de noviembre de 2016, por lo que el seguimiento de este periodo se puede hacer de forma más detallada.

En este caso, a comienzos de enero de 2017 el sistema almacenaba unos 409 hm³ y el umbral no trasvasable se situaba entonces en 368 hm³. La aplicación trimestral de la regla permitía deducir que el sistema se mantendría en nivel 3 durante todo el trimestre, pero no sería posible trasvasar el volumen máximo mensual de 20 hm³ durante los tres meses, sino tan solo 45 hm³ en el trimestre. La secuencia mensual de trasvases



CEDEX

obtenida (20-19-6) no permitiría asegurar el tercer mes el mínimo de 7,5 hm³ para abastecimientos urbanos, tal como se muestra en la tabla siguiente.

Si se ampliaba el horizonte de cálculo a seis meses, se deducía que el sistema se mantendría en nivel 3 durante todo el semestre, pero con una tendencia a empeorar ligeramente en el segundo trimestre, en el que el máximo trasvasable apenas alcanzaría 41 hm³. Las existencias embalsadas al final del semestre (comienzos de julio) serían inferiores al umbral de reserva no trasvasable, situándose por tanto el sistema en situación de nivel 4.

Mes	Volumen inicial (hm ³)	Aportación acumulada 12 meses (hm ³)	Umbral excedentes (hm ³)	Nivel	Aportación supuesta (80%) (hm ³)	Consumo Tajo (hm ³)	Excedente (hm ³)s	Trasvase (hm ³)	Evap. (hm ³)	Volumen final (hm ³)
ene-17	408,9	693,7	368	3	19,4	19	40,9	20,0	2	387,3
feb-17	387,3	664,6	368	3	26,0	18	19,3	19,3	2	374,0
mar-17	374,0	573,0	368	3	35,1	23	6,0	6,0	3	377,1
abr-17	377,1	504,5	368	3	45,9	23	9,1	9,1	3	387,9
may-17	387,9	434,8	368	3	46,8	31	19,9	19,9	4	379,8
jun-17	379,8	381,2	368	3	36,9	42	11,8	11,8	5	357,9

Tabla 3. Aplicación de la regla de explotación a comienzos de enero de 2017

La Comisión, en su reunión de 13 de enero, acordó proponer 20 hm³ y revisar en febrero la evolución de la coyuntura hidrológica (decisión mensual). Tras ello, mediante la Orden APM/18/2017, de 17 de enero, se autorizó el trasvase de 20 hm³ para el mes de enero de 2017.

Durante el mes de enero se registraron unas aportaciones (22 hm³) ligeramente superiores a las de cálculo (19) y los desembalses realizados hacia el Tajo (11 hm³) fueron inferiores a los de referencia (19), por lo que las reservas efectivas a comienzos de febrero (398 hm³) fueron superiores a las calculadas (387).

A pesar de ello, y como se puede apreciar en la tabla siguiente, el sistema se encontraría en condiciones hidrológicas excepcionales durante todo el trimestre. De la aplicación de la regla resultaba que no se podría trasvasar el volumen mensual máximo de 20 hm³ durante los tres meses, pudiendo trasvasarse como máximo un volumen de 36 hm³ en el trimestre. La secuencia mensual de trasvases obtenida (20-11-5) no permitiría asegurar el tercer mes el mínimo de 7,5 hm³ para abastecimientos urbanos.

Si se ampliaba el horizonte a seis meses la situación no mejoraba y el sistema se mantendría en nivel 3 hasta el mes de julio, en que se alcanzaría el nivel 4. En estas circunstancias, el volumen máximo trasvasable en el segundo trimestre sería de unos 25 hm³.

Mes	Volumen inicial (hm ³)	Aportación acumulada 12 meses (hm ³)	Umbral excedentes (hm ³)	Nivel	Aportación supuesta (80%) (hm ³)	Consumo Tajo (hm ³)	Excedente (hm ³)s	Trasvase (hm ³)	Evap. (hm ³)	Volumen final (hm ³)
feb-17	398,4	667,3	368	3	21,1	18	30,4	20,0	2	379,5
mar-17	379,5	570,8	368	3	30,8	23	11,5	11,5	3	372,8
abr-17	372,8	498,0	368	3	42,2	23	4,8	4,8	3	384,2
may-17	384,2	424,6	368	3	44,1	31	16,2	16,2	4	377,1
jun-17	377,1	368,3	368	3	35,3	42	9,1	9,1	5	356,3
jul-17	356,3	354,4	368	4	29,6	60	0,0	0,0	7	318,9

Tabla 4. Aplicación de la regla de explotación a comienzos de febrero de 2017

La Comisión, en su reunión de 23 de febrero, y tras discutir la propuesta de trasvase de 20 o 15 hm³, acordó elevar una propuesta de 20 hm³ y revisar la evolución hidrológica en marzo. Mediante la Orden APM/156/2017, de 24 de febrero, se autorizó el trasvase de 20 hm³ para el mes de febrero de 2017.

Durante el mes de febrero el sistema experimentó una ligera mejoría: las aportaciones registradas (42) fueron apreciablemente superiores a las de cálculo (21) y los consumos en el Tajo (10) también fueron inferiores a los de referencia (18).

De la aplicación trimestral de la regla (tabla siguiente) resultaba que se podría trasvasar el volumen mensual máximo de 20 hm³ durante los tres meses, es decir, que podría trasvasarse un volumen de 60 hm³ en el trimestre.

Sin embargo, el horizonte de seis meses volvía a indicar que se alcanzaría el nivel 4 en julio y que se mantendría en agosto, por lo que el volumen máximo trasvasable en el segundo trimestre sería tan solo de 20 hm³.

Mes	Volumen inicial (hm ³)	Aportación acumulada 12 meses (hm ³)	Umbral excedentes (hm ³)	Nivel	Aportación supuesta (80%) (hm ³)	Consumo Tajo (hm ³)	Excedente (hm ³)s	Trasvase (hm ³)	Evap. (hm ³)	Volumen final (hm ³)
mar-17	403,9	591,8	368	3	37,1	23	35,9	20,0	3	395,0
abr-17	395,0	525,3	368	3	47,5	23	27,0	20,0	3	396,5
may-17	396,5	457,2	368	3	48,0	31	28,5	20,0	4	389,5
jun-17	389,5	404,8	368	3	37,5	42	21,5	20,0	5	360,0
jul-17	360,0	393,0	368	4	30,6	60	0,0	0,0	7	323,6
ago-17	323,6	394,1	368	4	25,9	51	0,0	0,0	6	292,5

Tabla 5. Aplicación de la regla de explotación a comienzos de marzo de 2017

La Comisión, en su reunión de 8 de marzo, acordó proponer un trasvase de 20 hm³, aunque la Mancomunidad de los Canales del Taibilla expresó su preocupación por la posibilidad de que se suspendieran los suministros del trasvase en verano. Mediante la Orden APM/222/2017, de 9 de marzo, se autorizó el trasvase de 20 hm³ para el mes de marzo de 2017.

La aplicación de la regla a comienzos de abril pronosticaba un ligero empeoramiento de la situación, de modo que aunque el sistema se mantenía en nivel 3 durante todo el trimestre, no se podría trasvasar el volumen mensual máximo de 20 hm³ durante los tres meses, pudiendo trasvasarse como máximo un volumen de 49 hm³ en el trimestre. La



CEDEX

secuencia mensual de trasvases obtenida (20-20-9) permitiría asegurar el mínimo de 7,5 hm³ para abastecimientos urbanos.

Sin embargo, la ampliación del horizonte de cálculo a seis meses anticipaba que, una vez alcanzado el nivel 4 a comienzos de julio, este nivel se mantendría hasta finales de septiembre, por lo que el volumen trasvasable desde julio hasta octubre sería nulo.

Mes	Volumen inicial (hm ³)	Aportación acumulada 12 meses (hm ³)	Umbral excedentes (hm ³)	Nivel	Aportación supuesta (80%) (hm ³)	Consumo Tajo (hm ³)	Excedente (hm ³)s	Trasvase (hm ³)	Evap. (hm ³)	Volumen final (hm ³)
abr-17	399.6	524.8	368	3	37.9	23	31.6	20.0	3	391.5
may-17	391.5	447.1	368	3	40.8	31	23.5	20.0	4	377.2
jun-17	377.2	387.4	368	3	33.4	42	9.2	9.2	5	354.4
jul-17	354.4	371.5	368	4	28.6	60	0.0	0.0	7	316.0
ago-17	316.0	370.7	368	4	25.0	51	0.0	0.0	6	284.0
sep-17	284.0	369.8	368	4	23.1	36	0.0	0.0	4	267.0

Tabla 6. Aplicación semestral de la regla de explotación a comienzos de abril de 2017.

Ante esta situación, la Comisión, en su reunión del 6 de abril, tras debatir propuestas de trasvase de 15 o 10 hm³ acordó proponer un trasvase de 15 hm³. Mediante la Orden APM/319/2017, de 7 de abril, se autorizó el trasvase de 15 hm³ para el mes de abril de 2017, autorizándose, por primera vez en esta crisis, un valor inferior al máximo permitido en nivel 3.

Durante el mes de abril las aportaciones fueron menores que las de cálculo (se registraron las terceras aportaciones más bajas del periodo de operación del trasvase, 31,4 hm³) y los desembalses hacia el Tajo (33 hm³) fueron superiores a los de referencia (23), por lo que la situación a comienzos de mayo fue peor de lo previsto. Así, el sistema se mantendría en nivel 3 solo durante el mes de mayo y pasaría a nivel 4 en junio, con reservas inferiores a 368 hm³. El volumen máximo que se podría trasvasar durante el mes de mayo sería de 8,9 hm³. La situación de nivel 4 se mantendría también durante el mes de julio, por lo que durante los meses de junio y julio no habría trasvase. Solo podría asegurarse el mínimo de 7,5 hm³ para abastecimientos urbanos durante el mes de mayo.

Ampliando el horizonte de cálculo a seis meses, se deducía que el nivel 4 alcanzado en junio se mantendría durante el resto del semestre, por lo que el volumen trasvasable desde junio hasta noviembre sería nulo.

Mes	Volumen inicial (hm ³)	Aportación acumulada 12 meses (hm ³)	Umbral excedentes (hm ³)	Nivel	Aportación supuesta (80%) (hm ³)	Consumo Tajo (hm ³)	Excedente (hm ³)s	Trasvase (hm ³)	Evap. (hm ³)	Volumen final (hm ³)
may-17	376.9	440.6	368	3	28.7	31	8.9	8.9	4	361.7
jun-17	361.7	368.9	368	4	26.0	42	0.0	0.0	5	340.7
jul-17	340.7	345.6	368	4	24.9	60	0.0	0.0	6	299.6
ago-17	299.6	341.0	368	4	23.0	51	0.0	0.0	6	265.5
sep-17	265.5	338.1	368	4	21.8	36	0.0	0.0	4	247.3
oct-17	247.3	336.2	368	4	26.3	25	0.0	0.0	2	246.6

Tabla 7. Aplicación de la regla de explotación a comienzos de mayo de 2017.

La Comisión, en su reunión de 5 de mayo, acordó proponer un trasvase de 7,5 hm³ para abastecimiento. Mediante la Orden APM/403/2017, de 8 de mayo, se autorizó el trasvase de 7,5 hm³ para el mes de mayo.

El sistema entró en nivel 4 en junio de 2017 y a partir de este momento tuvo lugar la peor racha de aportaciones desde que el trasvase comenzó su operación: se registraron las aportaciones mínimas históricas los meses de mayo, junio, julio y agosto, la segunda más baja en septiembre y de nuevo las mínimas históricas desde octubre hasta febrero, inclusive. Como consecuencia de ello, las reservas a comienzos de marzo de 2018 eran de 244 hm³. En ese momento, el nivel de reservas no trasvasables ya había ascendido al valor de 400 hm³ actualmente vigente.

Ese mes de marzo, sin embargo, la situación cambió bruscamente. Se registró una aportación de 229 hm³ (la tercera más alta de la historia) y las reservas ascendieron a 463 hm³ a primeros de abril, por lo que el sistema superó el nivel 4 tras 10 meses sin la posibilidad de realizar trasvases. Las reservas continuaron subiendo tras las importantes aportaciones de abril y a comienzos de mayo el sistema entró en nivel 2, en el que se mantuvo durante tres meses.

En definitiva, en este periodo, comprendido entre enero y junio de 2017, la secuencia de trasvases mensuales fue 20-20-20-15-7,5-0. Es decir, se trasvasó un volumen total durante la crisis de 82,5 hm³, de los que 37,5 se destinaron al abastecimiento urbano y 45 a regadíos.

Hay que destacar que en este periodo la aplicación de la regla no permitía trasvasar 60 hm³ en ningún trimestre, salvo el que comenzaba en marzo. Así, en enero solo se disponía de 45 hm³ en el trimestre, de 36 en febrero, 49 en abril y 9 en mayo. Es decir, la aplicación trimestral de la regla en los meses sucesivos alertaba sobre las dificultades para sostener los suministros máximos en nivel 3. El análisis de la tendencia realizado mediante la aplicación semestral de la regla, anticipaba también la posibilidad de la futura crisis, de forma que en febrero se plantea por primera vez la probable ausencia total de excedentes en julio. Esta tendencia se confirma en marzo y en abril, meses en los que se alerta sobre la extensión de la crisis a todo el verano, y se precipita en mayo, momento en que se agotan los recursos trasvasables.

Los análisis de riesgo realizados y las discusiones en el seno de la Comisión Central de Explotación condujeron a que se aplicaran restricciones en el máximo suministro posible en el mes de abril, en que se autorizó un trasvase de 15 hm³. La autorización de 7,5 hm³

en mayo venía forzada por la ya práctica desaparición de excedentes en ese momento (8,9 hm³ para el trimestre).

En la siguiente figura se muestra la evolución durante la crisis de las reservas efectivas y los trasvases mensuales autorizados.

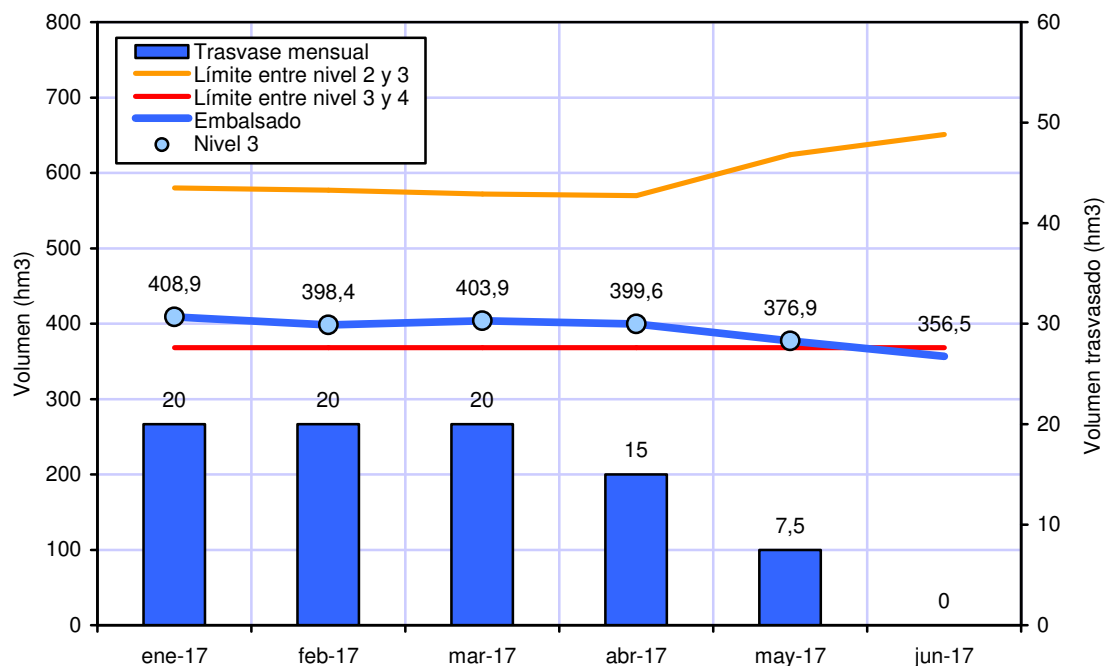


Figura 4. Evolución de las reservas efectivas en Entrepeñas-Buendía desde la entrada en vigor de la regla vigente.

Se observa que, en este caso, la activación de las restricciones se produjo en el cuarto mes de iniciarse la crisis, tras dos meses iniciales con disponibilidades trimestrales inferiores a la máxima y un tercer mes con la disponibilidad máxima. En este periodo se tardó más en activar las restricciones que en el periodo comprendido entre agosto de 2015 y febrero 2016, en el que las restricciones se activaron desde el primer mes.

2.3 RESUMEN

Se resumen a continuación los datos más significativos en la gestión de ambas crisis, incluyendo las fechas de las reuniones de la Comisión y las órdenes que autorizaron los trasvases correspondientes.

	Reservas efectivas (hm ³)	Disponibilidad trimestral (hm ³)	Reunión de la Comisión	Trasvase autorizado (hm ³)	Orden ministerial
Agosto 2015	402,3	40	20 agosto	15	AAA/1750/2015
Septiembre 2015	351,6	24	10 septiembre	10	AAA/1869/2015
Octubre 2015	331,5	22	23 octubre	8	AAA/2252/2015
Noviembre 2015	324,4	20	20 noviembre	6	AAA/2499/2015
Diciembre 2015	317,8	13	11 diciembre	6	AAA/2787/2015
Enero 2016	313,2	0	-	0	-
Febrero 2016	346,5	40	8 febrero	10	AAA/145/2016

Tabla 8. Principales datos de la crisis de agosto de 2015 a febrero de 2016.

	Reservas efectivas (hm ³)	Disponibilidad trimestral (hm ³)	Reunión de la Comisión	Trasvase autorizado (hm ³)	Orden ministerial
Enero 2017	408,9	45	13 enero	20	APM/18/2017
Febrero 2017	398,4	36	23 febrero	20	APM/156/2017
Marzo 2017	403,9	60	8 marzo	20	APM/222/2017
Abril 2017	399,6	49	6 abril	15	APM/319/2017
Mayo 2017	376,9	8,9	5 mayo	7,5	APM/403/2017
Junio 2017	356,5	0	-	0	-

Tabla 9. Principales datos de la crisis de enero a junio de 2017.

Hay que recordar que ambas crisis se produjeron durante el periodo transitorio en el que las reservas no trasvasables se elevaron desde 240 hasta 400 hm³.

Al comienzo de la crisis de 2015-2016 el umbral no trasvasable era de 304 hm³, y se elevó a 336 en enero de 2016. Si no se hubiera producido esta elevación no se habría alcanzado el nivel 4 en enero, pues las reservas efectivas eran de 313,2 hm³ y remontaron en febrero hasta 346,5. Es decir, sin la subida del umbral se habría superado la crisis sin entrar en nivel 4.

La crisis de 2017, por su parte, se produjo con un umbral no trasvasable de 368, que se elevaría a 400 en enero de 2018. La respuesta en ambas crisis, por tanto, no es directamente comparable, pues los umbrales de entrada en nivel 4 diferían, al comienzo de cada una de ellas, en 64 hm³.

3 CRITERIOS E INDICADORES PARA ESTABLECER LOS MÉTODOS DE OPERACIÓN

Con objeto de identificar los métodos más adecuados para aplicar la regla de explotación del trasvase cuando se alcanza el nivel 3, se definen una serie de criterios a los que se deberán ajustar los posibles procedimientos.

1. Como criterio general, el método propuesto se deberá ajustar estrictamente a la regla vigente. De hecho, solo operará en el margen de discrecionalidad que la normativa prevé cuando se alcanza el nivel 3.



2. Se considera prioritario el abastecimiento de población, de forma que el método elegido deberá asegurar, en la medida de lo posible, su suministro. A este respecto, la magnitud básica de referencia es la que se establece en el último párrafo del artículo 1 de la disposición adicional quinta de la Ley 21/2015, que indica que se deben asegurar siempre al menos $7,5 \text{ hm}^3/\text{mes}$ para los abastecimientos urbanos. Ante las dudas suscitadas sobre si esta cifra está referida a origen o destino del acueducto, la Comisión, en su reunión de 9 de agosto de 2018, consideró procedente elevar consulta a la Abogacía del Estado sobre la interpretación de esta cuestión. A los efectos de esta nota técnica, y a la espera del dictamen de la Abogacía, se considerará que la cifra de $7,5 \text{ hm}^3$ está referida a origen del acueducto, de conformidad con lo interpretado por la Comisión en sus últimas reuniones. Si el informe de la Abogacía estableciera finalmente que esta cifra se refiere a destino, se debería sustituir el valor de $7,5$ por el de $8,3 \text{ hm}^3/\text{mes}$, una vez consideradas las pérdidas en transporte del 10%.
3. Se consideran preferibles aquellos métodos que den lugar a secuencias de trasvases mensuales lo más regulares posible, evitando las oscilaciones en los envíos entre unos meses y otros. Serán preferibles, por tanto, los procedimientos que proporcionen menor variación y menor irregularidad en los volúmenes trasvasados.
4. Por último, serán preferibles los métodos que puedan expresarse de forma sencilla, mediante reglas simples o tablas de valores, y que sean parsimoniosos, empleando el menor número de parámetros.

Por otra parte, pueden seleccionarse diversos indicadores para definir el procedimiento a aplicar.

Por ejemplo, podrían utilizarse las reservas en Entrepeñas y Buendía o las aportaciones recientes acumuladas, o una combinación de ambas, tal y como se establece en los niveles 1 y 2 de la regla.

Utilizando las reservas como indicador, se podría determinar el umbral de reservas que permitiera garantizar el abastecimiento mínimo de $7,5 \text{ hm}^3/\text{mes}$. Esta curva, situada por encima del umbral de 400 hm^3 que determina el paso a nivel 4, marcaría el punto a partir del cual solo se trasvasaría el mínimo para abastecimiento. Por encima de ella se podría trasvasar cualquier volumen hasta un máximo de $20 \text{ hm}^3/\text{mes}$. La forma de determinar esta nueva curva de trasvase para uso exclusivo de abastecimiento urbano sería similar a la que se empleó para obtener el umbral de reservas no trasvasables, añadiendo ahora a las demandas propias del Tajo una demanda adicional de $7,5 \text{ hm}^3/\text{mes}$.

Este procedimiento requeriría emplear las series hidrológicas actualizadas, junto con las demandas y caudales ecológicos de la cuenca del Tajo también actualizados, lo que permitiría determinar los nuevos desembalses de referencia, a los que habría que añadir la demanda adicional de abastecimiento mínimo en la zona receptora del trasvase. Dado que esta actualización se encuentra en marcha en el marco de los trabajos de revisión de los planes hidrológicos, no parece oportuno, al menos por el momento, plantear un procedimiento de este tipo.

Otro posible indicador es la disponibilidad de agua en los meses futuros, obtenida mediante la aplicación plurimensual de la regla. Este indicador tiene la ventaja de

sintetizar una gran cantidad de información: reservas efectivas actuales, aportaciones futuras, desembalses de referencia y evaporación esperable en los próximos meses.

Sin perjuicio de que se pudiera valorar el empleo de un periodo de mayor duración, el periodo habitualmente empleado en situación hidrológica excepcional es de tres meses. Así se establece en el artículo 2 del Real Decreto 773/2014, que dispone que *no deberán considerarse como admisibles previsiones para periodos superiores a 6 meses, y si la situación en el mes inicial es de nivel 3 o 4, las previsiones se realizarán a lo sumo cada tres meses*. Por ello parece apropiado elegir un periodo de tres meses para la aplicación de la regla.

Este indicador tiene la ventaja adicional de su carácter dinámico, ya que se basa en las condiciones hidrológicas recientes, lo que le dota de mayor robustez para afrontar circunstancias no previstas inicialmente.

En definitiva, se elige como indicador para identificar y definir el procedimiento de aplicación de la regla en nivel 3 la disponibilidad trimestral, obtenida mediante la aplicación a tres meses de la regla de explotación del trasvase.

En la siguiente figura se muestra la relación entre esta disponibilidad trimestral y los trasvases mensuales autorizados en las situaciones de nivel 3 registradas desde julio de 2015. La situación más frecuente corresponde a las coordenadas (60,20), en las que coinciden 10 puntos.

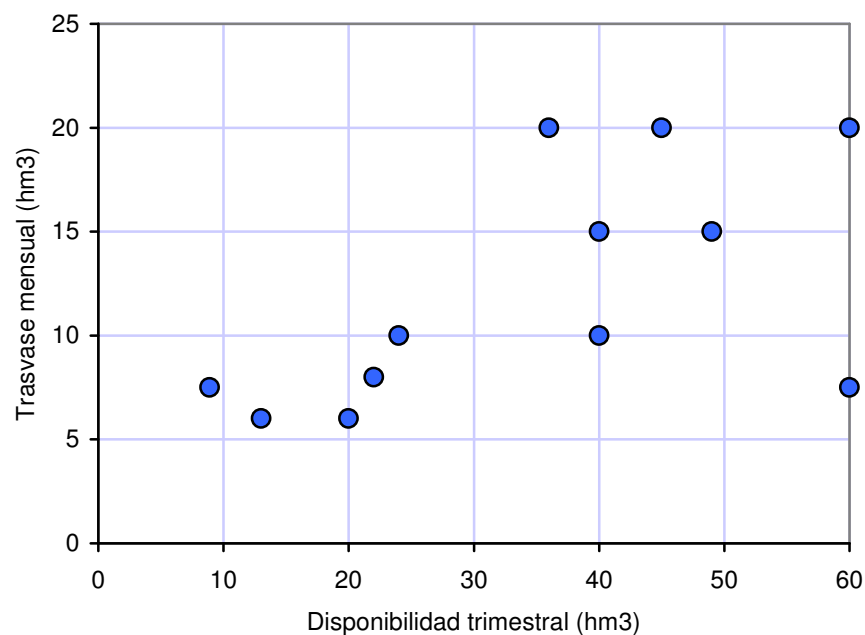


Figura 5. Disponibilidad trimestral y trasvases mensuales autorizados desde julio de 2015.



CEDEX

4 DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS Y APLICACIÓN A LAS SITUACIONES HIDROLÓGICAS EXCEPCIONALES RECIENTES

Atendiendo a los criterios expuestos, y una vez definido el indicador a utilizar, se han identificado los siguientes métodos con objeto de seleccionar el más adecuado para su aplicación en situación hidrológica excepcional:

- Método de operación estándar
- Suministro exclusivo para abastecimiento
- Reducción lineal del suministro
- Reducción escalonada del suministro
- Método adaptativo
- Método lineal 1/3

A continuación se describe cada uno de ellos y se ensaya su aplicación a las dos situaciones de crisis anteriormente descritas.

4.1 MÉTODO DE OPERACIÓN ESTÁNDAR

El método de operación estándar consiste en realizar todo el suministro que se requiera, siempre que el recurso disponible sea suficiente, es decir, se mantiene todo el suministro posible hasta que los recursos se agotan por completo. Esta regla supone prescindir de cualquier tipo de restricción al suministro mientras haya recursos disponibles⁴.

En el caso del ATS los recursos disponibles serían los resultantes de la aplicación trimestral regla, que permitiría disponer, como máximo, de 60 hm³ en el trimestre. Por tanto, podrían suministrarse 20 hm³ al mes hasta que la disponibilidad trimestral se redujese a un valor inferior a 20 hm³, en cuyo caso el suministro mensual sería precisamente ese valor. En la siguiente figura se muestra la representación gráfica de este criterio, relacionando el trasvase mensual con la disponibilidad trimestral resultante de aplicar la regla del trasvase.

⁴ Este procedimiento, conocido habitualmente como política de operación estándar (*standard operating policy*) en el ámbito de los sistemas de recursos hídricos, supone mantener el suministro objetivo todo el tiempo posible (Hashimoto, T., J.R. Stedinger y D.P. Loucks; Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation; *Water Resources Research*, 18(1), 14-20, 1982). Dado que esta política supone que todos los fallos tienen la misma importancia, independientemente de su cuantía, no se introducen restricciones anticipadas que pudieran evitar fallos más severos en el futuro. Diversos autores y algunas instituciones sostienen que una política de operación realista no está generalmente muy alejada de la política estándar. Véase U.S. Bureau of Reclamation; *Review of Water Supply Shortage Criteria and Reservoir Sizing Criteria*, 1990.

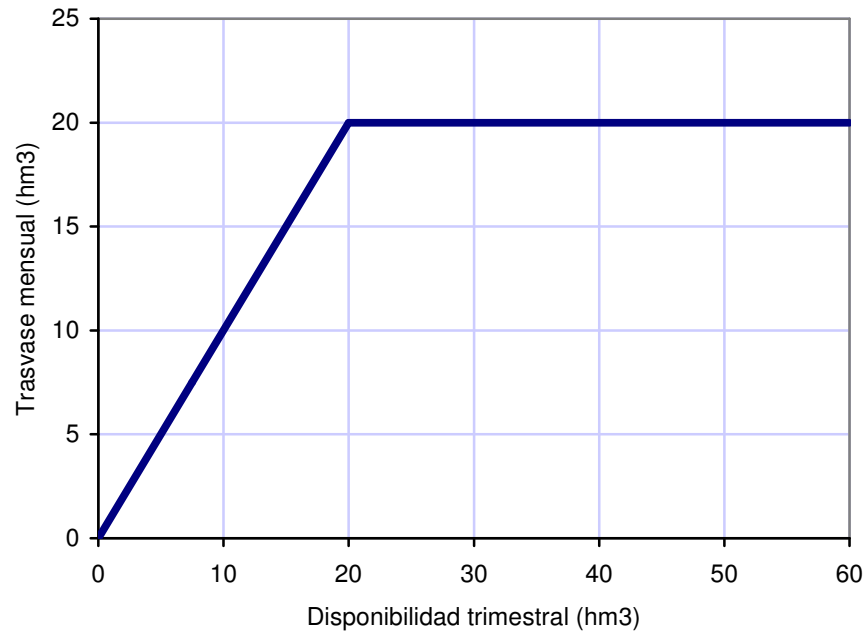


Figura 6. Método de operación estándar

Aplicando este procedimiento al periodo comprendido entre agosto de 2015 y febrero de 2016, se habrían podido trasvasar 20 hm³ en agosto, en lugar de los 15 trasvasados. En septiembre también habrían podido trasvasarse otros 20 hm³ en lugar de los 10 que se trasvasaron. En octubre se habrían podido trasvasar 12,5 hm³ –todo el recurso disponible- en lugar de los 8 trasvasados. Y en noviembre solo quedarían 0,9 hm³ para trasvasar, en lugar de los 6 que se trasvasaron. En diciembre no habría excedentes trasvasables, mientras que en la práctica pudieron trasvasarse 6 hm³. En enero tampoco habría excedentes con este procedimiento, coincidiendo en este caso con lo que sucedió realmente. En febrero, tras el inicio de la recuperación, se podrían trasvasar 2,1 hm³ en lugar de los 10 trasvasados y en marzo la situación se habría normalizado, volviendo a una disponibilidad trimestral de 60 hm³.

En resumen, la secuencia de trasvases mensuales que podrían haberse realizado aplicando el procedimiento estándar sería:

$$20 - 20 - 12,5 - 0,9 - 0 - 0 - 2,1$$

En la siguiente figura se muestra esta secuencia, junto con los volúmenes autorizados.

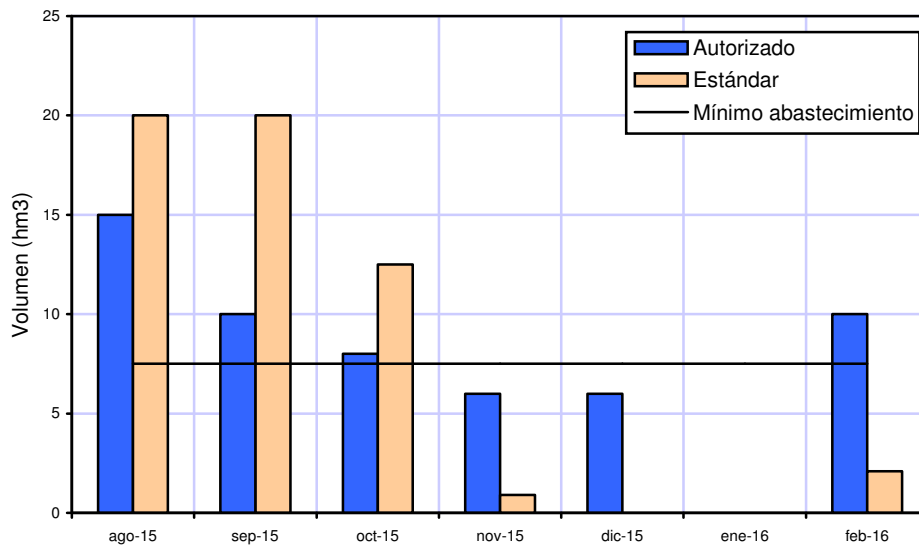


Figura 7. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el método estándar entre julio de 2015 y febrero de 2016.

En total se podrían haber trasvasado, por tanto, $55,5 \text{ hm}^3$ en el periodo agosto 2015-febrero 2016. De este volumen, se habrían destinado a abastecimiento urbano $25,5 \text{ hm}^3$ y a riego otros 30 hm^3 .

Aplicando este mismo procedimiento al periodo comprendido entre enero y junio de 2017, se habrían podido suministrar 20 hm^3 los meses de enero, febrero y marzo (tal como se hizo) y 20 también en abril (en lugar de los 15 trasvasados). Por lo tanto a primeros de mayo habría 5 hm^3 menos y la aplicación de la regla indicaría que se podrían trasvasar solamente $3,9 \text{ hm}^3$ y se agotarían las reservas trasvasables.

En definitiva, el criterio estándar habría conducido a la siguiente secuencia de trasvases mensuales en el periodo comprendido entre enero y junio de 2017:

$20 - 20 - 20 - 20 - 3,9 - 0$

En la siguiente figura se muestra esta secuencia y la de volúmenes autorizados.

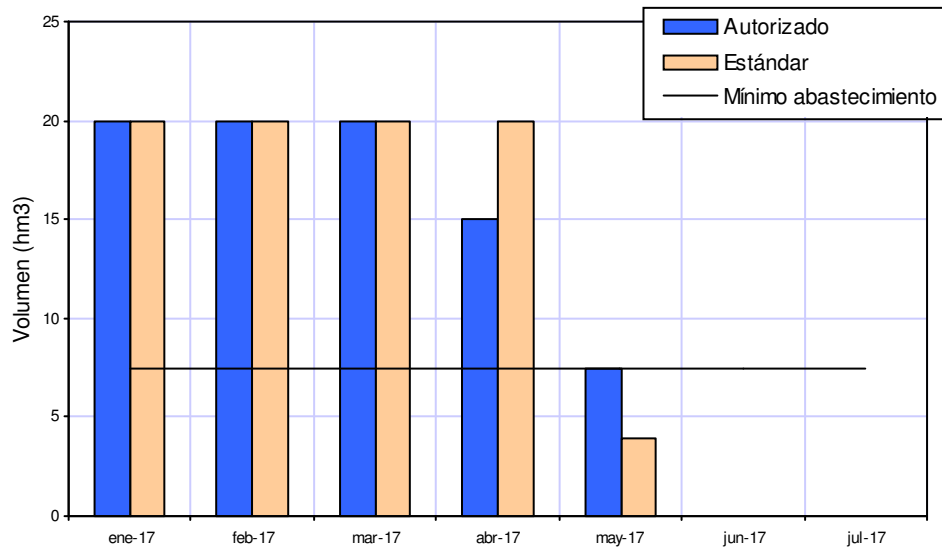


Figura 8. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el método estándar entre enero y junio de 2017.

Se habrían trasvasado 83,9 hm³ en total en el periodo, de los que 33,9 se habrían destinado a abastecimiento y 50 a riego.

En la siguiente figura se muestra la relación entre la disponibilidad trimestral y los trasvases mensuales resultantes de la aplicación de este procedimiento estándar, junto con los trasvases autorizados.

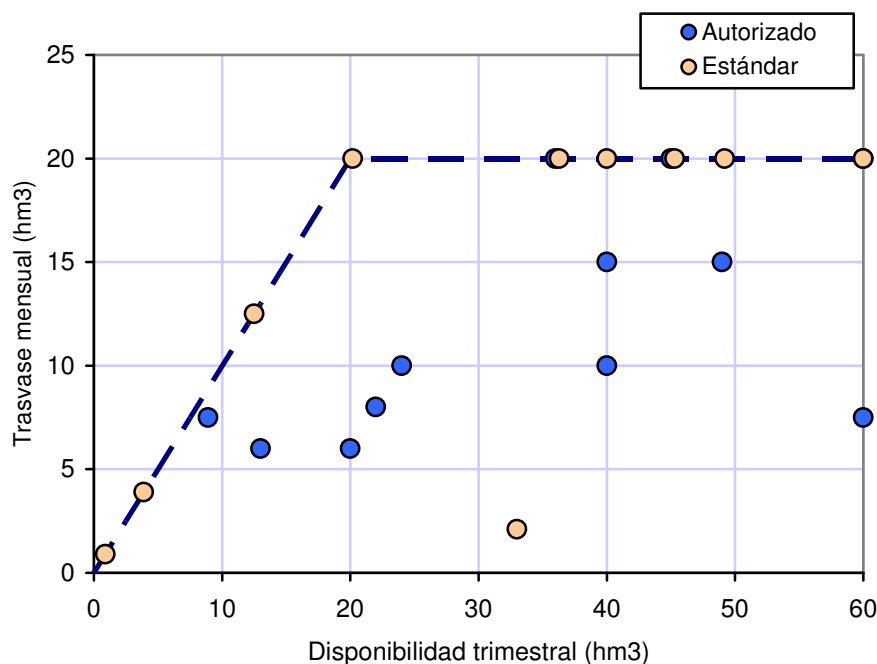


Figura 9. Resultados de la aplicación del método de operación estándar

Como puede apreciarse, este procedimiento da lugar a trasvases más extremos, generalmente superiores o inferiores a los autorizados.

A la luz de los resultados obtenidos puede decirse que este procedimiento no presenta un buen rendimiento. En la crisis de julio 15-febrero 16 daría lugar a que en 4 de los 7 meses del periodo no se alcanzara el mínimo de 7,5 hm³/mes para abastecimiento. Además, en dos de esos meses el suministro sería nulo, frente a lo que sucedió en la práctica, con un solo mes sin trasvase. A cambio de ello, se habría podido realizar el trasvase máximo de 20 hm³ en los meses de agosto y septiembre.

En la crisis de enero 17-junio 17, sin embargo, los trasvases obtenidos con este procedimiento no resultan muy diferentes de los que se autorizaron, seguramente porque la política aplicada durante esta crisis no difirió demasiado de la política estándar.

4.2 SUMINISTRO EXCLUSIVO PARA ABASTECIMIENTO

En la práctica, ante la inminencia de fallos importantes, es habitual introducir restricciones en el suministro con objeto de intentar limitar la repercusión de dichos fallos.

En un caso extremo, estas restricciones podrían llevarse al límite de atender exclusivamente el mínimo de 7,5 hm³ para abastecimiento de población en el momento en que la disponibilidad trimestral no asegurase el suministro para abastecimiento.

Estrictamente, esta situación se plantearía cuando la disponibilidad trimestral fuese inferior a 47,5 hm³, que correspondería a unas disponibilidades máximas de 20 hm³ en dos de los meses y una disponibilidad límite de 7,5 hm³ en el tercer mes. Con una disponibilidad trimestral superior a 47,5 hm³ el abastecimiento mínimo estaría

garantizado en el trimestre, mientras que por debajo de esa disponibilidad no siempre podría garantizarse.

Por tanto, el límite para activar las restricciones estaría en este valor de 47,5 hm³. Por debajo de este valor solo se autorizarían trasvases de 7,5 hm³. Este criterio se muestra gráficamente en la figura siguiente.

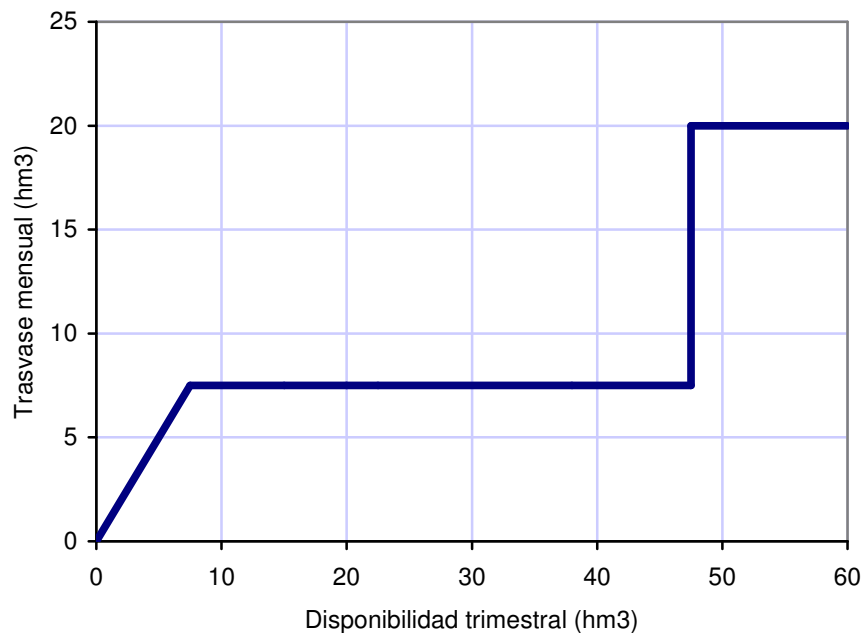


Figura 10. Procedimiento de operación con suministro exclusivo para abastecimiento

Si se aplica este procedimiento al periodo comprendido entre agosto de 2015 y febrero de 2016 se partiría de unas reservas efectivas a comienzos de agosto de 402 hm³, con una disponibilidad trimestral de 40 hm³, por lo que, al ser inferior a 47,5, procedería aplicar la restricción y limitar el suministro al abastecimiento (7,5). Esta situación se mantendría en los cuatro meses de septiembre a diciembre, en los que se trasvasarían 7,5 hm³. A comienzos de enero el sistema entraría en nivel 4, sin posibilidad de realizar trasvases, al igual que sucedió en la realidad. A comienzos de febrero comenzaría la recuperación, con una disponibilidad trimestral de 48,9 hm³, por lo que no procedería aplicar la restricción de abastecimiento (aunque el excedente mensual limitaría el volumen trasvasable a 18 hm³). Debido a las restricciones, la recuperación sería algo más rápida que en la situación real, aunque no se hubiera podido evitar la entrada en nivel 4 en el mes de enero.

La secuencia mensual de trasvases en el periodo agosto 2015-febrero 2016 habría sido, por tanto:

$$7,5 - 7,5 - 7,5 - 7,5 - 7,5 - 0 - 18$$

En la siguiente figura se muestra esta secuencia junto con los volúmenes autorizados.

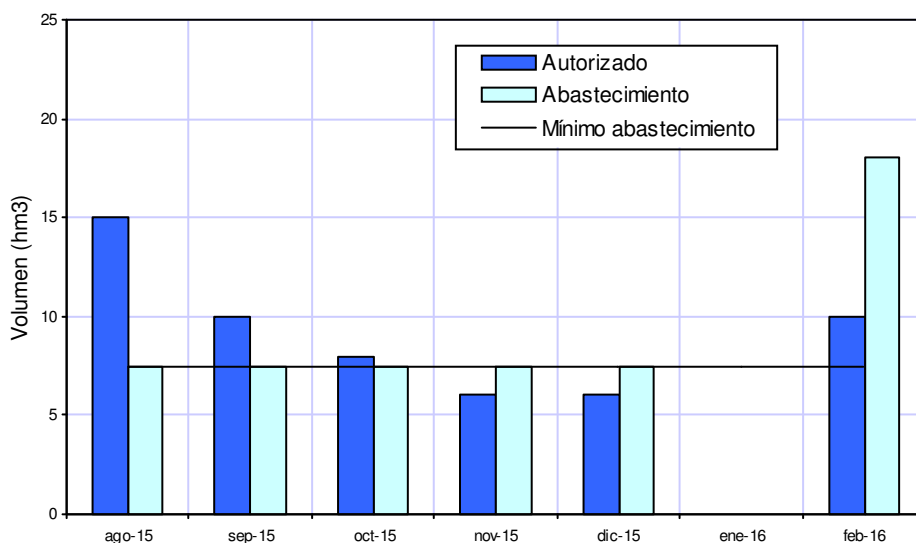


Figura 11. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el procedimiento de operación con suministro exclusivo para abastecimiento entre julio de 2015 y febrero de 2016.

Se habrían trasvasado en total $55,5 \text{ hm}^3$, de los que 45 habrían correspondido a abastecimiento de población y $10,5$ a regadíos.

A continuación se presenta la aplicación de este procedimiento en el periodo comprendido entre enero y junio de 2017.

En enero de 2017, con unas reservas efectivas de 409 hm^3 , la disponibilidad trimestral era de $45,3 \text{ hm}^3$, por lo que se aplicaría la restricción de trasvase mensual de $7,5 \text{ hm}^3$ en enero.

De esta forma se habrían ahorrado $12,5 \text{ hm}^3$ respecto al trasvase real realizado, que se añadirían a las reservas a comienzos de febrero. Así, la disponibilidad trimestral en febrero sería de $48,8 \text{ hm}^3$, por lo que no se activaría la restricción (disponibilidad superior a $47,5$) y se podrían trasvasar 20 hm^3 , como sucedió en realidad.

En febrero se mantendría el ahorro de $12,5 \text{ hm}^3$ respecto al trasvase real conseguido en enero, por lo que en marzo la disponibilidad trimestral sería de 60 hm^3 ; tampoco se aplicaría la restricción y se trasvasarían 20 hm^3 .

En el mes de marzo no se habría producido ahorro alguno respecto a la situación real. A comienzos de abril se dispondría de los $12,5 \text{ hm}^3$ ahorrados en enero. La disponibilidad trimestral volvería a ser de 60 hm^3 , por lo que tampoco se aplicaría la restricción en este caso y se trasvasarían 20 hm^3 .

Sin embargo, el trasvase real en abril fue de 15 hm^3 , por lo que con este criterio se estarían trasvasando 5 hm^3 más. En definitiva, a comienzos de mayo las reservas serían $12,5 - 5 = 7,5 \text{ hm}^3$ más que las reales. La disponibilidad trimestral sería de $16,4$ y se volvería a activar la restricción a $7,5 \text{ hm}^3$.

De esta forma se habría trasvasado lo mismo que en la situación real ($7,5 \text{ hm}^3$). A comienzos de junio, el sistema entraría en nivel 4 y no podrían realizarse más trasvases.

Es decir, la secuencia de trasvases con este procedimiento habría sido:

$$7,5 - 20 - 20 - 20 - 7,5 - 0$$

En la siguiente figura se muestra esta secuencia junto con los volúmenes autorizados.

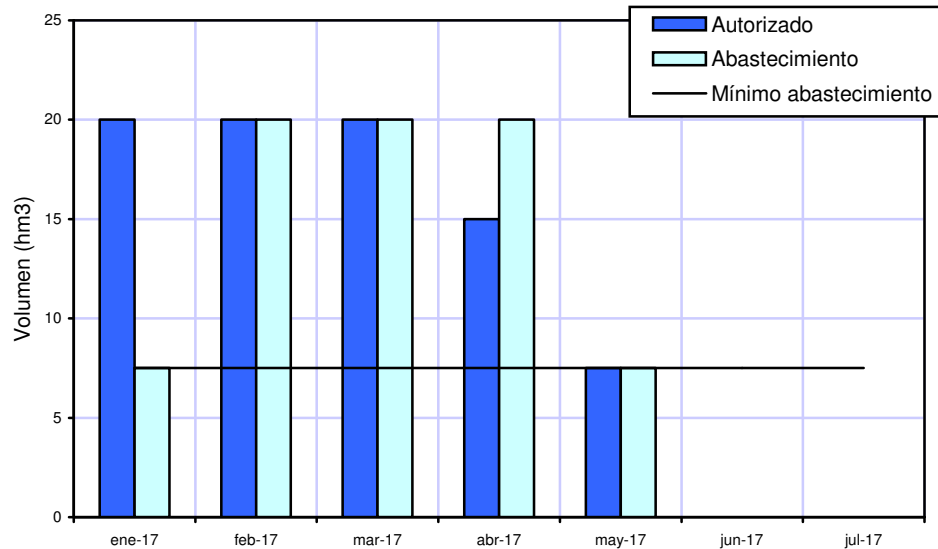


Figura 12. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el procedimiento de operación con suministro exclusivo para abastecimiento entre enero y junio de 2017.

Se habría trasvasado un volumen total de 75 hm^3 , de los que $37,5$ corresponderían a abastecimiento y otros $37,5$ a riego.

En la siguiente figura se muestra la relación entre la disponibilidad trimestral y los trasvases mensuales resultantes de la aplicación de este procedimiento, junto con los trasvases autorizados.

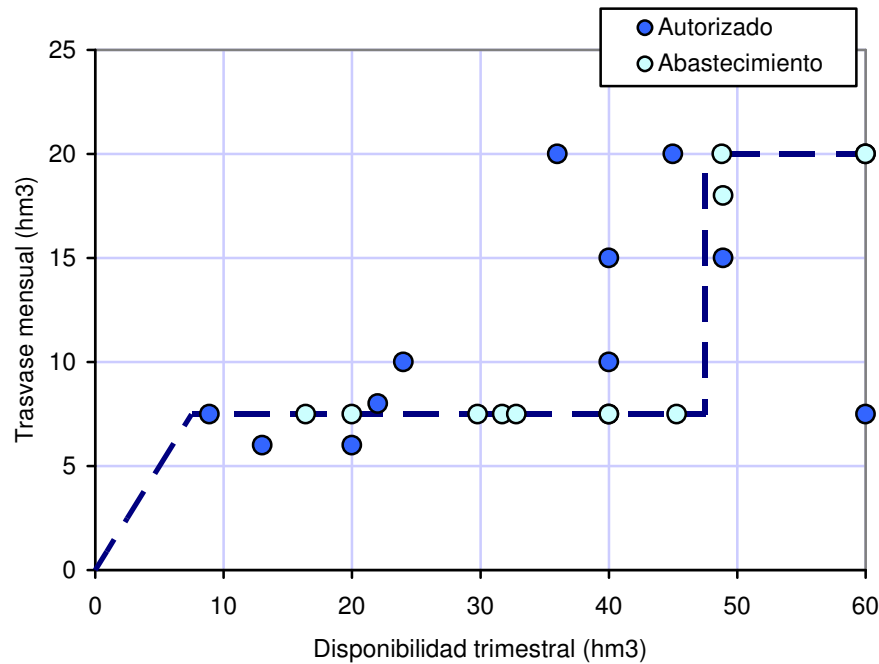


Figura 13. Resultados de la aplicación del procedimiento de operación con suministro exclusivo para abastecimiento

Se observa que este procedimiento generalmente da lugar a trasvases inferiores a los autorizados.

A pesar de las importantes restricciones que introduce, este procedimiento no consigue ampliar el periodo de suministro, de modo que en la primera crisis se seguiría entrando en nivel 4 en enero de 2016 y en la segunda se entraría en nivel 4 en junio de 2017.

Uno de los inconvenientes de este procedimiento es la importante oscilación que se puede producir en los volúmenes trasvasados cada mes, lo que se aprecia claramente en la respuesta en la crisis de enero 17-junio 17, en la que los volúmenes trasvasados serían los mínimos de 7,5 hm³ en dos de los meses, los máximos de 20 hm³ en otros tres meses, y nulos a partir de junio.

4.3 REDUCCIÓN LINEAL DEL SUMINISTRO

Un procedimiento intermedio entre los dos anteriores consistiría en graduar la reducción desde los 20 hm³ de suministro máximo, a partir de una disponibilidad trimestral de 47,5 hm³, hasta los 7,5 hm³ a los que se limitaría el suministro cuando la disponibilidad trimestral quedara reducida precisamente a ese valor. Esta reducción gradual se podría aplicar linealmente, tal y como se muestra en la figura y en la tabla siguientes.

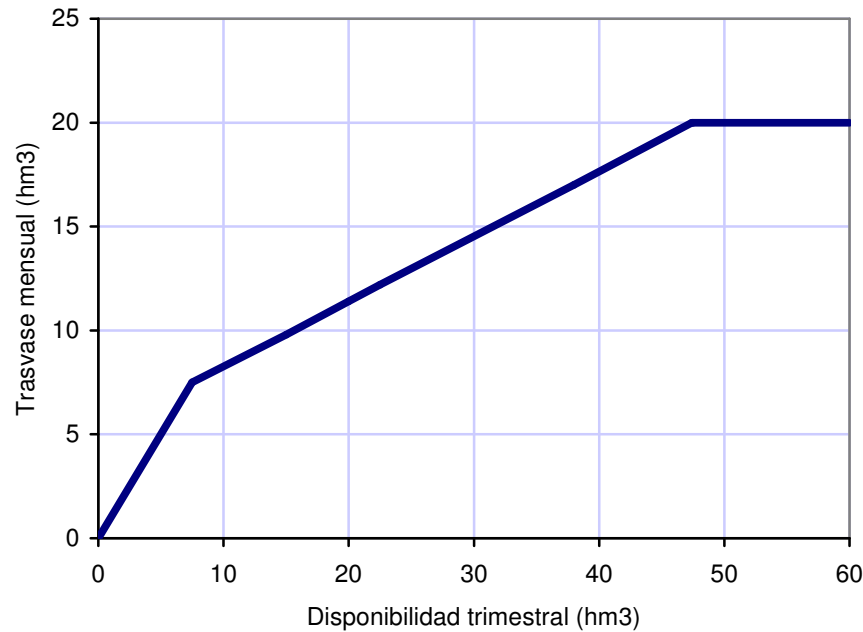


Figura 14. Procedimiento de reducción lineal del suministro

Disponibilidad trimestral (hm³)	Trasvase mensual (hm³)	Disponibilidad trimestral (hm³)	Trasvase mensual (hm³)	Disponibilidad trimestral (hm³)	Trasvase mensual (hm³)	Disponibilidad trimestral (hm³)	Trasvase mensual (hm³)
48	20,0	36	16,4	24	12,7	12	8,9
47	19,8	35	16,1	23	12,3	11	8,6
46	19,5	34	15,8	22	12,0	10	8,3
45	19,2	33	15,5	21	11,7	9	8,0
44	18,9	32	15,2	20	11,4	8	7,7
43	18,6	31	14,8	19	11,1	7	7,0
42	18,3	30	14,5	18	10,8	6	6,0
41	18,0	29	14,2	17	10,5	5	5,0
40	17,7	28	13,9	16	10,2	4	4,0
39	17,3	27	13,6	15	9,8	3	3,0
38	17,0	26	13,3	14	9,5	2	2,0
37	16,7	25	13,0	13	9,2	1	1,0

Tabla 10. Disponibilidad trimestral y trasvase mensual resultante

Aplicando este procedimiento al periodo comprendido entre agosto de 2015 y febrero de 2016, con una disponibilidad trimestral en agosto de 40 hm³, el volumen de trasvase mensual correspondiente sería de 17,7 hm³. Las disponibilidades trimestrales en los meses siguientes (septiembre, octubre, noviembre y diciembre) serían de 22,5, 20, 12 y 2,5 hm³, respectivamente, con lo que los trasvases mensuales en ese periodo serían 12,3, 11,4, 8,9 y 2,5 hm³. En enero el sistema entraría en nivel 4, por lo que no se realizaría trasvase, y en febrero la disponibilidad trimestral de 2,7 hm³ permitiría un trasvase de esa cuantía. Es decir, la secuencia mensual de trasvases habría sido:

$$17,7 - 12,3 - 11,4 - 8,9 - 2,5 - 0 - 2,7$$

En la siguiente figura se muestra esta secuencia junto con los volúmenes autorizados.

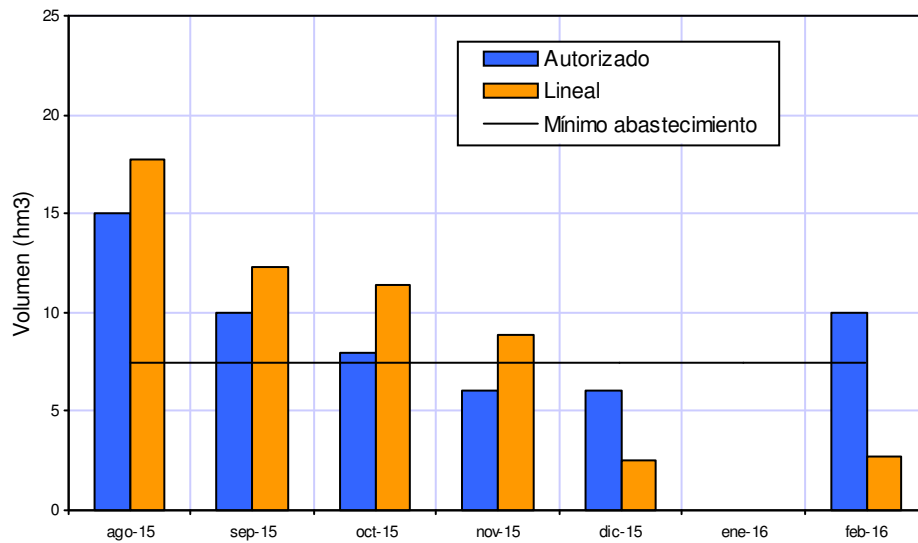


Figura 15. Traslases mensuales autorizados y traslases obtenidos con el procedimiento de reducción lineal del suministro entre julio de 2015 y febrero de 2016.

Se habrían podido realizar traslases por un valor total de total de 55,5 hm³, de los que 35,2 corresponden a abastecimiento de población y 20,3 a regadíos.

Análogamente, aplicando el procedimiento al periodo de enero a junio de 2017, las disponibilidades trimestrales serían de 45,3, 37,1, 60, 53,3 y 8 hm³, entre enero y mayo, respectivamente, y el sistema entraría en nivel 4 a comienzos de junio. La secuencia mensual de traslases correspondiente sería:

19,2 - 16,7 - 20 - 20 - 7,7 - 0

En la siguiente figura se muestra esta secuencia junto con los volúmenes autorizados.

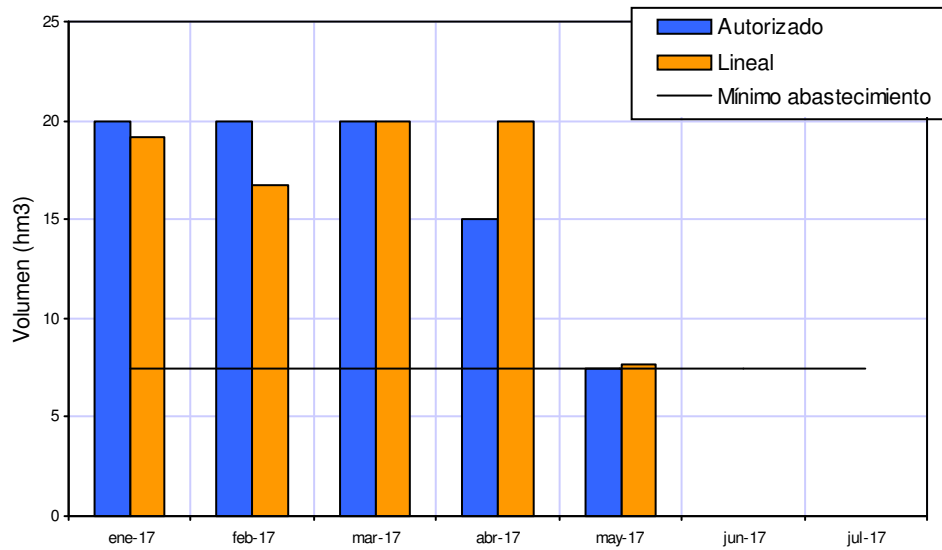


Figura 16. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el procedimiento de reducción lineal del suministro entre enero y junio de 2017.

Esta secuencia supondría un trasvase total de $83,6 \text{ hm}^3$, de los que $37,5$ se destinarían a abastecimiento y $46,1$ a regadíos.

En la siguiente figura se muestra la relación entre la disponibilidad trimestral y los trasvases mensuales resultantes de la aplicación de este procedimiento, junto con los trasvases autorizados.

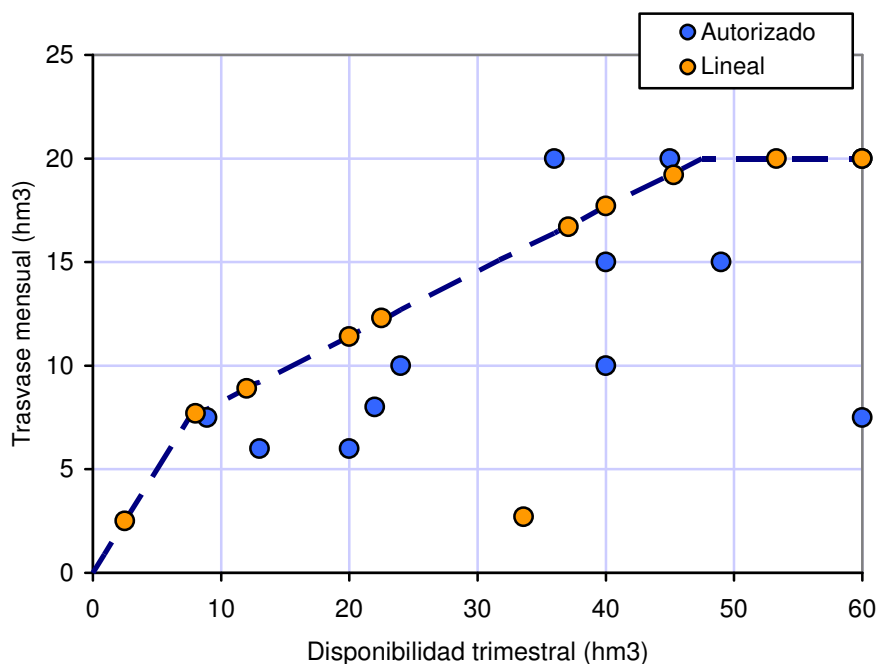


Figura 17. Resultados de la aplicación del procedimiento de reducción lineal del suministro

Este procedimiento daría lugar a unos volúmenes mensuales trasvasados intermedios entre los dos procedimientos anteriores, y tampoco conseguiría ampliar el periodo de suministro en ninguna de las dos crisis.

Como es lógico, la reducción de los suministros se haría de forma más gradual y, por tanto, se registrarían menos oscilaciones en los volúmenes trasvasados.

4.4 REDUCCIÓN ESCALONADA DEL SUMINISTRO

Una variante simplificada del procedimiento anterior de reducción lineal del suministro consiste en aplicar la reducción de forma escalonada, de modo que entre el valor inicial de 20 hm³ correspondiente a la máxima disponibilidad, y el valor mínimo de abastecimiento de 7,5 hm³, se aplique únicamente un escalón intermedio, que se activaría para un determinado rango de disponibilidades trimestrales.

El procedimiento representado en la figura siguiente, por ejemplo, supone activar la reducción cuando la disponibilidad trimestral es inferior a 47,5 hm³, limitando el suministro a 15 hm³ a partir de ese momento. Este suministro se realizaría hasta que la disponibilidad trimestral fuese inferior a 25 hm³, en cuyo caso el suministro se reduciría a 7,5 hm³, que se mantendrían mientras la disponibilidad lo permitiera. En caso contrario, por debajo de 7,5 el suministro se limitaría al volumen disponible.

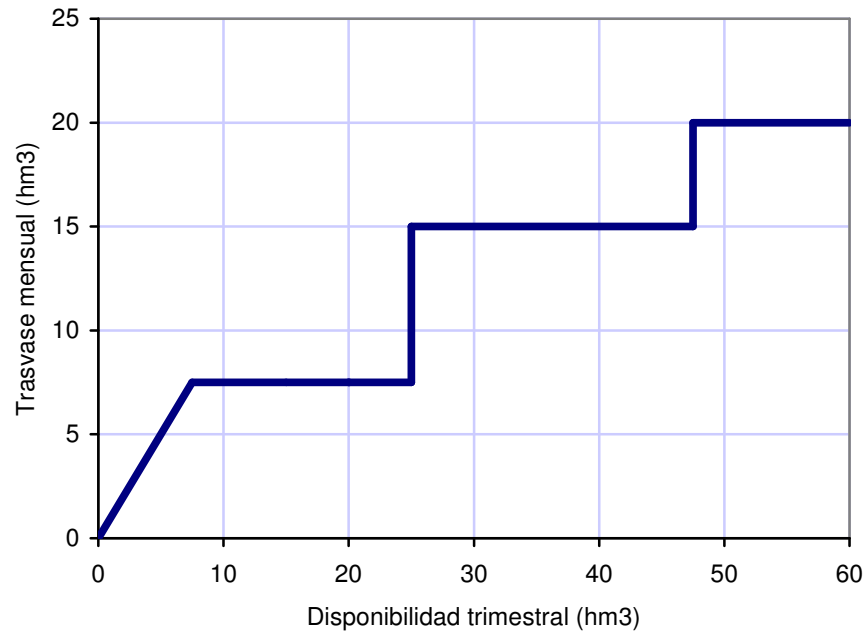


Figura 18. Procedimiento de reducción escalonada del suministro

Aplicando este procedimiento al periodo comprendido entre agosto de 2015 y febrero de 2016, la disponibilidad trimestral inicial a comienzos de agosto era de 40 hm^3 , por lo que el trasvase mensual sería de 15 hm^3 . A partir de ahí, las disponibilidades en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre serían de 24, 25, 16 y 8 hm^3 , respectivamente, lo que daría lugar a unos trasvases mensuales de 7,5, 15, 7,5 y 7,5. A comienzos de enero el sistema entraría en nivel 4, por lo que no habría trasvase ese mes. En febrero se iniciaría la recuperación, pero aunque la disponibilidad trimestral sería de 34 hm^3 , las existencias mensuales solo permitirían un trasvase de 3 hm^3 . En resumen, la secuencia mensual de trasvases habría sido:

$$15 - 7,5 - 15 - 7,5 - 7,5 - 0 - 3$$

En la siguiente figura se muestra esta secuencia junto con los volúmenes autorizados.

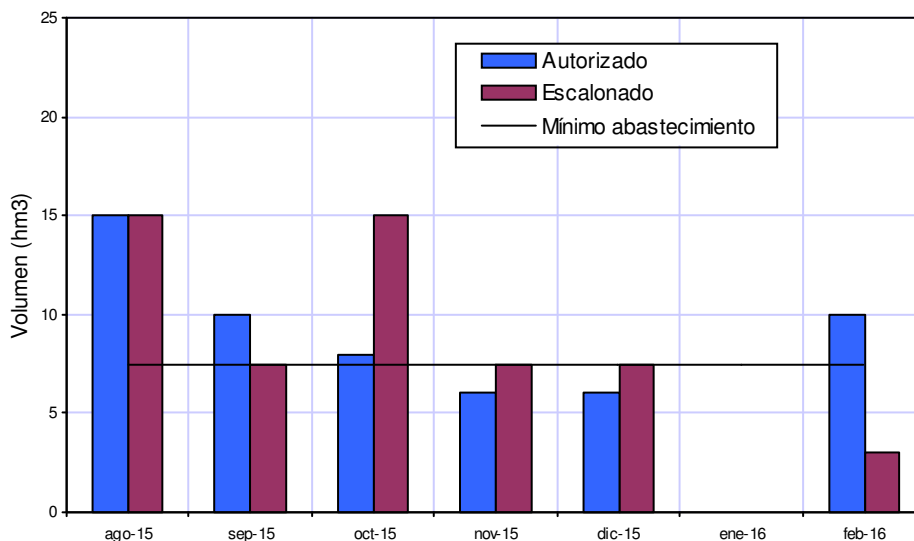


Figura 19. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el procedimiento de reducción escalonada del suministro entre julio de 2015 y febrero de 2016.

Se habrían trasvasado en total 55,5 hm³, de los que 40,5 habrían correspondido a abastecimiento de población y 15 a regadíos.

Análogamente, en el periodo entre enero y junio de 2017, con unas disponibilidades trimestrales de 45, 41, 60, 59 y 14, los trasvases mensuales habrían sido de 15, 15, 20, 20 y 7,5, respectivamente. A comienzos de junio el sistema se encontraría en nivel 4 y no se podrían realizar trasvases. Por tanto, la secuencia mensual de trasvases en este periodo sería:

$$15 - 15 - 20 - 20 - 7,5 - 0$$

Esta secuencia se puede observar en la figura siguiente.

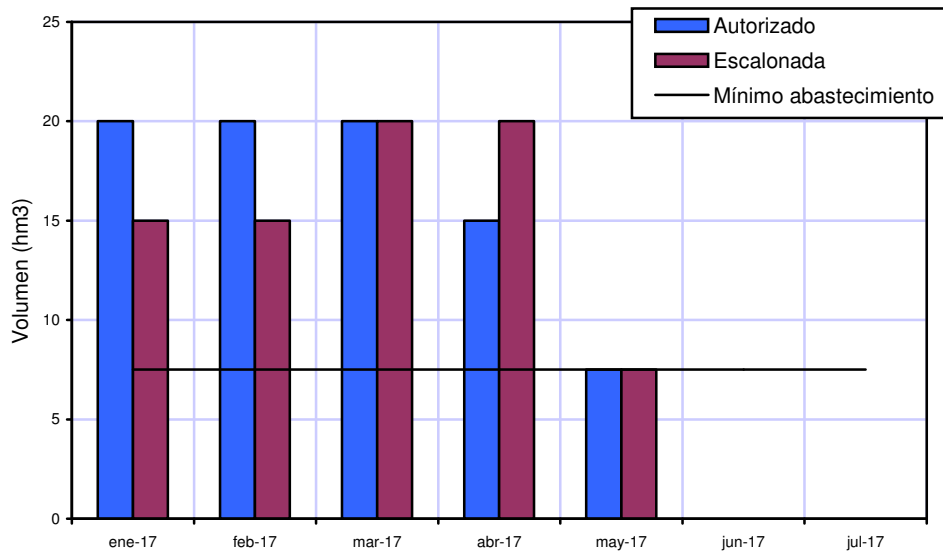


Figura 20. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el procedimiento de reducción escalonada del suministro entre enero y junio de 2017.

En este caso se habrían podido realizar trasvases por un valor total de total de 77,5 hm³, de los que 37,5 corresponden a abastecimiento de población y 40 a regadíos.

En la siguiente figura se muestra la relación entre la disponibilidad trimestral y los trasvases mensuales resultantes de la aplicación de este procedimiento, junto con los trasvases autorizados.

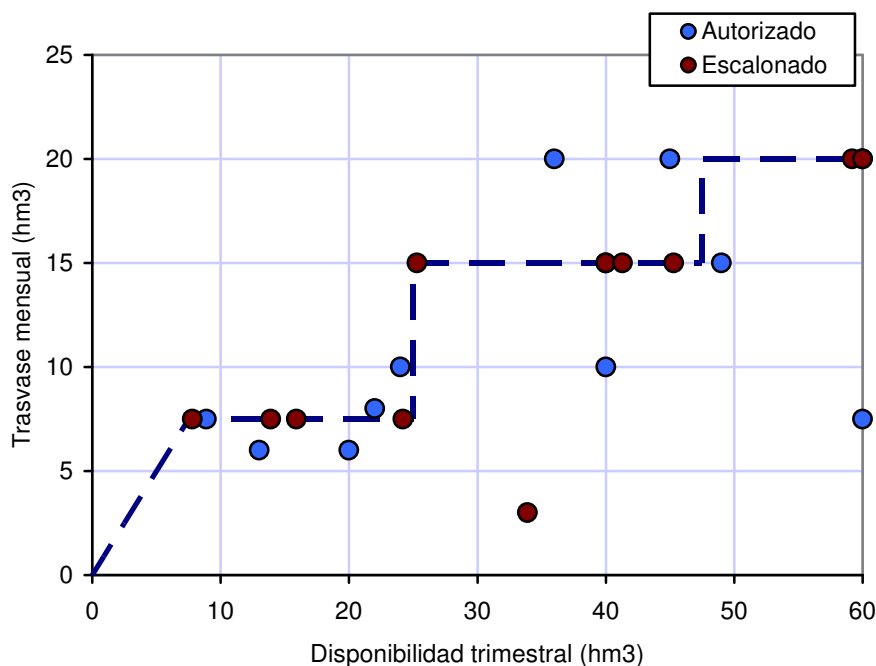


Figura 21. Resultado de la aplicación del procedimiento de reducción escalonada del suministro

Con este procedimiento, los volúmenes mensuales trasvasados se situarían, en general, en el entorno de los volúmenes autorizados.

Este procedimiento presenta el inconveniente de requerir dos parámetros más para definir el escalón. En este caso se ha optado por un escalón de 15 hm³, que se activaría para disponibilidades trimestrales inferiores a 47,5 hm³ y superiores o iguales a 25 hm³. Estas cifras de 15 y 25 (los dos nuevos parámetros) se han establecido de forma aproximada. Si se optara finalmente por un procedimiento de este tipo, se deberían optimizar estos valores, analizando los resultados obtenidos para diferentes parejas de valores.

4.5 MÉTODO ADAPTATIVO

Los procedimientos expuestos hasta ahora fijan de antemano el trasvase mensual que se realizaría en función de la disponibilidad trimestral.

Un procedimiento alternativo podría consistir en determinar, en cada situación concreta, el máximo trasvase mensual que podría realizarse con objeto de garantizar en el trimestre el suministro para abastecimiento. Es decir, se trataría de reducir el máximo

mensual de 20 hm³, de forma que se garantizara en el trimestre el mínimo de 7,5 hm³ para abastecimiento⁵.

Si tomamos, por ejemplo, la situación a comienzos de febrero de 2017, la aplicación trimestral de la regla daría lugar a los resultados que se muestran en la siguiente tabla.

Mes	Volumen inicial (hm ³)	Aportación acumulada 12 meses (hm ³)	Umbral excedentes (hm ³)	Nivel	Aportación supuesta (80%) (hm ³)	Consumo Tajo (hm ³)	Excedentes (hm ³)	Trasvase (hm ³)	Evap. (hm ³)	Volumen final (hm ³)
feb-17	398,4	667,3	368	3	21,1	18	30,4	20,0	2	379,5
mar-17	379,5	570,8	368	3	30,8	23	11,5	11,5	3	372,8
abr-17	372,8	498,0	368	3	42,2	23	4,8	4,8	3	384,2

Tabla 11. Aplicación trimestral de la regla de explotación a comienzos de febrero de 2017

Como se puede apreciar, no podría trasvasarse el volumen mensual máximo de 20 hm³ durante los tres meses, pudiendo trasvasarse como máximo un volumen de 36,3 hm³ en el trimestre y la secuencia mensual de trasvases obtenida no permitiría asegurar el tercer mes el mínimo de 7,5 hm³ para abastecimientos urbanos.

Si se redujera gradualmente el máximo trasvase desde 20 hasta 10 hm³/mes, se obtendría el resultado que se muestra en la siguiente figura.

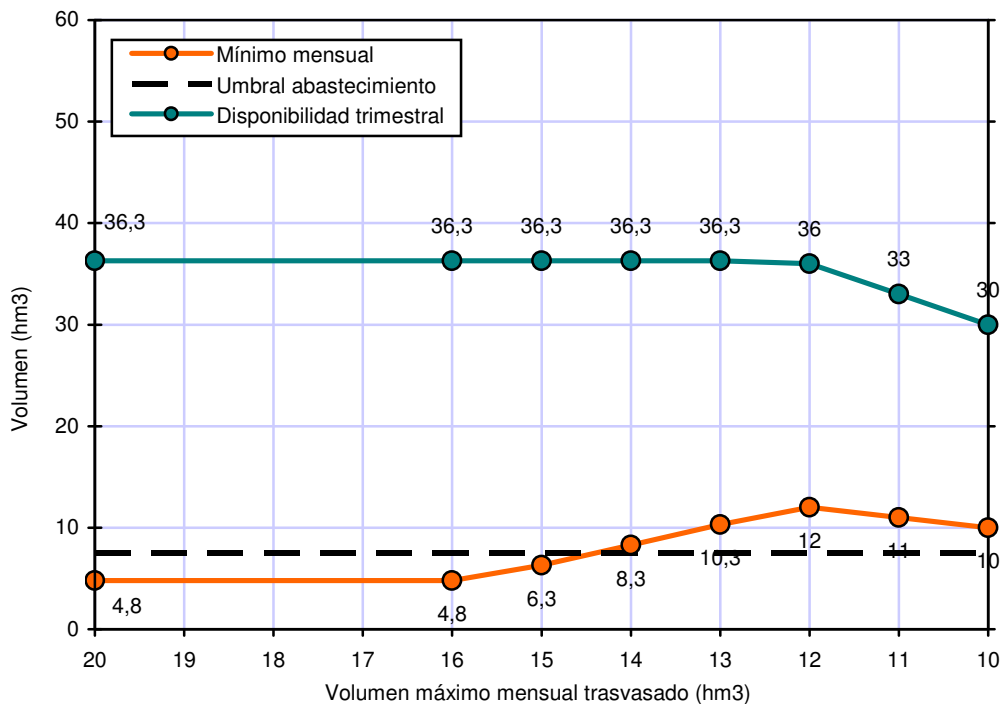


Figura 22. Sensibilidad al volumen máximo mensual trasvasado en febrero de 2017.

⁵ Este procedimiento ya se apuntaba en el Informe de situación de la Comisión Central de Explotación del Acueducto Tajo-Segura de febrero de 2017, en el que se planteaba como análisis de sensibilidad frente al trasvase máximo mensual (pág. 17).

Así, si el volumen de trasvase máximo mensual se redujera hasta 16 hm³, el volumen resultante en el trimestre sería el mismo (36,3 hm³) pero no se produciría efecto alguno en el volumen mínimo de trasvase mensual, que continuaría siendo de 4,8 hm³ en el mes de abril.

A partir de ahí, las reducciones empiezan a tener efecto en el volumen mínimo de trasvase. Así, para 15 hm³ el volumen mínimo en el trimestre sería de 6,3 hm³ y para 14 hm³ de trasvase mensual el volumen mínimo sería de 8,3 hm³. Esta cifra ya superaría el umbral de 7,5 hm³/mes que se establece para abastecimientos urbanos⁶. Todo ello sin modificar el volumen trimestral resultante de la aplicación de la regla.

Si continuara la reducción, al alcanzar 12 hm³/mes se obtendría el volumen mensual mínimo más alto, que correspondería a una secuencia de tres trasvases iguales de 12 hm³ cada mes. Por debajo de esta cifra se producirían reducciones tanto en el volumen trimestral como en el mínimo mensual, quedando por debajo de los valores sugeridos por la regla.

Con el volumen máximo de trasvase de 14 hm³/mes, el balance trimestral obtenido sería el mostrado en la tabla siguiente.

Mes	Volumen inicial (hm ³)	Aportación acumulada 12 meses (hm ³)	Umbral excedentes (hm ³)	Nivel	Aportación supuesta (80%) (hm ³)	Consumo Tajo (hm ³)	Excedentes (hm ³)	Trasvase (hm ³)	Evap. (hm ³)	Volumen final (hm ³)
feb-17	398,4	667,3	368	3	21,1	18	30,4	14,0	2	385,5
mar-17	385,5	570,8	368	3	30,8	23	17,5	14,0	3	376,3
abr-17	376,3	498,0	368	3	42,2	23	8,3	8,3	3	384,2

Tabla 12. Balance trimestral en Entrepeñas-Buendía con trasvase máximo mensual de 14 hm³ a partir de febrero de 2017.

Aplicando este procedimiento al periodo comprendido entre agosto de 2015 y febrero de 2016, la secuencia mensual de trasvases obtenida sería la siguiente:

15 - 7,5 - 8 - 7,5 - 7,5 - 0 - 10

⁶ El volumen estricto para superar este umbral sería 14,4 hm³/mes.

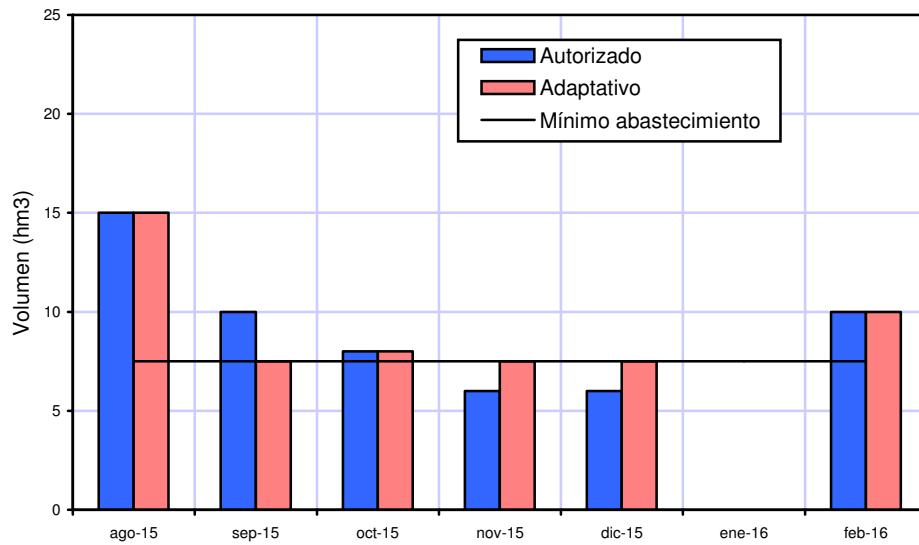


Figura 23. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el procedimiento adaptativo entre julio de 2015 y febrero de 2016.

En el caso del periodo comprendido entre enero y junio de 2017 se obtendría la siguiente secuencia de trasvases mensuales:

18 – 15 – 20 – 20 - 7,5 - 0

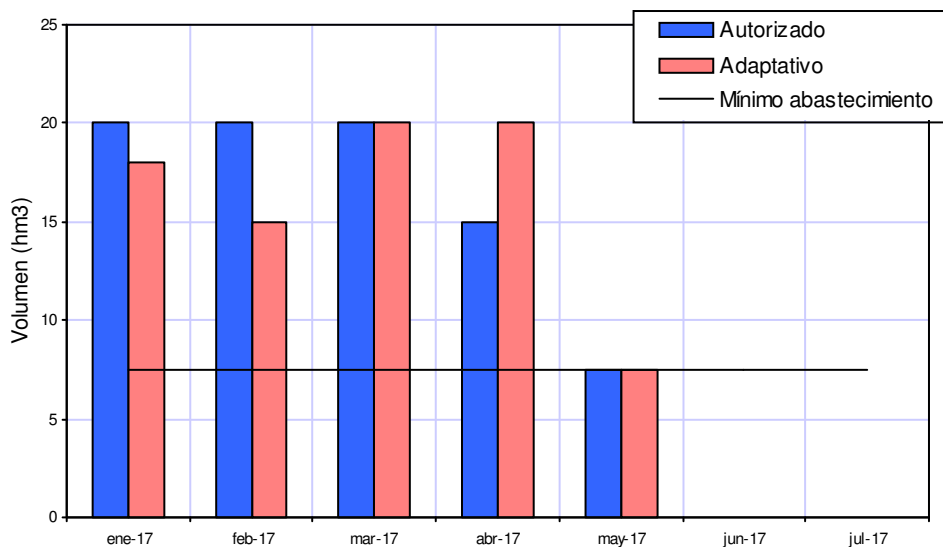


Figura 24. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el procedimiento adaptativo entre enero y junio de 2017.

En la siguiente figura se muestra la relación entre la disponibilidad trimestral y los trasvases mensuales resultantes de la aplicación de este procedimiento, junto con los trasvases autorizados.

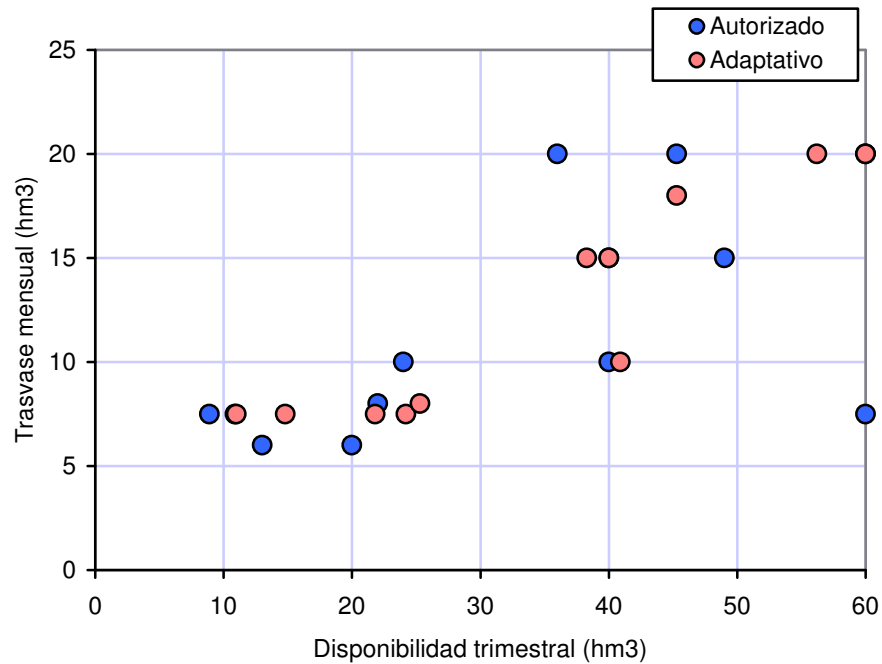


Figura 25. Resultados de la aplicación del procedimiento adaptativo.

Con este procedimiento, los valores resultantes se sitúan en el rango de los trasvases autorizados.

El inconveniente que presenta este método es que requiere un proceso iterativo hasta determinar el trasvase máximo mensual que se podría realizar, por lo que no podría expresarse de forma sencilla mediante reglas simples o tablas que permitieran determinar de antemano el trasvase en función de la disponibilidad trimestral, en contra de los criterios establecidos en el capítulo 3.

Observando la distribución de los volúmenes obtenidos con este procedimiento, se podría valorar la posibilidad de formularlo de otra manera, no mediante un proceso iterativo como el que se acaba de describir, sino mediante una variante más simple de los procedimientos lineal y escalonado, tal como se muestra en la figura siguiente.

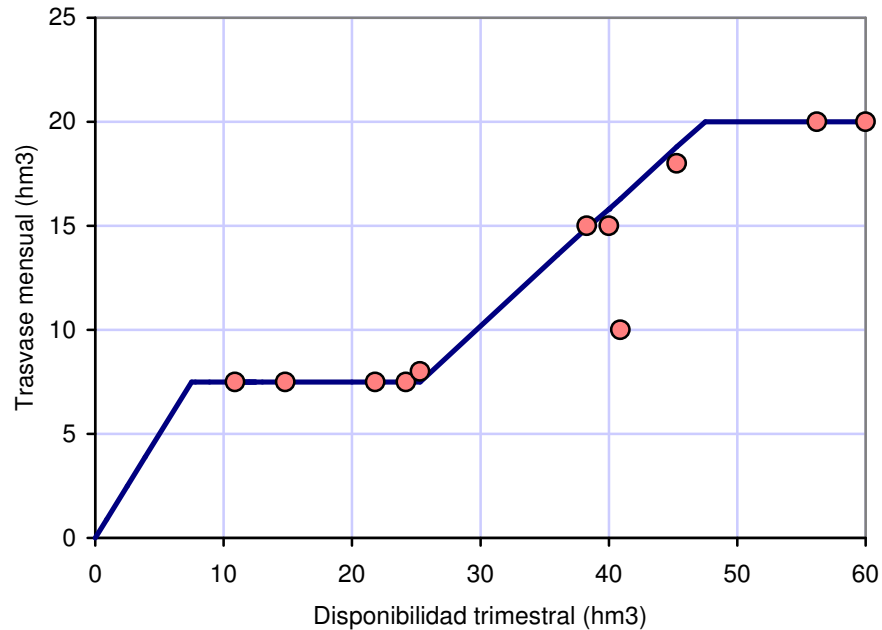


Figura 26. Formulación mixta escalonada-lineal equivalente al procedimiento adaptativo

4.6 MÉTODO LINEAL 1/3

A partir de esta formulación combinada de los métodos lineal y escalonado derivada del procedimiento adaptativo, se plantea un nuevo método consistente en un primer tramo de reducción lineal del suministro y un escalón horizontal en el umbral mínimo de 7,5, pero con la variante de comenzar la reducción a partir del valor de disponibilidad trimestral máxima de 60 hm³, y reducir el trasvase mensual desde ese punto a la tercera parte de la disponibilidad trimestral, hasta alcanzar el umbral mensual de 7,5, es decir, hasta que la disponibilidad trimestral se reduzca a 22,5 hm³⁷.

Este nuevo procedimiento, al que de forma simplificada se puede denominar lineal 1/3, se esquematiza en la siguiente figura.

⁷ En el documento *Análisis de coyuntura y riesgos de explotación en el trasvase Tajo-Segura*, realizado por Francisco Cabezas en 2018, se plantea un criterio orientativo de este tipo, aunque con cifras ligeramente diferentes.

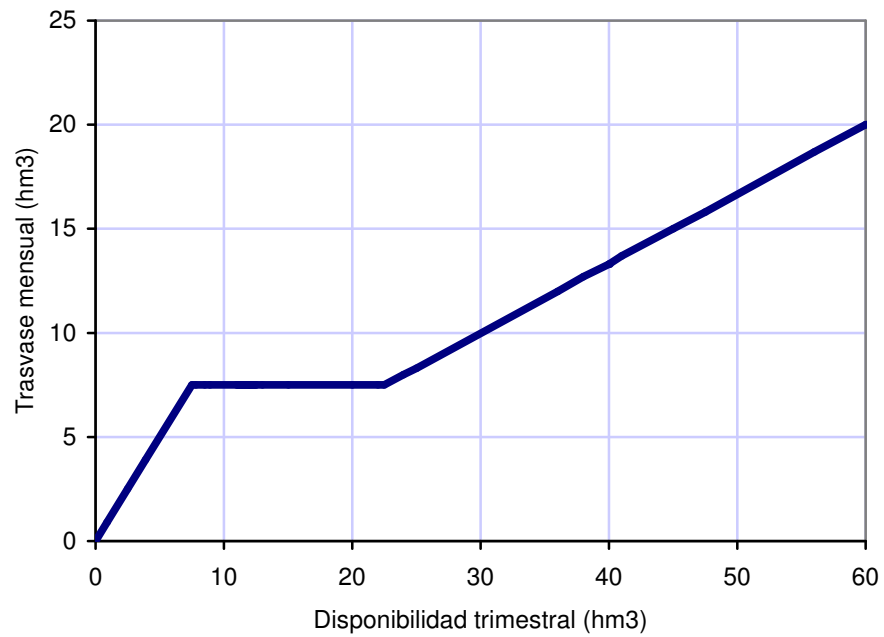


Figura 27. Método lineal 1/3

Aplicando este procedimiento al periodo comprendido entre agosto de 2015 y febrero de 2016, la secuencia mensual de trasvases obtenida sería la siguiente:

13,3 – 8,6 – 8,6 - 7,5 - 7,5 – 0 – 10

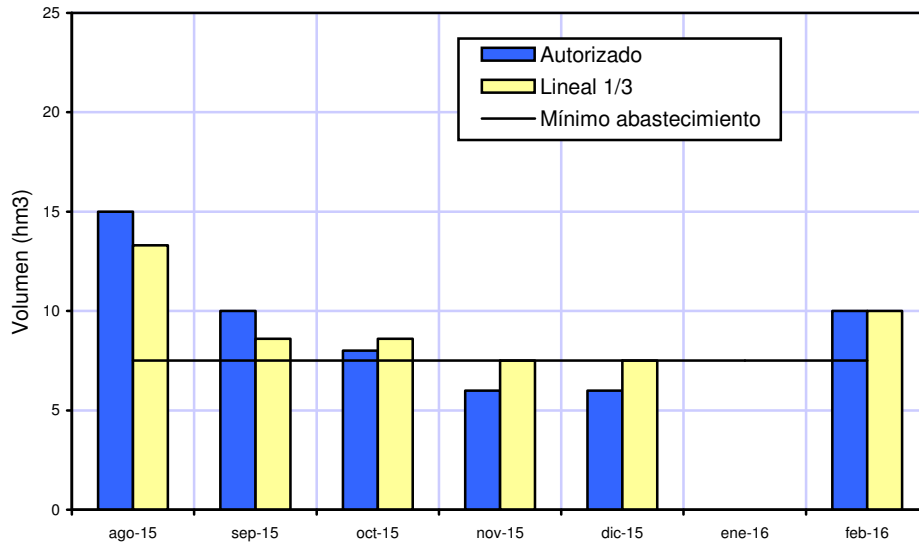


Figura 28. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el método lineal 1/3 entre julio de 2015 y febrero de 2016.

En el caso del periodo comprendido entre enero y junio de 2017 se obtendría la siguiente secuencia de trasvases mensuales:

15,1 – 13,7 – 20 – 20 - 7,5 - 0

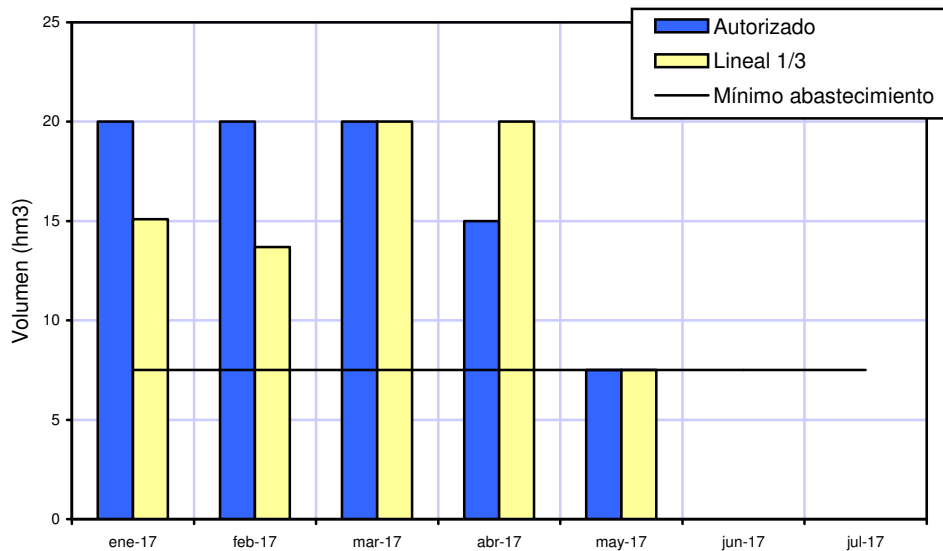


Figura 29. Trasvases mensuales autorizados y trasvases obtenidos con el método lineal 1/3 entre enero y junio de 2017.

En la siguiente figura se muestra la relación entre la disponibilidad trimestral y los trasvases mensuales resultantes de la aplicación de este método, junto con los trasvases autorizados.

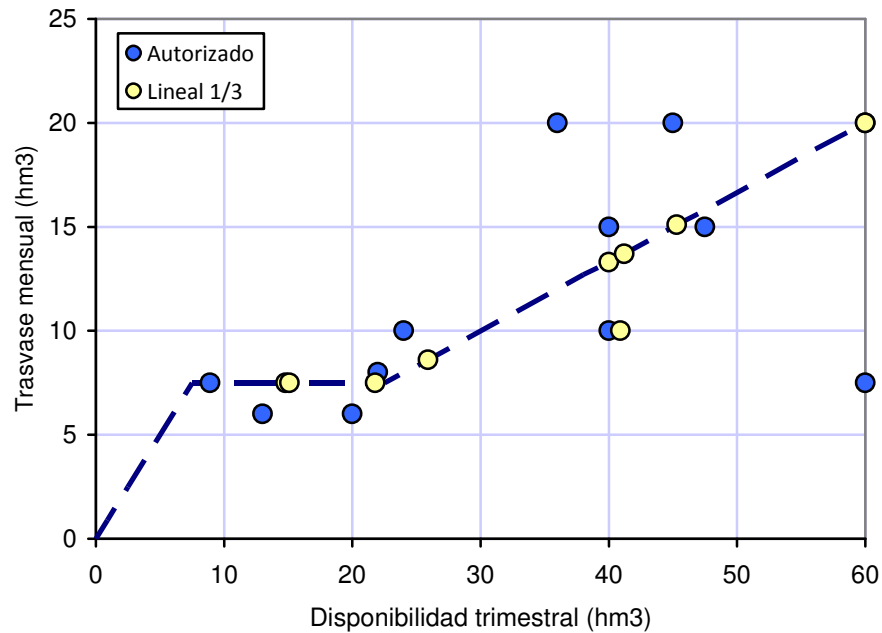


Figura 30. Resultado de la aplicación del método lineal 1/3.

Se puede observar que los resultados obtenidos con este método están en el rango de los trasvases autorizados.

En este caso tampoco se amplía el periodo de suministro respecto a la situación real, pero se garantiza el mínimo de abastecimiento en los meses de trasvase y los trasvases resultantes tienen una variación más gradual que en los otros métodos.

5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Una vez ensayados los seis métodos descritos en las dos situaciones hidrológicas excepcionales recientes, se presenta un resumen de los resultados obtenidos

La tabla y figura siguientes muestran los resultados obtenidos en la primera de las crisis, entre agosto de 2015 y febrero de 2016.

	Autorizado	Estándar	Abastecimiento	Lineal	Escalonado	Adaptativo	Lineal 1/3
ago-15	15	20	7,5	17,7	15	15	13,3
sep-15	10	20	7,5	12,3	7,5	7,5	8,6
oct-15	8	12,5	7,5	11,4	15	8	8,6
nov-15	6	0,9	7,5	8,9	7,5	7,5	7,5
dic-15	6	0	7,5	2,5	7,5	7,5	7,5
ene-16	0	0	0	0	0	0	0
feb-16	10	2,1	18	2,7	3	10	13,6
Abastecim.	42	25,5	45	35,2	40,5	45	45
Regadío	13	30	12,5	20,3	15	10,5	10,5
Total	55	55,5	57,5	55,5	55,5	55,5	55,5

Tabla 13. Resultados de los diferentes métodos aplicados en el periodo comprendido entre agosto de 2015 y febrero de 2016

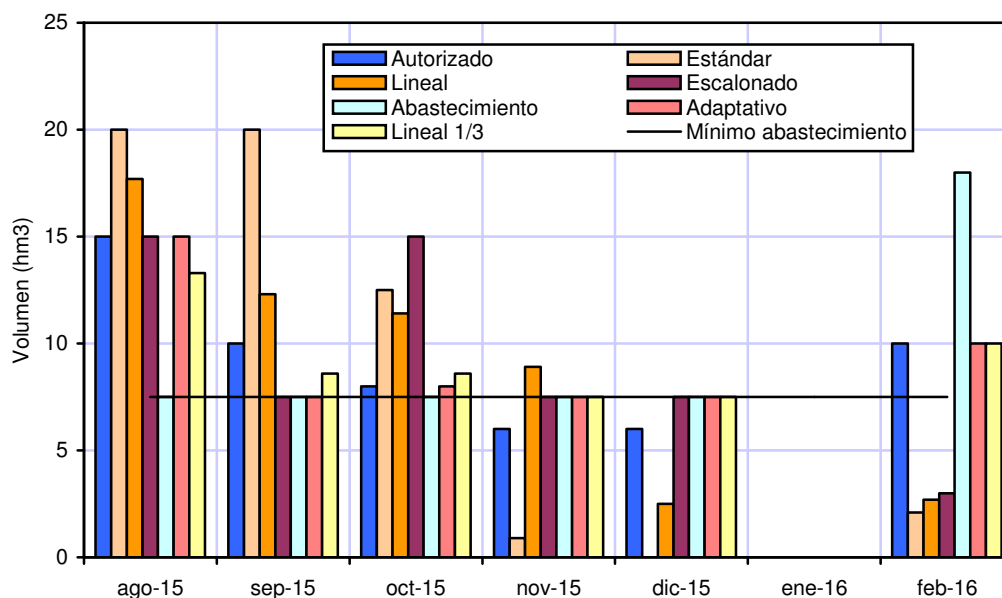


Figura 31. Resultados de la aplicación trimestral de la regla, volúmenes de trasvase mensuales autorizados y propuesta de trasvases con los diferentes procedimientos aplicados entre agosto de 2015 y febrero de 2016.

El volumen total trasvasado en este periodo de 7 meses es muy similar en todos los métodos (entre 55,5 y 57,5 hm^3) y, a su vez, muy similar al volumen autorizado (55 hm^3). Las principales diferencias se producen en el reparto entre usos de las aguas trasvasadas.

Así, el abastecimiento urbano oscila entre los 25,5 hm^3 obtenidos con el método estándar y los 45 hm^3 obtenidos con los métodos de abastecimiento, adaptativo y lineal 1/3. El trasvase autorizado fue similar a este valor máximo (42 hm^3).

Los trasvases para regadíos, por su parte, varían entre los 12,5 hm^3 del método de abastecimiento y los 30 hm^3 del método estándar. El volumen autorizado (13 hm^3) fue similar al mínimo.



CEDEX

Es decir, en esta crisis todos los métodos conducen a un trasvase total en el periodo muy similar. Los métodos de abastecimiento, adaptativo y lineal 1/3 alcanzan los mayores valores de trasvase con destino al abastecimiento urbano y el método estándar consigue el suministro más alto para regadíos. Los volúmenes realmente autorizados fueron muy similares a los obtenidos mediante el método de abastecimiento.

Los métodos estándar, lineal y escalonado presentan un mal funcionamiento desde el punto de vista de garantizar el mínimo para abastecimiento urbano, pues además del mes de enero, en el que el suministro sería nulo según todos los métodos, el método escalonado fallaría un mes más (febrero), el lineal fallaría dos meses más (diciembre y febrero) y el estándar en tres más (noviembre, diciembre, y febrero).

Por otra parte, los métodos de abastecimiento y escalonado presentan mayores oscilaciones en los volúmenes trasvasados, mientras que en el resto de los métodos las variaciones son más graduales.

En definitiva, en esta crisis de agosto de 2015 a febrero de 2016 los métodos que presentan un mejor funcionamiento son el adaptativo y el lineal 1/3.

La tabla y figura siguientes muestran los resultados obtenidos en la segunda crisis, comprendida entre enero y julio de 2017.

	Autorizado	Estándar	Abastecimiento	Lineal	Escalonado	Adaptativo	Lineal 1/3
ene-17	20	20,0	7,5	19,2	15	18	15,1
feb-17	20	20,0	20	16,7	15	15	13,7
mar-17	20	20,0	20	20	20	20	20
abr-17	15	20,0	20	20	20	20	20
may-17	7,5	3,9	7,5	7,7	7,5	7,5	7,5
jun-17	0	0,0	0	0	0	0	0
Abastecim.	37,5	33,9	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5
Regadío	45	50	37,5	46,1	40	43	38,8
Total	82,5	83,9	75	83,6	77,5	80,5	76,3

Tabla 14. Resultados de los diferentes procedimientos aplicados en el periodo comprendido entre enero y junio de 2017

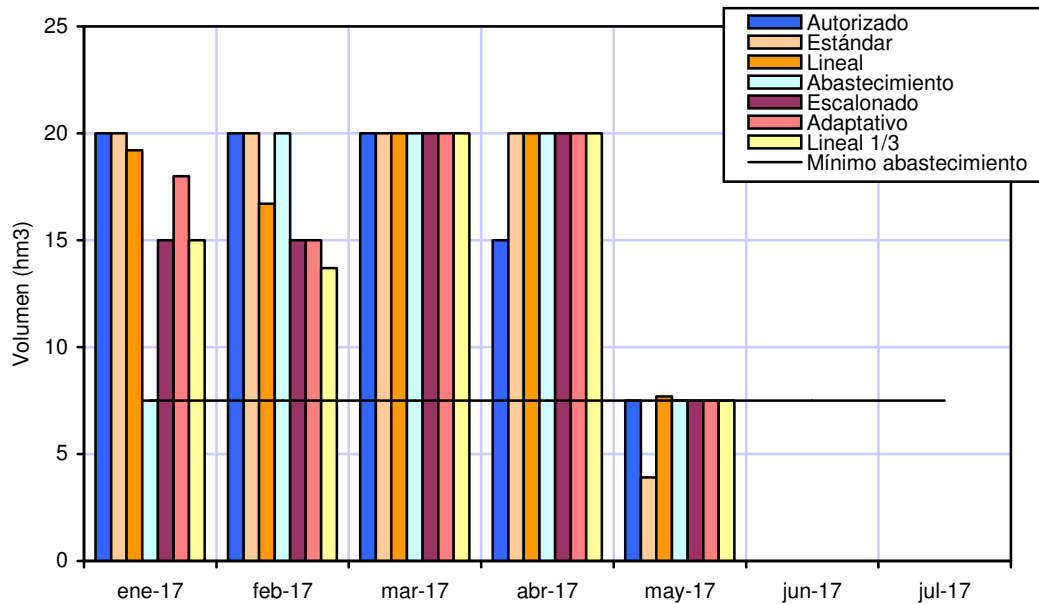


Figura 32. Resultados de la aplicación trimestral de la regla, volúmenes de trasvase mensuales autorizados y propuesta de trasvases con diferentes criterios entre enero y junio de 2017.

En esta crisis el volumen total trasvasado presenta mayor diferencia entre unos métodos y otros, oscilando entre 75 hm^3 (método abastecimiento) y $83,9 \text{ hm}^3$ (método estándar). El volumen autorizado ($82,5 \text{ hm}^3$) fue similar a este valor máximo.

Los trasvases destinados a abastecimiento son muy similares en todos los métodos. De hecho, son exactamente iguales en todos los métodos excepto uno y, a su vez, iguales al volumen autorizado ($37,5$). Tan solo el método estándar conduce a un volumen diferente y ligeramente inferior ($33,9$).

Los volúmenes destinados a regadío experimentan unas mayores diferencias, y varían entre $37,5$ del método abastecimiento y 50 del método estándar. El volumen autorizado, 45 hm^3 , se sitúa en una zona intermedia entre estos extremos.

El método estándar vuelve a presentar un mal funcionamiento en esta crisis, pues no garantizaría el abastecimiento mínimo el mes de mayo, mientras que el resto de los métodos sí lo harían.

Por su parte, el método de abastecimiento también presenta en este caso importantes oscilaciones, variando entre $7,5$ y 20 hm^3 .

En esta crisis, por tanto, resultarían preferibles los métodos lineal, escalonado, adaptativo y lineal 1/3, que presentan resultados bastante similares.

Un detalle sobre el que cabe llamar la atención es la diferencia en el mes de abril de 2017 entre el volumen autorizado (15 hm^3) y el resultante de todos los métodos (20 hm^3). Esta unanimidad en los resultados de todos los métodos se debe a que la disponibilidad trimestral en todos los casos era suficiente para no activar las restricciones. Sin embargo, el análisis semestral de la tendencia (ver tabla 6) y el análisis de riesgos llevaron a aplicar esta reducción del volumen autorizado. Hasta ese momento, los volúmenes autorizados habían sido exactamente los mismos que si se hubiera seguido el método



estándar. Para hacer frente a este tipo de situaciones con la suficiente antelación, sería necesario ampliar el periodo trimestral de cálculo de la disponibilidad, utilizando un horizonte mayor. Aun así, esta reducción del volumen autorizado en la práctica no supuso mejora alguna en cuanto a la ampliación del periodo de suministro, pues se entró en nivel 4 en el mes de junio, en coincidencia con los resultados obtenidos con todos los métodos.

Si se compara la respuesta en ambas crisis se comprueba que el trasvase total máximo se consigue en cada crisis con un método diferente: en la primera el máximo trasvase se consigue con el procedimiento de suministro exclusivo para abastecimiento, mientras que en la segunda el máximo trasvase se obtiene con el procedimiento estándar.

El suministro máximo para abastecimiento se consigue en las dos crisis con los procedimientos de abastecimiento y adaptativo, mientras que el suministro máximo para riego se obtiene en ambos periodos aplicando el método estándar.

Es importante constatar que ninguno de los métodos consigue ampliar el periodo de suministro (ni siquiera el de abastecimiento, que es el que introduce restricciones más severas), de forma que el sistema desciende a nivel 4 tanto en enero de 2016 como en junio de 2017, en cualquier caso.

Los volúmenes que realmente fueron autorizados se sitúan entre los valores obtenidos por el conjunto de métodos analizados, aunque se aprecian diferencias en la gestión de una y otra crisis. Así, los trasvases autorizados durante la crisis de 2015/16 son bastante similares a los resultados del método adaptativo, mientras que en la crisis de 2017 los trasvases que se autorizaron se parecen más a los resultados del método de operación estándar.

En definitiva, según lo expuesto, y atendiendo a la garantía de suministro para abastecimiento y a la regularidad de los trasvases mensuales en ambas crisis, los métodos que proporcionan mejores resultados son el adaptativo y el lineal 1/3.

6 COMPROBACIÓN CON EL PERIODO DE TRASVASE COMPLETO

Una vez descritos los posibles métodos a aplicar y ensayado su comportamiento en las dos situaciones hidrológicas excepcionales recientes, se procede ahora a verificar su funcionamiento a lo largo del periodo completo de operación del trasvase.

Mientras que el ensayo de los métodos en las situaciones recientemente experimentadas tiene la ventaja de su facilidad de interpretación por comparación de los resultados obtenidos con las decisiones que se tomaron en las situaciones reales correspondientes, su comprobación a lo largo de la serie histórica registrada presenta las ventajas de poder evaluar su funcionamiento desde un punto de vista estadístico y de verificar su rendimiento en otras crisis de magnitud y duración diferentes.

Para hacer este análisis se parte de las reservas almacenadas en octubre de 1980 y se consideran las aportaciones mensuales históricas a Entrepeñas y Buendía durante los 38 años completos de operación del trasvase. Los desembalses hacia el Tajo que se consideran son los desembalses de referencia correspondientes y la evaporación desde los embalses se obtiene mediante el procedimiento habitualmente empleado por la

Comisión en los informes de situación. Los trasvases hacia las cuencas receptoras son los resultantes de la aplicación de la regla de explotación actualmente vigente -una vez superado el régimen transitorio-, completada en la situación de nivel 3 con lo establecido en cada uno de los seis métodos descritos, lo que da lugar a seis evoluciones históricas diferentes. Estas seis evoluciones se diferencian en la variación de las reservas mensuales almacenadas y en los trasvases mensuales resultantes.

A continuación se presentan los resultados obtenidos.

6.1 EVOLUCIÓN DE LAS RESERVAS

La siguiente figura muestra la evolución de las reservas mensuales almacenadas desde octubre de 1980 durante los 38 años completos de operación del trasvase. En ella se señalan los cuatro niveles operativos definidos en la regla de explotación del trasvase como si hubieran estado definidos desde el comienzo de su entrada en servicio.

La figura muestra tanto la serie histórica de reservas mensuales registradas como las reservas resultantes de los seis métodos descritos.

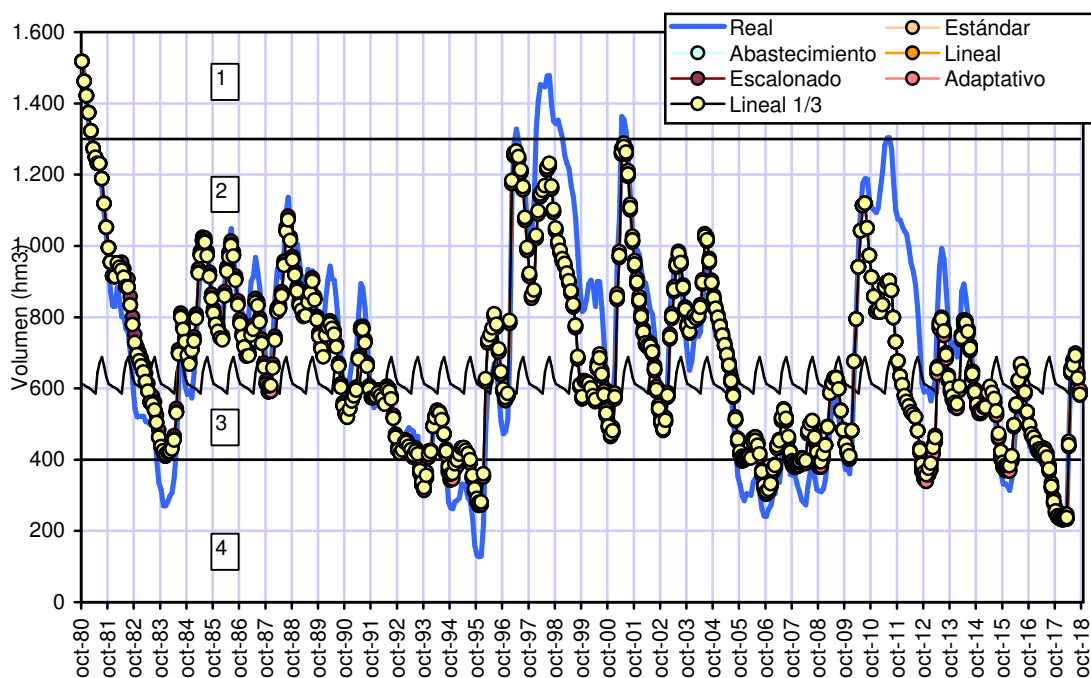


Figura 33. Volúmenes reales embalsados a primeros de mes en el sistema Entrepeñas-Buendía desde el comienzo de la operación del ATS y volúmenes resultantes de la aplicación de los métodos analizados.

Como se observa en la figura, apenas hay diferencia en las reservas obtenidas mediante los seis métodos aplicados. Tan solo algunas ligeras diferencias cuando se trata de las reservas mínimas.

Sin embargo se aprecian importantes diferencias entre la evolución de las reservas históricas y la de las reservas resultantes de estos métodos, a excepción de los últimos años, una vez en vigor la regla actual. Estas diferencias se manifiestan en un mejor aprovechamiento de las reservas altas, que no ascenderían tanto como en la situación

real, y una operación más restrictiva cuando las reservas son menores, de manera que no se habrían alcanzado valores tan bajos de reservas como sucedió en la realidad.

Si las reservas se complementan con las aportaciones acumuladas en los últimos 12 meses se puede determinar el nivel en que el sistema se encontraría cada mes. La siguiente figura muestra estas aportaciones acumuladas. Dado que se trata de las aportaciones históricas entrantes a los embalses son comunes a todos los métodos.

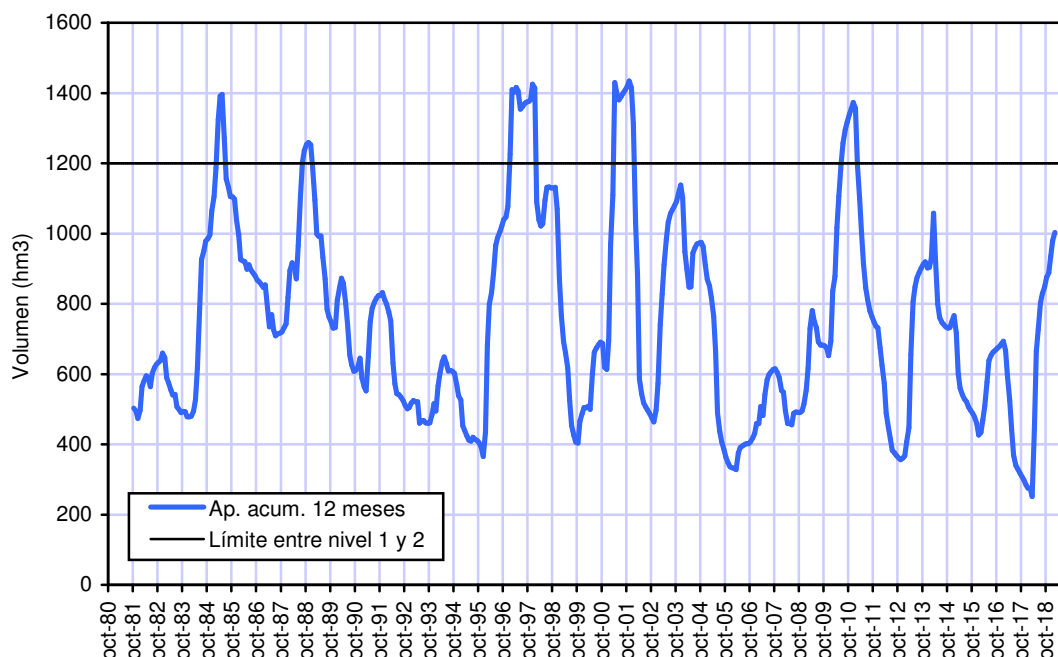


Figura 34. Aportaciones acumuladas durante los últimos doce meses a Entrepeñas y Buendía desde el comienzo de la operación del ATS.

Una vez determinada la situación en que el sistema se encuentra cada mes se puede obtener la probabilidad de que el sistema se encuentre en cada uno de los cuatro niveles definidos por la regla de explotación, tal como se muestra en la tabla siguiente.

	Estándar	Abastecimiento	Lineal	Escalonado	Adaptativo	Lineal 1/3
Probabilidad nivel 1 (%)	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6
Probabilidad nivel 2 (%)	41,9	42,5	42,3	42,3	42,1	42,3
Probabilidad nivel 3 (%)	35,7	37,7	36,4	37,1	36,6	37,5
Probabilidad nivel 4 (%)	12,7	10,1	11,6	11,0	11,6	10,5
Probabilidad nivel 3+4 (%)	48,4	47,8	48,0	48,1	48,2	48,0
Vertido medio anual (hm ³)	0	0	0	0	0	0

Tabla 15. Indicadores de explotación relacionados con las reservas y las aportaciones acumuladas.

Como puede apreciarse, los resultados son muy similares para todos los métodos. La probabilidad de encontrarse en nivel 1 es exactamente igual para todos, ligeramente inferior al 10%. Es decir, tal y como era previsible, la fijación de un criterio de explotación del sistema en nivel 3 no afecta al nivel 1.

La probabilidad de encontrarse en nivel 2 es muy parecida en todos los métodos, del orden de un 42%.

Las probabilidades de nivel 3 y 4 presentan ligeras diferencias. Así, la probabilidad de encontrarse en nivel 3 varía entre 35,7 (método estándar) y 37,7 (método abastecimiento) y la de encontrarse en nivel 4 entre 10,1 (abastecimiento) y 12,7 (estándar). En realidad, se trata en cierta forma de probabilidades *intercambiables*, ya que, por ejemplo, el método estándar presenta una menor probabilidad de encontrarse en nivel 3 porque su probabilidad de encontrarse en nivel 4 es mayor. Y a la inversa, el método abastecimiento tiene una menor probabilidad de situarse en nivel 4 porque su probabilidad de estar en nivel 3 es mayor. Si se suman las probabilidades de encontrarse en nivel 3 o 4 todos los métodos presentan un valor similar, del orden del 48%.

En ningún caso se alcanza el nivel máximo, por lo que no se producen vertidos con ninguno de los métodos.

En resumen, los métodos que presentan una menor probabilidad de alcanzar el nivel 4 son el método de abastecimiento y lineal 1/3, con un valor en torno al 10%.

6.2 VOLÚMENES TRASVASADOS

La figura siguiente muestra los volúmenes mensuales trasvasados desde la entrada en servicio del trasvase.

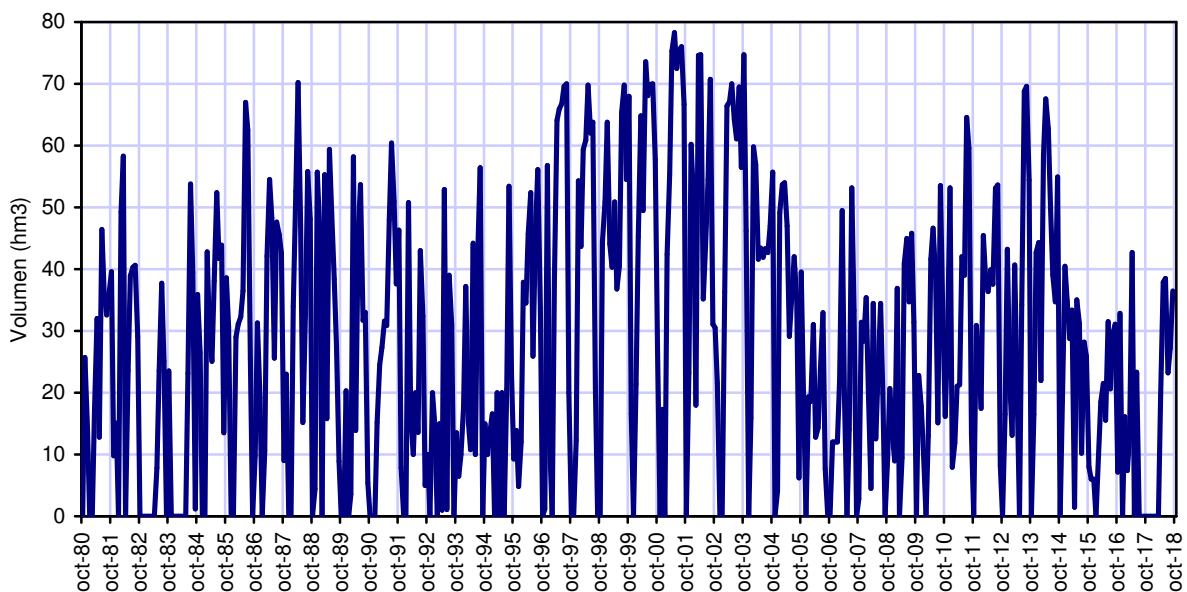


Figura 35. Trasvases mensuales realizados desde la entrada en servicio del trasvase.

Si desde el primer momento se hubiera aplicado la regla de explotación actualmente vigente se habrían obtenido los trasvases mensuales que se presentan en la siguiente colección de figuras. Cada una de ellas corresponde a uno de los métodos descritos y se diferencian principalmente, como es lógico, en los trasvases resultantes en nivel 3.

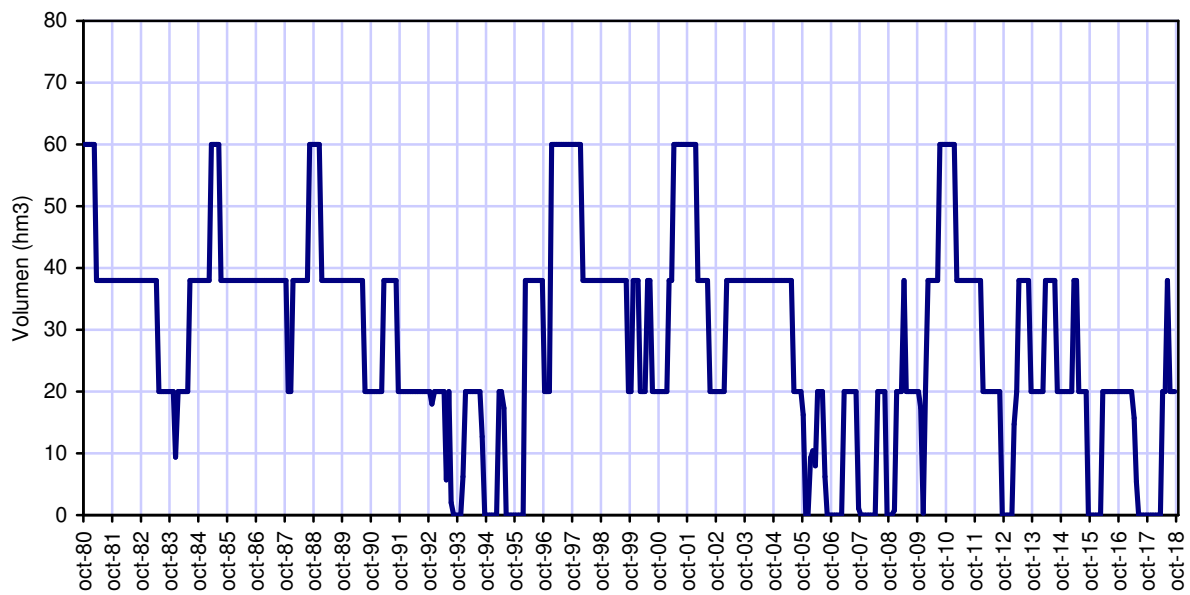


Figura 36. Trasvases mensuales con el método estándar.

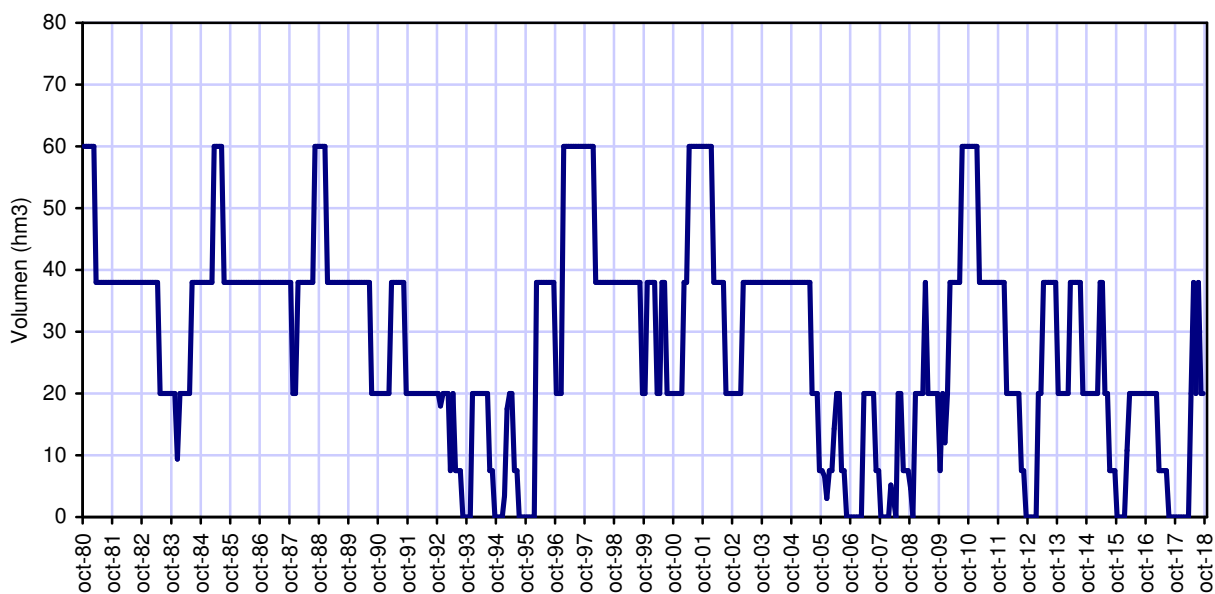


Figura 37. Trasvases mensuales con el procedimiento de suministro exclusivo para abastecimiento.

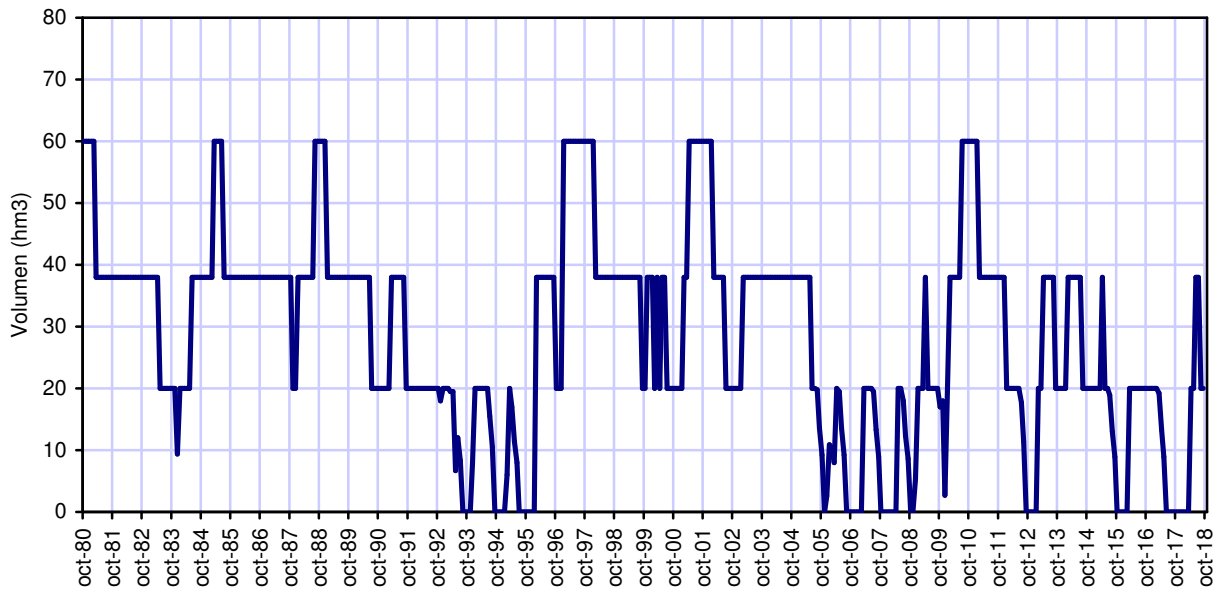


Figura 38. Trasvases mensuales con el procedimiento de reducción lineal del suministro.

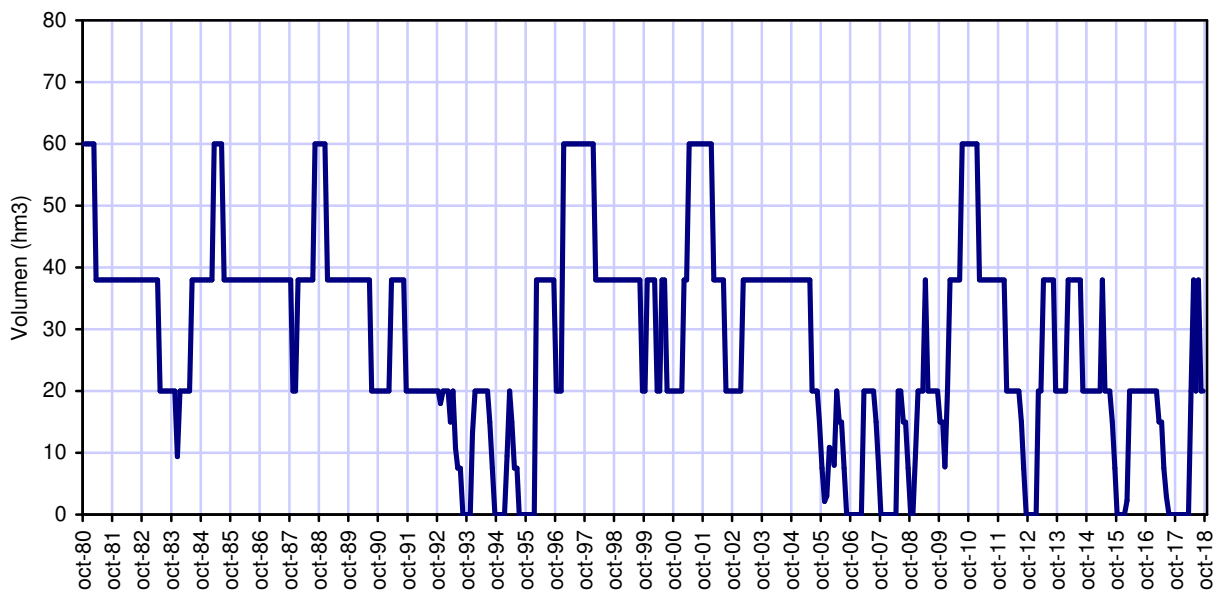


Figura 39. Trasvases mensuales con el procedimiento de reducción escalonada del suministro.

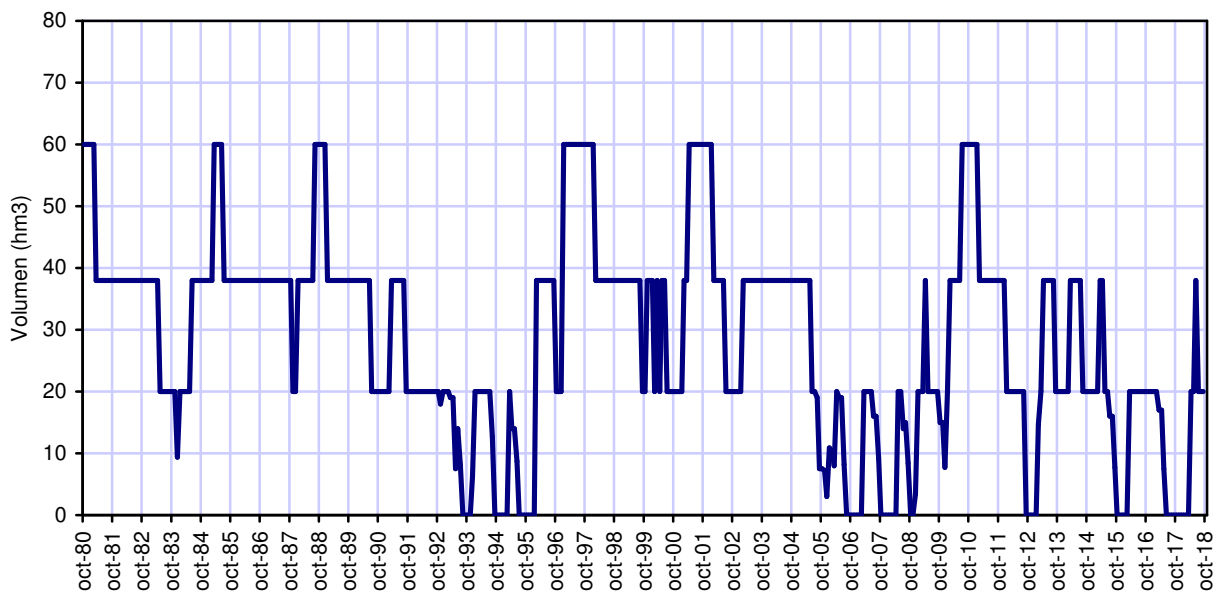
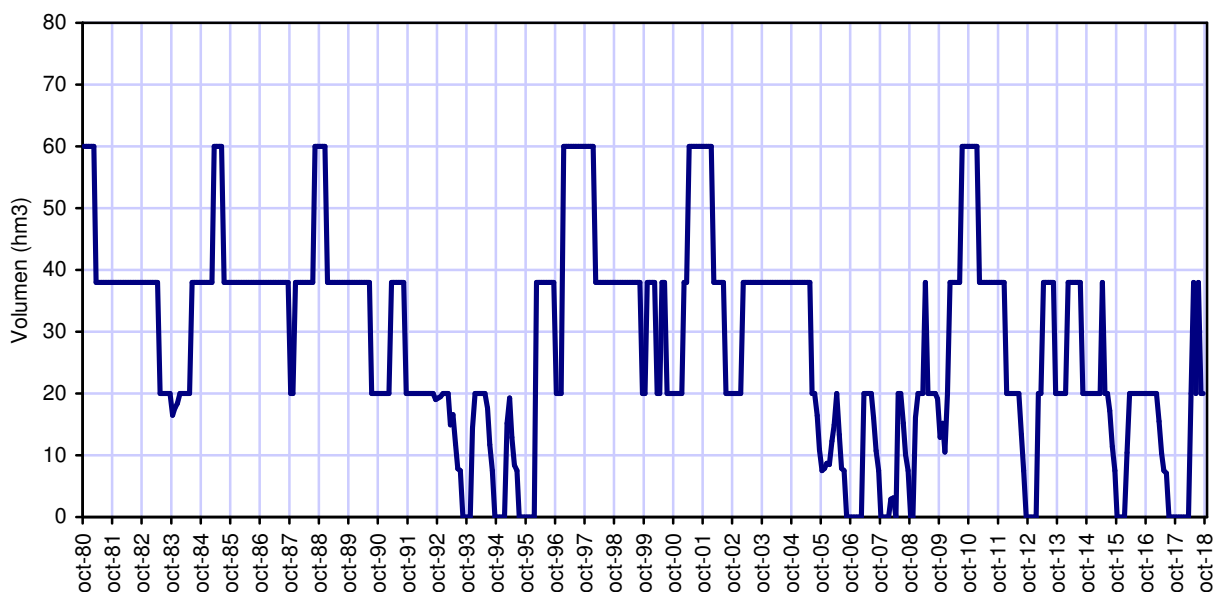


Figura 40. Trasvases mensuales con el método adaptativo.



Trasvases mensuales con el método lineal 1/3.

Llama la atención en primer lugar la gran diferencia en la regularidad de los envíos entre los trasvases realizados y los resultantes de la aplicación de la regla con cualquiera de los seis métodos. Mientras que los trasvases mensuales realizados son altamente irregulares, los trasvases resultantes de la regla presentan una gran regularidad, con los tres escalones de la regla de 60, 38 y 20 hm³/mes claramente marcados. Esta regularidad, como es lógico, es un factor que facilita la programación del empleo de las aguas trasvasadas.

Los seis métodos analizados se diferencian principalmente en los trasvases en nivel 3, aunque las diferencias son ciertamente muy ligeras. En el caso del método abastecimiento se manifiesta claramente el escalón de 7,5 hm³, y en el caso del método escalonado pueden apreciarse los escalones de 15 y 7,5.

Desde el punto de vista de la cuantía de los volúmenes trasvasados y de su regularidad, los resultados son muy similares en los seis métodos, como se aprecia en la tabla siguiente.

	Estándar	Abastecimiento	Lineal	Escalonado	Adaptativo	Lineal 1/3
Trasvase mínimo anual (hm ³)	57,3	70,8	62,4	59,5	56,7	63,3
Trasvase medio anual (hm ³)	340,9	341,0	341,5	341,2	341,1	341,3
Trasvase máximo anual (hm ³)	600,0	600,0	600,0	600,0	600,0	600,0
Coefficiente de variación mensual	0,586	0,585	0,582	0,583	0,583	0,581
Coefficiente de irregularidad	0,100	0,103	0,101	0,098	0,100	0,097

Tabla 16. Indicadores de explotación relacionados con los volúmenes totales trasvasados.

El volumen medio anual trasvasado es el mismo en todos los métodos, unos 341 hm³/año⁸. El volumen máximo es idéntico (600 hm³) y las principales diferencias se encuentran en el trasvase mínimo anual, que varía entre los 57 hm³ del método adaptativo y los 71 del método abastecimiento.

Los indicadores de regularidad de los envíos (coeficientes de variación y de irregularidad⁹) son similares en todos los métodos, aunque ligeramente mejores en el método lineal 1/3, que presenta una variación mensual y una irregularidad ligeramente inferiores.

En cuanto a la distribución por usos de las aguas trasvasadas, la tabla siguiente muestra los resultados correspondientes a los trasvases destinados a abastecimiento urbano.

	Estándar	Abastecimiento	Lineal	Escalonado	Adaptativo	Lineal 1/3
Trasvase mínimo anual (hm ³)	22,5	40,9	36,0	37,5	30,0	37,5
Trasvase medio anual (hm ³)	96,4	99,3	98,0	98,5	98,1	99,1
Trasvase máximo anual (hm ³)	157,5	157,5	157,5	157,5	157,5	157,5
Número meses trasvase >=7,5	390	404	398	402	398	405
Garantía mensual (%)	85,5	88,6	87,3	88,2	87,3	88,8

Tabla 17. Indicadores de explotación relacionados con los volúmenes trasvasados destinados a abastecimiento.

El trasvase medio anual destinado a abastecimiento es muy similar en todos los métodos, variando entre 96 y 99 hm³/año, y el trasvase máximo es idéntico (157,5). Hay mayor diferencia en los trasvases mínimos, que oscilan entre 22,5 (método estándar) y 40,9 (método abastecimiento).

⁸ Esta cifra es prácticamente idéntica al volumen promedio trasvasado realmente en el mismo periodo, que fue 340 hm³/año.

⁹ Como coeficiente de irregularidad se ha utilizado el índice de Richards-Baker, definido como la suma de incrementos diarios absolutos normalizada por la suma de valores totales.



CEDEX

El método que garantiza el trasvase mínimo de 7,5 hm³/mes para abastecimiento un mayor número de meses es el lineal 1/3, ligeramente por encima, incluso, que el método de abastecimiento. Expresado en términos de garantía mensual, el método lineal 1/3 es el que presenta un valor más alto, pudiendo garantizarse el volumen mínimo para abastecimiento casi el 89% de los meses.

La tabla siguiente muestra los resultados correspondientes a los trasvases destinados a regadío.

	Estándar	Abastecimiento	Lineal	Escalonado	Adaptativo	Lineal 1/3
Trasvase mínimo anual (hm ³)	34,8	25,0	26,4	22,0	26,7	25,8
Trasvase medio anual (hm ³)	244,5	241,7	243,5	242,8	243,0	242,1
Trasvase máximo anual (hm ³)	442,5	442,5	442,5	442,5	442,5	442,5

Tabla 18. Indicadores de explotación relacionados con los volúmenes trasvasados destinados a regadío.

También en este caso el trasvase medio es muy similar en todos los métodos, con valores que varían entre 242 y 245 hm³/año. El trasvase máximo es idéntico y el mínimo se sitúa entre 22 y 35 hm³/año. El método que proporciona valores de trasvase para riego más altos es el estándar, aunque con poca diferencia con el resto de los métodos, como se acaba de mostrar.

6.3 COMPORTAMIENTO EN LAS PRINCIPALES CRISIS DEL SISTEMA ANTERIORES A 2015

Tal y como se ha expuesto, las principales diferencias entre los métodos se producen en las situaciones de crisis derivadas de la falta de disponibilidad de recursos, en las que el sistema se mantiene entre los niveles 3 y 4 durante varios meses.

Además de las situaciones excepcionales recientes descritas al comienzo de este documento, durante los años de operación del trasvase se han producido crisis importantes en dos ocasiones: en el periodo comprendido entre 1991 y 1996, y en el periodo comprendido entre 2005 y 2010.

Con objeto de comparar el comportamiento de los diversos métodos analizados en estas situaciones de crisis, se muestran a continuación de forma más detallada los volúmenes trasvasados según cada método en estas dos situaciones.

En la crisis de la primera mitad de los noventa, los volúmenes mensuales que fueron trasvasados en el periodo comprendido entre septiembre de 1991 y enero de 1996 son los que se representan en la siguiente figura.

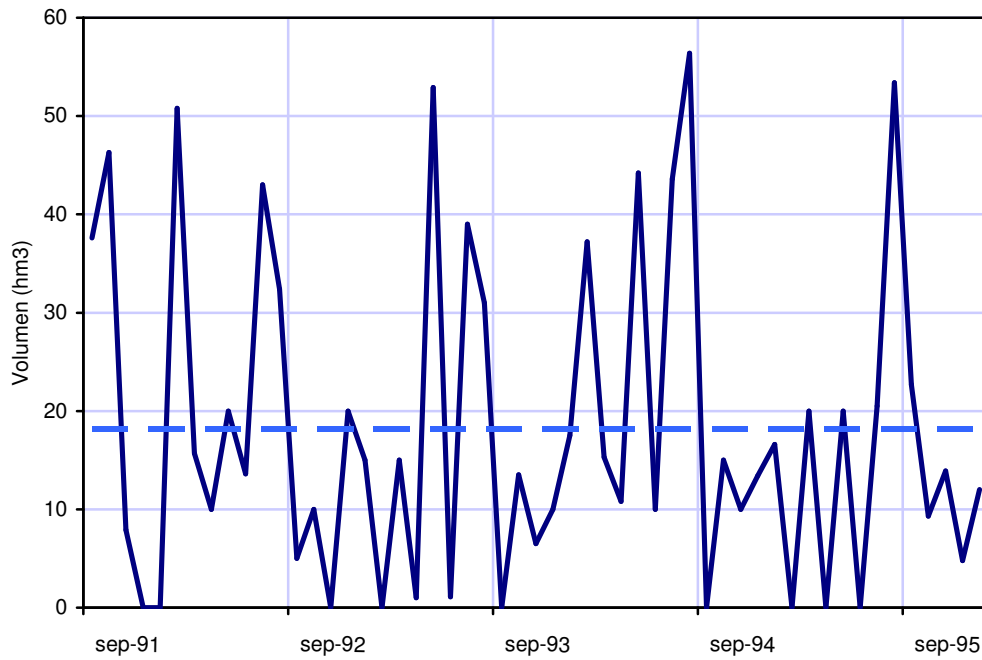


Figura 41. Volúmenes mensuales trasvasados durante la crisis de los noventa (periodo septiembre 1991-enero 1996).

El promedio de los volúmenes trasvasados en este periodo fue de 18 hm³/mes, con puntas que superaron los 50 hm³/mes en varias ocasiones.

En las figuras siguientes se muestran los resultados obtenidos con los seis métodos analizados.

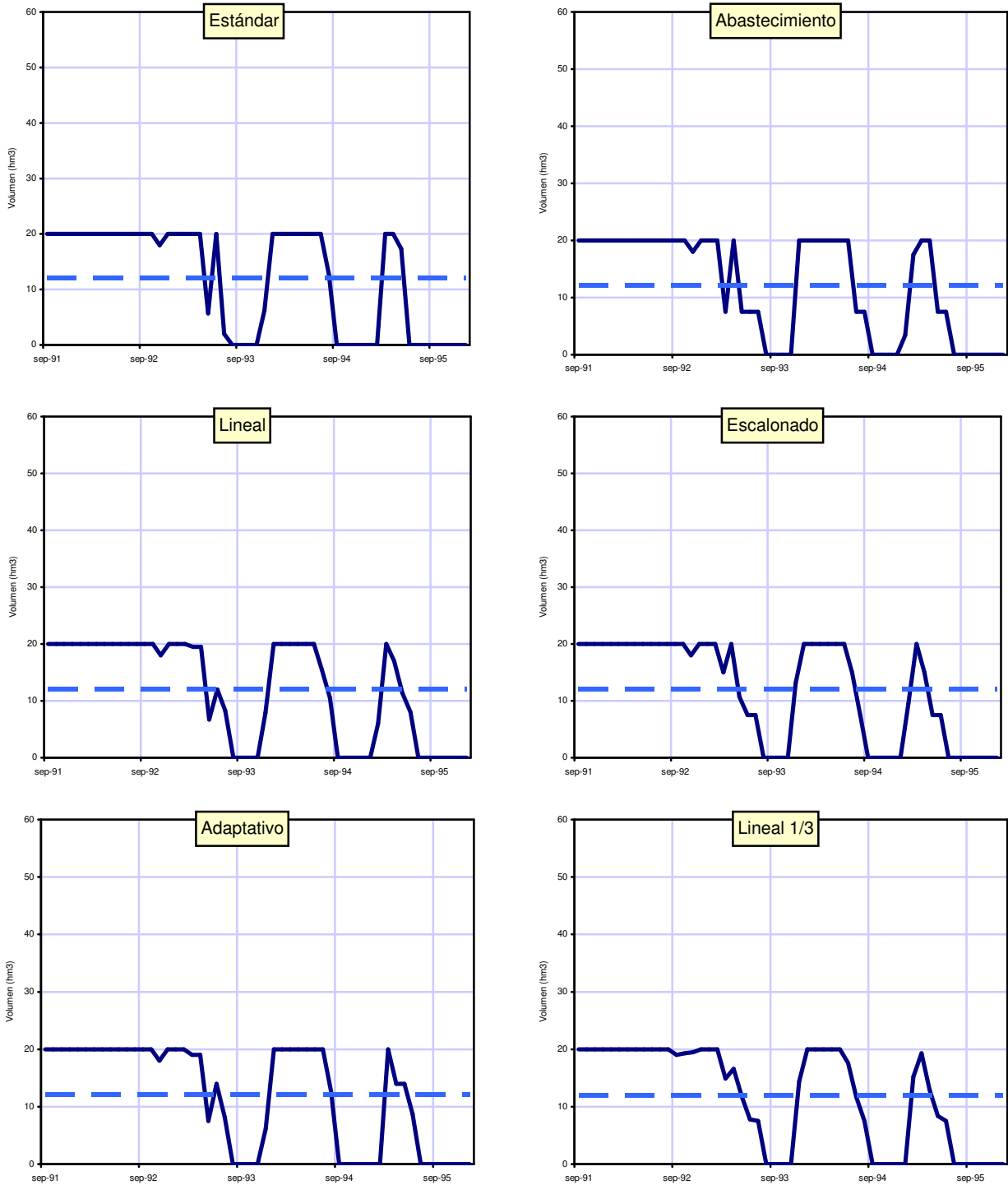


Figura 42. Volúmenes mensuales de trasvase resultantes de la aplicación de los diferentes procedimientos en la crisis de los noventa (periodo septiembre 1991-enero 1996).

Como puede apreciarse, los trasvases hubieran sido con cualquiera de los métodos mucho más regulares de lo que fueron. El trasvase máximo se limita a 20 hm³/mes, como corresponde a la situación de nivel 3, y el volumen medio trasvasado es el mismo en todos los métodos, 12 hm³/mes. Es decir, los métodos estudiados no se diferencian

en el volumen que trasvasan durante el periodo de crisis, que es el mismo en todos los casos, sino en la forma de distribuir dicho volumen entre los distintos meses en los que el sistema sufre la situación de crisis.

Así, el método estándar, por ejemplo, es el que presenta unas mayores pendientes debido a las bruscas caídas de suministro en las que incurre el sistema una vez agotadas las reservas por completo, tras haber intentado mantener los suministros máximos todo el tiempo posible. En el otro extremo se sitúa el método lineal 1/3, que activa antes las restricciones y las aplica de manera más gradual, lo que da lugar a unas menores pendientes en la serie de trasvases mensuales. En este método se aprecia también una menor oscilación en los volúmenes trasvasados. En los métodos de abastecimiento y escalonado se marca claramente el escalón de $7,5 \text{ hm}^3$ correspondiente al mínimo para abastecimiento.

Por su parte, durante la crisis de la segunda mitad de la primera década de este siglo, se trasvasaron los volúmenes mensuales que se muestran en la siguiente figura.

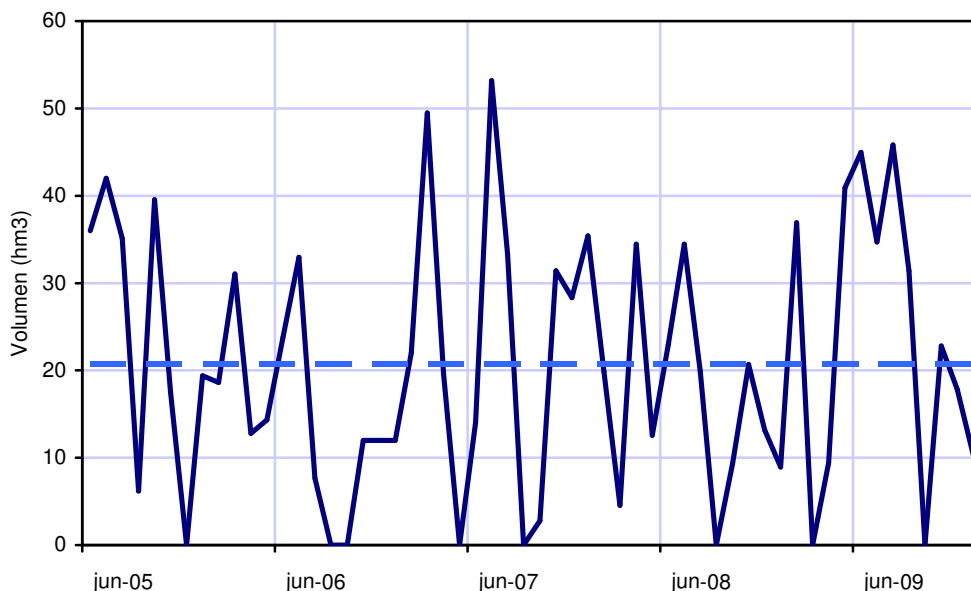


Figura 43. Volúmenes mensuales trasvasados durante la crisis de la primera década de este siglo (periodo junio 2005-enero 2010).

En este caso, el volumen promedio trasvasado durante el periodo fue de $21 \text{ hm}^3/\text{mes}$, de nuevo con importantes oscilaciones entre unos meses y otros.

Los resultados obtenidos con los métodos analizados se muestran en las siguientes figuras.

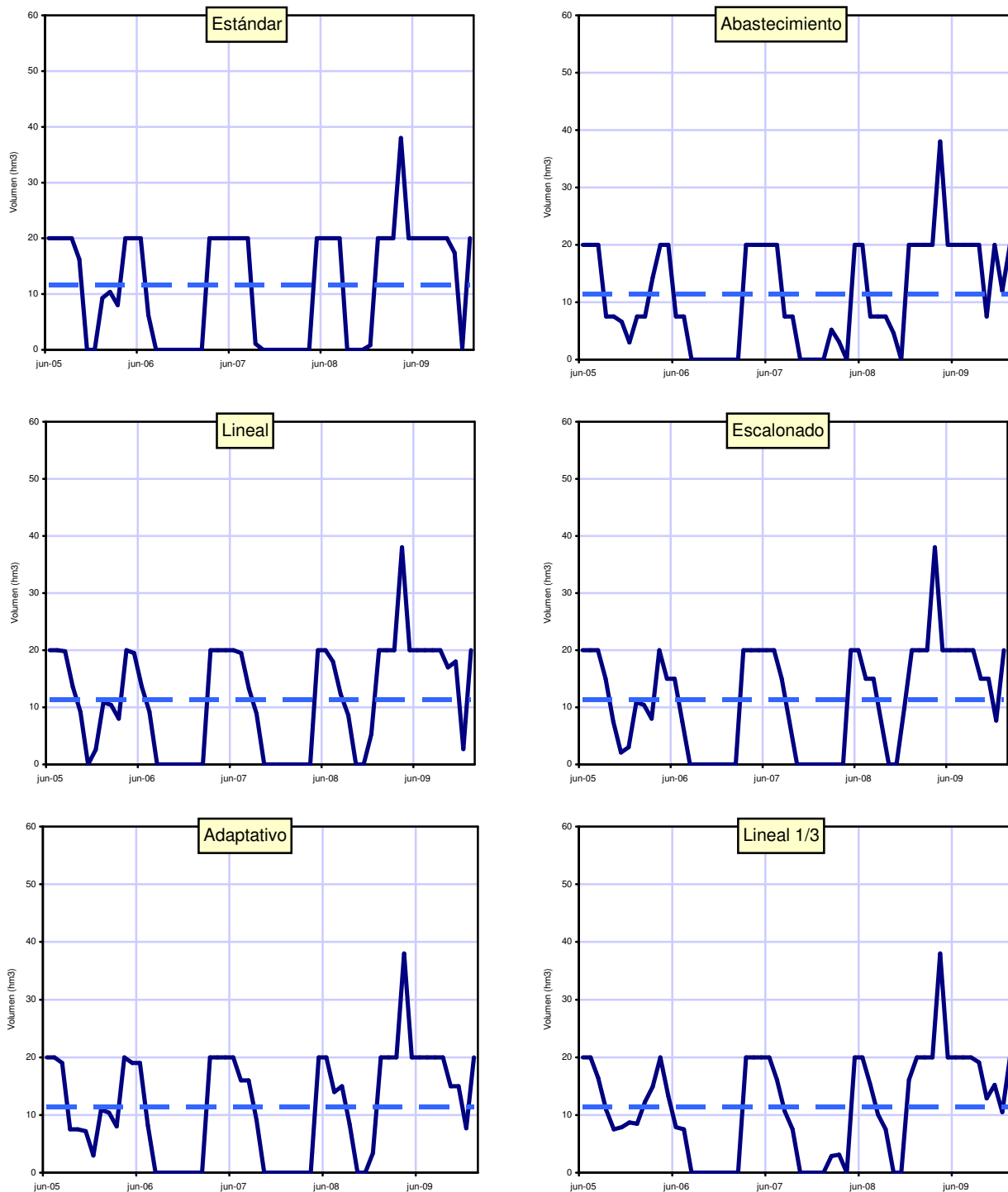


Figura 44. Volúmenes mensuales de trasvase resultantes de la aplicación de los diferentes procedimientos en la crisis de la primera década de este siglo (periodo junio 2005-enero 2010).

En este caso ocurre algo muy similar a lo que sucedía en la crisis de los noventa. Los volúmenes mensuales trasvasados son mucho más regulares que los reales, aunque de menor cuantía, con un promedio en todos los métodos de $11 \text{ hm}^3/\text{mes}$.

El método estándar conduce a que el sistema mantenga durante más tiempo el trasvase máximo de 20 hm³/mes, pero a cambio de que el sistema entre más veces en situación de nivel 4. De nuevo las pendientes son menores con el método lineal 1/3, con el que se mantiene el suministro máximo durante un tiempo menor.

En definitiva, con la regla de explotación vigente, completada en la situación de nivel 3 con alguno de los seis métodos propuestos, se obtienen trasvases más regulares que los históricos, aunque de menor cuantía en periodos de crisis (no a largo plazo, pues los volúmenes trasvasados en ese caso son similares, como ya se ha mencionado). Todos los métodos que se han analizado dan lugar al mismo trasvase durante el periodo de crisis. El método lineal 1/3 es el que proporciona una mayor garantía para abastecimiento y una secuencia de trasvases más gradual, pues las restricciones se activan antes y la pendiente de la reducción del suministro es menor.

7 SELECCIÓN DEL MÉTODO A APLICAR

Con las pruebas y ensayos realizados se puede proceder a seleccionar el método más adecuado para la aplicación de la regla de explotación del trasvase en situación hidrológica excepcional.

Teniendo en cuenta los resultados de la aplicación de los diversos métodos a las dos situaciones hidrológicas excepcionales sufridas en 2015/16 y en 2017, y atendiendo principalmente a la garantía de suministro para abastecimiento y a la regularidad de los trasvases mensuales, los dos métodos que han proporcionado mejores resultados son el adaptativo y el lineal 1/3.

Por otra parte, los resultados de la aplicación de los métodos al periodo de trasvase completo han proporcionado una colección de indicadores de explotación relacionados con la evolución de las reservas almacenadas en el sistema, los volúmenes trasvasados y su distribución entre abastecimiento y regadío, que permiten valorar el rendimiento de cada uno de los métodos evaluados. En las siguientes tablas se reúnen los indicadores obtenidos que, como se puede apreciar, alcanzan, en general, valores bastante similares.

	Estándar	Abastecimiento	Lineal	Escalonado	Adaptativo	Lineal 1/3
Probabilidad nivel 1 (%)	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6
Probabilidad nivel 2 (%)	41,9	42,5	42,3	42,3	42,1	42,3
Probabilidad nivel 3 (%)	35,7	37,7	36,4	37,1	36,6	37,5
Probabilidad nivel 4 (%)	12,7	10,1	11,6	11,0	11,6	10,5
Probabilidad nivel 3+4 (%)	48,4	47,8	48,0	48,1	48,2	48,0
Trasvase mínimo anual (hm ³)	57,3	70,8	62,4	59,5	56,7	63,3
Trasvase medio anual (hm ³)	340,9	341,0	341,5	341,2	341,1	341,3
Trasvase máximo anual (hm ³)	600,0	600,0	600,0	600,0	600,0	600,0
Coefficiente de variación mensual	0,586	0,585	0,582	0,583	0,583	0,581
Coefficiente de irregularidad	0,100	0,103	0,101	0,098	0,100	0,097
Vertido medio anual (hm ³)	0	0	0	0	0	0

Tabla 19. Indicadores de explotación relacionados con la evolución de las reservas y los volúmenes trasvasados.

	Estándar	Abastecimiento	Lineal	Escalonado	Adaptativo	Lineal 1/3
Trasvase mínimo anual (hm ³)	22,5	40,9	36,0	37,5	30,0	37,5
Trasvase medio anual (hm ³)	96,4	99,3	98,0	98,5	98,1	99,1
Trasvase máximo anual (hm ³)	157,5	157,5	157,5	157,5	157,5	157,5
Número meses trasvase >=7,5	390	404	398	402	398	405
Garantía mensual (%)	85,5	88,6	87,3	88,2	87,3	88,8

Tabla 20. Indicadores de explotación relacionados con los volúmenes trasvasados destinados a abastecimiento.

	Estándar	Abastecimiento	Lineal	Escalonado	Adaptativo	Lineal 1/3
Trasvase mínimo anual (hm ³)	34,8	25,0	26,4	22,0	26,7	25,8
Trasvase medio anual (hm ³)	244,5	241,7	243,5	242,8	243,0	242,1
Trasvase máximo anual (hm ³)	442,5	442,5	442,5	442,5	442,5	442,5

Tabla 21. Indicadores de explotación relacionados con los volúmenes trasvasados destinados a regadío.

Seleccionando aquellos indicadores que resultan independientes y que permiten discriminar el funcionamiento de los diferentes métodos, se ha elaborado la tabla que se muestra a continuación, en la que se ha indicado el lugar en el que se clasifica cada método según el indicador o criterio correspondiente.

Criterio	Lugar ocupado por el método					
	1	2	3	4	5	6
A) Probabilidad nivel 3+4	Abast	Lineal Lineal 1/3	Escalon.	Adapt.	Estándar	
B) Tránsito mínimo anual	Abast	Lineal 1/3	Lineal	Escalon.	Estándar	Adapt.
C) Tránsito medio anual	Lineal	Lineal 1/3	Escalon.	Adapt.	Abast.	Estándar
D) Coeficiente de variación mensual	Lineal 1/3	Lineal	Escalon. Adapt.	Abast.	Estándar	
E) Coeficiente de irregularidad	Lineal 1/3	Escalon.	Adapt. Estándar	Lineal	Abast.	
F) Tránsito mínimo anual abast.	Abast.	Escalon. Lineal 1/3	Lineal	Adapt.	Estándar	
G) Tránsito medio anual abast.	Abast.	Lineal 1/3	Escalon.	Adapt.	Lineal	Estándar
H) Garantía mensual abast.	Lineal 1/3	Abast.	Escalon.	Lineal Adapt.	Estándar	

Tabla 22. Clasificación de los procedimientos analizados de acuerdo con los indicadores de explotación.

A partir de estas clasificaciones parciales se puede determinar el promedio de las clasificaciones obtenidas para el conjunto de los criterios, lo que puede dar una buena orientación respecto al método globalmente más adecuado. Esto es lo que se muestra en la tabla siguiente.

	Estándar	Abast.	Lineal	Escalonado	Adaptativo	Lineal 1/3
A	5	1	2	3	4	2
B	5	1	3	4	6	2
C	6	5	1	3	4	2
D	5	4	2	3	3	1
E	3	5	4	2	3	1
F	5	1	3	2	4	2
G	6	1	5	3	4	2
H	5	2	4	3	4	1
Promedio	5	3	3	3	4	2

Tabla 23. Posiciones obtenidas en la clasificación de los diferentes procedimientos de acuerdo con los indicadores de explotación y posición promedio resultante.

De acuerdo con los resultados de esta tabla, el método que en conjunto resulta mejor valorado es el lineal 1/3, que ocupa en promedio la mejor posición. En segundo posición se encontrarían los métodos de abastecimiento, lineal y escalonado, ocuparía la tercera posición el método adaptativo y quedaría en último lugar el método estándar.

El método lineal 1/3 presenta los mejores resultados en cuanto a coeficiente de variación mensual, coeficiente de irregularidad y garantía mensual de abastecimiento. Es el segundo método mejor valorado en lo que se refiere a probabilidad de encontrarse en los niveles 3 o 4, tránsito mínimo anual, tránsito medio anual, tránsito mínimo anual para abastecimiento y tránsito medio anual para abastecimiento.

En definitiva, tras los análisis y ensayos realizados con los seis métodos seleccionados, valorando su funcionamiento tanto en las situaciones hidrológicas excepcionales recientes, como a lo largo del periodo completo de operación del tránsito y, en particular, en las crisis sufridas por el sistema en la década de los noventa y en la primera década de este siglo, se considera que el método denominado lineal 1/3 es el

más adecuado para la aplicación de la regla de explotación del trasvase Tajo-Segura en situación hidrológica excepcional (nivel 3).

La siguiente figura reúne la expresión gráfica de los seis métodos evaluados, mostrándose de forma destacada el método finalmente propuesto.

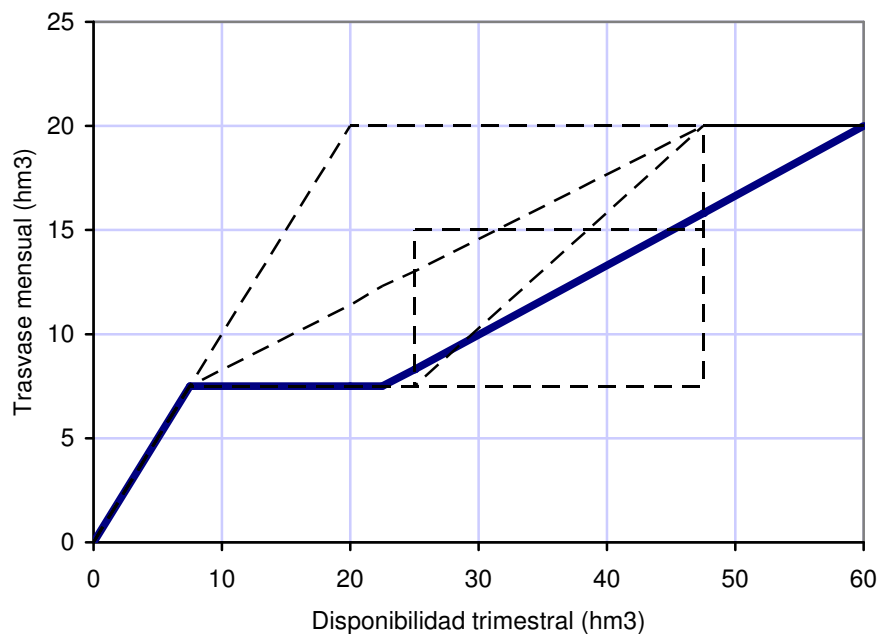


Figura 45. Traslase mensual en función de la disponibilidad trimestral según los diferentes métodos ensayados. Remarcado el método propuesto.

Como puede apreciarse en la figura, y ya ha sido señalado a lo largo del documento, este método comienza antes la aplicación de la reducción del suministro y lo hace de un modo más gradual, con una menor pendiente en la relación entre la disponibilidad trimestral y el trasvase mensual. De esta forma, el método consigue obtener una mayor garantía de abastecimiento y una mayor regularidad en los trasvases mensuales. A ello hay que añadir una gran sencillez de aplicación, lo que resulta particularmente interesante desde el punto de vista de la correcta interpretación de las decisiones que se adopten sobre los volúmenes a trasvasar en situación hidrológica excepcional.

8 MÉTODO PROPUESTO

El método finalmente propuesto se representa gráficamente en la figura siguiente.

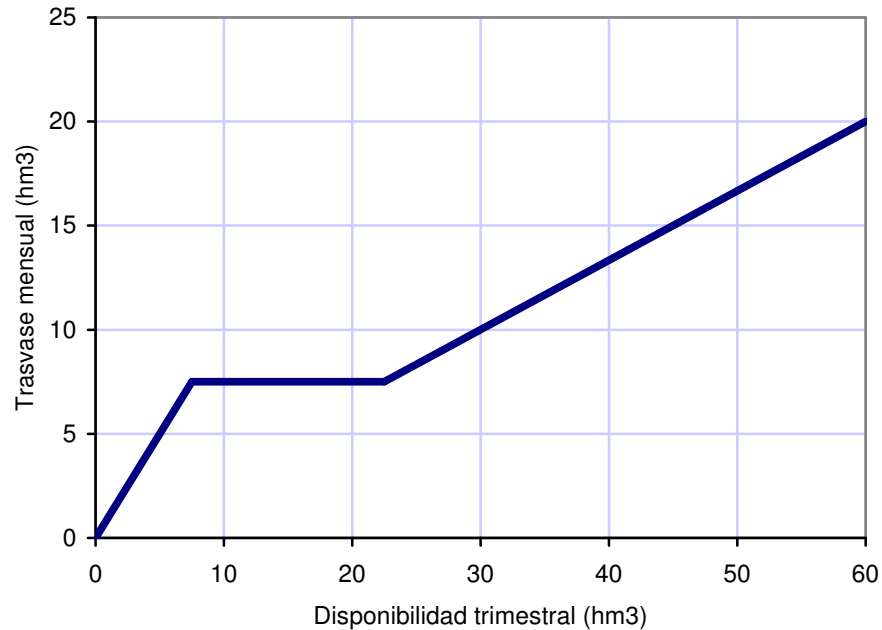


Figura 46. Trasvase mensual en función de la disponibilidad trimestral según el método propuesto.

El método se formula matemáticamente de la siguiente manera¹⁰:

$$\begin{aligned}
 TM = & \begin{cases} DT & \text{si } DT < 7,5 \\ 7,5 & \text{si } 7,5 \leq DT \leq 22,5 \\ DT/3 & \text{si } 22,5 < DT \leq 60 \end{cases} \\
 & \text{En todo caso, } TM \leq DM
 \end{aligned}$$

Siendo:

TM = trasvase mensual

DT = disponibilidad trimestral, obtenida por aplicación a tres meses de la regla de explotación

DM = disponibilidad mensual

¹⁰ Si finalmente se interpretara que el mínimo de 7,5 hm³ para abastecimiento se contabiliza en destino, la cifra correspondiente en origen sería 8,3 hm³ y el método se formularía de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 TM = & \begin{cases} DT & \text{si } DT < 8,3 \\ 8,3 & \text{si } 8,3 \leq DT \leq 25 \\ DT/3 & \text{si } 25 < DT \leq 60 \end{cases} \\
 & \text{En todo caso, } TM \leq DM
 \end{aligned}$$