



Manual técnico para una gestión óptima de la hidráulica en humedales restaurados para mejora del hábitat y de la calidad del agua

Autores

Francisco J. Vallés, Miguel Martín, Beatriz Nácher
Carmen Hernández-Crespo, Ignacio Andrés-Doménech,
Miguel A. Eguibar, Sara Gargallo, Eduardo Albentosa
Instituto Ingeniería del Agua y Medio Ambiente
Universitat Politècnica de València

Diseño y maquetación:

MOEBO

Impresión:

ByPrint Percom S.L.

Impreso en España, 2016

ISBN: 978-84-945224-4-4

Depósito legal: Impresión bajo demanda

Reservados los derechos de propiedad intelectual.

Se autoriza el uso y reproducción del contenido para uso particular y docente haciendo referencia a esta publicación.

Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse, almacenarse o transmitirse en manera alguna por ningún medio ya sea electrónico, informático, de grabación o de fotocopia, con intereses de venta o comerciales.

PRÓLOGO

En la actualidad, la visión moderna de las zonas húmedas naturales que todavía permanecen en el planeta es totalmente diferente a la de hace unas decenas de años: se les reconoce unos valores ambientales que los convierten en ecosistemas de muy alto valor, ayudan a la protección de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, mejoran la calidad de las aguas...

En nuestro ámbito, tres Directivas europeas son de aplicación directa al problema que nos ocupa: las comúnmente conocidas Directiva Hábitats (DH, 92/43/CEE), Aguas (DMA, 2000/60/CE) y Aves (DA, 2009).

La Directiva Hábitats (1992) no menciona específicamente la palabra "humedal" pero varios de los hábitats descritos corresponden a los que se pueden encontrar en un humedal natural: en nuestro caso, L'Albufera de Valencia, está identificado como "1150 Lagunas costeras". Por la misma Directiva, estamos obligados a mantener los hábitats en un "estado de conservación favorable" ¿Lo estamos?

En la Directiva Marco del Agua (2000), la recreación y recuperación de zonas húmedas se sugiere como una medida adicional a desarrollar por los Organismos de Cuenca (parte B, Anexo VI) como elementos de sus programas de medidas a elaborar para alcanzar los objetivos de la Directiva (Apdo 4, Art. 11). Aquí, la percepción de los humedales es más "instrumental" y menos "conservacionista" lo cual nos permite otra aproximación al tema de los humedales bajo el concepto de "infraestructuras verdes".

Por último, en la Directiva Aves (2009) aparece el término "humedal" para instar a los estados miembros (Art. 4) a su protección y especialmente de aquellos humedales de importancia internacional (Ramsar).

El agua es el elemento clave. La DMA tiene como objeto protegerla para proteger y mejorar el estado de los ecosistemas acuáticos, terrestres y humedales. En este sentido, la interacción de las tres Directivas es muy clara ya que la DMA, al establecer el objetivo anterior, está contribuyendo a la conservación de los hábitats, flora y fauna recogidos en la DH y DA. La interpretación conjunta de las tres Directivas, junto con la obligación de desarrollar los Planes de Gestión de los espacios Red Natura 2000, lleva a la necesidad de asegurar los recursos hídricos necesarios, en cantidad y calidad, para los espacios protegidos.

Es en este contexto en el que se ubica el proyecto LIFE+ ALBUFERA. ¿Qué pueden hacer los HHAA para recuperar un estado de conservación favorable perdido? ¿Qué pueden hacer para mejorar las masas de agua a las que están ligados y que deberían haber estado en buen estado o alcanzar su potencial ecológico en 2015? ¿Qué pueden hacer para proteger los humedales naturales?

Éstas son las preguntas sobre las cuales los resultados del proyecto LIFE+ ALBUFERA pretenden arrojar un poco de luz y para lo que se han elaborado varios manuales de trabajo. Estas guías constituyen una parte importante de los resultados del proyecto. Su intención es múltiple: que puedan servir a los Organismos de Cuenca para su inclusión en programas de medidas en los Planes Hidrológicos de Cuencas; a la administración con competencias ambientales para que puedan ser empleadas para mejorar los hábitats especialmente en zonas Red Natura 2000; para los profesionales que deseen ampliar sus conocimientos en el empleo de estas "infraestructuras verdes" y puedan replicarlas con las variantes más adecuadas en cada zona. La intención es que sean de utilidad para todos ellos pero también para el público en general que desee aproximarse a este tipo

de actuaciones, por lo que se han procurado escribir de una forma amena si perder rigor científico-técnico.

Existen cuatro guías-manuales técnicos de los cuales tienes ahora uno entre las manos:

1. Hidráulica.
2. Vegetación.
3. Avifauna.
4. Aspectos sociales.

Los tres primeros tienen una primera parte común en la que se describen los espacios en los que se ha trabajado: *tancat* de la Pipa, *tancat* de Milia y *tancat* de L'Illa, con la información básica de su funcionamiento durante los dos años, 2014 y 2015. A continuación se desarrollan los aspectos específicos de cada uno. En los tres primeros podrás encontrar información relevante sobre la modificación de la calidad de las aguas que se produce en los HHAA.

ABREVIATURAS Y DEFINICIONES

ARU: Aguas Residuales Urbanas

Celda: unidad de HA con una entrada y una salida de agua. Puede estar conectada con otras en serie para formar una parcela.

CHS: carga hidráulica superficial ($m^3/m^2/d$)

Cla *a*: clorofila *a*

CMS: carga másica superficial ($mg/m^2/d$)

DA: Directiva Aves (2009/147/CE), relativa a la conservación de las aves silvestres

DH: Directiva Hábitats (92/43/CEE), relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres

DMA: Directiva Marco de Aguas (2000/60/CE)

DQO: materia orgánica total

DQO_s: materia orgánica soluble

EDAR: Estación Depuradora de Aguas Residuales

HA: Humedal Artificial

HATLI: Humedal Artificial de *tancat* de L'illa

HATM: Humedal Artificial de *tancat* de Milia

HATP: Humedal Artificial de *tancat* de la Pipa

ISO: Normas establecidas por la Organización Internacional de Normalización (ISO).

LR: laguna de reserva (sector C de HATP)

MAGRAMA: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

NT: nitrógeno total

OD: oxígeno disuelto

PT: fósforo total

Sector A: HA de flujo subsuperficial

Sector B: HA de flujo superficial (compuesto de *n* celdas)

Sector C: Laguna somera

SST: sólidos suspendidos totales

SSV: sólidos suspendidos volátiles

TRH: tiempo de retención hidráulica

UNE: documentos normativos UNE (acrónimo de Una Norma Española)

0 INTRODUCCIÓN	9	B2 GESTIÓN DE LA VEGETACIÓN	51
01 HUMEDALES ARTIFICIALES EN ESPACIOS NATURALES	10	B3 RÉGIMEN DE FUNCIONAMIENTO: CONTINUO / INTERMITENTE	53
02 EL PARQUE NATURAL DE L'ALBUFERA: UNA ZONA HÚMEDA CON ESCASEZ DE HÁBITATS NATURALES	11	B4 CALIDAD DEL EFLUENTE	56
03 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	12	C GESTIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES. CONTROL Y MONITORIZACIÓN	61
A ELEMENTOS PARA EL DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES	17	C1 INSTRUMENTACIÓN Y METODOLOGÍA PARA MONITORIZAR LA HIDRÁULICA DEL SISTEMA	62
A1 ORIGEN DEL AGUA A TRATAR	18	C1.1 Aforos	62
A2 MORFOLOGÍA. TIPOS DE CELDA	19	C1.2 Caracterización de las variables meteorológicas	67
A2.1 Parcelas	20	C1.3 Compuertas	68
A2.2 Motas y diques	24	C1.4 Trazadores	69
A2.3 Taludes y pendientes	27	C2 INSTRUMENTACIÓN Y METODOLOGÍA PARA MONITORIZAR LA CALIDAD DEL AGUA	69
A3 FLUJOS DE ENTRADA Y SALIDA. CONEXIONES ENTRE CELDAS	28	C3 OBTENCIÓN DE HERRAMIENTAS DE GESTIÓN	71
A3.1 Compuertas. Vertederos	28	C3.1 Hidráulica	73
A3.2 Conductos sumergidos	32	C3.2 Calidad de aguas	77
A3.3 Canales de conexión	34	C4 COMPROBACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LAS VARIABLES HIDRÁULICAS DEFINIDAS EN LA GESTIÓN/OPERACIÓN	80
A3.4 Rejillas de protección	35	D RECOMENDACIONES GLOBALES	83
A4 EQUIPOS	36	E REFERENCIAS	87
A4.1 Motores de bombeo	36		
A4.2 Sistema de control SCADA	37		
B GESTIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES. OPERACIÓN	39		
B1 VARIABLES HIDRÁULICAS	40		
B1.1 Carga hidráulica superficial (CHS)	40		
B1.2 Caudales	43		
B1.3 Volumen a introducir	45		
B1.4 Calados	46		
B1.5 Tiempo de retención hidráulico (TRH)	49		



Introducción

01 LOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN ESPACIOS NATURALES

En la UE, las infraestructuras verdes se consideran una de las principales herramientas para abordar las amenazas contra la biodiversidad representadas por la fragmentación y la pérdida de hábitats y por los cambios de uso del suelo (Unión Europea, 2010).

Los humedales artificiales (HHAA) son un tipo de estas infraestructuras relacionadas con el agua. Como tecnología de tratamiento de aguas llevan empleándose desde hace varias décadas como sistemas de tratamiento de aguas residuales urbanas de pequeñas aglomeraciones y en numerosas aplicaciones industriales. Su empleo en el medio natural es todavía escaso pero existen notables ejemplos en el control de contaminación difusa de fósforo (Kadlec, R., 2016) y en la reducción de la eutrofización de masas de agua. El interés que están suscitando estas aplicaciones no solo es debido a la mejora de la calidad del agua sino a todos los beneficios ambientales que aportan. El reconocimiento de los servicios ecosistémicos que proporcionan es un hecho (Vymazal, 2012), ya que se ha constatado que un correcto diseño, ejecución y operación, facilita la reproducción de los mecanismos y procesos físicos, químicos y biológicos que operan en los humedales naturales y proporcionan servicios similares como la mejora de la calidad de las aguas, el incremento de la biodiversidad, la mejora paisajística y su posible empleo como lugares de ocio y educación ambiental.

Cuando se plantea la ubicación de un HA en una zona natural, incluida en la Red Natura 2000 o todavía no, mediante la transformación de un espacio, hay que tener en cuenta el uso que la fauna va a realizar de él. Es por ello que en su diseño y gestión deben contemplarse no solo los aspectos relacionados con la mejora de la calidad del agua sino con

la protección de las especies objetivo (que serán diferentes de unas zonas a otras) y con la creación de hábitats deseables. Este triple objetivo implica un equilibrio entre la ingeniería del HA y la biología de las especies animales y vegetales que lo ocupan. Así, por ejemplo, el desafío de emplear materiales "blandos" sin que las estructuras se desmoronen, la imposibilidad de emplear láminas impermeabilizantes sin que las filtraciones de aguas inunden o sequen las parcelas de manera no deseada, la maximización de los flujos de agua por gravedad para evitar consumos energéticos, la disposición de zonas más densa o menos densamente vegetadas para favorecer alguna/s especie/s, o por el mismo motivo, el mantenimiento de zonas con distintos niveles de agua, etc son muchas de las condiciones que se han de perseguir y que se analizan en los manuales de esta serie, resultado del proyecto LIFE+12 ALBUFERA.

La vegetación helófito e hidrófito juega un papel fundamental en los ecosistemas acuáticos: sirve de alimento y refugio a aves y peces, captura nutrientes y CO₂ atmosférico, facilita el desarrollo de microorganismos que contribuirán a la mejora de la calidad de las aguas, incrementan la población de macroinvertebrados acuáticos. Desde el punto de vista de su aplicación en HHAA, además de los ya mencionados, una alta cobertura de helófitas en HHAA superficiales tiene dos consecuencias muy interesantes desde el punto de vista de la calidad del agua: produce un efecto "tranquilizador" de las aguas evitando la resuspensión de sedimentos que puede producir el viento e impide el paso de la luz, que ya no puede ser aprovechada por el fitoplancton.

Sin duda, la vegetación que se desarrolle en el HA va a jugar un papel clave en la presencia de especies. En el proyecto se ha trabajado con vegetación helófito, principalmente carrizo, enea, lirios, juncos y masiega, pero

también con vegetación sumergida, fundamental para la alimentación de especies acuáticas de gran valor ambiental. De hecho, los HHAA deben diseñarse para que, al ir mejorando la calidad de las aguas de entrada conforme avanza por los distintos sectores llegue a las lagunas donde se trabaja con la vegetación sumergida con una calidad apta para su desarrollo. La importancia de vegetación sumergida se puede comprender a partir del conocimiento de sus funciones en los ecosistemas acuáticos:

- Para su crecimiento utilizan los nutrientes del agua, por lo que son depuradoras naturales.
- Suponen el lugar en el que los invertebrados acuáticos hacen sus puestas.
- Dan cobijo a pequeños peces autóctonos como el fartet, el samaruc, el gobio o la colmilleja mientras se alimentan de pequeños invertebrados y algas microscópicas, y sirven de refugio ante predadores.
- Son lugares de alimentación de aves acuáticas herbívoras como el pato colorado (sivert) y la focha común, así como de otras especies que se alimentan de peces, como los somormujos, zampullines y fumareles, sirviendo además para estas especies como lugar en el que construir el nido.
- Suponen el ambiente en el que se alimentan las polladas de muchas aves acuáticas, cuya dieta se compone principalmente de insectos acuáticos.

02 EL PARQUE NATURAL DE L'ALBUFERA: UNA ZONA HÚMEDA CON ESCASEZ DE HÁBITATS NATURALES

El Parque Natural de l'Albufera de Valencia forma parte de la Red Natura 2000. Su elemento de referencia, el lago, presenta unas aguas clasificadas como hipereutróficas desde mediados de los años 1970. Esta situación desencadenó la pérdida de biodiversidad en

general, reducción de hábitats prioritarios y de las aves que dependen de un buen estado ecológico del espacio. La "sopa verde" en la que se ha convertido el lago, con altas concentraciones en materia orgánica, fitoplancton, sólidos en suspensión, nitrógeno y fósforo, mantiene una serie de problemas de compleja solución:

- Reducción de la cantidad de luz que llega al suelo de la laguna, dificultando la germinación de semillas de plantas acuáticas.
- Desaparición de peces autóctonos por falta de plantas acuáticas que suponen refugio ante predadores, principalmente peces exóticos.
- Escasez de insectos acuáticos que necesitan de plantas acuáticas para realizar sus puestas.
- Reducción de la abundancia de las especies de aves que necesitan de las plantas acuáticas para establecer su nido, alimentarse de ellas o de los insectos que habitan en ellas.
- Aumento de la erosión y reducción de la superficie de las matas de vegetación palustre, debido al oleaje causado por el viento y que la vegetación subacuática evitaría.

Para la cual, sin duda, habría que empezar por mejorar la calidad del agua, permitiendo establecer las condiciones necesarias para que se recuperen los ecosistemas acuáticos y toda la biodiversidad asociada a ellos.

El Parque Natural atesora una importante variedad de hábitats de elevado valor ambiental, pero de escasa superficie y en franca regresión: masegares, eneaes y carrizales son lugares en los que se reproducen pequeñas aves escasas en l'Albufera como el carricerín real, el bigotudo o la buscarla. Las zonas húmedas, con apenas 350 ha, están constituidas por las matas y los *ullals* o manantiales; en ellos habitan y se reproducen las aves acuáticas, varias de ellas recogidas en la Directiva Aves. Aunque, sin duda, es la recuperación de la vegetación sumergida que



Figura 1
Detalle de ubicación de los HHA de l'Albufera de Valencia.
Fuente imagen de fondo: Google Maps.

antaoño dominó en el lago el hecho que supondría un hito en su recuperación.

Potenciar la existencia de estos hábitats con agua de calidad es uno de los objetivos de los HHA recreados en estos últimos años.

03 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales artificiales (HHA) están ubicados en el interior del Parque Natural de l'Albufera de Valencia. Dos de ellos, los ubicados en el *tancat de la Pipa* (HATP) y en el *tancat de Milia* (HATM), están en las orillas del propio lago; mientras que el localizado en el *tancat de L'illa* (HATLI) está en el *Estany de la Plana* una pequeña laguna costera en la desembocadura de una de las acequias principales de desagüe del parque, la *Carrera de la Reina*. En la Figura 1 se muestra un esquema con la ubicación de los tres espacios.

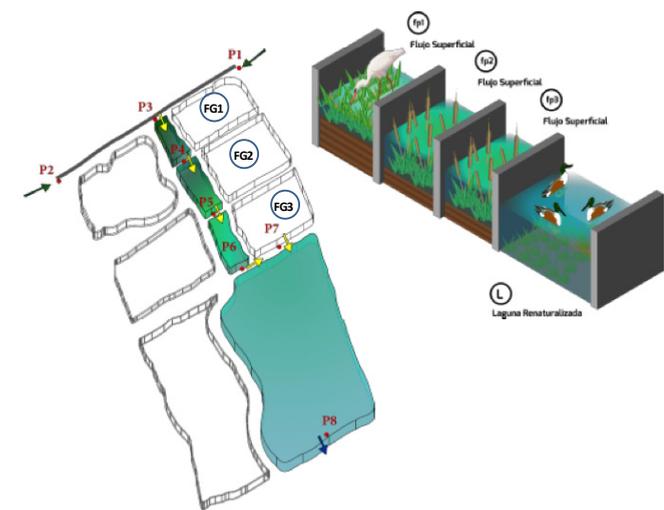
Los tres HHA están construidos sobre antiguos campos de arroz, *tancats*; terrenos ganados al lago mediante aterramiento y cuya base está por debajo del nivel del agua del lago. La creación de estos espacios no ha sido una acción dentro de LIFE+ ALBUFERA, sino que se construyeron entre 2009 y 2011 a iniciativa de la Confederación Hidrográfica del Júcar (HATP) y Aguas de las Cuencas Mediterráneas, AcuaMed (HATM y HATLI). La morfología de los HHA es de tres tipos: de flujo subsuperficial (sector tipo A), de flujo superficial (sector tipo B) y lagunas someras (sector tipo C).

El *tancat de la Pipa* dispone de tres sectores de HHA de flujo superficial designadas como FG, fp y F4. A su vez, FG y fp están constituidas por tres celdas en serie, mientras que F4 está conformada por tres celdas en paralelo. En total son nueve celdas de las que en el proyecto LIFE ALBUFERA



Figura 2
Imagen aérea del tancat de la Pipa.

se han monitorizado tres simultáneamente: las tres de fp desde enero de 2014 hasta junio de 2015 (en color verde en la Figura 3) y las tres de FG desde julio de 2015 hasta diciembre de 2015. En el *tancat de la Pipa* el agua puede ser introducida por gravedad desde sus dos extremos laterales: el barranco del Poyo y la acequia del Puerto de Catarroja. Disponer de dos captaciones es interesante para dotar de mayor capacidad operativa al sistema, por ejemplo, manteniendo el caudal desde una entrada durante las labores de mantenimiento de la otra; pero si se emplean a la vez se duplica el coste de monitorización de la calidad del agua de entrada. El caudal introducido en los dos años ha sido de 3.1 Hm³, lo cual hace una media de unos 60 l/s, de los cuales unos 20 l/s circulaban por el sector fp (enero 2014-junio 2015 y unos 40 por FG (julio-diciembre 2015). El resto circulaba por otros sectores del *tancat*. Como la entrada es por gravedad, el agua fluye de manera continua en todos los sectores. El nivel de agua en los sectores superficiales oscila entre 15 y 20 cm. El caudal de salida



es bombeado periódicamente a l'Albufera para mantener un nivel constante en el sector C.

El *tancat de Milia* dispone de un sector A, y tres sectores B designados como BE, BC y BO. Cada sector B está constituido por dos celdas en serie, de las que se han monitorizado las

Figura 3
Esquema de los sectores del tancat de la Pipa.

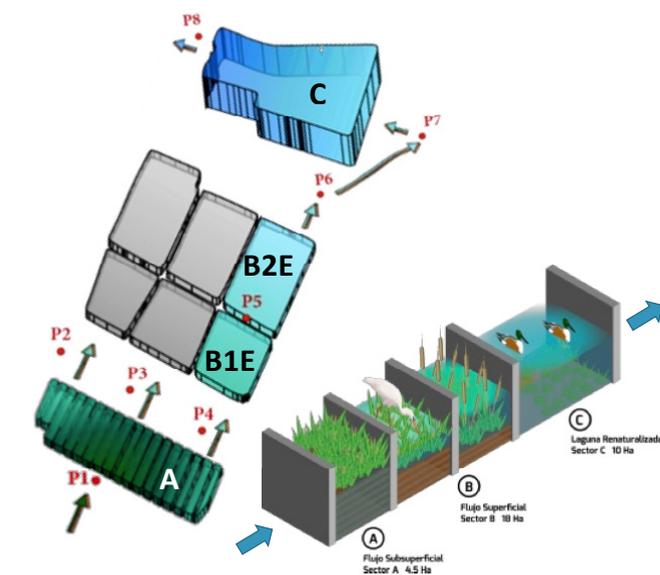


Figura 4. Arriba
Imagen aérea del tancat de Milia.

Figura 5. Abajo
Esquema de los sectores del tancat de Milia.

dos celdas de la línea BE. El sector A está formado por 18 celdas en paralelo y también ha sido monitorizado. El tancat de Milia es el único de los tres en el que el agua debe de ser bombeada tanto a la entrada como a la salida. El caudal introducido en los dos años de proyecto ha sido de 2.25 Hm³, a razón de unos 3100 m³/d, aunque en realidad el caudal diario durante los días de bombeo ha sido de 4500 m³/d ya que se bombea cinco días a la semana durante unas ocho horas al

día. La intermitencia del bombeo produce un efecto de "llenado" y "vaciado" del sector A, con una oscilación de nivel más de 20 cm y grandes variaciones en el caudal que circula desde el sector A hasta el BE (desde 0 hasta unos 90 l/s). A lo largo de los sectores superficiales el caudal circulante reduce su variabilidad y ya no se interrumpe. El nivel de agua en los sectores B está entre 30 y 35 cm. Este HHAA está preparado para recibir en un futuro agua procedente del tratamiento terciario de la EDAR de Albufera-Sur.

El tancat de L'Illa dispone de un pequeño sector A y cuatro sectores B designados como B1, B2, B3 y B4. La parcela B2 tiene dos celdas en serie, mientras que B3 y B4 están constituidas por tres celdas, que junto con B1 hacen un total de 9 celdas. En el proyecto LIFE ALBUFERA se han monitorizado los sectores B3 y B4. El tancat de L'Illa recibe el agua por bombeo desde L'Estany de la Plana y es devuelta al mismo Estany (aunque no en el mismo punto) por gravedad. Por lo tanto no recibe aguas directamente del lago. El caudal introducido ha sido de 1.30 Hm³, a razón de unos 1800 m³/d, aunque en realidad el caudal diario durante los días de bombeo ha sido de 3200 m³/d ya que se bombea cinco días a la semana durante unas ocho horas al día. El sector A se llena y vacía completamente en cada ciclo de bombeo y en los sectores B el caudal circulante también se anula antes del siguiente ciclo. Únicamente en el sector C el caudal fluye de manera constante. El nivel de agua en los sectores B es el más alto de los tres tancats, situándose entre 40 y 55 cm. Este HHAA está preparado para recibir agua procedente del tratamiento terciario de la EDAR de Sueca.

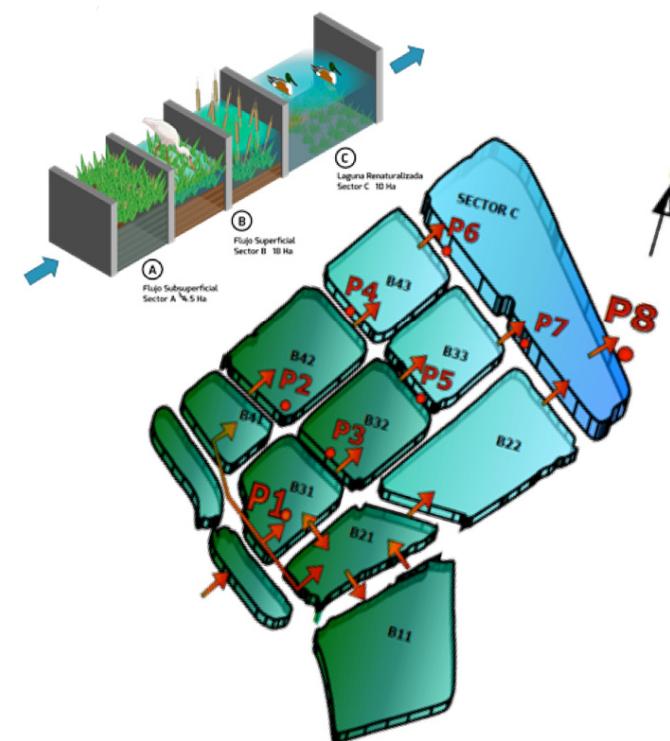
Algunos aspectos hidromorfológicos de los HHAA se recogen en la Tabla 1 para los tres tancats. Hay que destacar que las superficies de las parcelas monitorizadas están

entre 1,46 y 4,90 ha. Ésta es una de las singularidades del proyecto LIFE+ ALBUFERA, la gran superficie de las celdas de HHAA en las que se trabaja y que son propias de las aplicaciones ambientales de los HHAA.



Figura 6. Izquierda
Imagen aérea del tancat de L'Illa.

Figura 7. Derecha
Esquema de los sectores del tancat de L'Illa.



Tancat de La Pipa			Tancat de Milia			Tancat de L'Illa		
Sector	Superficie (ha)	Calado máximo (m)	Sector	Superficie (ha)	Calado máximo (m)	Sector	Superficie (ha)	Calado máximo (m)
B	8.92		A	4.13	0.60	A	0.25	0.60
<i>fp</i>	1.46		B	14.94		B	8.95	
<i>fp1</i>	0.36	0.30	<i>BE</i>	4.80		<i>B1</i>	1.44	0.50
<i>fp2</i>	0.52	0.30	<i>B1E</i>	1.80	0.40	<i>B2</i>	2.40	0.50
<i>fp3</i>	0.59	0.30	<i>B2E</i>	3.00	0.40	<i>B21</i>	0.74	0.50
<i>FG</i>	4.90		<i>BC</i>	4.95		<i>B22</i>	1.65	0.50
<i>FG1</i>	1.35	0.30	<i>B1C</i>	2.02	0.40	<i>B3</i>	2.60	
<i>FG2</i>	1.82	0.30	<i>B2C</i>	2.93	0.40	<i>B31</i>	0.72	0.50
<i>FG3</i>	1.72	0.30	<i>BO</i>	5.18		<i>B32</i>	0.96	0.50
<i>F4</i>	2.59		<i>B10</i>	1.72	0.40	<i>B33</i>	0.92	0.50
<i>F41</i>	0.86	0.30	<i>B20</i>	3.47	0.40	<i>B4</i>	2.52	
<i>F42</i>	0.86	0.30				<i>B41</i>	0.46	0.50
<i>F43</i>	0.87	0.30				<i>B42</i>	1.05	0.50
						<i>B43</i>	1.01	0.50
C			C	8.56	0.80	C	2.83	0.90
<i>LE</i>	6.00	0.60						
<i>LR</i>	8.00	0.70						

Tabla 1
Dimensiones de los HHAA del proyecto LIFE ALBUFERA.



A

Elementos para el diseño de humedales artificiales

A1 ORIGEN DEL AGUA A TRATAR

El origen del agua que vaya a ser tratada en un humedal artificial supone un elemento clave en el diseño de estas infraestructuras y su control es parte fundamental de su gestión. En función de la distinta procedencia (urbana, industrial, natural altamente modificada...), sus características van a ser distintas y su caudal, más o menos variable. En el caso de los HHAA de l'Albufera, el origen del agua tiene dos fuentes:

- Aguas eutróficas procedentes de las masas de agua del Parque Natural: del lago en los casos de HATP y HATM; del Estany de la Plana en el caso de HATLI.
- Aguas procedentes de EDAR tras un tratamiento terciario en los casos de HATM y HATLI.

La primera fuente tiene su disponibilidad asegurada al margen de que se puedan producir oscilaciones de caudal asociadas a oscilaciones de nivel en el lago. La segunda fuente puede ser variable dependiendo de si el agua regenerada tiene otros usos (regadío, por ejemplo) adicionales a los ambientales. En el proyecto solamente se ha trabajado con aguas eutróficas, caracterizadas por presentar elevadas concentraciones de fitoplancton, dominancia de cianobacterias, elevada turbidez y coloración verdosa, y altas concentraciones de materia orgánica y nutrientes, así

como una baja biodiversidad piscícola y escasez de vegetación sumergida. La composición media obtenida a partir de las entradas en HATP y HATM desde l'Albufera de Valencia se presenta en la Tabla 2.

Una opción de diseño muy interesante es incluir en los HHAA la posibilidad de rebompear el agua tratada hacia la cabecera del sistema para aquellos casos en los que:

- La calidad del efluente final no cumpla los estándares definidos (si los hubiera).
- El aporte se interrumpa por algún motivo durante un periodo de tiempo prolongado.
- Se desee emplear la salinidad como trazador para averiguar los TRH (ver apartado C1.4).

En los procesos de bombeo, el seguimiento de la calidad del agua, fundamentalmente de su salinidad, debe de ser muy estricto ya que la evapotranspiración de las plantas reduce el volumen de agua circulante. Un valor excesivo de salinidad puede perjudicar el desarrollo de la vegetación helófito y aunque ésta es bastante tolerante, por ejemplo el carrizo puede desarrollarse hasta con 20-45 g/L de sales (Vymazal, 2013; Cooper *et al.* 1996), para favorecer la diversidad vegetal es aconsejable no superar salinidades de 10 g/L (~20 mS/cm) para helófitas (Cooper *et al.* 1996) ni 4 g/L (~7 mS/cm) para macrófitas sumergidas (Margalef, 1981). Estos valores también

son de aplicabilidad a las aguas de entrada, lo que marca un límite para la aplicación habitual de estas ecotecnologías.

El agua a tratar también puede estar muy afectada por escorrentías pluviales: forestales procedentes de la cuenca vertiente; agrícolas en el caso de que en el entorno predominen ese tipo de actividades; urbanas en el caso de que la zona esté próxima a núcleos de población. Especialmente en este último caso las aportaciones de las descargas de sistemas de colectores unitarios pueden afectar muy negativamente a la calidad de las aguas.

Lecciones aprendidas

Las aguas superficiales continentales de carácter eutrófico pueden ser objeto de tratamiento mediante HHAA ya que no presenta características que afecten negativamente a la vegetación de los HHAA (excesiva concentración de sales). Además, es esperable que en los HHAA se vea incrementada la riqueza biológica del agua tratada.

Los sistemas bombeo a cabecera se han mostrado de gran utilidad: por ejemplo en el HATLI fue necesario recircular el agua del propio humedal, desde su sector C hacia su sector A, durante dos meses (noviembre-diciembre). Esto fue debido a que las aguas de su captación (l'Estany de la Plana), conectadas con el mar mediante exclusas, sufrieron picos de elevada salinidad debido a la entrada de agua del mar. Esta salinidad podía afectar a la vegetación y a la fauna del HATLI, por lo que disponer de un sistema de recirculación del HA fue fundamental durante estos episodios.

Se ha observado que tras periodos de precipitación intensa se producen picos de sólidos en suspensión y fósforo total, entre otros contaminantes, en las aguas de captación.

Recomendaciones

Es imprescindible analizar las características físico-químicas del agua a tratar, así como su disponibilidad, o la variación de su disponibilidad a lo largo del año, de manera que se pueda asegurar un volumen suficiente para el mantenimiento de los HA.

En casos en los que se prevea una insuficiencia de agua de entrada durante algún periodo prolongado de tiempo, es necesario proporcionar sistemas alternativos de alimentación del humedal, entre los que la recirculación de caudales del propio HA ha resultado plenamente satisfactorio en el ámbito del proyecto LIFE Albufera. Es fundamental en este caso hacer un seguimiento de la conductividad eléctrica (salinidad) ya que las pérdidas por evapotranspiración, fundamentalmente en verano, pueden ser muy importantes. A modo de ejemplo, si en verano se evapotranspiran unos 5 mm/d (l/m² d) de agua, para una superficie de 10 ha supone un caudal diario evaporado de 500 m³/d.

Los HHAA en espacios naturales son muy recomendables para capturar sólidos en suspensión y fósforo total procedentes de fuertes escorrentías naturales y así evitar que alcancen la masa de agua a restaurar. Cuanto mayor sea esta captura mayores serán las necesidades de mantenimiento de los HHAA debido a la mayor velocidad de colmatación de los mismos, pero estarán cumpliendo de una manera más eficiente su tarea de protección de la masa de agua: laminación de avenidas, papel habitual de los humedales naturales.

A2 MORFOLOGÍA. TIPOS DE CELDA

La morfología de las masas de agua juega un papel clave en la dinámica de los ecosistemas acuáticos. Así se reconoce en la Directiva Marco de Aguas cuando establece una

Tabla 2
Características del agua a tratar. Se indican los valores medios, mínimos (Mín.) y máximos (Máx.) obtenidos en las entradas a HATP y HATM. PS: peso seco.

Variable*	Media	Mín.	Máx.	Variable	Media	Mín.	Máx.
DQO total (mg/L)	54.6	11.7	108.0	Alcalinidad (mg/L)	216.3	75.1	390.6
DQO soluble (mg/L)	28.6	5.0	54.8	Conductividad eléctrica (µS/cm)	2181	606	3790
N Total (mg N/L)	3.84	1.39	14.15	Salinidad (g/L)	1.0	0.0	1.9
Amonio (mg N/L)	0.349	0.029	2.450	Temperatura (°C)	19.0	6.2	30.8
Nitritos (mg N/L)	0.144	0.005	5.760	pH	7.9	6.9	8.9
Nitratos (mg N/L)	1.60	0.10	11.70	OD (mg/L)	8.9	1.8	16.5
P Total (mg P/L)	0.268	0.080	0.835	%OD sat	87%	25%	174%
Fosfatos (mg P/L)	0.033	0.005	0.285	Clorofila a (µg/L)	80.2	9.3	486.0
SST (mg/L)	46.2	15.4	162.8	Porcentaje cianofíceas (%)	44%	0.2%	87.2%
SSV (mg/L)	19.5	0.0	64.3	Biovolumen (mm ³ /L)	28.6	0.8	95.9
Turbidez (NTU)	45.7	16.2	276.0	Zooplancton (µg PS/L)	207.2	18.4	606.3
Sílice (mg/L)	2.7	0.1	9.3				

serie de indicadores de calidad hidromorfológicos como la variación de la profundidad y anchura de un río, la estructura y el sustrato de las masas de agua, la variación de la profundidad de un lago y la estructura de la zona de ribera de ríos y lagos, entre otros.

En el diseño de HHAA destinados simultáneamente a mejorar la calidad la calidad de las aguas y la biodiversidad en entornos naturales, los aspectos morfológicos son aún más importantes que en los HHAA destinados al tratamiento de aguas residuales urbanas. A continuación se recogen estos aspectos, analizados a partir de los aprendizajes adquiridos en los *tancats de la Pipa, Milia y L'illa*.

A2.1 Parcelas

Tamaño

Normalmente, cuando se diseña un humedal artificial como sistema de tratamiento de aguas, la superficie necesaria de humedal se determina en función de las necesidades de tratamiento, es decir, del caudal de agua a tratar y de las características del agua de entrada así como de los requisitos a cumplir en el efluente. La ecuación empleada habitualmente para el cálculo de su superficie es la siguiente:

$$S = \frac{Q}{k_A} \ln \left(\frac{C_{inf} - C^*}{C_{ef} - C^*} \right)$$

Donde k_A es la constante cinética de primer orden de disminución del contaminante en el humedal (m/d) y es igual al producto de la constante cinética volumétrica (k_v ; d⁻¹) por la

porosidad (Φ) y el calado (h; m) ($k_A = k_v \cdot \Phi \cdot h$); Q es el caudal a tratar (m³/d); C_{inf} es la concentración de entrada; C_{ef} es la concentración deseada en el efluente del humedal y C^* es la concentración de fondo o concentración mínima por debajo de la cual no se puede reducir la concentración de contaminante. Esta ecuación es la resultante de aplicar un modelo cinético de primer orden a un reactor de flujo pistón para simular la degradación de los contaminantes (García y Corzo, 2008; Comín, 2014).

En el caso objeto del presente manual, es decir, diseño de humedales artificiales para mejora ambiental de ecosistemas acuáticos degradados, la superficie de humedal artificial podría determinarse también mediante los criterios anteriores, sin embargo, ésta vendrá limitada por la disponibilidad de espacio en el entorno de la masa de agua a recuperar ya que los HHAA requieren grandes superficies.

En casos como el que nos ocupa, lo más común es que se disponga de una determinada superficie (establecida probablemente por el coste de la expropiación de terrenos) y se estime el caudal a tratar a través de ecuaciones como la anterior. Para ello es necesario conocer las velocidades de retirada de contaminantes o las constantes cinéticas de dicho proceso. La aplicación de humedales artificiales para tratar agua eutrófica es relativamente reciente y la información disponible sobre este tipo de parámetros de diseño y operación se limita a unos pocos estudios (Dunne *et al.* 2012, 2013, 2015; Martin *et al.* 2013). En la Tabla 3 se recopilan valores y rangos obtenidos en dichos estudios.

Tabla 3
Parámetros de diseño de HHAA para tratamiento de aguas eutróficas obtenidos en diversos estudios.

Variable	Concentración de fondo (C*) (mg/L; µg/L para Cl a)	k _A (m/d)	Referencia
Nitrógeno total	1.5	0.060 ± 0.016	Dunne <i>et al.</i> 2013
	0.3 – 0.7	0.184	Martin <i>et al.</i> 2013
Fósforo total	0.030 – 0.044	0.074 ± 0.038	Dunne <i>et al.</i> 2015
	0.044 – 0.076	0.278	Martin <i>et al.</i> 2013
Sólidos en suspensión	0.5	0.301 – 0.795	Dunne <i>et al.</i> 2012
	1.5 – 4.3	0.260	Martin <i>et al.</i> 2013
Fitoplancton (Cl a)	0.19 – 10.26	0.178	Martin <i>et al.</i> 2013

En el proyecto LIFE ALBUFERA se han testado distintas condiciones de operación (caudales, cargas hidráulicas, concentraciones de entrada, cobertura vegetal y tipología de humedal superficial / subsuperficial) con la finalidad de ofrecer valores de los parámetros de diseño y operación que permitan optimizar tanto la calidad de las aguas, como la biodiversidad de hábitats y aves. En la Tabla 4 se indican los rangos de valores obtenidos para la constante cinética (k_A). En general, los máximos obtenidos corresponden al sector subsuperficial, que presenta buenos rendimientos de eliminación para todas las variables y opera a altas cargas (hidráulica y másica) de entrada, y los mínimos se obtienen en aquellos sectores que operan a menores cargas de entrada¹.

Sin embargo, los modelos análogos a los representados por la ecuación anterior son muy limitados cuando en las masas de agua existen diversas variables de calidad de aguas fuertemente relacionadas entre sí (nutrientes, materia orgánica, fitoplancton, zooplancton, especies superiores como peces y aves), por lo que el empleo de modelos matemáticos de eutrofización sería más recomendable para simular correctamente la evolución de la calidad del agua en la masa de agua y en los propios humedales tras su puesta en marcha.

En el proyecto LIFE ALBUFERA se ha desarrollado un modelo completo de calidad de aguas que reproduce los distintos procesos que tienen lugar en masas de agua eutrofizada. Se han modelado los tres humedales artificiales del proyecto (HATP, HATM, HATLI) y se han vinculado los dos primeros con el lago. Una vez calibrado con los datos obtenidos durante los dos años de monitorización, ha sido empleado para simular diferentes

Variable	k _A (m/d)
Nitrógeno total	0.013 – 0.123
Fósforo total	0.041 – 0.103
Sólidos en suspensión	0.004 – 0.248
Fitoplancton (Cl a)	0.052 – 0.292

Tabla 4
Valores de k_A obtenidos en los HHAA del LIFE ALBUFERA.

escenarios. Las simulaciones indican que la superficie necesaria para lograr una disminución significativa de la concentración de fitoplancton, medido como clorofila a, equivaldría a 300 sectores tipo A o lo que es lo mismo, 1.200 ha de humedal artificial subsuperficial, lo cual reafirma las elevadas necesidades de superficie de este tipo de infraestructuras. En el documento *Documento Técnico de Ampliación y Calibración del modelo Albufera*, disponible en la web del proyecto², se describen el modelo matemático desarrollado y los escenarios simulados.

Morfología

La parcela es el elemento base de los HHAA. Su estructura original, la división parcelaria previamente existente en la zona, condiciona el funcionamiento hidráulico en el sistema. Esta división es resultado de los usos y aprovechamientos históricos que se hayan efectuado (agrícolas, ganaderos, cinegéticos...) y que en el caso de los HHAA que nos ocupan corresponde al arrozal. En este cultivo, las parcelas se subdividen en elementos menores que se denominarán celdas, separados entre ellos por pequeñas motas, como se puede apreciar en la Figura 8.

El aprovechamiento histórico de los terrenos ya condiciona una de las primeras decisiones que hay que tomar en el diseño de los HHAA: ¿en qué medida deben parecerse al medio agronómico original, en este caso el arrozal? Como veremos, esta decisión deberá tomarse teniendo en cuenta los diversos factores que en esta guía van a ir apareciendo, pero

^[1] En los apartados b1.1 y c3.2 se encuentran las definiciones de estos parámetros de operación (carga hidráulica y másica) y más información acerca de su influencia sobre el funcionamiento de los hhaa.

^[2] <http://lifealbufera.org/index.php/es/documentos>



Figura 8
Imagen de división parcelaria en un campo de arroz.

Figura 9
Imágenes de la parcela de *tancat* de la Pipa en enero de 2006 (izqda.) y en agosto de 2015 (derecha). Fuente: Google Earth.



Figura 10
Imágenes de la parcela de *tancat* de Milia en julio de 2005 (izqda.) y en agosto de 2015 (derecha). Fuente: Google Earth.



Figura 11
Imágenes de la parcela del *tancat* de L'illa en julio de 2005 (izqda.) y en julio de 2014 (derecha). Fuente: Google Earth.

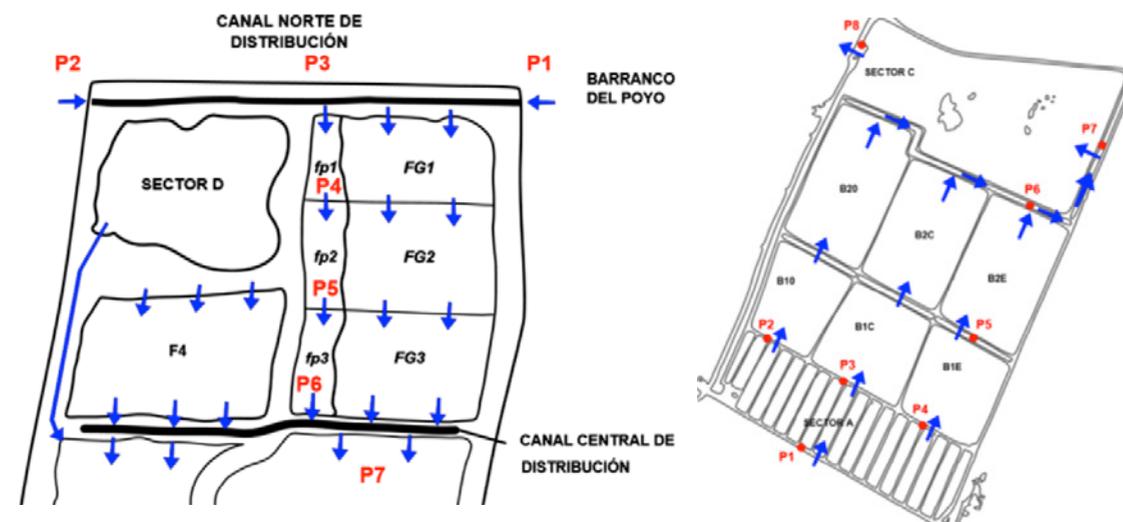


Figura 12
Distribución de celdas actual en HATP y HATM.

para que el lector veamos las estructuras parcelarias de los *tancats* de la Pipa y Milia antes y después de la actuación de transformación (véase Figura 9, Figura 10 y Figura 11).

Como se puede observar, el cambio en todos los casos ha sido muy importante y poco se parece la parcelación actual a la histórica como arrozal. No obstante ello, el HA del *tancat* de la Pipa (celdas FG, fp y F4 de la Figura 12) mantiene unas motas de separación entre celdas similares a las de los arrozales, lo que le convierte en un HA más similar a las parcelas de arrozal.

Otro aspecto a considerar en la toma de decisiones sobre la ubicación de un HA es el asegurar la máxima independencia desde el punto de vista hidráulico. Hay que recordar que la ubicación de estas infraestructuras verdes en espacios naturales limita la posibilidad de emplear diversos materiales como, por ejemplo, láminas de impermeabilización. La afección de la gestión hídrica de los HHAA hacia los campos circundantes, o viceversa, debe ser la menor posible con el fin de reducir los costes de gestión y la mejor forma para ello es que la parcela de HHAA coincida con una unidad

hidrológica de arrozal. Dos ejemplos de los *tancats* del proyecto LIFE ALBUFERA ilustran muy bien esta condición: un buen ejemplo es el *tancat* de la Pipa, que está rodeado por lago y acequias por tres de sus cuatro lados, por lo que únicamente linda con otro *tancat*, el de la Sardina, por el norte y éste es una unidad hidrológicamente independiente con su propio motor. Un mal ejemplo es la parcela 1 del *tancat* de L'illa, que pertenece hidrológicamente al arrozal contiguo y al que inunda ligeramente por filtraciones cuando éste está seco.

Una variable morfológica del mayor interés en las celdas es la relación entre la longitud y la anchura (L:A) de las mismas. Para aplicaciones en aguas residuales urbanas las relaciones típicas L:A se encuentran entre 1:1 y 3:1 (USEPA, 2000; Salas *et al.* 2007). Se ha comprobado que estas relaciones reducen el riesgo de generación de zonas en las que el agua se queda estancada, llamadas "zonas muertas". La presencia de "zonas muertas" reduce el tiempo de retención hidráulico (véase apartado B1.5) y, como consecuencia, el tiempo del que se dispone para que se produzcan los procesos de transformación de contaminantes. En la Tabla 5 se muestra esta relación para las celdas del estudio:

Tabla 5
Relaciones entre longitud y anchura (L:A) en las celdas de los HHAA del proyecto LIFE ALBUFERA. En sombreado se encuentran los sectores monitorizados.

Tancat de la Pipa		Tancat de Milia		Tancat de L'illa	
Sector	L:A	Sector	L:A	Sector	L:A
Sectores C (flujo subsuperficial)					
A	-	A	0.27	A	0.10
Sectores B (flujo superficial)					
fp	8.4	BE	2.71	B1	0.93
fp1	2.28	B1E	1.08	B2	4.00
fp2	2.54	B2E	1.63	B21	2.02
fp3	2.21	BC	2.54	B22	1.99
FG	2.1	B1C	0.98	B3	3.20
FG1	0.6	B2C	1.57	B31	1.00
FG2	0.7	BO	3.09	B32	1.16
FG3	0.8	B1O	1.27	B33	1.03
F4		B2O	1.76	B4	3.07
F41	2.13			B41	0.58
F42	2.13			B42	1.30
F43	2.13			B43	1.18
Sectores C (laguna somera)					
C-LR	1.9	C	2.20	C	0.29
C-LE	3.2				

Como se puede observar de la Tabla 5, las relaciones están en los intervalos típicos recomendados. El hecho de que en algún caso la relación sea inferior a 1 no es negativo en cuanto a la distribución del flujo siempre que se asegure una alimentación bien distribuida (en general esta afirmación es aplicable a todas las entradas de los HHAA pero más en estos casos).

Un factor ambiental importante que afecta al flujo del agua cuando se trabaja en espacios naturales tan abiertos (interior de los sectores tipo B y C) como los que en este manual se describen, es el viento. En efecto, el viento puede suponer un aporte de energía externa a la masa de agua que tenga como consecuencia la modificación del campo de velocidades en la masa de agua somera. Consecuentemente, el viento puede modificar las direcciones principales de flujo en la celda, pudiendo tener esto repercusiones en la localización y persistencia de las zonas muertas.

Su efecto es mayor cuanto más larga es la celda en la dirección del viento y menor el calado. Sus consecuencias dependen de si la dirección y el sentido del viento son coincidentes con el flujo normal, en cuyo caso lo

acelera; o si coinciden en dirección pero son de sentidos opuestos, en cuyo caso lo frena; provocando una clara afección a los TRH en todos los casos.

Recomendaciones

Con el fin de minimizar el efecto de la resuspensión de sólidos por efecto del viento se recomienda orientar los sectores tipo laguna somera y superficiales de manera que su lado mayor no se oriente en la dirección de viento dominante.

A2.2 Motas y diques

Las motas o diques de separación entre celdas constituyen uno de los elementos principales de los HHAA de tipo superficial (no son necesarios en los HHAA de tipo subsuperficial ni en las lagunas someras). Las motas configuran la forma y tamaño de las celdas, permiten el acceso a diversos puntos en su interior para el mantenimiento, establecen límites a la circulación del flujo y en ellas se ubican las tuberías o compuertas de paso de agua, por lo que el comportamiento hidráulico del humedal depende de forma directa de éstas.

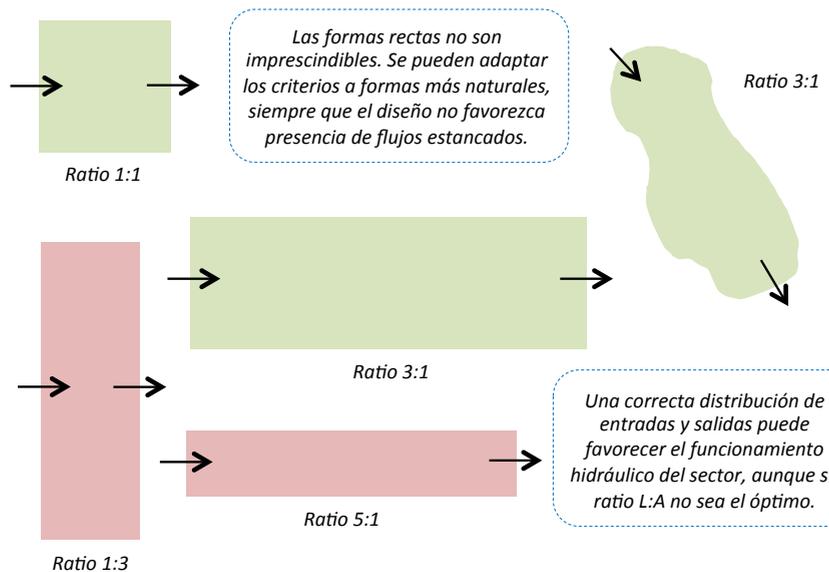
DISEÑO DE SECTORES

¿Qué forma deben tener? ¿Cómo han de ser sus dimensiones?

En el diseño de los sectores que conforman los HA, la forma de los mismos y la relación entre sus dimensiones (ancho, largo, profundidad) juega un papel importante en su correcto funcionamiento hidráulico. Están estrechamente relacionadas con la Carga Hidráulica Superficial (CHS) y el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH).

CHS - volumen de agua a tratar por metro cua-drado de superficie y por unidad de tiempo (m³ m⁻² d⁻¹)
TRH - tiempo de permanencia del agua a tratar en la celda (d)

Las relaciones longitud/anchura (L:A) recomendadas están entre 1:1 y 3:1. Una mayor relación supondría sectores muy alargados y estrechos, en los que las velocidades pueden ser excesivas. Una menor relación lleva a sectores demasiado anchos, donde el agua puede atravesar el sector directamente de entrada a salida, sin una correcta distribución y con generación de zonas muertas.



Cuadro 1
Recomendaciones sobre la morfología de las celdas.

Figura 13
Imágenes de motas de tierra (izda. y dcha. arriba) y hormigón (dcha. abajo).



En el ámbito del arrozal del PN de La Albufera estas motas se elaboran indistintamente mediante tierra o con diques rígidos de hormigón o bloques, aunque la forma tradicional de dividir el parcelario es con motas de tierra (Figura 13). Debido a la escasa elevación de los niveles de agua en el interior de las parcelas, las motas no requieren una altura demasiado grande y es raro encontrar motas que superen los 40 cm de altura, ya que los niveles del agua en los laterales del sistema no suele superar los 20 cm.

El empleo de bloques facilita su mantenimiento ya que se evita la reposición continua

que sufren los de tierra debido a su desmoronamiento o filtraciones a través de las motas causadas por la fauna (cangrejo americano, por ejemplo). Además, constituye una zona de paso cuando los campos están inundados, y al tratarse de un elemento rígido se reduce la vegetación que crece en su entorno.

Estas tradiciones agronómicas pueden influir en la decisión sobre el tipo de mota que se construye en los HHAA superficiales. En los HHAA del *tancat* de la Pipa se ha seguido esta tradición en los sectores FG y fp: motas de 1,5 metros de anchura y 60 cm de altura (para un calado de agua de entre 20 y 30 cm).

En la Figura 15 se puede observar la erosión que se produce en los exteriores de los bloques de hormigón que conforman la compuerta de paso y que obliga a una reposición anual del material para que no se produzcan fugas laterales. Por otro lado, requieren un desbroce al menos dos veces al año (principios de verano y principios de otoño) ya que el carrizo y la enea rápidamente las colonizan e impiden el paso al estar constituidos por

terreno natural poco compactado. Esta colonización de la vegetación es favorable para la fauna pero dificulta la gestión del espacio.

En los *tancats* de *Milia* y *L'illa*, la separación entre las celdas se ha realizado mediante terraplenes que constituyen los caminos de mantenimiento de unos 4 metros de anchura y entre 1,5 y 2,5 metros de altura contados desde la base del HHAA (Figura 16).

Recomendaciones

Construir en los HHAA superficiales motas de separación como si fueran campos de arroz permite integrarlos mucho mejor en el medio, pero dificulta su mantenimiento y accesos ya que se desmoronan con facilidad. Es mucho más resistente la solución realizada en HATM y HATLI. Sin embargo, si no se desea una infraestructura de separación tan voluminosa se recomienda que las motas tengan al menos 2 metros de anchura y que sean de material bien compactado; en este caso los canales de paso entre celdas deben ser abiertos para facilitar su limpieza y tanto la boca de entrada como la de la salida del canal deben estar reforzadas para que se fijen bien en la propia mota y no se erosionen lateralmente.

A2.3 Taludes y pendientes

Los taludes laterales de las celdas resultan relevantes por tratarse de zonas en las que en un reducido espacio se presentan una mayor variabilidad de calados, por lo que pueden ubicarse más variedades de especies. La realidad es que al tratarse de calados muy pequeños y pendientes de relación 3H:2V o 2H:1V la variación de vegetación es muy escasa. La pendiente del talud suele ser alta para no perder volumen útil al ser los HHAA unidades destinadas a la mejora de la calidad de las aguas. Pendientes más



Figura 15
Imagen de compuerta de paso construida con bloques de hormigón sobre mota de tierra.

suaves del orden de 5H:1V o 10H:1V se emplean en las lagunas someras para favorecer especialmente la fijación de vegetación sumergida.

No obstante, sí que se ha observa en todos los *tancats* que el carrizo coloniza muy bien los laterales de todas las parcelas, allí donde la humedad es abundante pero el nivel de agua bajo; mientras que la enea cubre las zonas profundas, alcanzando una muy buena cobertura en el *tancat* de L'illa.



Figura 16
Terrapienes de separación de celdas en HATM y HATLI.

Figura 14
Imagen del sector FG del *tancat* de la Pipa en abril de 2009. En primer plano está FG3 y se observan las motas de separación y las compuertas con FG2 y FG1.



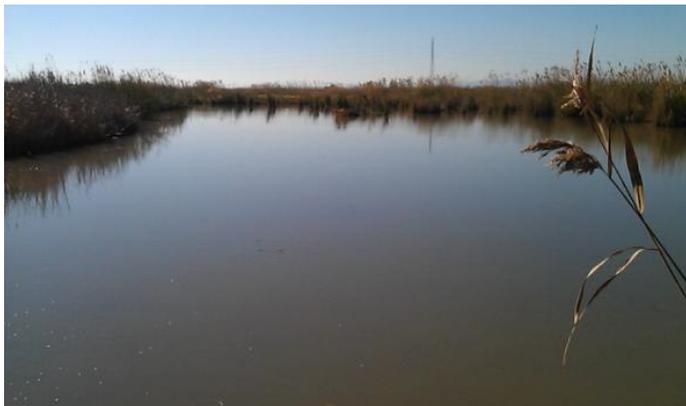


Figura 17
Imagen de vegetación desarrollada en el perímetro de una de las celdas de HATP.

En la Figura 17 se muestra la densidad de vegetación que llega a desarrollarse en el perímetro de una de las celdas de la parcela fp del *tancat de Pipa*.

A3 FLUJOS DE ENTRADA Y SALIDA. CONEXIONES ENTRE CELDAS

A3.1 Compuertas. Vertederos.

Las compuertas que se instalan en las motas constituyen los elementos de unión entre las celdas del sistema, y permiten que el agua

circule de unas a otras. Las compuertas que existen en los tres HHAA son de dos tipos: clásicas compuertas de tajadera en hormigón como las que habitualmente se emplean en el regadío tradicional y que se sitúan fundamentalmente en HATP (entradas a los sectores y motas intermedias) y en HATLI (entradas a los sectores A y C); y las compuertas murales de apertura con volante, mucho más grandes que las anteriores y que están situadas en todos los sectores del HATM y en las salidas de las parcelas de HATP (Figura 18 a y b).

En el mercado existen otras compuertas tipo tajadera manual que permiten regular el nivel aguas arriba sin necesidad de tablonas, inclinando la tajadera (Figura 18c: compuerta abatible) o izándola en caso de tajadera enterrada en el lecho (Figura 18d: compuerta vertedero). La compuerta abatible se podría obstruir o atascar más fácilmente que las demás, ya que el eje de giro de la compuerta estaría siempre sumergido, y debido a los sedimentos o la vegetación, es más propensa a averiarse que las que hay instaladas actualmente en los HHAA. La ventaja es que con una sola compuerta se

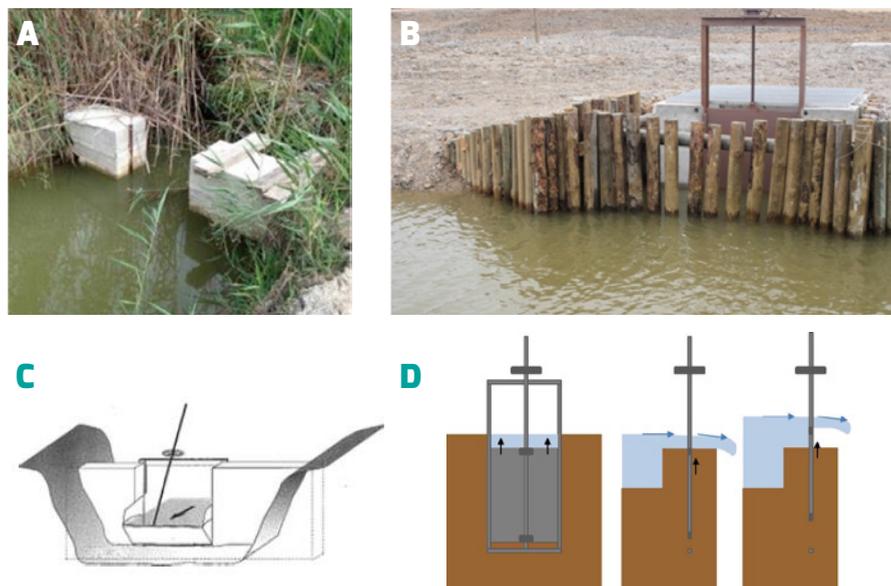


Figura 18
Tipos de compuerta existentes en los HHAA del proyecto (a y b) y otros tipos de compuerta (c y d). Compuerta tipo c) tomada de Comín (2014).

garantiza el nivel deseado en el sector. Esta función se podría conseguir también con una compuerta vertedero, que funcionaría a modo de vertedero con el labio a cota móvil. El inconveniente de esta última opción es que supone excavaciones mayores que en el caso de compuertas convencionales.

En las compuertas se pueden colocar tablonas a modo de vertederos de sección rectangular que pueden cumplir una doble función:

- Mantener un nivel determinado en la celda aguas arriba.
- Poder medir fácilmente el caudal que circula.

Ésta es la solución que se ha adoptado en los *tancats* de la Pipa y Milia, no siendo posible hacerlo en L'Illa debido a que la conexión entre celdas se realiza mediante tuberías sumergidas.

Los vertederos pueden funcionar libres o anegados, dependiendo sobre todo del nivel de aguas abajo, como se puede ver en la Figura 19.

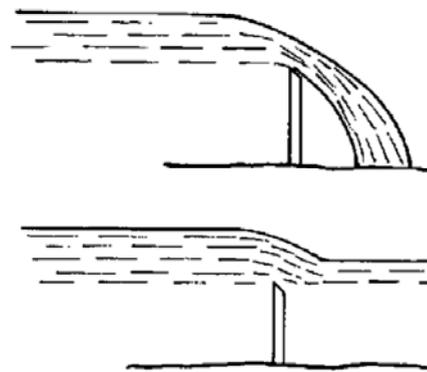


Figura 19
Esquema de funcionamiento de vertederos: libre (arriba) y anegado (abajo). Imágenes tomadas de FAO (1997).

[3] Se define "sección crítica" como aquella en la que el flujo circula en régimen crítico, y por tanto existe una relación biunívoca entre caudal circulante y calado en la sección. Es decir, a cada caudal le corresponde únicamente un solo calado posible. Es por tanto una buena sección como sección de aforo.



Figura 20
Tipos de paso de agua (arriba: en el terreno natural; abajo: bloques de hormigón).

En el primero de los casos, esto va acompañado de la generación de una sección crítica, lo que facilita la medición del caudal circulante, como se explicará más adelante. En los humedales costeros con muy escasa pendiente del terreno, la generación de esta sección crítica³ no siempre es posible debido al escaso desnivel entre parcelas, por lo que no se produce la caída libre del agua. El funcionamiento de un vertedero de forma libre o anegada no depende sólo de su diseño, sino también del funcionamiento hidráulico del sistema en cada instante.

Según se aprecia igualmente en las figuras anteriores, los pasos de agua pueden realizarse en terreno natural o mediante elementos rígidos, como hormigón o bloques prefabricados.



Figura 21
Ejemplo de paso de agua a través de bloques de hormigón en el que se han erosionado los laterales y se han colocado sacos de arena para obstruir el flujo.

En terreno natural quedan mejor integrados en el entorno del humedal y generan un menor impacto visual. También mantienen el modo tradicional de separación entre parcelas en el entorno de muchos parques naturales, por lo que se mantiene su diseño histórico de regulación. Los vertederos realizados de este modo presentan el inconveniente de que hay que reponerlos para que sigan controlando el flujo en condiciones adecuadas, pues en caso contrario, la aceleración del flujo en su entorno provoca que el vertedero se vaya agrandando por las erosiones. Este incremento de anchura aumenta el caudal de salida, y genera un descenso de nivel del campo de aguas arriba, alterando las condiciones del sistema.

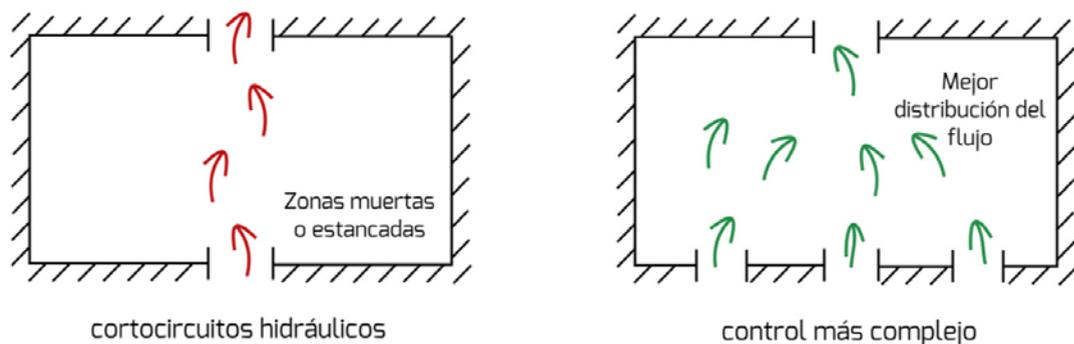
Como solución provisional, para evitar estar reconstruyendo de forma continua en vertedero de tierra, los operarios suelen colocar

elementos que generen una cierta obstrucción del flujo, como pequeños sacos de arena, piedras o trozos de ladrillo. Esto reduce temporalmente el caudal saliente y vuelve a incrementar el nivel de aguas arriba.

Como el mantenimiento de los vertederos suele requerir tiempo por parte de los usuarios del sistema, éstos tienden a reforzarlos, bien en sus laterales, o en todo su contorno. En esos casos podemos encontrar vertederos rígidos realizados mediante obra, que apenas modifican su sección tras el paso continuo de caudal. Sin embargo, este otro tipo de vertederos rígidos también requieren de un cierto mantenimiento, ya que la vegetación prolifera igualmente en su entorno.

Por otro lado, el número de compuertas que se instalan en cada celda es clave para lograr una buena distribución del caudal en su interior y minimizar la existencia de zonas muertas. Cuanto menor sea la relación entre la anchura de la celda y las compuertas, mejor será la distribución del flujo. En el caso de que la alimentación provenga de un canal lateral (por ejemplo el sector B de HATP), hay que tener en cuenta que a través de la primera compuerta saldrá más agua que a través de la segunda y así sucesivamente ya que el flujo pierde energía conforme avanza. Dicha relación es de unos 30 m/compuerta en HATP y en HATLI, mientras que es de unos 130 m/compuerta en HATM.

Figura 22
Esquema del efecto del número de compuertas sobre la distribución del flujo.



ENTRADAS Y SALIDAS DE UN SECTOR

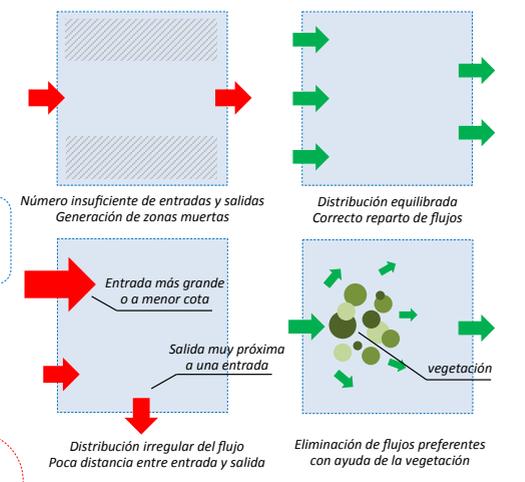
¿Cuántos puntos de entrada y salida de caudal son necesarios?
¿Dónde deben situarse?

Al diseñar un HA y las conexiones entre sus sectores, es frecuente plantearse estas preguntas. La respuesta, sin embargo, no es tan simple como aplicar una fórmula en función del ancho y/o largo de nuestro sector. Un gran número de factores interviene en la correcta distribución del flujo y el mantenimiento de los TRH teóricos, como por ejemplo:

- Caudales de entrada/salida
- Geometría de las entradas/salidas
- Tipología: en presión o lámina libre
- Forma del sector
- Dimensiones del sector
- Nivel de agua (calados) en el sector

El objetivo es conseguir que el flujo de entrada se distribuya lo más uniformemente posible dentro del sector, que no vaya desde la entrada a la salida en línea recta (dejando zonas muertas) y que, además, la velocidad con la que circule el agua no sea alta en ningún punto, para evitar resuspensión del material del fondo. De la experiencia en los HA del proyecto Life-Albufera, se puede recomendar:

- ✓ Aumentar el número de entradas/salidas para disminuir la velocidad en cada una de ellas, si los caudales son elevados
- ✓ Diseñar las entradas/salidas iguales en forma, tipología y cota para evitar que entre más agua por unas que por otras
- ✓ Colocarlas frente a islas o masas de vegetación, que ejerzan de distribuidoras del flujo dentro del sector
- X No colocarlas en lados contiguos en la celda, sino intentar que la distancia entre ellas sea la mayor posible
- X No enfrenar directamente entradas y salidas. Mejor distribuir las al tresbolillo
- X No colocar más de las necesarias, ya que complica las labores de monitorización



Cuadro 2
Recomendaciones sobre el número y distribución de entradas y salidas en una celda.

Recomendaciones

La experiencia indica que se requiere un mantenimiento casi continuo de las compuertas, tanto para proceder a la limpieza de vegetación que crece a su alrededor o restos flotantes que obstruyen el vertedero, como en la reconstrucción de sus estribos en caso de estar realizados con terreno natural. En caso contrario, se alterarán las condiciones de funcionamiento hidráulico del sistema.

Además, si se desea utilizar estos vertederos como aforadores, se debe mantener estanca la unión entre los laterales del vertedero y el terreno, para evitar que las fugas de agua distorsionen la medición, o que generen un vertido de caudal excesivo.

Como ejemplo, en la Figura 23 se muestra el punto P4 de conexión entre las celdas fp1 y

fp2 del *tancat* de Pipa. Como puede apreciarse existe un tablón en la sección rectangular que hace las veces de vertedero, sobre el que se realiza la medición de caudal, pero se aprecia a simple vista cómo parte del agua se filtra



Figura 23
Imagen que muestra la existencia de un flujo secundario en un paso entre celdas, debido a la erosión del lateral de la compuerta.

por los laterales de la estructura de hormigón al haberse erosionado. Se recomienda reponer la unión con estas motas laterales, por donde también está pasando caudal.

Aunque no se pueda constatar que la relación anchura/compuerta haya afectado a los resultados de calidad, se recomienda no emplear relaciones tan altas como las de HATM. Los valores de 20-30 m/compuerta se consideran adecuados para este tipo de sistemas.

A3.2 Conductos sumergidos

La conexión entre parcelas a veces se realiza mediante conductos que atraviesan la mota sin quedar abiertos por su parte superior. Estos son los elementos que se han instalado en mayor medida en los *tancats* para atravesar los caminos que separan las celdas y conectarlas hidráulicamente.

Entre los tipos de conductos enterrados que se suelen encontrar, cabe destacar:

- Marcos rectangulares. Se realizan normalmente con hormigón in situ. Suelen utilizarse para cruzar infraestructuras de cierta entidad.
- Conductos circulares. Habitualmente son tubos de PVC o prefabricados de hormigón,

aunque como a menudo se trata de elementos reutilizados, pueden ser de cualquier material utilizado en la construcción.

- Secciones irregulares. A veces este tipo de conductos sumergidos se realizan con trozos de tuberías divididas por su diámetro, o incluso se parten para tal fin. No es raro ver conexiones realizadas con media sección de tubería. Su finalidad es aprovechar el conducto para realizar dos conexiones, ya que el escaso nivel de agua no requiere de la totalidad del diámetro.

El objetivo principal de este tipo de conductos es:

- Evitar el mantenimiento y reconstrucción de los vertederos realizados en terreno natural a través motas de tierra, ya que estos tienden a desmoronarse con el paso del flujo.
- Mantener constante el paso de caudal, e indirectamente el nivel de agua en las parcelas, ya que su sección permanece constante en el tiempo.
- Cruzar infraestructuras de mayor tamaño, como caminos o carreteras.

En cuanto a su funcionamiento hidráulico, estos conductos pueden funcionar completamente sumergidos, o bien semi-sumergidos, dependiendo del nivel de agua que se



Figura 25
Medición de velocidad del flujo con minimolinte.

tenga tanto en la parcela de aguas arriba, como en la de aguas abajo, ya que el control hidráulico del flujo puede estar en cualquiera de las dos. En la Figura 24 puede apreciarse dos tipologías de funcionamiento hidráulico diferente para estos conductos enterrados.

El uso de estas conexiones permite mejorar la conectividad para peces y otra fauna, permitiendo colonizar desde las zonas altas desde las zonas bajas, conectadas a la masa de agua exterior. Por ejemplo, en HATLI existe esta conectividad desde l'Estany de la Plana hasta las celdas de cabecera del HA.

Cuando se desea medir el caudal en este tipo de conexiones, resulta más complicado cuando están completamente sumergidos. Se recomienda utilizar un minimolinet que se adentre en la sección del tubo, del modo que se ilustra en la Figura 25.

La conservación y mantenimiento de los tubos puede ser problemática al sufrir obturaciones por restos de vegetación y/o colmataciones por acumulación de sedimentos. Si además se desea medir periódicamente el caudal que circula a su través, es fundamental mantenerlos limpios de vegetación para poder localizarlos ya que en muchas ocasiones pueden estar sumergidos y no ser fácilmente visibles. En ocasiones, a través de la conexión puede seguir circulando un cierto caudal, que apenas puede ser identificado visualmente debido a la escasa velocidad del flujo, lo que dificulta el control global del sistema.

El control del flujo en los conductos sumergidos es uno de sus principales inconvenientes ya que al tenderse a hacer de grandes diámetros para evitar su colmatación, las velocidades son imperceptibles a la vista para los caudales que se manejan.

Figura 26
Imágenes de la salida de tubos sumergidos en los que se puede apreciar la acumulación de sedimentos.



Figura 24
Imágenes de conductos sumergidos: desagüe anegado en su desembocadura (izda.) y desagüe libre en el que la condición de aguas abajo no influye en el vertido (dcha.).



Recomendaciones

Aunque el objetivo de este tipo de conexiones enterradas sea reducir su mantenimiento respecto a los vertederos en abierto, éste no puede ser nulo, por lo que se recomienda:

- Realizar limpiezas periódicas de los conductos para retirar el material sedimentado por las bajas velocidades del agua, y evitar que estos elementos se cieguen.
- Llevar a cabo limpiezas periódicas para que la vegetación no tienda a proliferar en su entorno, al tratarse de puntos con un aporte constante de humedad. Esto ayudará a evitar la reducción de capacidad del conducto.
- Identificar las conexiones enterradas, para que cuando se desarrolle la vegetación en su entorno, sean fácilmente identificables.

A3.3 Canales de conexión

Históricamente, en el área del arrozal tienen funciones de alimentación de los campos o de drenaje de los mismos. En el caso de los HHAA, los canales son infraestructuras que los vertebran conectando hidráulicamente las diferentes celdas. No son infraestructuras estrictamente necesarias ya que, por ejemplo, el HHAA del *tancat* de L'illa no dispone de ellos. Sin embargo, su uso permite dotar al sistema de mayor flexibilidad para la gestión hídrica (poder conducir la salida de

una celda a otra celda situada lejos de ella) y se integra mejor paisajísticamente; su abuso, junto con la escasa diferencia de niveles que existe en las parcelas, puede condicionar negativamente la gestión hídrica.

Los canales se diferencian básicamente en dos tipologías según el material del que se forman: excavados en el terreno natural y revestidos.

La excavación de acequias en terreno natural es la forma tradicional de trasegar el agua en este tipo de sistemas, por lo que se conserva en gran parte de estas superficies del arrozal y es la que se ha mantenido en los HHAA. Esta tipología resulta barata de ejecutar, lo cual es un aspecto relevante en estas infraestructuras lineales de gran longitud. En la Figura 27 se muestra un ejemplo de estos canales realizados sobre el terreno de arrozal.

En cuanto a los canales revestidos, se suelen utilizar diferentes tipos de materiales:

- Revestimiento de hormigón realizado in situ, o mediante bloques o gaviones. Con este tipo de revestimiento, la sección transversal del canal suele tener forma de U. Suele utilizarse para acequias de tamaño medio o reducido.
- Revestimiento con escollera. Se suele emplear en canales grandes, con sección trapecial.

Uno de los principales problemas que presentan las acequias tradicionales es su mantenimiento, ya que requieren de un refuerzo de motas cada cierto tiempo para eliminar fugas, y sobre todo, limpiar la vegetación que crece en sus márgenes, ya que reduce la velocidad de la corriente y genera sobre elevación del flujo. En el caso de los HHAA, el crecimiento de la vegetación en los canales es deseable durante los primeros años para mejorar su biodiversidad, pero si la densidad aumenta mucho puede dar lugar a los mismos problemas que en las acequias del arrozal.

La presencia de canales de conexión en los HHAA es interesante en la medida en que permiten transferir agua entre sectores alejados (por ejemplo desde B1E hasta B20), lo que dota de una mayor flexibilidad hidráulica al sistema. Se ha comprobado durante los dos años de operación que esta flexibilidad requiere un mantenimiento de los canales y compuertas que no compensa los posibles beneficios. Los canales de alimentación sí que son necesarios al igual que el canal de salida del sector A (Figura 27 dcha.) mediante cuyas compuertas se puede regular el nivel y el ritmo de vaciado de este sector.

Recomendaciones

Se recomienda minimizar la cantidad de canales de conexión entre celdas y que el flujo sea de una celda a la inmediatamente "aguas abajo" (por ejemplo, en HATM, de B1E a B2E, de B1C a B2C...ver Figura 12) sin intentar llevar el agua a celdas no situadas en la línea (por ejemplo de B1E a B20). La conexión más sencilla entre dos celdas consecutivas es por medio de tuberías directas. Sí que se consideran imprescindibles los canales de alimentación de agua bruta a los sectores A ó B y los canales de recogida del sector A (Figura 27).

Hay que evitar zonas muertas en los canales que produzcan un estancamiento del

agua y den lugar a posibles proliferaciones de fitoplancton.

A3.4 Rejillas de protección

Para evitar el atasco de los puntos de conexión hidráulica entre las celdas, tanto en los conductos enterrados como en los vertederos en abierto, pueden disponerse de rejillas de protección aguas arriba de los mismos. Con ello se impedirá que las cañas, sedimentos o restos de vegetación puedan obstruir la circulación entre parcelas, o bien falsear su medición de caudal (en los puntos aforados) al generar una elevación puntual del nivel cuando pasen a través del mismo.

Figura 28
Imagen de rejilla de protección aguas arriba de un conducto enterrado.



Estas rejillas de protección deben tener un perímetro amplio, para que tarden en obstruirse, y requieren de una limpieza periódica, para evitar que lleguen a cegarse. También se necesita fijar de forma fiable la rejilla al lecho, lo cual no resulta sencillo al tratarse a menudo de materiales muy sueltos, formados con sedimentos de partículas finas. La fijación puede soltarse cuando la vegetación queda enganchada en la rejilla, pues actúa de pantalla, ofreciendo una mayor resistencia ante la corriente.

Figura 27

Imágenes de canales de conexión: excavados en el terreno natural (izda.) y revestidos (dcha.).



La altura sobre la lámina de agua debe de ser de unos pocos centímetros, para que las aves que puedan acceder dentro accidentalmente puedan salir sin problemas.

Estas rejillas pueden aportar un beneficio ambiental en tanto en cuanto pueden limitar el paso a los HHAA de peces de talla grande, que pueden alterar el crecimiento de macrófitos sumergidos por depredación y resuspender sedimentos.

Lecciones aprendidas

La experiencia que se ha tenido respecto a este tipo de rejillas ha mostrado que su frecuente limpieza es un aspecto crucial a tener en cuenta en los programas de gestión para evitar incertidumbres en las mediciones. A veces se producía un taponamiento por exceso de carga flotante, que al soltarse, generaba una variación brusca de nivel en el vertedero, falseando la medida de caudal. Es decir, que estas rejillas pueden generar indirectamente un funcionamiento a modo de pulsos en el vertedero cuando la limpieza no se realice correctamente.

Recomendaciones

Únicamente se requiere instalar este tipo de protecciones si se instala un caudalímetro por ultrasonidos o sonda de nivel en el interior de las tuberías. No se trata por consiguiente de un elemento necesario e imprescindible en el HA sino que puede emplearse puntualmente.

A4 EQUIPOS

A4.1 Motores de bombeo

Las bombas permiten la gestión hídrica del HHAA y son imprescindibles, ya sea para la introducción de agua, la evacuación o ambas actividades. De manera tradicional, en los *tancats* de arroz tan solo se requiere bombeo para vaciar los campos, ya que el llenado se realiza por gravedad. En los HHAA de l'Albufera encontramos que el único de los tres que funciona hidráulicamente como un *tancat* clásico es el de la Pipa, mientras que los de Milia y L'Illa requieren bombeos de entrada al haber elevado cerca de 1 metro el sector subsuperficial.

Es recomendable que las bombas de entrada sean de caudal variable (con variador de frecuencia) y al menos sean instaladas por duplicado como mínimo, para que siempre exista una bomba de repuesto que funcione en caso de avería o mantenimiento de la bomba principal. El caudal de bombeo dependerá del caudal de funcionamiento pero suelen ser de alto caudal, hasta 500 l/s, y de unos pocos metros de columna de agua de elevación.

Con respecto a la evacuación, la tendencia en los motores de los arrozales es a evacuar el agua lo más rápidamente posible, por lo que siempre se ha tendido a instalar sistemas de bombeo de alto caudal. Esto no es tan necesario en los HHAA, en los que el agua ha de ser evacuada de una forma más regular y a caudales más bajos. Es importante disponer de alguna bomba de evacuación de alto caudal, como las de la entrada, pero también de bombas de caudal más próximo al ordinario que se puede encontrar a la salida de los HHAA: entre 20 – 60 l/s. El motivo es que la situación ideal para el medio receptor (lago de l'Albufera o Estany de la Plana) es aquella en la que el bombeo de salida sea lo más continuo posible.

A4.2 Sistema de control SCADA

Los sistemas de control automático de las bombas son elementos imprescindibles hoy en día en todo tipo de instalaciones. Los HHAA, pese a ser infraestructuras muy sencillas, también deben disponer de sistemas de adquisición, supervisión y control de datos (SCADA) para el control y programación de los bombeos por ordenador (Figura 29). Si además se dispone de conexión wifi, el control diario del bombeo se puede hacer a distancia, sin necesidad de que el operario tenga que desplazarse a la instalación.

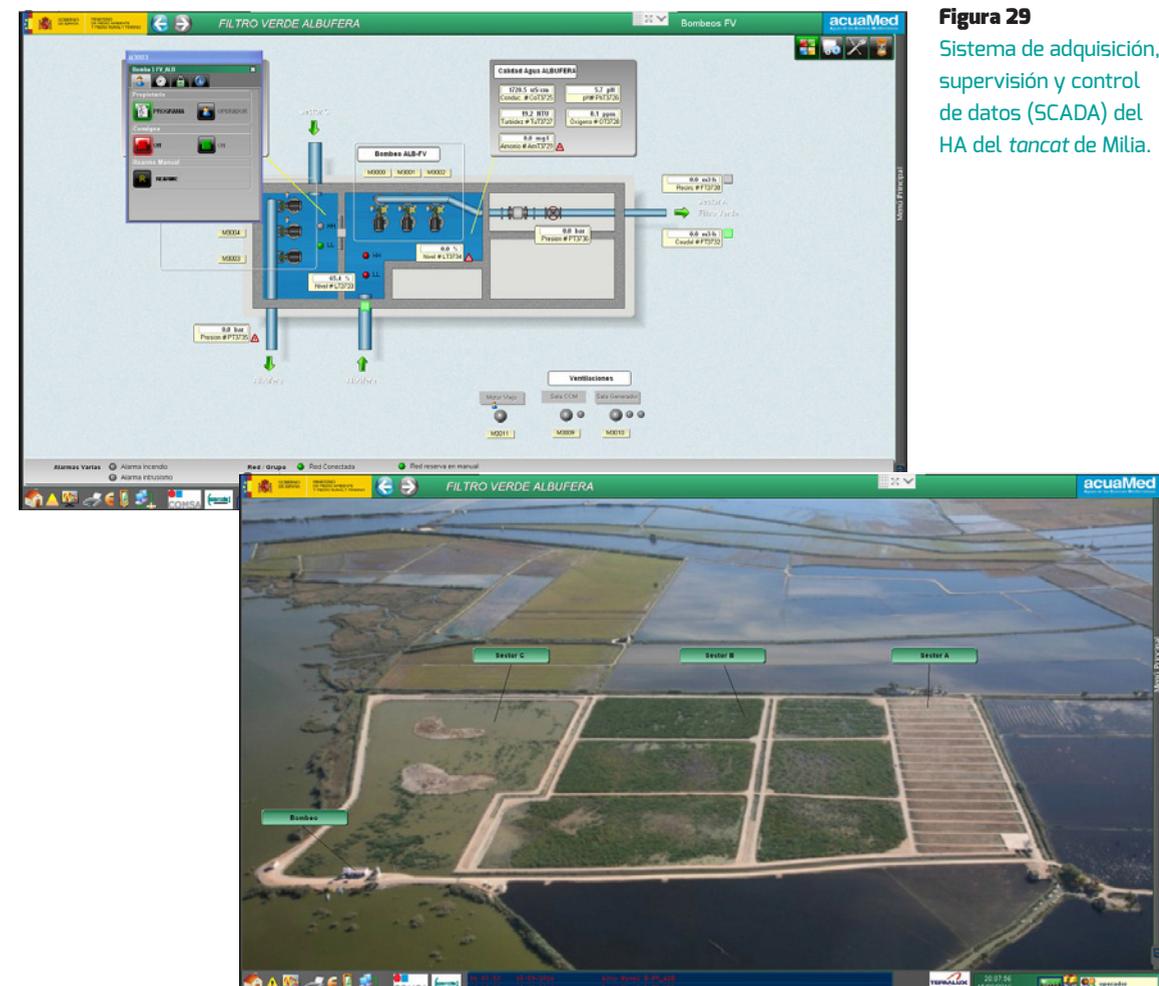


Figura 29
Sistema de adquisición, supervisión y control de datos (SCADA) del HA del *tancat* de Milia.



B

Gestión de humedales artificiales. Operación

B1 VARIABLES HIDRÁULICAS

A continuación se exponen las principales variables hidráulicas que es necesario definir durante el periodo de operación de un HA. Ha de tenerse en cuenta que, a pesar de que se presenten de manera individual, todas estas variables están interrelacionadas, y fijar una o varias de ellas determina directamente el valor de las restantes (Figura 30).

Los valores de estas variables están fuertemente conectados con los objetivos que persigue cada HA. Es necesario conocer las necesidades específicas de las especies a proteger (por ejemplo el calado), o los condicionantes de los elementos (vegetación) que constituyen los hábitats que se pretenden regenerar, así como las eficiencias deseadas en los procesos de eliminación de contaminantes (por ejemplo nutrientes), para poder definir una gestión hidráulica del humedal acorde a las mismas.

B1.1 Carga hidráulica superficial (CHS)

Se define la carga hidráulica superficial (CHS) como el volumen de agua tratado por unidad de superficie y por unidad de tiempo. Las unidades habituales para esta variable son m³/m²/d. Cuanto mayor sea este parámetro, mayores cantidades de agua se estarán tratando, ya que la superficie de las celdas es un parámetro constante una vez construido el HA. Sin embargo, si el valor de CHS supera un determinado máximo, los rendimientos de eliminación de nutrientes pueden verse disminuidos significativamente, y el funcionamiento hidráulico del humedal no ser el adecuado. Este máximo no es un valor que pueda conocerse a priori, y la elección de la CHS también ha de tener en cuenta la calidad de partida del agua a tratar (concentraciones de nutrientes, cantidad de sólidos suspendidos, etc.). En la Tabla 6 se muestran algunos valores típicos de este parámetro

CHS (m ³ /m ² /d)	Tipo de agua	Tipo de Humedal Artificial	Referencia
0.033 – 0.120	Eutrófica	Superficial	Dunne <i>et al.</i> 2015
0.019 – 0.129	Eutrófica	Superficial	Martin <i>et al.</i> 2013
0.140 – 0.155	Agua fluvial afectada por áreas urbanas y agrícolas	Superficial	Nairn y Mitch, 2000
0.190 – 0.382	Escorrentía urbana	Superficial; Subsuperficial	Terzakis <i>et al.</i> 2008
0.068	ARU (efluente de tratamiento terciario)	Subsuperficial	Martin <i>et al.</i> 2013b
0.050	ARU (efluente de tratamiento primario)	Superficial; Subsuperficial; macrófitas en flotación.	Hijosa-Valsero <i>et al.</i> 2010

para distintas aplicaciones; se puede observar que las CHS para ARU suelen ser menores, debido a la mayor carga contaminante que contienen.

Una vez fijado el calado de la celda, mediante tabloneros por ejemplo, éste depende también de la CHS. No es sencillo determinar qué calado adquiere el agua en el interior de una celda para una CHS determinada ya que depende, por ejemplo, de la rugosidad del fondo o la frondosidad de la vegetación y del número de compuertas de salida, pero está claro que a mayor CHS, mayor calado. Variaciones bruscas de la CHS pueden dar lugar a variaciones bruscas de calado –de hasta 12 cm en el caso específico del sector B de HATM- y repercutir significativamente en la avifauna, en la época de nidificación por ejemplo.

También el valor de la CHS está relacionado con el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH, que se define más adelante). Si no se varía el calado, altas CHS suponen menores tiempos de retención, por lo que se reduce el tiempo de contacto entre el agua y los microorganismos o plantas encargados de los procesos de asimilación y transformación de nutrientes y otras sustancias.

En algunos casos, además, es posible que mantener las CHS óptimas en las celdas o sectores de un HA, suponga introducir una cantidad de agua total al sistema que otros sectores no sean capaces de admitir (por ejemplo, los sectores subsuperficiales, por los que el agua discurre a través de un medio poroso y, por tanto, más lenta que en los su-

perficiales). Por otro lado, puede ocurrir que esta cantidad de agua suponga costes excesivos de operación, en los casos en los que el agua ha de introducirse en el HA mediante bombeo.

Lecciones aprendidas

Basándose en experiencias previas en el HATP, y de los resultados obtenido en los dos años de monitorización, se puede proponer una valor adecuado para la CHS en este tipo de sistemas entre 0.05 y 0.10 m³/m²/d. Debido a los condicionantes impuestos por los HHAA, el valor de CHS ha variado de unos sectores a otros, con máximos en torno a los 0.150 m³/m²/d y valores mínimos de 0.005 m³/m²/d.

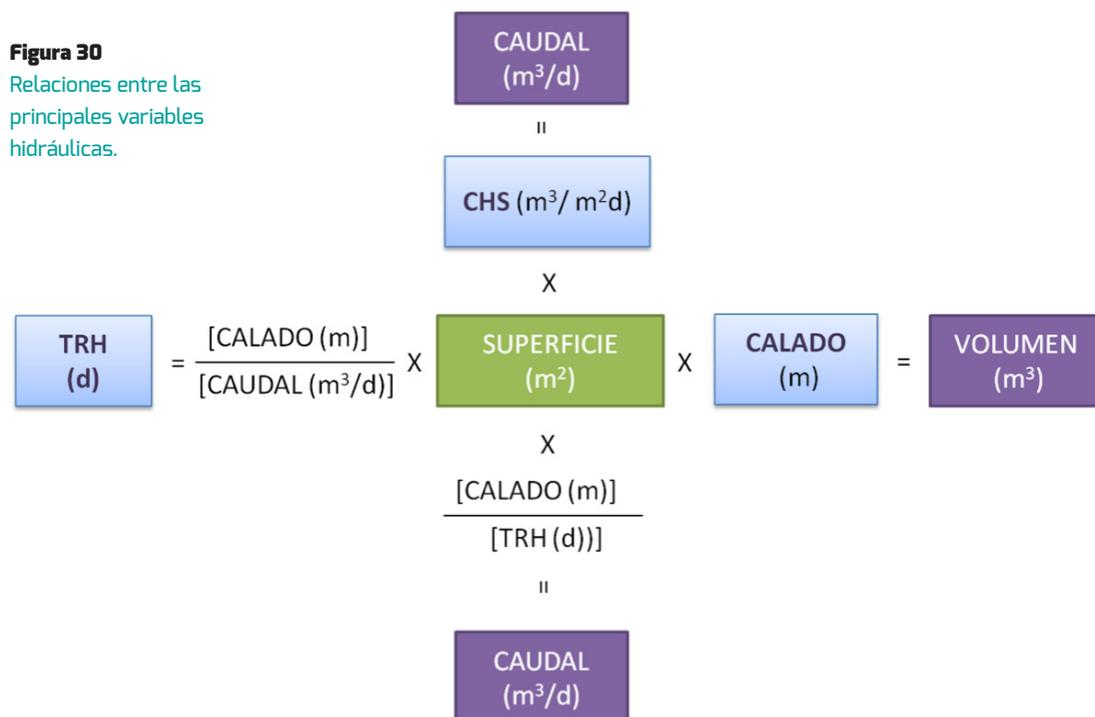
Los sectores subsuperficiales pueden colmatarse si las CHS son muy elevadas y la concentración de SST del agua es alta, pero no se ha dado el caso en los HATM y HATLI.

En cuanto a los costes de operación, en HATM y HATLI, donde el agua entra por bombeo, el valor de CHS sí ha tenido en cuenta estos costes.

El mantenimiento de una CHS constante es bastante difícil si la alimentación al sistema es por gravedad y se producen oscilaciones de nivel significativas en la captación. En ese sentido, aunque los sistemas de bombeo requieren más inversión y mantenimiento sí que aseguran la CHS adecuada. En todo caso hay que recordar que la inercia de estos sistemas es muy grande por lo que hay

Tabla 6
Valores de CHS encontrados en la bibliografía para distintos tipos de agua problema.

Figura 30
Relaciones entre las principales variables hidráulicas.



que valorar si realmente es significativo que durante un par de días (tiempo entre revisiones de caudales de entrada en sistemas de gravedad) el caudal que haya entrado en el HA sea superior o inferior al que le hubiera correspondido.

En sistemas naturales tan extensos, la evapotranspiración juega un papel muy importante en el balance hídrico (ver apartado de caudales). Al reducirse el caudal que circula a través de las celdas, también se reduce la CHS, que será menor a la entrada que a la salida. Si, por ejemplo, la CHS de entrada se fija en 100 l/m²/d y la evapotranspiración es de 8 mm/día, la CHS a la salida será de 92 l/m²/d, por lo que este proceso está reduciendo la CHS media en toda la superficie en un 4%. La influencia relativa de la evapotranspiración depende del valor de la CHS ya que si, por ejemplo, se fija en 20 l/m²/d, la misma evapotranspiración anterior reducirá la CHS a la salida en un 40% y la media en un 20%. Esta situación hay que tenerla en cuenta a la hora de interpretar los resultados y en el caso de que la desviación relativa entre la entrada y la salida sea muy importante habrá que aumentar el caudal de entrada.

Se ha demostrado que en el intervalo de CHS con el que se ha trabajado en este proyecto, la mejora de la calidad de las aguas en sus aspectos físico-químicos y planctónicos ha sido evidente. En este sentido, cabe destacar que es difícil distinguir la influencia

de la CHS sobre la eficiencia de los HHAA, ya que otros factores como la cobertura vegetal y la concentración de entrada estaban ejerciendo su influencia al mismo tiempo. En la Tabla 7 se muestran los resultados de porcentaje de reducción de contaminantes para diferentes rangos de CHS, separando los sectores por su grado de cobertura vegetal, ya que se ha comprobado que éste es un factor muy importante. A grandes rasgos se puede concluir que para contribuir a uno de los objetivos de los HHAA, reducir fitoplancton y materia en suspensión, es conveniente trabajar a CHS superiores a 0.050 m³/m²/d. En el caso de que el objetivo fuera reducir nitrógeno, sí que resultaría recomendable aplicar CHS inferiores; en este proyecto se obtuvo una eficiencia sensiblemente superior para CHS menores de 0.025 m³/m²/d.

No obstante, como se puede observar en la Tabla 7, la masa que entra al sistema por unidad de superficie y tiempo (CMS_{inf}) aumenta al aumentar la CHS. Por tanto, se da el caso de que, aunque la eficiencia de eliminación de NT sea menor para CHS altas, al estar tratando mayor cantidad de agua se está consiguiendo una mayor velocidad de eliminación de nitrógeno por unidad de superficie y tiempo (mg/m²/d).

También se ha observado que la CHS no afecta por sí misma a la vegetación ni a la avifauna salvo cuando afecta al calado.

Hay que tener muy presente que los porcentajes de eliminación indicados corresponden a cargas másicas de entrada relativamente bajas, lo que viene dado por el carácter eutrófico de las aguas de l'Albufera.

Recomendaciones

A la hora de operar un HA, es conveniente buscar CHS de referencia según el tipo de agua a tratar y las eficiencias de eliminación de nutrientes deseadas. A continuación, ese valor de referencia ha de corregirse en función de las características específicas del HA (superficie, capacidad de trasegar caudales en caso de sectores subsuperficiales, costes de operación en función de los caudales/volumenes que esos valores suponen, etc.).

Se recomienda en sistemas alimentados por gravedad que se corrija el caudal de entrada para ajustar la CHS si se ha observado una desviación significativa del valor fijado durante los días anteriores debido a oscilaciones de niveles y también en aquellos periodos con alta evapotranspiración.

La extrapolación de los porcentajes de eliminación a otros problemas ambientales (por ejemplo, reducción de altas concentraciones de nitratos procedentes de escorrentías agrícolas) debe realizarse con precaución. El carbono disponible en el medio acuático es limitante en el proceso de desnitrificación (eliminación de nitratos), por lo que si este proceso puede ser importante en el global de eliminación de nitrógeno, hay que evaluar la disponibilidad de carbono. En el caso de que las aguas no lo lleven o no lleven el suficiente como para producir la desnitrificación de todo el nitrato, deberán ser los residuos orgánicos de las plantas y/o algas que colonicen el medio las que deberán proporcionarlo. Por ello, y enlazando con la gestión de la vegetación, no se recomienda el cosechado más que cuando ya se haya observado un aporte

suficiente de carbono al medio acuático. En el caso de las aguas eutróficas, éstas contienen carbono fitoplanctónico que puede ser empleado por bacterias en los procesos de desnitrificación tras la muerte de las algas.

B1.2 Caudales

Los caudales de entrada al HA son función de las CHS definidas para cada HA y del sistema de entrada. Si la entrada se produce por gravedad, con una apertura de compuertas fija se puede mantener un caudal sensiblemente constante a lo largo del día. Si, por el contrario, la entrada se produce por bombeo, se puede introducir un caudal mayor durante menos tiempo de bombeo al día.

La entrada de agua por gravedad al HHAA, a la manera tradicional de los *tancats*, obliga a un control constante de los niveles en la zona de captación ya que se ha comprobado, por ejemplo, que en el Bco. del Poyo se han producido bajadas de nivel del orden de varios centímetros en dos días (hay que recordar que la Albufera está regulada como un embalse por parte de la Junta de Desagüe). Si a este hecho se le añade que cada disminución de 1 cm en el nivel del Bco. del Poyo implica, aproximadamente, una reducción de 7 l/s de caudal se puede entender la importancia del control de niveles en la captación.

Se ha de tener en cuenta la capacidad de los sectores de entrada para trasegar flujo. En los sectores superficiales no suele haber problema para evacuar los caudales con los que se ha estado trabajando (del orden 10-100 l/s) pero, en los sectores subsuperficiales, si se bombean caudales demasiado altos durante varias horas, el calado en la sección de entrada puede subir muy rápidamente porque en la zona porosa no se pueden alcanzar velocidades elevadas, y el agua puede empezar a fluir por la superficie del

Tabla 7
Resultados de porcentaje de eliminación de contaminantes (% Elim.) para diferentes CHS (m³/m²/d) y sus correspondientes cargas másicas superficiales de entrada (CMS_{inf}, mg/m²/d, para Clorofila a µg/m²/d).

Carga Hidráulica superficial (CHS)	Nitrógeno Total		Fósforo Total		Fitoplancton (Clorofila a)		Sólidos en suspensión	
	CMS _{inf}	% Elim.	CMS _{inf}	% Elim.	CMS _{inf}	% Elim.	CMS _{inf}	% Elim.
Sectores con alta cobertura vegetal (>50%)								
<0,025	63	75	3.7	50	664	43	623	62
0,025-0,050	138	53	11.4	45	1660	29	1729	80
0,050-0,075	245	55	11.8	34	5016	75	2873	79
0,075-0,150	390	55	16.7	42	7335	79	4619	78
Sectores con baja cobertura vegetal (<50%)								
<0,025	29	53	0.8	-39	302	-46	113	25
0,025-0,050	104	36	7.5	0	1757	13	1050	4
0,050-0,075	152	30	12.5	11	2030	42	1605	-9
0,075-0,150	519	52	34.2	13	5572	55	5267	26

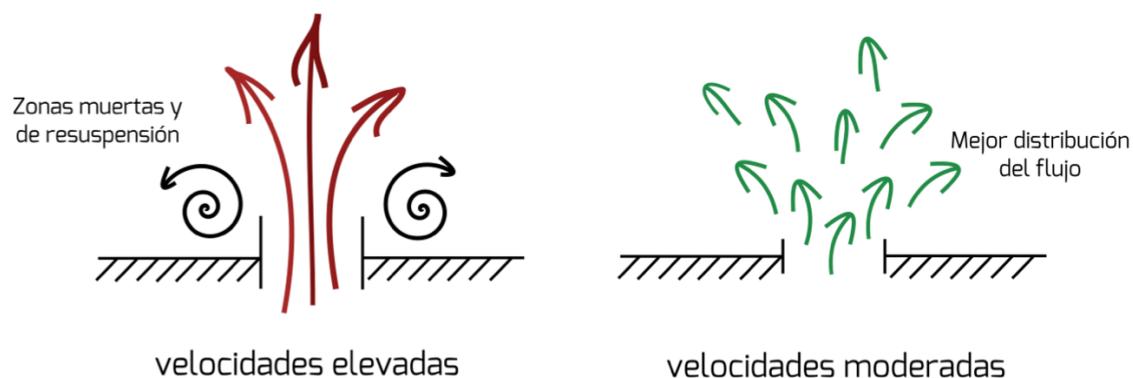


Figura 31
Ilustración de la influencia del caudal circulante sobre la distribución del flujo.

sector. Esta situación en la que el agua alimentado circula por encima del lecho de gravas es absolutamente indeseable en un HA subsuperficial que tratara aguas residuales urbanas, pero en el caso de HA subsuperficial destinado a tratar aguas eutróficas no es tan preocupante ya que la inundación finaliza a poco de cesar el bombeo, dependiendo de la permeabilidad del lecho de gravas.

En general, es preferible que los caudales de entrada a través de cada compuerta no sean elevados. Los caudales altos pueden generar corrientes rápidas en las entradas del sector (Figura 31), mientras que caudales más pequeños permitirán un mejor reparto del agua en la zona de entrada, a lo largo de todo el ancho del sector (véase a este respecto lo que se indica en el apartado de compuertas).

Lecciones aprendidas

En los HATP y HATLI, la gestión normal de los caudales de entrada ha sido relativamente sencilla. En el caso de HATP, las entradas disponían de vertederos triangulares que permitían aforar el caudal de entrada de una manera sencilla, por lo que si se detectaba un caudal diferente al previsto bastaba con abrir o cerrar manualmente la válvula. En HATLI, las bombas disponen de variador de frecuencia, lo que permite regular su caudal entre 100 y 400 m³/h de una

manera sencilla, además de disponer de un caudalímetro que permite conocer el caudal de entrada al sistema.

Sin embargo, el HATM únicamente dispone de tres bombas de velocidad constante, en las que el volumen bombeado no puede regularse con flexibilidad, resultando en un valor demasiado elevado para la capacidad del sector A incluso con una sola bomba. El bombeo habitual ha sido de unos 3200 m³/d distribuidos en unas 8 horas, lo que hace un caudal horario de 400 m³/h, que divididos entre 180 m de longitud de HA hace una carga hidráulica lineal de 2,22 m³/m h. Este régimen de funcionamiento provocaba la inundación de los primeros 10 metros longitudinales de las celdas centrales. Cuando cesaba el bombeo empezaban a bajar los niveles en todo el sector A, consiguiéndose un funcionamiento mixto de humedal subsuperficial horizontal y vertical con una diferencia de calados de unos 15 cm.

Manteniendo el mismo valor diario de CHS, con un caudal horario menor y bombeando durante un mayor número de horas, se habría evitado que se produjeran situaciones de flujo superficial en el mansector A, haciendo que funcionara como subsuperficial horizontal.

Con respecto al caudal de salida también conviene hacer algunos comentarios ya que

en HATP y HATM este caudal es bombeado por medio de bombas de alta capacidad. En HATP, la capacidad de las bombas de evacuación es tan alta que en pocos minutos vacían el pozo de bombeo, provocando el arranque de las bombas numerosas veces al día y unos consumos energéticos muy elevados. Se ha ensayado con éxito temporizar la apertura de la compuerta de paso desde el HA al pozo de bombeo para que permanezca cerrada durante el día y se abra durante la noche, lo cual permite evacuar el caudal de forma más continua. Ello implica el uso de parte final del HATP (canales de salida y sectores C) como depósitos de almacenamiento puesto que sus niveles suben durante el día y bajan durante la noche. Como se ha comprobado que estas fluctuaciones de nivel son muy pequeñas y no afectan a la biodiversidad, la solución es muy ventajosa ya que, además, se puede aprovechar la tarifa nocturna. HATM funciona de manera similar ya que evacúa directamente el agua desde el sector C y hace que sus niveles fluctúen.

Recomendaciones

Los caudales de entrada y los circulantes entre los sectores de los humedales dependen de los sistemas de alimentación y de las CHS.

La principal recomendación que puede realizarse al respecto es disponer de sistemas de alimentación tan versátiles como sea posible, de manera que pueda definirse el valor del caudal de entrada a lo largo del día (sea o no constante), y que no se superen ni las capacidades para trasegar agua de los distintos sectores, ni que los picos de caudal sean tan altos como para que generen condiciones hidrodinámicas no deseables a la entrada de los mismos (altas velocidades en flujo superficial, inundaciones en flujo subsuperficial...).

Otra recomendación en sistemas alimentados por gravedad es construirse una gráfica

de la variación anual de niveles de agua en la zona de captación, para saber en qué época del año hay que estar más pendientes de la regulación de las válvulas de entrada. A la vez, calcular la reducción de caudal que se deriva de cada centímetro menos de nivel. Y si es posible, automatizar la apertura de las válvulas de entrada en función del nivel de la captación.

En sistemas de bombeo de salida similares a los de HATP y HATM se recomienda instalar varias bombas iguales, con variador de frecuencia para que puedan funcionar de manera continua la mayor parte del tiempo posible. Un caudal razonable para este tipo de sistemas sería de unos 100 m³/h y una capacidad máxima por bomba de 500 m³/h. Para mantener todas las bombas activas, y evitar averías asociadas al no uso, se recomienda ir alternándolas.

B1.3 Volumen a introducir

A nivel operativo y dado que las escalas de tiempo en las cuales se está trabajando con este tipo de infraestructuras son del orden de semanas, una magnitud interesante a manejar es el volumen de agua que se introduce en una semana o en un mes. Este volumen a introducir en cada sistema depende del resto de las variables hidráulicas y las características del HA, aunque es el parámetro que guíe las operaciones semanales de entrada y salida de caudales de los HHAA.

Es decir, el operador contará con un valor objetivo de volumen a inyectar en el HA durante un periodo de tiempo determinado (por semana o mes), que junto con otras variables como el caudal de entrada en las celdas y/o el calado en las mismas, permitirán mantener los valores de CHS y TRH definidos en la estrategia de gestión.

Lecciones aprendidas

Los volúmenes totales tratados por los distintos HA han sido muy diferentes, como lo son las dimensiones de los mismos.

Para los responsables de la gestión diaria de los sistemas, contar con un volumen semanal objetivo ha resultado útil, porque ha permitido ajustar bombeos y aperturas de compuertas a lo largo del proyecto.

El aforo y/o la correcta estimación de los volúmenes realmente tratados es de suma importancia cuando se trata de describir cuantitativamente los rendimientos de los HA. Tan importante ha sido comprobar cuánta agua entraba al sistema, cómo el reparto de volúmenes entre las distintas celdas y, finalmente, comprobar en qué medida el agua que entra al sistema acaba saliendo del mismo.

Sucede con más frecuencia de la deseada que se producen interrupciones o reducciones en el caudal de entrada: fallos en el suministro eléctrico, descenso de niveles en la captación, acumulación de vegetación en la boca de entrada, etc. En estos casos hay que aportar el caudal necesario los días siguientes de manera homogénea para llegar al objetivo del caudal semanal/quincenal/mensual. Dado que los tiempos de residencia en los HHAA son del orden de días, y si se cuenta con los sectores C del orden de semanas, la distorsión que se produce no es muy significativa.

Recomendaciones

A la hora de diseñar un HA, el volumen a inyectar suele venir determinado por el resto de variables hidráulicas definidas anteriormente. A la hora de gestionar un HA, es imprescindible proporcionar valores objetivos de volúmenes de entrada a los responsables de la operación diaria de los mismos.

Como se comenta más adelante en el apartado de control/monitorización, para la correcta estimación de los volúmenes de entrada y salida del humedal, y de cada uno de sus sectores, es necesario llevar a cabo una monitorización periódica. La recomendación para el control de caudales (empleando las metodologías/herramientas que se describen en el apartado C) es diferente según se trate de HHAA en los que el agua se introduzca por gravedad o por bombeo. En este segundo caso, al disponer de un control total sobre la entrada, el seguimiento de los caudales se recomienda que se realice al menos dos veces a la semana durante los dos primeros meses. Si tras este periodo no se observan diferencias significativas, se puede reducir a un control semana. En el primer caso, el seguimiento dependerá de las fluctuaciones de nivel en la captación de agua y será necesario fijar la frecuencia a partir del conocimiento que se disponga de las fluctuaciones de nivel.

La aportación del caudal necesario para compensar el mal funcionamiento puntual debe hacerse de forma regular para que no se produzcan incrementos de nivel o caudal excesivos ni se reduzca en exceso el TRH. Se recomienda aportar como caudal de compensación no más del 30% de caudal diario. Por ejemplo, supóngase que en un día determinado, de las ocho horas de bombeo diario a razón de 400 m³/h solo se han bombeado 3 horas, por lo que faltan 2000 m³ por introducir; la recomendación es que en los dos días siguientes se bombee durante 10 horas y en el siguiente durante 9 horas.

B1.4 Calados

El calado en cada sector es un parámetro fundamental, desde los tres ámbitos de actuación que abarca este proyecto: calidad de aguas, mejora de hábitats, conservación favorable de

aves ya que puede ser fijado (siempre dentro de los límites establecidos en el diseño) a voluntad del gestor del espacio.

Desde el punto de vista de la calidad del agua, el calado define el volumen de agua dentro del sector, una vez fijada la superficie en la fase de diseño y posterior construcción. Seleccionado el caudal de entrada, un mayor o menor calado hace mayor o menor el tiempo que pasa cada gota de agua dentro del sector al hacer mayor o menor el volumen disponible. Esa relación entre volumen y caudal de entrada, un tiempo al fin y al cabo, se conoce como tiempo de retención hidráulico (TRH), y ha de ser suficiente para que puedan darse todas las reacciones físico-químicas-biológicas necesarias para la eliminación del contaminante de interés dentro del sector.

Desde el punto de vista de los hábitats, hay que tener en cuenta que cada especie (ya sea vegetal o animal), tiene unas "preferencias" respecto a los niveles de agua, o calados. Por ejemplo, hay plantas que necesitan un terreno húmedo, pero no completamente saturado ni inundado, para poder desarrollarse en sus primeras etapas de vida. Otras plantas pueden crecer en zonas inundadas, pero si los calados son pequeños, los brotes tiernos están muy expuestos a la predación. En sectores con superficies del orden de hectáreas, la batimetría (o forma del fondo del sector) puede hacer posible la coexistencia de zonas con calados profundos y otras zonas más someras, con el mismo nivel de agua dentro del sector (Figura 32). Esto permite mayor diversidad de hábitats dentro de un mismo humedal. Para más información sobre la relación entre calados y hábitats se recomienda consultar el "Manual técnico para la gestión de la vegetación en humedales restaurados para la mejora del hábitat y de la calidad del agua", dentro de esta misma colección.

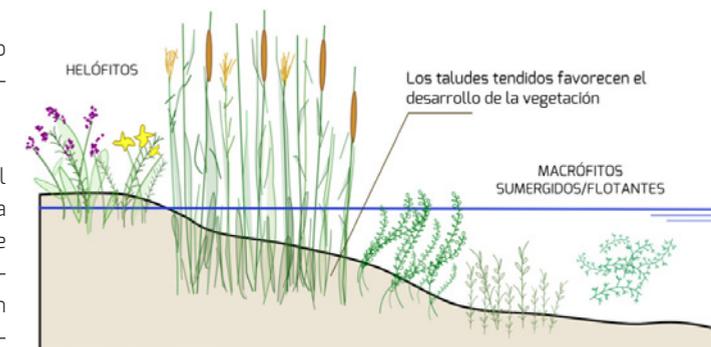


Figura 32
Perfil de un humedal con taludes tendidos y diversidad de especies vegetales (adaptado de varios autores).

Desde el punto de vista de las aves acuáticas, dada la variedad de especies que utilizan estos espacios existen especies que se benefician de los distintos calados que se puedan establecer. Así, zampullines, somormujos, focha común y moruna, junto a anátidas buceadoras como el pato colorado, porrón europeo o malvasía cabeciblanca, se establecen en zonas profundas con calados grandes. Por el contrario, especies que se alimentan en estos espacios durante los períodos de migración, como los andarríos, correlimos, archibebe o agujas prefieren zonas someras, pudiendo nidificar en el caso de cigüeñuelas, avocetas o chorlitejos. De la misma manera, una gestión de calados que permita el desarrollo de vegetación densa favorecerá la nidificación de algunas de estas especies, y la reducción de la probabilidad de predación de nidos y crías. Una vez desarrollada una buena cobertura de vegetación, el mantenimiento de calados profundos (mayor de 50 cm) tiene la utilidad de reducir la intensidad de uso y alimentación del calamón, especie típica de los humedales mediterráneos. En el caso de celdas con poco calado, las concentraciones de calamón fuera del período de cría pueden llegar a reducir notablemente la cobertura en poco tiempo e impedir la regeneración natural de esta vegetación en el período de rebrote, especialmente en el caso de la enea. Por ello, es imprescindible establecer de manera previa a la programación de la gestión hidráulica los objetivos de gestión de avifauna del humedal, y evaluar las posibles interferencias que los objetivos de gestión de

ambos aspectos (agua y aves) puedan dar a lugar. Para más información sobre la relación entre calados y hábitats se recomienda consultar el "Gestión de la avifauna para la mejora de su estado de conservación", dentro de esta misma colección.

En sectores de tipo superficial, la forma más sencilla de mantener un calado constante dentro de la celda es colocando tabloncillos, como ya se comentó en el apartado A3.1. No obstante, hay que tener en cuenta que sobre el tablón, el agua que sale tiene cierta altura que depende del caudal (altura sobre vertedero), por lo que el calado real será el establecido con el tablón (constante) más, al menos, la altura sobre el vertedero. Cuantas más compuertas de salida tenga el sector menor será la altura sobre vertedero y menos influirá el caudal sobre el calado. Éste es un motivo más, además de para mejorar la hidrodinámica del sector como se comentó en el apartado A3.1, para disponer de varias compuertas de salida.

En sectores de flujo subsuperficial horizontal, el calado está condicionado por la profundidad de las raíces de las plantas que crecen en superficie: lo ideal es que el calado sea similar a la profundidad radicular típica de las plantas, ya que así todo el espesor de gravas estará ocupado por raíces (cuando el sistema haya alcanzado la madurez) y el agua circulará de forma más homogénea. Si las raíces no alcanzaran el fondo, se establecería un flujo preferente del agua en esa zona profunda, ya que la resistencia al flujo sería menor y se produciría una disminución del TRH real.

En general, los calados en los HA suelen oscilar entre los 20 cm de los HHAA del *tancat* de la Pipa y 50 cm en el *tancat* de L'illa, intervalo que se puede considerar adecuado para el diseño de estos sistemas.

Lecciones aprendidas

La regulación de calados en los HA del proyecto LIFE ha sido, en general, difícil. Los calados se han mantenido ligeramente por encima (HHAA superficiales en HATM) o por debajo (HATP) de los definidos inicialmente, pero dentro de los límites normales de este tipo de sistemas. En algunos casos, sobre todo en los HA con funcionamiento discontinuo, se han observado variaciones de varios centímetros a lo largo del mismo día.

Las celdas de los tres *tancats* están muy interconectadas, lo cual permite una gran versatilidad en el funcionamiento del HA, pero en la mayoría de los casos, las compuertas que separan los diferentes sectores no eran estancas, o directamente no existían, como en el caso de los tubos de conexión del HATLI. Esta falta de compuertas (recordemos que en HATLI las conexiones son mediante tuberías enterradas) hace que los calados de los sectores no puedan ser independientes; es más, el calado de trabajo normal está determinado por el calado que se debe alcanzar el sector C para desaguar en el Estany de la Plana por gravedad.

A menudo se ha tenido que recurrir a cerrar varios sectores a la vez con el objetivo inicial de que únicamente uno de ellos permaneciera

seco (en el caso de HATLI habría que secarlos todos a la vez). A esto se le une el flujo de agua debido a la conectividad lateral subterránea a través de las motas, por la imposibilidad de utilizar materiales impermeables dentro del Parque Natural. En otros casos, como en el HATM, se decidió eliminar la conexión entre varios sectores mediante terraplenes colocados en los propios canales de reparto.

Recomendaciones

Por una parte, es imprescindible disponer de sistemas (como por ejemplo, tabloncillos o vertederos) en la salida de las celdas para poder definir un nivel mínimo en el sector, pero también hay que tener en cuenta que las posibles fugas laterales y la evapotranspiración pueden hacer descender los calados por debajo de los mínimos fijados, si el caudal de entrada no es suficientemente grande.

Si la regulación del calado se hace mediante tabloncillos superpuestos, es necesario que estos tengan un tamaño entre 5 y 10 cm. Mayores tamaños llevarían a una regulación demasiado grosera, mientras que menores tamaños no suponen una mejora sustancial de la regulación y son menos prácticos.

Si los niveles deseados de calados en los distintos sectores del HA son muy diferentes, es imprescindible independizarlos entre sí, por lo que una gran conectividad hidráulica puede dificultar estas tareas, si las conexiones no son estancas cuando se cierran.

B1.5 Tiempo de retención hidráulico (TRH)

El término "tiempo de retención hidráulica" se refiere al tiempo que permanece el agua dentro de un sector. En teoría, podría calcularse como el volumen almacenado en un sector, dividido entre el caudal de entrada

al mismo (suponiendo que éste sea igual al de salida), y corresponde a un TRH teórico medio (también denominado nominal). Esto supondría que todas las gotas de agua que entran al sector permanecen dentro del mismo el mismo tiempo.

Sin embargo, este TRH nominal no es real, ya que dentro de cada sector existen zonas de flujo preferente (por donde el caudal circula más rápido) y zonas muertas, donde el agua tiene poca velocidad y se renueva más lentamente.

El TRH real de cada sector depende en gran medida de la forma del mismo, de la localización de las entradas y salidas, y de la presencia de obstáculos que dificulten zonas de flujo preferente (el equivalente a cortocircuitos hidráulicos en terminología de tratamiento de aguas).

Así, una entrada del agua muy distribuida a lo largo de todo el ancho de la celda, una adecuada relación de aspecto (véase apartado A2), y la presencia de vegetación favorecen TRH reales más próximos a los nominales.

Lecciones aprendidas

Pese a que no se han llevado a cabo experiencias específicas para calcular los TRH reales en todos los sectores de los HHAA (en el apartado C1.4 se comenta más sobre este tema), algunas mediciones realizadas con la instrumentación de monitorización en continuo de varios sectores del HATP muestran indicios de que los TRH nominales podrían ser superiores a los reales.

Por ejemplo, en la Figura 33 se observa la evolución de niveles de agua a la entrada y a la salida del sector fp del HATP, donde se observa una subida rápida de nivel a la entrada, y su réplica a la salida aproximadamente un día después. El TRH teórico de

Tabla 8
Calados tolerables y profundidad radicular aproximados de las plantas empleadas en el proyecto (fuente: *Cooper et al. 1996; **Kadlec et al. 2000).

Planta (nombre científico)	Profundidad radicular (en subsuperficiales)* (m)	Calado máximo (nivel de inundación, en superficiales)** (m)	Duración de la inundación** (%)
Carrizo (<i>Phragmites australis</i>)	>0.6	<0.05 – 0.50	70-100
Enea (<i>Typha spp.</i>)	0.3 – 0.4	0.10 – 0.75	70-100
Lirio (<i>Iris spp.</i>)	-	<0.05 – 0.20	50-100
Juncos (<i>Juncus spp.</i>)	0.6-0.9	<0.05 – 0.25	50-100
Esparganio (<i>Sparganium spp.</i>)	-	0.10 – 0.50	70-100
Ceratófila (<i>Ceratophyllum spp.</i>)	-	>3	75-100

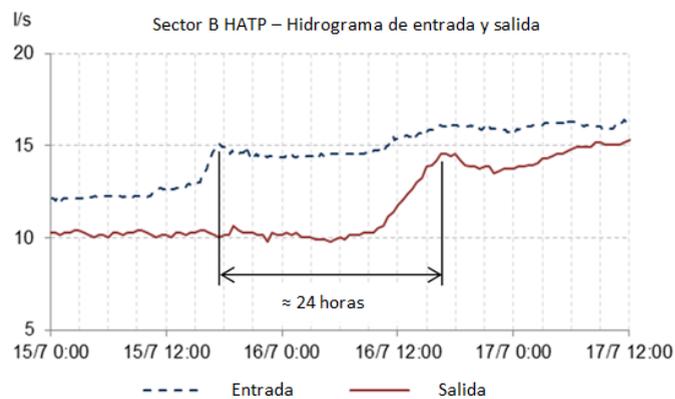


Figura 33
Evolución de los niveles de agua en la entrada y la salida del sector fp (sector B de HATP).

este sector es de 3.3 días. Sin embargo, la variación brusca de nivel a la entrada se transmite a la salida únicamente un día después. Estas 24 horas tampoco representan el TRH del sector, pero constatan que hay parte del flujo que está circulando por el sector más rápido de lo que sería deseable.

En los sectores en los que hay más vegetación, como el sector fp3 de HATP, el agua no puede discurrir en línea recta porque se

encuentra con las plantas como obstáculos, lo que favorece el cumplimiento de los TRH deseados. Pero cuando bajan los niveles de agua, se observa como el flujo prefiere rápidamente los caminos con menos presencia de plantas, reduciéndose drásticamente los TRH (Figura).

Cuanto más abundante es la vegetación, como por ejemplo en los sectores B del HATLI, más se nota el efecto “tranquilizador” del flujo por parte de la vegetación, ya que aunque los caudales de entrada por bombeo sean grandes, el agua tarda más tiempo en llegar a la salida.

Recomendaciones

Se ha de tener en cuenta que los tiempos de retención hidráulica calculados con las ecuaciones correspondientes, normalmente no van a coincidir con los reales en las celdas del HA. Aun así, estos cálculos teóricos son necesarios, ya que ayudan a definir el resto de variables con la que se llevarán a cabo las tareas de gestión diaria del humedal.

Figura 34
Ilustración del desarrollo de zonas de flujo preferentes y zonas muertas en el sector B del HATP.



Para evitar que los TRH reales sean inferiores a los calculados, hay que tener en cuenta que la existencia de varias entradas facilita la distribución del volumen de agua en todo el ancho de la celda y disminuye las zonas muertas, pero si se dispone únicamente de un punto de entrada y otro de salida, ha de evitarse, al menos, que éstos se encuentren alineados.

Además, cuanto mayor sea la presencia de vegetación y más homogénea su distribución, la velocidad del flujo dentro de los sectores será menor, y se evitará el desarrollo de vías preferentes entre las entradas y salidas, obligando al flujo a serpen-tear entre la vegetación, y a obtener los TRH deseados.

Se recomienda que cuando se realice la plantación en los HHA superficiales, la densidad de vegetación en las proximidades de las compuertas de entrada sea elevada para facilitar la ruptura del flujo preferencial. Así se ha realizado en las tareas de revegetación dentro del proyecto y se puede encontrar más información en el “Manual de gestión de la vegetación para la mejora del hábitat y de la calidad del agua” de esta misma colección.

B2 GESTIÓN DE LA VEGETACIÓN

A lo largo del proyecto se ha constatado la intensa relación que existe entre la gestión hidráulica de las parcelas y la gestión de vegetación. No sólo el papel de la vegetación es importante desde el punto de vista de la creación de hábitats, sino también en la medida en que modifica el flujo y los niveles de agua. Así mismo, desempeña funciones muy importantes en la mejora de la calidad del agua, como se puede comprobar en las mayores eficiencias de los sectores con alta cobertura vegetal (véase Tabla 7).

Por una parte, cada especie vegetal tiene unos requerimientos en cuanto a nivel de agua necesario para su desarrollo y supervivencia. Por otra, la existencia de vegetación helófitas altera las vías preferentes del agua, la velocidad, modifica la influencia del viento sobre el flujo...

La elección de la vegetación a plantar tiene que ser coherente con las características hidráulicas de los sectores. Todas las partes de las plantas juegan un rol en los HA, pero qué parte de la planta es más importante depende mucho del tipo de flujo en la celda.

El sembrado es una operación importante en los HA, ya que posiblemente sea necesario secar los HA para el correcto desarrollo de las plantas en sus primeras etapas de crecimiento. Después, tendrá que controlarse el nivel en las celdas para permitir su futuro crecimiento, sin poner en peligro los brotes tiernos, de los que se alimentan algunas aves.

En cuanto al esquema de plantación (o disposición de las plantas dentro del sector), una plantación en mosaico, a modo de tablero de ajedrez, con celdas de 4x10 metros y densa vegetación en su interior, ayudará a

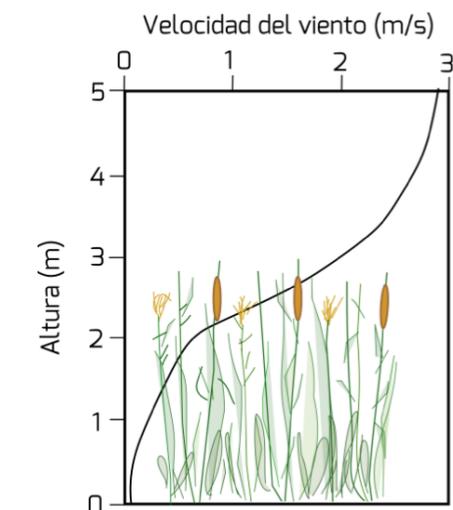


Figura 35
Efecto de la vegetación en la velocidad del viento. La velocidad se reduce en la zona de vegetación densa (adaptado de Brix, 1994).

aproximar los TRH a su valor nominal. La expansión de la vegetación desde estas celdas permitirá alcanzar una buena densidad en toda la celda de HA.

La presencia de vegetación reduce el efecto del viento sobre la superficie del agua, y disminuye la velocidad del flujo, creando mejores condiciones para la sedimentación, y haciendo más difícil que se produzca resuspensión de sólidos en la celda (Figura 35). Además, siempre hay que tener en cuenta que mayor densidad de vegetación supone una mayor tasa de eliminación de nutrientes.

Por otra parte, también han de tenerse en cuenta las tareas de segado de la vegetación cada cierto número de años, de manera que se pueda eliminar la biomasa generada. La gestión de esta biomasa también es un punto importante en las tareas de gestión de los HHAA.

Lecciones aprendidas

En los *tancats* del proyecto se han llevado a cabo tanto tareas de plantación como de segado de la vegetación y fangueos o preparación de los terrenos.

Sin duda alguna, una de las lecciones aprendidas es que las eneas soportan y crecen bien con calados de agua superiores a 30 cm llegando a calados de hasta 60 cm. Esta capacidad de desarrollarse con elevados calados facilita su resistencia a la depredación por aves, como el calamón. Por este motivo en HATLI, el HA con mayores calados (Tabla 8), la cobertura de eneas es muy densa y se mantiene y recupera tras los cosechados a los que ha sido sometida, en los otros dos *tancats* la enea no sobrevive en las parcelas de los HHAA.

En el HATP, en el que se realizaron labores de plantación en el sector FG, se han probado distintas configuraciones o esquemas de plan-

tación, pero las bondades o inconvenientes de cada uno de ellos no podrán analizarse hasta que las plantas no se encuentren más desarrolladas. Lo que sí se ha puesto de manifiesto es que el carrizo necesita varios meses con el suelo semi-seco para arraigar y expandirse. Ello obliga a coordinar muy bien las acciones de gestión hidráulica y gestión de la vegetación, así como los requerimientos de la avifauna, cortando el flujo de agua en toda la parcela y regulando los caudales en las otras parcelas de los *tancats*. Esto se ha podido hacer con cierta facilidad en el sector FG del *tancat* de la Pipa, con algo más de dificultad en los sectores BO y BC del *tancat* de Milia. En este *tancat* también se plantaron lirios que al no requerir un secado exhaustivo se ha desarrollado bastante bien.

Recomendaciones

A la hora de seleccionar las especies vegetales que se plantarán en el HA, hay que tener muy en cuenta sus requerimientos en cuanto a calados o niveles de agua a lo largo de todas las etapas de su desarrollo. La correcta gestión hidráulica durante los periodos más críticos de este desarrollo, es fundamental para que la vegetación cumpla las múltiples funciones que tiene encomendadas dentro del humedal. Se debe disponer de todos los elementos necesarios para poder independizar hidráulicamente los distintos sectores.

El diseño del HA debe poder contemplar la posibilidad de secar un sector sin que los otros vean afectado su funcionamiento. Por ejemplo, en el *tancat* de la Pipa se pueden secar independientemente los sectores FG y fp, aunque el secado debe ser completo y no por celdas independientes. Esta forma de trabajar es más que suficiente para los objetivos de este tipo de humedales artificiales. En el *tancat* de Milia los sectores BE, BC y BO sí que pueden secarse por celdas independientes ya que se diseñaron con canales de reparto que pueden llevar el agua de B1E a

B2C y B2O pero se ha visto que este esquema es complicado de gestionar hidráulicamente y no aporta grandes ventajas: lo mejor sería, como en HATP, independizar hidráulicamente las líneas BE, BC y BO y gestionar la plantación de la vegetación a nivel de sector, no de celda.

Si se desea un HA con calados del orden de 50-60 cm la planta más idónea es la enea. Para calados del orden de 15-30 cm se recomienda el carrizo pero tras un periodo prolongado de secado del terreno tras su plantación.

En el "Manual de gestión de la vegetación para la mejora del hábitat y de la calidad del agua" se puede encontrar más información al respecto.

B3 RÉGIMEN DE FUNCIONAMIENTO: CONTINUO / INTERMITENTE

Desde un punto de vista hidráulico, podemos dividir el régimen de funcionamiento de los HHAA en función de la escala temporal que consideremos: de varios días o de varios meses.

A nivel diario, los HHAA empleados como sistemas de tratamiento de aguas residuales urbanas pueden ser alimentados de manera continua o discontinua. De igual manera, los HHAA que se alimentan con aguas eutróficas pueden funcionar de manera más o menos continua, con pequeñas variaciones en los caudales de entrada y salida a lo largo del día/semana; o bien pueden funcionar de manera discontinua, con grandes variaciones de caudales, debido al tipo de alimentación del HA.

Dado que es conocido que en HHAA destinados a tratar aguas residuales urbanas son más eficientes los sistemas subsuperficiales verticales intermitentes que los horizontales continuos, es razonable pensar que sea así también

cuando las aguas a introducir sean eutróficas. Por ello, pese a que en un principio se pueda pensar que el modo de funcionamiento continuo, más natural, es el más deseable para un HA, existen beneficios asociados al funcionamiento discontinuo que cabe destacar.

Por ejemplo, pensando en un HA que se alimenta por bombeo de manera intermitente, a lo largo del día (o de un cierto periodo de tiempo) se producen varios ciclos de subidas y bajadas de caudal, lo que se traduce en subidas y bajadas del nivel de agua en los sectores. Esto puede ser beneficioso, ya que facilita la reoxigenación de la columna de agua pero hay que ser prudentes y evitar que las oscilaciones de nivel puedan comprometer la presencia/nidificación de aves.

La decisión del régimen de funcionamiento hidráulico también depende de la capacidad de bombeo, y de la posibilidad de su regulación. Si se dispone de varias bombas cabe preguntarse qué es mejor: si bombear menos horas con más bombas o más horas con una bomba; e incluso en cualquiera de los dos casos: si hay que bombear 8 horas ¿qué es mejor, bombear ocho veces al día durante una hora, cuatro veces al día dos horas seguidas para obtener un flujo más distribuido o bombear una vez al día ocho horas seguidas?

Lo primero que hay que tener en cuenta es la gran "inercia" hidráulica que tienen estas infraestructuras debido a los altos TRH (del orden de días, ver Tabla 1). Una hipótesis inicial razonable es que bajo una alimentación intermitente, la variabilidad del caudal irá disminuyendo conforme se avance en las celdas: en el *tancat* de Milia, por ejemplo, la intermitencia del caudal se notará mucho en el sector A (subs superficial) llegando incluso a detenerse el paso de agua al sector B, pero en los sectores aguas abajo la continuidad no se verá interrumpida aunque sí varíen los caudales que circulan.

En este sentido, los trabajos llevados a cabo con el sistema de bombeo en HATM han permitido demostrar que:

- En el caso de HATM era más eficiente energéticamente trabajar con una bomba que con dos. La tubería de alimentación al sector A tiene un diámetro inferior al debido, por lo que el funcionamiento de dos bombas simultáneamente provocaba pérdidas de carga tan altas que el caudal bombeado no era la suma de las dos 400+400 m³/h sino algo menos de 600 m³/h. Por ello, hay que prestar mucha atención al diseño de los elementos hidráulicos (bombas, conducciones...)
- Es más eficiente energéticamente trabajar ocho horas seguidas que arrancando bombas cada dos o tres horas. El arranque de las bombas genera un consumo elevado.
- Se pueden programar los bombeos para que se realicen en horas de tarifa eléctrica reducida.

A escala mensual el régimen de funcionamiento está afectado por la gestión de la vegetación y de la ictiofauna ya que es positivo para el HA generar periodos de secado completo de ciertas celdas, y aprovecharlos para realizar actividades de laboreo con la maquinaria correspondiente. Esto permite reactivar el banco de semillas presente en el terreno, de manera que nuevas plantas pueden comenzar a crecer sin necesidad de replantación manual. Por otra parte, en zonas donde la fauna piscícola esté muy desarrollada, un vaciado o secado de los sectores puede aprovecharse para eliminar biomasa en forma de peces.

Lecciones aprendidas

En los HATM y HATLI el funcionamiento era discontinuo, ya que sólo se bombeaba caudal durante un cierto número de horas al día. Esto provocaba que los primeros sectores de

las líneas de flujo recibieran caudales altos durante parte del día, y muy bajos o nulos durante el resto (aunque conforme avanzaba la línea de flujo, los caudales iban siendo más continuos debido al efecto laminador de los sectores). Concretamente, en el HATM, tuvo que estudiarse en detalle el bombeo, ya que las bombas no disponían de regulación (no es posible variar el caudal bombeado), y a partir de un número de horas de bombeo, el sector subsuperficial se saturaba y el agua comenzaba a fluir por la superficie. Este estudio además, condujo a una nueva propuesta de alimentación (cambio de horas de bombeo) con el consiguiente ahorro de costes al aprovechar en gran medida tarifas eléctricas más económicas.

La variación en los caudales de entrada a lo largo del día dificulta las tareas de monitorización, ya que no es suficiente con realizar aforos puntuales para conocer la situación real de funcionamiento. En la Figura 36 se observa la evolución de caudales desde el inicio del bombeo en diferentes puntos del humedal: entrada al sector A por P1 (a), entrada a B1E por P4 (b), entrada a B2E por P5 (c) y entrada a la laguna por P7 (d). Conforme nos alejamos del punto de entrada por bombeo, se observa cómo disminuye el pico del bombeo, y como el volumen de entrada está más repartido a lo largo del tiempo (efecto conocido como laminación).

En el HATP el funcionamiento era más continuo, ya que la posición de las compuertas de entrada se mantenía prácticamente constante durante los periodos de funcionamiento normal del humedal. Por tanto, las tareas de monitorización eran más sencillas y una medición puntual puede considerarse representativa del flujo medio circulante.

En cuanto a las operaciones de secado y labrado de sustrato del HA, cabe destacar los periodos de vaciado de lagunas en HATP y

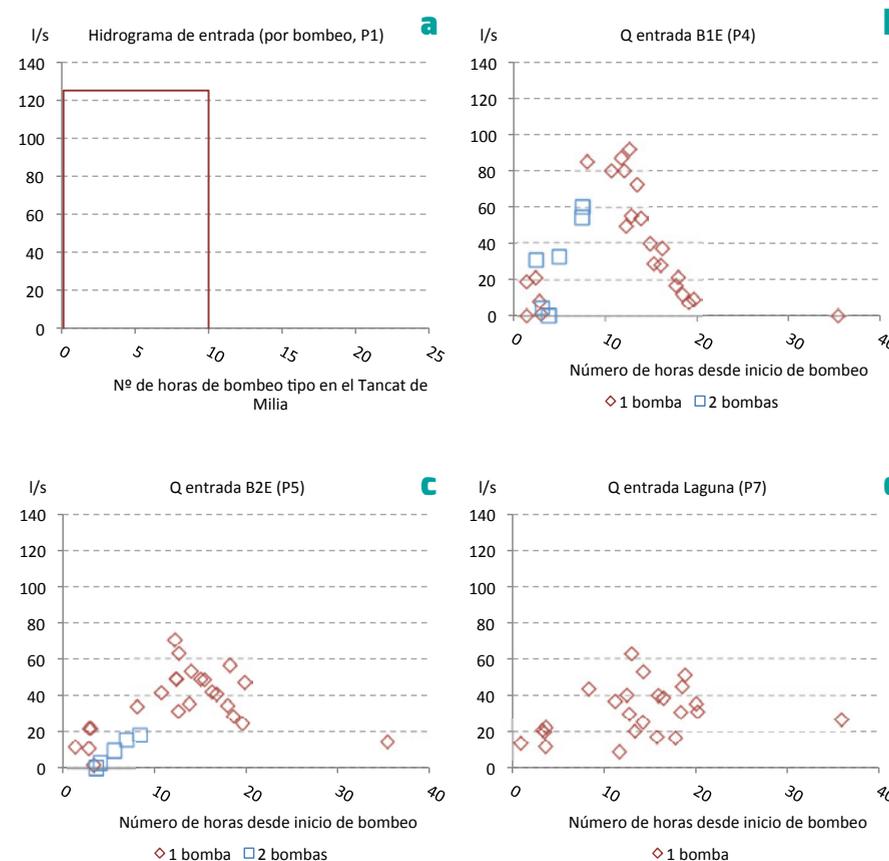


Figura 36
Hidrogramas de entrada al sector A por P1 (a), entrada a B1E por P4 (b), entrada a B2E por P5 (c) y entrada a la laguna por P7 (d), en el HATM.

HATLI, en los que se aprovechó para eliminar una gran cantidad de peces en ambos casos.

Recomendaciones

Como se ha expuesto, las variaciones en los caudales de entrada y niveles dentro de los sectores conllevan un cierto número de beneficios, pero dificultan las tareas de monitorización y control, al ser necesario aforar en distintos instantes temporales.

Para poder realizar una gestión adecuada del régimen de funcionamiento del HA, es imprescindible que los instrumentos que controlan la entrada de caudales (ya sean bombas o compuertas) puedan regularse. En el caso de bombas por ejemplo, es primor-

dial que éstas dispongan de un variador de frecuencia, e incluso de un sistema de accionamiento remoto o programable.

Por último, dado que los periodos de vaciado son necesarios por varios motivos, es imprescindible poder asegurar la estanqueidad de las compuertas que separan los distintos sectores, sobre todo en los casos en los que existe una gran conectividad hidráulica entre éstos.

Para los HHA subsuperficiales se recomienda un funcionamiento mixto, vertical-horizontal, siempre que sea posible, para lo cual se deben dar dos condiciones: entrada discontinua y regulación de la salida mediante compuertas tajaderas (caudal de salida) y tablonés (nivel interior) y siempre que ello no

Cuadro 3

Análisis comparativo del régimen de funcionamiento: continuo versus intermitente.

¿ALIMENTACIÓN EN CONTINUO O BOMBEO DISCONTINUO?

Cuando el agua entra por gravedad al HA, los caudales suelen ser continuos y sensiblemente constantes a lo largo del día. Pero cuando se alimenta por bombeo, es posible variar este caudal a lo largo del día, llegándose a generar variaciones de nivel apreciables en los sectores más próximos a la entrada.

Esta variación de nivel puede presentar algunos aspectos beneficiosos, pero también ha de estar acotada, ya que variaciones demasiado grandes pueden llegar a afectar a la eficiencia del HA.

Aspectos positivos

- En el caso de HHAA de flujo subsuperficial permite la oxigenación del medio poroso y del agua.
- El TRH real es más próximo al TRH teórico ya que al producirse llenados y vaciados se utiliza todo el volumen de la celda.
- Según el modelo de calidad del agua desarrollado, las concentraciones máximas son menores que en el régimen de funcionamiento continuo.

Aspectos negativos

- Afección negativa en época de nidificación en celdas de flujo superficial (la viabilidad de los nidos instalados en la vegetación de la celda puede verse comprometida si son desplazados a causa de los cambios de nivel).
- La medición de caudales en puntos intermedios es más compleja y medidas puntuales no son representativas.
- Según el modelo de calidad del agua desarrollado, las concentraciones medias son mayores que en el régimen de funcionamiento continuo.
- Posible afección negativa a la vegetación en celdas de flujo superficial (estrés).

comprometa ni la continuidad en el flujo ni excesivos cambios de nivel en los HHAA superficiales que estén aguas abajo.

Es importante disponer de al menos dos bombas de entrada, como equipo de reserva para tareas de mantenimiento o fallos. Por lo tanto, cada bomba debe asegurar el caudal máximo de diseño tener un variador de potencia para poder regular el caudal.

B4 CALIDAD DEL EFLUENTE

La operación de los humedales artificiales como los del proyecto LIFE ALBUFERA debe cumplir los objetivos de mejora de la calidad del agua y de la biodiversidad. El efluente de los HHAA debe tener una mejor calidad que el influente y en el caso de que no se cumpla

esta condición deberán establecerse las reglas operativas necesarias para ello.

Por ejemplo, el rebombeo de aguas desde la salida hacia la entrada es posible en todos los HHAA por lo que puede ser una herramienta de gestión interesante para mejorar el efluente. Durante el periodo de desarrollo del proyecto no se ha realizado dicha gestión por lo que no se pueden extraer enseñanzas al respecto.

Diversas actuaciones de gestión contribuyen a mejorar aspectos de la calidad de las aguas. En la Tabla 9 se muestra un resumen de las realizadas en el proyecto.

Es en la fase de diseño de los HHAA cuando se debe establecer el destino final del agua que va a ser introducida. En muchos casos,

Acción de gestión	Objetivo	Beneficios	Inconvenientes
Secado de celdas	Desarrollo de la vegetación	Reducción de los SS y aumento de la transparencia	Efecto negativo sobre la reproducción de aves acuáticas si se realiza en primavera
	Airear el sedimento.	Reducción de la materia orgánica del suelo Durante el proceso se favorece la disponibilidad de alimento de aves ictiófagas.	Disminución de la capacidad de desnitrificación.
	Germinación de semillas	Nuevos brotes de vegetación helófitas	Posibles brotes de vegetación no acuática
Cosechado de la vegetación	Retirada de biomasa para evitar su descomposición en el agua y retirar nutrientes del sistema.	Reducción de materia orgánica y nutrientes y del riesgo de eutrofización	Afección del hábitat, posibles impactos negativos en el siguiente periodo de nidificación
Pesca	Retirada de biomasa para reducir la resuspensión de sedimentos.	Reducción de los SS y aumento de la transparencia	
Plantaciones	Mejorar la cobertura vegetal	Mejora de la eficiencia de tratamiento del agua Las especies utilizadas y el marco de plantación pueden favorecer lugares de nidificación para algunas especies de aves	Desfavorable para algunas especies de aves si la cobertura es excesiva

la propia circulación y depuración del agua a través de los distintos sectores del HA ya cumple un objetivo, como es el de la generación de hábitats dentro de los límites del propio humedal, por lo que la calidad del agua a la salida no es un objetivo tan definido. En el caso en el que el HA vaya a contribuir a la regeneración de la masa de agua de la cual se alimenta (caso de HATP y HATM), hay que priorizar la masa de contaminante eliminada frente al rendimiento en la eliminación. A mayor CHS, puede ser que se obtenga menor rendimiento en la eliminación de alguno de los contaminantes pero, al estar tratando mayor cantidad de agua, se alcanza una mayor eliminación de masa (ver Tabla 7, apdo. B1.1), por lo que si en un plazo de tiempo determinado la masa de agua debe alcanzar el buen estado químico o ecológico es conveniente maximizar la CHS.

Además, mayores CHS también implican menores salinizaciones del influente ya que la proporción de agua evapotranspirada frente a la influente disminuye.

Si el destino final del agua no es exclusivamente ambiental sino que puede emplearse para regadío, por ejemplo, habría que comprobar que el efluente cumpla los requisitos establecidos en la normativa de reutilización (RD 1620/2007), en cuanto a contenido de patógenos y otros contaminantes, según el caso.

En la Tabla 10 se resumen las características de los efluentes obtenidos en los HHAA del proyecto LIFE ALBUFERA. En general se produce una mejora significativa de las variables físico-químicas y biológicas respecto a las entradas (Tabla 2). Se reducen considerablemente las concentraciones de nutrientes (nitrógeno y fósforo principalmente), los sólidos en suspensión y la turbidez del agua, mejorando así su transparencia, aspecto muy positivo para la recuperación de macrófitos sumergidos. El fitoplancton se ve reducido notablemente, tanto en biovolumen como la concentración de clorofila *a*, alcanzándose en numerosas ocasiones valores inferiores a 5 mg/L, propios de sistemas oligotróficos. Por

Tabla 9
Relación de actividades de gestión de los HHAA, indicando beneficios e inconvenientes de cada una de ellas.

Variable*	Media	Mín.	Máx.	Variable	Media	Mín.	Máx.
DQO total (mg/L)	42.7	18.5	85.0	Alcalinidad (mg/L)	216.0	125.5	315.2
DQO soluble (mg/L)	32.6	12.0	64.0	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2866	1759	4690
N Total (mg N/L)	1.73	0.10	3.74	Salinidad (g/L)	1.4	0.7	2.5
Amonio (mg N/L)	0.316	0.006	2.140	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	18.5	6.1	31.0
Nitritos (mg N/L)	0.033	0.005	1.010	pH	7.7	7.1	8.3
Nitratos (mg N/L)	0.32	0.10	1.96	OD (mg/L)	6.7	1.6	16.4
P Total (mg P/L)	0.147	0.037	0.522	%OD sat	69%	21%	222%
Fosfatos (mg P/L)	0.006	0.005	0.035	Clorofila a ($\mu\text{g}/\text{L}$)	27.2	0.6	198.4
SST (mg/L)	31.6	6.0	121.0	Porcentaje cianofíceas (%)	15.8	0.0	70.6
SSV (mg/L)	10.7	1.2	36.3	Biovolumen (mm^3/L)	8.7	0.2	75.9
Turbidez (NTU)	29.9	6.0	72.2	Zooplancton ($\mu\text{g PS}/\text{L}$)	319.1	24.1	2220.3
Sílice (mg/L)	2.1	0.2	6.1				

Tabla 10
Características del efluente de los HHAA. Se indican los valores medios, mínimos (Mín.) y máximos (Máx.) obtenidos en los efluentes de los tres HHAA del proyecto.

otro lado, un aspecto sumamente beneficioso es el aumento de la población zooplanctónica, compuesta en gran parte de organismos filtradores, de manera que se están exportando hacia el lago de l'Albufera organismos que contribuirán a mejorar la calidad de sus aguas.

En cuanto a la concentración de fósforo, nutriente limitante de la eutrofización en el caso de l'Albufera, cabe destacar que se llegan a alcanzar valores en torno a 0.1 mg P/L, el cual coincide con el valor propuesto en el "Estudio para el desarrollo sostenible de l'Albufera" (MMA, 2004) como valor objetivo en las entradas al lago para conseguir su

recuperación ambiental. Así mismo, las concentraciones de clorofila *a* en el interior de los HHAA y en sus efluentes también alcanzan cifras muy optimistas, inferiores a los 30 mg/L, fijado como objetivo en el Plan Hidrológico del Júcar para 2027 (RD 1/2016) para alcanzar el buen potencial ecológico del lago.

Entre los sectores monitorizados el de flujo subsuperficial y los de flujo superficial con alta cobertura vegetal son los que mejores rendimientos han presentado desde el punto de vista de mejora de la calidad físico-química y biológica del agua (véase Tabla 4 y Tabla 7). De ahí, que en las recomendaciones se incluya incluir en el diseño celdas de HA

Figura 37
Fotografía de las muestras de entrada con coloración verde intenso (izda.) y de salida, muy transparente (dcha.).



de esta tipología. Así mismo, en el proyecto se ha realizado un importante esfuerzo para recuperar la cobertura vegetal en aquellas celdas en las que ésta es escasa; del trabajo realizado se han extraído recomendaciones de gestión de los HHAA como las recogidas en la Tabla 9 (descritas con mayor detalle en el "Manual de gestión de la vegetación para la mejora del hábitat y de la calidad del agua").



Figura 37b
Fotografía de la desembocadura del *tancat* de Milia en el lago de l'Albufera. Se puede observar la pluma de agua transparente sobre el lago con coloración verde.



Gestión de humedales artificiales. Control y monitorización

C1 INSTRUMENTACIÓN Y METODOLOGÍA PARA MONITORIZAR LA HIDRÁULICA DEL SISTEMA

Las tareas en campo de muestreo durante la operación del HA tienen como objetivo asegurar que los volúmenes inyectados, los caudales circulantes por los diferentes sectores y los niveles en los mismos, son los previamente establecidos. Las tareas específicas a realizar deben también ser seleccionadas estratégicamente (en el tiempo y en el espacio) para maximizar el alcance de la información obtenida, permitir una mejora en el conocimiento del funcionamiento real del HA y corregir, en su caso, las posibles disfunciones respecto de lo establecido como estrategia de gestión. La idea en definitiva es optimizar tanto el control como la propia operación.

Se debe establecer por tanto la frecuencia de los muestreos si son discretos o si se requieren continuos, la necesidad de coincidencia temporal con los muestreos de calidad en su caso, así como los puntos concretos de control (de niveles, velocidades, caudales, etc). Es en este último caso, cuando la selección debe ser tal que con el mínimo número de puntos de muestreo se obtenga el máximo de información, bien directamente o a partir del uso posterior de fórmulas que aplicadas a los valores reales de las variables medidas nos permitan extraer nuevas conclusiones (p.e. se puede monitorizar una línea de flujo, la principal, y las entradas y salidas globales al sistema, y luego mediante balance, extraer las oportunas conclusiones respecto del resto de variables no directamente aforadas).

Habitualmente para la comprobación del cumplimiento de los valores establecidos para las variables definidas en la estrategia de gestión, puede ser suficiente con una monitorización discreta o puntual con una frecuencia en el rango de las semanas (esto

también depende del tipo de funcionamiento del HA en cuanto a alimentación y retorno de caudales tratados, en el sentido de si se alcanza o no el régimen estacionario de funcionamiento hidráulico, etc.). No obstante, para el conocimiento real del funcionamiento hidráulico del sistema, normalmente con cierto grado de complejidad, y la mejor estimación de alguno de los parámetros establecidos, como el TRH, es recomendable cierto periodo de monitorización en continuo. La información así obtenida permite caracterizar el tipo de funcionamiento del sistema y conocer en función del tiempo tanto flujos como niveles.

Dicho esto y ante la dificultad de acceder a equipos de medición en continuo por parte del personal encargado de la gestión técnica de estos espacios se recomienda realizar una campaña inicial muy intensa de mediciones con molinetes

A continuación se muestra la instrumentación con la que habría que contar según las necesidades.

C1.1 Aforos

C1.1.a Método volumétrico con cubo

Este sistema consiste en estimar el caudal a partir de la medición del volumen de agua desaguada por unidad de tiempo. Para ello basta con colocar un cubo aforado debajo de la caída del agua, a la vez que se cronometra el tiempo que tarda en llenarse cierto volumen. Es un sistema manejable para pequeños caudales de hasta 1 l/s, para recipientes de hasta 10 litros, y siempre que se disponga de la suficiente caída libre. Especialmente indicado en los casos en los que el calado impide además la inserción en el flujo de cualquier instrumento de aforo (molinete, etc.). Conviene repetir al menos tres veces la medición y lograr mayor representatividad del resultado.

El caudal finalmente estimado será el promedio de las tres mediciones. Este método proporciona buena precisión a un coste muy bajo.

C1.1.b Flotadores

Este sistema también es muy sencillo aunque su precisión es baja y hay que considerarlo como una primera aproximación. Se basa en medir la velocidad en la superficie del agua circulando en lámina libre por una sección de una tubería abierta o un canal en donde se pueda considerar que la velocidad se mantiene constante. Para medir dicha velocidad se lanzan pequeños flotadores procurando hacerlo en el centro del canal y que no se desvíen hacia sus paredes. Se mide el tiempo que tardan en recorrer cierta distancia, la anchura y calado del canal o tubería, se calcula su sección y se calcula el caudal considerando que la velocidad media del flujo está entre 0.8 y 0.95 veces la velocidad superficial, en función de precisamente la anchura y el calado en el canal.

Se recomienda que la longitud del recorrido sea de pocos metros (hasta 5 metros ya que las tuberías abiertas y los canales son de pocos centímetros de anchura) ya que cuanto más larga sea y más turbulento sea el flujo mayor es la posibilidad de que el flotador se desvíe de la línea central de corriente. El tiempo de recorrido debe ser superior a cinco segundos para no cometer excesivo error y hay que realizar al menos tres mediciones. Este sistema es interesante en los HHA para caudales de hasta 20 l/s, que corresponderían a mediciones en tuberías de calados del orden de 10 cm, anchuras de 40 cm y velocidades máximas próximas a 0,4 m/s.

C1.1.c Molinete

El aforo de caudal con molinete o minimolinete es un método directo de aforo a partir de la estimación de la velocidad y la sección del flujo. La velocidad se estima

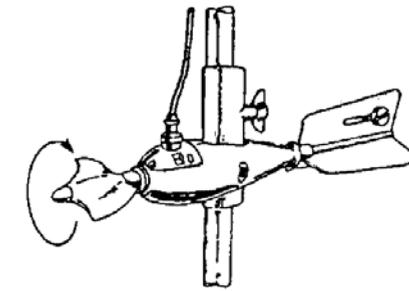


Figura 38
Imágenes de molinete para medición de velocidad del flujo: esquema (izda. FAO, 1997) y fotografía del molinete empleado en el proyecto.

con el minimolinete a partir de la velocidad de giro de la hélice que se enfrenta a la corriente.

Cada hélice está tarada y funciona en un rango de velocidad, de modo que existe una velocidad mínima por debajo de la cual la hélice no gira y una velocidad máxima a partir de la cual la medición no es fiable. La ecuación que relaciona la velocidad de giro con la velocidad del flujo es una relación lineal del tipo

$$V = \alpha n + \beta$$

donde V ($m \cdot s^{-1}$) es la velocidad de la corriente, n (s^{-1}) la velocidad de giro de la hélice, y α (m) y β ($m \cdot s^{-1}$) los parámetros tarados para cada hélice.

En una sección de flujo, ya sea éste en presión o en lámina libre, la distribución de velocidades no es constante en la sección. En el caso de

Figura 39
Minimolinete en posición previa a la inmersión.



los flujos a aforar en humedales artificiales, lo normal es que éstos tengan lugar por conductos circulares (tubos) o rectangulares. Si el flujo es en presión, la velocidad se mide en el

Cuadro 4
Cómo realizar un aforo con molinete.

AFORO CON MOLINETE

¿Cuántas mediciones deben hacerse en cada sección?
¿Dónde hay que medir?

El aforo con molinete es el método de aforo directo de caudales más empleado para flujos en lámina libre, ya que es sencillo, rápido y fiable. Se basa en calcular la velocidad del agua en una sección a partir del número de vueltas que da una hélice introducida en el flujo, y multiplicar por la sección.

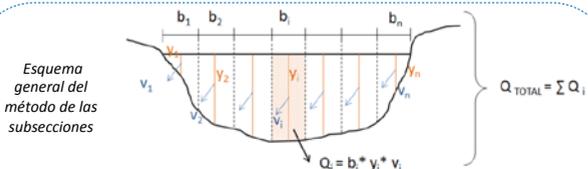
$$\text{Velocidad} = K \cdot n + D$$

n = número de vueltas por segundo
 K, D = parámetros de la hélice

$$\text{CAUDAL} = \text{Velocidad media} \cdot \text{Sección}$$

Cada hélice tiene unos parámetros distintos y se caracteriza por la velocidad mínima y máxima que puede llegar a medir. Normalmente, se cuentan las vueltas dadas durante 3 minutos, y se obtiene el número de vueltas por segundo medio en ese intervalo.

El número de puntos de velocidad que hay que medir en la sección para poder estimar una correcta velocidad media, depende del ancho de la sección y del calado (profundidad de agua). Si las secciones son muy grandes o hay mucha profundidad, hay que dividir en subsecciones y medir a distintas profundidades, aplicando después las ecuaciones correspondientes.



Anchura de las subsecciones (b_i) = aproximadamente 30 cm

Número de mediciones en cada subsección =

- Calados < 60 cm, se mide una vez a una distancia del fondo de 0.4 veces el calado.
- Calados superiores y hasta 3 m, se mide dos veces, a 0.2 y 0.8 veces el calado desde el fondo, y se hace la media de las mediciones.
- En flujos en presión, se mide una vez en el centro de la sección.

centro de la sección, donde ocurre la velocidad máxima. Si el flujo es en lámina libre, para calados de hasta 60 cm suele ser suficiente medir la velocidad a una profundidad del 60% del calado (medido desde la superficie del agua). En este punto, la velocidad es aproximadamente la velocidad promedio en la sección. Para secciones más complejas o calados más importantes, conviene discretizar la sección en bandas verticales y medir la velocidad a varias profundidades, de manera que se estime el caudal total de la sección como suma de caudales parciales por cada subárea.

C1.1.d Vertedero de pared delgada

El aforo de caudales mediante vertederos hace uso de la relación existente entre la altura de la lámina de agua aguas arriba del vertedero desde una determinada referencia y el caudal que lo atraviesa. Existen varias formas de vertedero, que se describen a continuación.

Vertederos triangulares

El caudal vertido se obtiene a partir de la ecuación:

$$Q = C_e \cdot \frac{8}{15} \cdot (2 \cdot g)^{1/2} \cdot \text{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot h^{2.5}$$

donde Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) es el caudal, C_e un coeficiente de descarga, g ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) la aceleración de la gravedad, θ (rad) el ángulo del vértice del vertedero y h (m) la altura efectiva del flujo sobre el vértice del vertedero a una distancia de 3 a 4 veces el valor máximo de h . El detalle de la formulación así como la estimación del coeficiente puede encontrarse en Bos (1976).

En el *tancat* de la Pipa, las entradas desde el Barranco del Poyo y de la Acequia del Puerto de Catarroja se realiza por gravedad a través de sendos vertederos triangulares en pared delgada. Con los datos de calado sobre el vértice del vertedero, se calcula el caudal de entrada en el humedal.



Figura 40
Arquetas de entrada al *tancat* de la Pipa. Vertederos triangulares en pared delgada para el aforo de caudales.

Vertederos rectangulares

De manera análoga, el caudal sobre un vertedero rectangular de pared delgada está relacionado con la altura de agua sobre éste a través de la ecuación:

$$Q = C L h^{1.5}$$

donde Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) es el caudal, C un coeficiente de descarga, L (m) la longitud efectiva del vertedero (descontando el efecto de la contracción lateral) y h (m) la altura efectiva del flujo sobre el labio del vertedero a una distancia de 3 a 4 veces el valor máximo de h . El detalle de la formulación así como la estimación del coeficiente puede encontrarse en (Chow, 1959).

En los *tancats* de Pipa y Milia, muchos de los puntos disponen de tableros aguas arriba de la sección de aforo a través de los cuales pasa el flujo, actuando como vertederos rectangulares en pared delgada.



Figura 41
Ilustración de un vertedero rectangular en funcionamiento (tomada de FAO, 1997).

En los casos en los que el vertido es libre, se han calibrado las ecuaciones propias de estos vertederos para poder aforar el caudal a partir del calado sobre el vertedero. La calibración se realiza a partir de los caudales aforados con minimolinete en el tubo situado inmediatamente aguas abajo de los tableros.

Figura 42
Vertedero rectangular de pared delgada en el *tancat* de Milia.

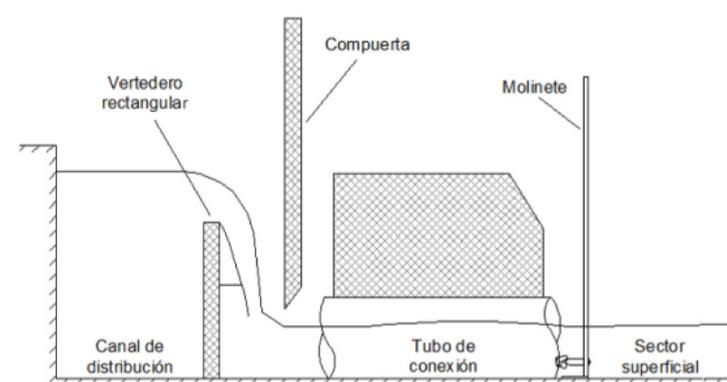


Figura 43
Equipo de ultrasonidos instalado en un tubo pasante en un pozo de registro.



C1.1.e Caudalímetro de ultrasonidos

El aforo de caudal por ultrasonidos es un método directo de aforo a partir de la estimación de la velocidad y la sección del flujo.

La velocidad se estima a partir del principio del efecto Doppler, esto es, el aparente cambio de frecuencia de una onda producido por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador. El emisor del caudalímetro (fuente) emite una señal acústica (ultrasonidos) que es reflejada por las partículas en suspensión presentes en el flujo (observador). Por otra parte, el equipo cuenta con un transductor de presión hidrostática que permite registrar el calado del flujo.

los aforos manuales con molinete. Sin embargo, necesitan de alimentación eléctrica, cuestión que suele resolverse mediante baterías externas.

En el caso de los sistemas de bombeo, para el aforo de los caudales también se suele disponer de un caudalímetro por ultrasonidos. En HATM y HATLI existen en la entrada de agua, pero no existen en las salidas de ninguno de los tres HA. En estos casos los caudales de salida pueden estimarse a partir del registro de horas de funcionamiento de las bombas o del registro de consumo energético.

C1.1.f Limnímetros

Los limnímetros permiten la medición directa del nivel de agua respecto de una determinada referencia.

Figura 44
Escalas fijas en el tancat de la Pipa.

Estos equipos permiten la medición y almacenamiento de datos en continuo, lo cual representa una ventaja respecto de



Figura 45
Sonda de presión e instalación en el tancat de la Pipa.

Escalas fijas

El método manual más sencillo de medición del nivel son las escalas fijas. Se trata de regletas graduadas, generalmente con precisión centimétrica.

Sondas de presión hidrostática

La medición en continuo del nivel de agua en un punto puede realizarse con sondas de presión hidrostática. Estos dispositivos miden la presión del agua a la profundidad a la que están instaladas, por lo que el dato de nivel es inmediato. Las sondas registran un valor de corriente en función del nivel de agua. El dispositivo debe calibrarse previamente en condiciones controladas, para tarar la relación entre el pulso eléctrico y el nivel real de agua.

C1.2 Caracterización de las variables meteorológicas.

Para poder cerrar los balances hídricos en los humedales es necesario contar con todas las entradas y salidas, incluyendo precipitación y evapotranspiración. Estos datos pueden obtenerse de estaciones meteorológicas de las redes oficiales o bien instalando la propia instrumentación.

C1.2.a Precipitación

La medida de la precipitación puede hacerse en continuo (pluviógrafo) o bien en cantidades acumuladas, generalmente diarias

(pluviómetro). Para cerrar balances hídricos en el humedal es suficiente con registros acumulados. Para análisis más detallados sobre la propia cinética del sistema, interesa monitorizar la lluvia con una mayor discretización temporal (horaria al menos).

C1.2.b. Evapotranspiración

La estimación de la evapotranspiración es compleja. Atendiendo a la ecuación de Penman-Monteith, recomendada tanto por la FAO como por la ASCE para la estimación de la evapotranspiración, ésta depende de multitud de factores como la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Este método (Richard *et al.* 2006) es actualmente el único método estándar para la determinación de la evapotranspiración de referencia, la que corresponde a un determinado cultivo patrón en unas condiciones dadas.

Figura 46
Pluviógrafo de balancín e instalación en la azotea de un edificio.



Para la obtención de los datos necesarios de cara al cierre del balance del humedal, puede recurrirse al Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SiAR) del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Este portal permite la consulta y descarga de los siguientes datos meteorológicos diarios, semanales o mensuales: temperatura media del aire, humedad relativa del aire, velocidad y dirección del viento, radiación solar, precipitación acumulada. Con estos datos, el propio portal proporciona los valores de evapotranspiración de referencia a través del método FAO-Penman-Monteith.

Figura 47
Estación meteorológica instalada en el HA del tancat de la Pipa.



Figura 48
Sondas de presión hidrostática aguas arriba de una compuerta.



C1.2.c. Viento

Algunos estudios específicos en el humedal pueden requerir de datos de viento (estudios hidráulicos donde la influencia del oleaje pueda ser significativa). Dada la alta variabilidad espacial que puede presentar este fenómeno, es recomendable la instalación de un anemómetro para registrar correctamente las condiciones locales de viento.

C1.3 Compuertas

Las compuertas son elementos de control de flujo muy habituales en los humedales artificiales. Suponen además un buen punto para aforar el caudal a su través midiendo el calado inmediatamente aguas arriba de la compuerta y, si el desagüe es anegado, además el calado aguas abajo.

Para un desagüe libre de compuerta en sección rectangular, resulta:

$$Q = CBw\sqrt{2gh}$$

donde Q ($m^3 \cdot s^{-1}$) es el caudal, C el coeficiente de descarga de la compuerta, g ($m \cdot s^{-2}$) la aceleración de la gravedad, w (m) la apertura de la compuerta y h (m) el calado del flujo aguas arriba de la compuerta.

Si el desagüe de la compuerta es anegado, entonces:

$$Q = C_a Bw\sqrt{2g(h - h_a)}$$

Donde, además, h_a (m) es el calado aguas abajo de la compuerta.

Ambas curvas de gasto dependen en buena medida de los coeficientes de descarga por lo que, si se va a utilizar sistemáticamente un desagüe bajo compuerta como elemento de aforo en el sistema, conviene calibrar dichos coeficientes aforando el caudal de paso por otro medio, por ejemplo con el molinete.

C1.4 Trazadores

Con el fin de mejorar el conocimiento de la hidrodinámica de los HHAA también puede ser muy interesante el uso de trazadores, que en el caso de zonas especialmente vulnerables debe realizarse empleando condiciones naturales y evitando mayores alteraciones que las estrictamente naturales. Una aplicación que se ha constatado como muy útil es la realizada durante el proyecto aprovechando la capacidad de rebombeo de las aguas tratadas en el interior de los HHAA y las altas tasas de evapotranspiración de verano.

El 1 de julio de 2015 la conductividad del agua en el sector C de HATM era de unos 2600 $\mu S/cm$ mientras que a la salida del sector A, que estaba recibiendo aguas de l'Albufera, era de 1700 $\mu S/cm$. La idea era rebompear agua desde el sector C, con una concentración de sales superior a la del sector A, para calcular el TRH de dicho sector observando la evolución de la conductividad en su salida (Figura 49). Se instrumentó el canal de salida del sector A con tres conductímetros situados en sus tres compuertas de salida para la medición en continuo (cada 10 minutos) de la conductividad y la temperatura.

Los datos experimentales pueden ajustarse a un modelo matemático de reactor de mezcla completa⁴ (RCTA) para calcular la variación de la concentración con respecto al tiempo en función del TRH, que tiene la siguiente expresión:

$$C(t) = Q \cdot \frac{C_e}{\frac{1}{TRH} \cdot V} \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{TRH}t}\right) + C_0 \cdot e^{-\frac{1}{TRH}t}$$

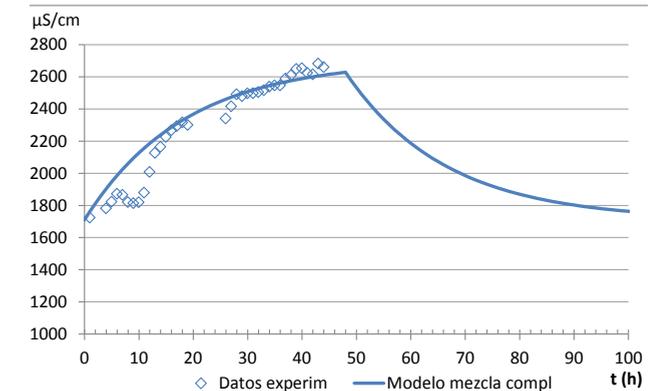
Y que se pueden ver representados en la figura 49.

A partir de la curva obtenida mediante el modelo anterior, se puede calcular el tiempo

mediano de retención (paso del 50% del trazador, tiempo análogo al TRH) mediante la siguiente ecuación:

$$t_m = \frac{\sum_{i=0}^n t_i \cdot (C_i - C_0)}{\sum_{i=0}^n (C_i - C_0)}$$

Por lo tanto se puede estimar el TRH real del sector A en 1,75 días aproximadamente, que es inferior al TRH teórico o nominal (3 días).



C2 INSTRUMENTACIÓN Y METODOLOGÍA PARA MONITORIZAR LA CALIDAD DEL AGUA

La instrumentación necesaria para monitorizar la calidad del agua consta de diversos elementos que podemos clasificar según las variables de estudio:

Variables físico-químicas

En la etapa de muestreo se emplean sondas de medición universal (T^a , pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto), muestreador y envases de muestra. Los procedimientos a seguir se encuentran normalizados en la serie de normas UNE-EN ISO 5667:2006 relativas a muestreo y conservación de muestras. En espacios de superficie tan grandes como

Figura 49
Evolución de la conductividad en el canal de salida del sector A (datos experimentales) y modelo de mezcla completa ajustado para un TRH de 42 horas.

⁽⁴⁾ En función del régimen de funcionamiento también puede ajustarse a un modelo de reactor de flujo de pistón (RFP) o a otro de n-RCTAs en serie (Kadlec, 2009).

los HHAA del proyecto es conveniente tener información sobre el aporte de sustancias por deposición atmosférica, colocando in situ captadores atmosféricos Figura 50.



Figura 50
Imagen de captador atmosférico colocado en HATLI.

En la etapa de análisis se debe emplear material de laboratorio de precisión y métodos de análisis normalizados. En el proyecto LIFE ALBUFERA se han empleado test basados en las correspondientes normas ISO. Si se desea conocer con mayor detalle los métodos empleados se remite al lector al documento "Informe del primer año de resultados de la monitorización del impacto de la gestión sobre la calidad del agua y sedimentos. Acción C1"⁵. Las variables de calidad del agua a analizar son numerosas y dependen del problema ambiental considerado. Podríamos decir que las incluidas en la DMA son de obligado cumplimiento, éstas son:

- Indicadores físicoquímicos generales: condiciones térmicas, oxigenación, salinidad, estado de nutrientes, estado de acidificación. En el caso de lagos, los indicadores concretos dentro de este grupo son: fósforo total, pH y transparencia (RD 817/2015).
- Sustancias individuales: sustancias prioritarias, contaminantes específicos⁶.

En el proyecto LIFE ALBUFERA se han considerado, además de las anteriores, los siguientes indicadores físico-químicos:

- Materia orgánica, medida como Demanda Química de Oxígeno total y soluble.
- Nutrientes principales en distintas formas: nitrógeno total, amoniacal, nitritos y nitratos, fósforo total y fosfatos, sílice inorgánica.
- Estado de acidificación: alcalinidad.

El lector con experiencia en contaminación de aguas se habrá sorprendido por no haber visto analizada la materia orgánica como Demanda Biológica de Oxígeno a los cinco días (DBO₅). El motivo reside en el hecho de que esta medición, con aguas altamente concentradas en fitoplancton, puede dar resultados erróneos debido al consumo de oxígeno por respiración fotosintética. Por ello se desaconseja este método cuando se trabaja con aguas hipertróficas.

La frecuencia de monitorización dependerá del tipo de aplicación del HA, si se trata de un sistema de tratamiento de agua residual la frecuencia será la que determine el organismo competente en materia de vertidos, en el caso de que el efluente vaya a ser reutilizado se deberá cumplir también los requerimientos de la normativa de reutilización (RD 1620/2007). En masas de agua tipo lago la frecuencia mínima viene marcada por la DMA, que en el caso de los indicadores físicoquímicos se establece en 4 veces/año. En nuestro caso como se trata de un proyecto demostrativo cuyo objetivo es establecer recomendaciones de gestión, la frecuencia seleccionada ha sido mayor, cada tres semanas para el agua y cada seis meses para el sedimento. Cabe mencionar que en masas de agua eutrofizadas se considera que la frecuencia mínima recomendable es mensual para poder registrar adecuadamente las va-

riaciones estacionales típicas de este tipo de sistemas.

Variables biológicas

En la etapa de muestreo se emplean muestreadores de agua para fitoplancton, mallas de Nylal de 37 µm de luz de para el zooplancton, red de tamaño 250 µm para macroinvertebrados epibentónicos, tubos de metacrilato de 5 cm de diámetro para macroinvertebrados bentónicos, envases para conservar las distintas muestras y agentes conservantes (lugol, formol). En la etapa de análisis se utiliza material de precisión y equipamiento de laboratorio (espectrofotómetro, microscopio con cámara digital, etc.). En ambas etapas, los procedimientos deben ajustarse a los protocolos estandarizados⁷. Los indicadores biológicos para lagos recogidos en la DMA son: fitoplancton, diatomeas, macrófitos, macroinvertebrados y peces.

Para evaluar el indicador fitoplancton se debe cuantificar la concentración de clorofila *a* (µg/L) y el biovolumen algal (mm³/L), para masas de agua tipo lago, y para embalses además de las anteriores se incluyen el porcentaje de cianobacterias y el índice de grupos algales (IGA). En el proyecto LIFE ALBUFERA se han cuantificado dichos indicadores y, adicionalmente, se ha considerado la ficocianina, que es un pigmento específico fundamentalmente de las cianobacterias, muy adecuado cuando existe dominancia de cianobacterias, como en l'Albufera. La frecuencia de monitorización en el proyecto ha sido bimestral para fitoplancton y zooplancton y trimestral para macroinvertebrados. En cuanto a la precisión en la identificación de fitoplancton, es recomendable llegar al nivel taxonómico más

preciso posible (género o especie), pero hay que tener en cuenta que es preferible identificar correctamente a nivel superior que hacer una identificación errónea a nivel inferior (MAGRAMA, 2013). En algunos casos, como puede ser entre las cianobacterias, se pueden tener especies indicadoras o potencialmente tóxicas por lo que es necesaria una identificación fina.

La evaluación del potencial ecológico también debe seguir los protocolos elaborados por el MAGRAMA. Una conclusión de los resultados del proyecto es que el potencial ecológico no debería calcularse únicamente a partir de datos estivales, ya que en sistemas con tanta variación estacional la clasificación debería tener en cuenta los datos correspondientes a primavera y otoño. Los resultados obtenidos en el proyecto indican que el potencial ecológico mejora en los HHAA. En el caso de los macroinvertebrados, se considera que la frecuencia trimestral podría reducirse a la mitad (dos veces al año) pero se ha observado que sería necesario un periodo de tiempo mayor, para poder detectar tendencias temporales y espaciales evidentes.

C3 OBTENCIÓN DE HERRAMIENTAS DE GESTIÓN

A partir de los elementos y dispositivos hidráulicos dispuestos en el HA (vertederos, compuertas, etc.) y de su instrumentación/monitorización (sondas, caudalímetros, etc.), es posible obtener una serie de herramientas de gestión que facilitan las tareas ordinarias de control de niveles y caudales (repartos de flujo) en cada una de las celdas de cada sector y por tanto en el conjunto del humedal. De esta manera, es posible la operación y el control de las principales variables hidráulicas de

[5] Disponible en la web del proyecto, <http://lifealbufera.org/index.php/es/documentos>.

[6] Este tipo de contaminantes quedaban fuera del alcance del proyecto, y no se han podido analizar.

[7] Pueden tomarse como referencia los protocolos de explotación de las redes de seguimiento del estado y potencial ecológico de las masas de agua superficiales continentales, elaborados por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) (<http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/aguas-superficiales/programas-seguimiento/Protocolos-de-muestro-laboratorio-y-calculo-de-indices.aspx>).

interés (caudales, velocidades,...) por personal no especialista, mediante sencillas operaciones como la medida de un nivel de agua en un lugar determinado (estratégicamente dispuesto por el personal especialista). A continuación se incluye, tanto desde el punto de vista hidráulico (cantidad) como de calidad de aguas, las principales herramientas de gestión obtenidas a partir de la experiencia en la operación y control de los *tancats* de Pipa, Milia e Illa.

C3.1 Hidráulica

Con la toma sistemática de datos de campo y las observaciones realizadas durante las visitas a los *tancats*, se ha ampliado el conocimiento sobre el funcionamiento hidráulico de cada uno de los humedales, teniendo en cuenta sus distintos mecanismos de alimentación y reintegro de caudales a la Albufera (gravedad, bombeo). Así, a partir del conocimiento adquirido se han preparado herramientas sencillas (curvas de gasto, ajustes correlacionando variables, etc.) que facilitan la estimación de las variables hidráulicas (menor coste temporal y consumo de recursos) al mismo tiempo que la hacen más sencilla.

Figura 51
Ajuste de ecuaciones de vertedero rectangular en pared delgada para los puntos P4 y P6.

Curvas de Gasto

En diversos puntos monitorizados se han ajustado curvas de gasto. Estas, son curvas que representan la relación entre el calado o nivel en una determinada sección y el caudal circulante por dicha sección, denominada sección de aforo. El objetivo principal de estas curvas es dotar a los encargados del mantenimiento del humedal de una herramienta para estimar, de manera rápida y sencilla, los caudales circulantes entre periodos de monitorización con tan solo medir el nivel del agua en determinado punto. Así, pueden realizar los ajustes oportunos (maniobras de compuertas, etc.) en caso de que existan diferencias importantes respecto a los caudales definidos en la estrategia de gestión del humedal.

Estas curvas son muy útiles para la gestión diaria del humedal, pero se debe tener en cuenta que su campo de aplicación o rango de validez está asociado normalmente a un tipo de funcionamiento hidráulico y al conjunto de datos que ha dado lugar a su obtención (ajuste), con ligeras extrapolaciones en todo caso. Estas curvas además, requieren de calibraciones o revisiones periódicas que garanticen su idoneidad a lo largo del tiempo. Además, es necesario el mantenimiento

y limpieza periódica tanto de la sección de aforo como de su entorno (aproximación al vertedero y labio del vertedero libre de vegetación que lo obstruya total o parcialmente, etc).

Así por ejemplo, en los puntos P4 y P6 (Figura 51) del *tancat* de Milia, el vertido a través del tablón situado aguas arriba de la conexión entre celdas –considerado como un vertedero en pared delgada– ha sido libre en la mayoría de los aforos, de manera que ha sido posible ajustar sendas curvas de gasto. Con los datos recogidos en el año 2015 se completaron y volvieron a ajustar las curvas obtenidas para estos dos puntos en el año 2014. De esta forma, se han obtenido los ajustes correspondientes.

Para P4, la bondad del ajuste resultó satisfactoria (curva izda.), con un coeficiente R^2 de 0.97. No obstante, también se observó que para valores de calado sobre el vertedero superiores a 13 – 14 cm, el vertido comienza a anegarse, o no existe una aireación suficiente entre la lámina vertiente y la pared del vertedero, del lado de aguas abajo, por lo que la ecuación obtenida no es de aplicación en esos casos, porque sobreestima el caudal real. Mientras que para P6 por diversos motivos (modificación de la altura del vertedero, obstrucción por vegetación, etc.) no fue posible obtener una curva de gasto que resultara totalmente satisfactoria. La utilización de la curva finalmente obtenida (y sus envolventes) se recomienda como primera aproximación y sólo a falta de aforo directo.

Del mismo modo, durante el periodo de monitorización del sector fp en el HATP, se calibró para el punto P5 la curva de gasto de la sección de aforo (Figura 52). En este caso no se generaba una sección crítica, por lo que los valores empleados en la calibración dependen del nivel de agua en el sector aguas abajo (fp3). Aun así, para la situación normal

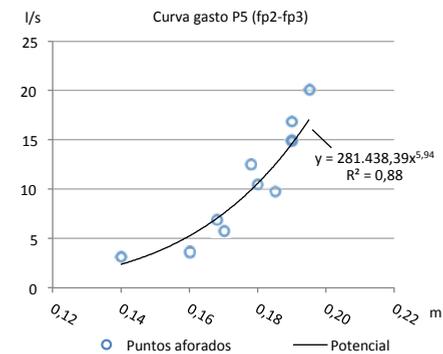
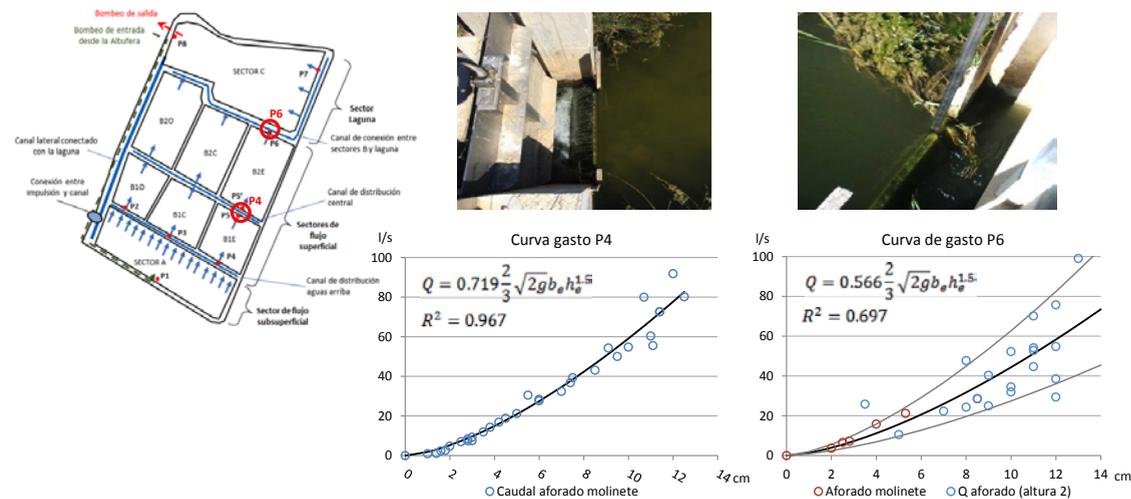


Figura 52
Gráfica de curva de gasto de P5 en HATP.

de funcionamientos del año 2014 y la primera mitad del 2015, el ajuste obtenido ha sido suficiente para que el personal encargado del mantenimiento del humedal pudiera estimar el caudal circulante por fp, únicamente midiendo el calado en el punto P5.

Correlaciones Hidráulicas

La entrada de agua a un sector o las conexiones hidráulicas entre celdas de un mismo sector, rara vez son sencillas, en el sentido de únicas. Normalmente son varias las entradas –normalmente reguladas, por ejemplo, por compuertas– a un sector desde un canal de distribución o varios los conductos de una conexión hidráulica entre celdas. Tener controlado el caudal entrante a cada unidad considerada (sector o celda) en una determinada situación de funcionamiento, implica necesariamente conocer la suma de caudales entrantes por cada una de las compuertas o qué pasa por cada uno de los conductos. Ello en principio requeriría de la medición o aforo del caudal circulante por cada una de esas vías de agua. No obstante, es bien conocido que esos caudales no son independientes, pues por ejemplo, aunque el reparto entre los dos tubos –del mismo diámetro– de una conexión entre celdas no sea el mismo, el caudal circulante depende de las condiciones de entrada y salida –niveles en las celdas–, y esas son las mismas para los dos. De tal manera que, tras una extensa campaña de

aforos en todos y cada uno de los conductos, se puede establecer matemáticamente esa dependencia. Estas funciones de dependencia matemática entre variables hidráulicas es lo que hemos dado en llamar **correlaciones hidráulicas**. De forma que, a partir por ejemplo del caudal circulante por uno de los dos conductos podemos obtener el caudal total entrante en la celda –y por diferencia con éste el circulante por el otro tubo– o, para unas condiciones de funcionamiento dadas, a partir del caudal circulante por una de las entradas al sector, el caudal total de entrada al mismo.

Estas correlaciones hidráulicas constituyen también una importante herramienta de gestión pues facilitan de nuevo la operación y control de las variables hidráulicas en los HA. Hacen estas operaciones más sencillas y de menor coste temporal.

Por ejemplo, en el HATP, el sector FG dispone de 4 tubos de entrada y 4 tubos de salida, lo que es beneficioso para la correcta distribución de flujos, dada su anchura, pero incómodo para determinar los caudales entrantes y salientes totales. Las secciones de aforo no se encuentran todas a la misma altura, ni están todas a la misma distancia de la entrada del Barranco del Poyo, de la que se abastece principalmente este sector. Esto implica que sea necesario aforar el caudal en todos los puntos, ya que pueden existir grandes diferencias

entre ellos. Además, el acceso a los puntos más alejados de los caminos principales no es sencillo durante determinadas épocas del año, en las que la vegetación es demasiado exuberante para poder transitar por los caminos con los aparatos de medida.

En este punto, con los datos obtenidos de la monitorización, se han comenzado a establecer relaciones entre uno de los puntos de entrada y el resto, y uno de los puntos de salida y el resto. De esta manera, aforando únicamente 2 puntos puede conocerse el caudal total de entrada y de salida. Para que los resultados sean fiables, se requiere un número de puntos superior al tomado en los muestreos puntuales, ya que el sector FG se monitorizó durante menos de un año.

Por otra parte, en la Laguna de Reserva (sector C) del HATP existen dos tubos de entrada y dos de salida, en los que también se han obtenido curvas de correlación hidráulica, para evitar el aforo de uno de los dos puntos (Figura 53).

En el caso del *tancat* de Milia, respecto a las entradas a la laguna (Sector C), durante el año 2015 se mantuvieron abiertas tanto la primera como la última compuerta, para mejorar el desagüe y evitar niveles más altos de lo deseado tanto en el canal donde vierten los sectores superficiales, como en

Figura 53
Relación de caudales en la entrada (izquierda) y salida (derecha) de la laguna. Caudal total en función del caudal aforado en el tubo derecho.

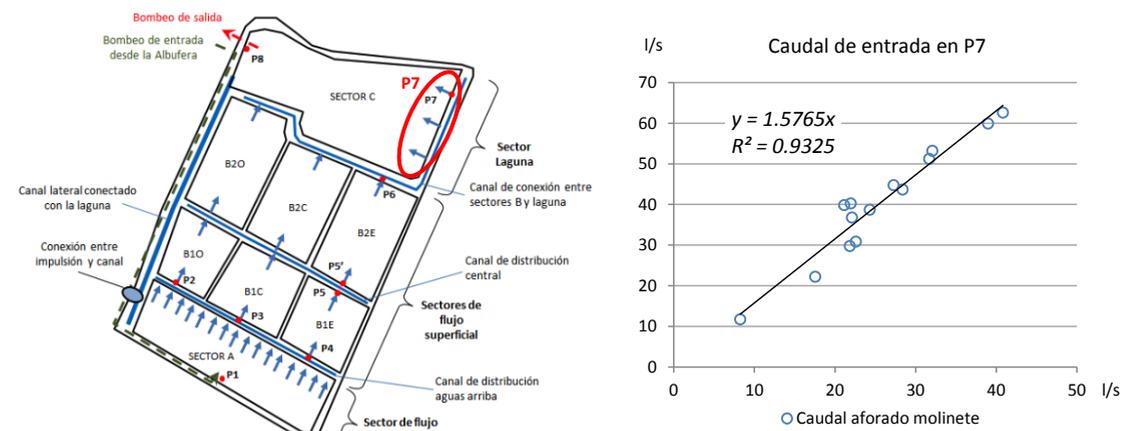
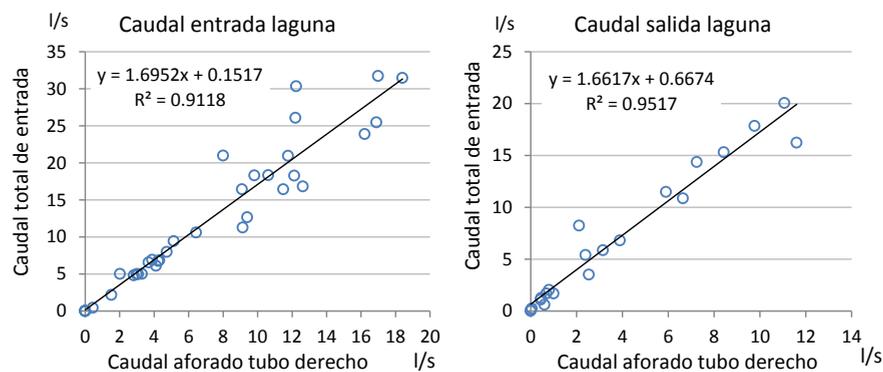


Figura 54
Relación de caudales en la entrada a la laguna. Caudal total en función del caudal aforado en la primera compuerta.

los propios sectores. Esto supuso aforar dos tubos más en cada muestreo, puesto que ambas entradas están compuestas de dos conductos, situados además a diferentes alturas (por lo que los tubos de la primera compuerta desaguan en lámina libre, y los de la tercera suelen hacerlo en presión). Para facilitar las tareas de aforo, se analizó la relación entre los caudales circulantes por cada una de las entradas y el caudal total en P7. La gráfica de la Figura 54 representa la relación entre el caudal circulante por la primera compuerta, y el caudal total de entrada a la laguna. Para el rango de caudales aforados, es posible definir una relación lineal (ajuste de una recta) con un alto grado de ajuste a los datos obtenidos.

cada línea de flujo en función de los caudales aforados en la línea central.

No obstante, en este humedal estos objetivos no pudieron completarse de manera satisfactoria por diferentes motivos. En primer lugar, los tubos de conexión entre los sectores se encuentran a una cota muy baja, como ya se ha comentado en el apartado de conexiones entre celdas, y por tanto se aterraban con mucha facilidad. Como no todos los tubos se aterraban por igual, y la limpieza de los tubos era periódica, pero no con la frecuencia suficiente para que no se modificaran las secciones de aforo entre muestreos, la relación de caudales entre los tres tubos de entrada a cada sector no era constante. Las relaciones obtenidas durante un muestreo se mantenían durante otros dos muestreos más, aproximadamente, pero después era necesario volver a medir en todos los puntos, para recalibrarlas.

En segundo lugar, las tres primeras celdas de cada línea de flujo (B1+2, B3 y B4) están interconectadas entre sí, además de estarlo con las celdas situadas inmediatamente aguas abajo de cada una de ellas (Figura 7). En función de la situación de los tubos de conexión de aguas arriba a aguas abajo (más o menos aterrados), y de los niveles de agua, se han observado distintos repartos del caudal de

En este caso son también de aplicación todas las consideraciones realizadas para las curvas de gasto en cuanto mantenimiento de condiciones bajo las que las correlaciones han sido deducidas, necesidad de calibraciones y revisiones periódicas, etc.

Por último, en el HATLI también se intentaron obtener correlaciones entre los distintos puntos de entrada a cada sector, ya que cada una de las conexiones consta de 3 tubos. De igual manera, también se intentó determinar el caudal que circulaba por

entrada entre las tres líneas de flujo. Si bien este reparto tiende a estabilizarse en un valor más o menos constante conforme avanza el bombeo, es complicado estimar el caudal que circula en un momento dado por los sectores adyacentes a los de la línea B3, únicamente aforando estos.

Repartos en función del grado de apertura de las compuertas

El conocimiento del reparto de caudales entre las diferentes líneas de flujo en función de los grados de apertura o cierre de los diferentes dispositivos hidráulicos de control, resulta de fundamental interés para la gestión de los HA. No obstante, su conocimiento, si los dispositivos son numerosos, no es en absoluto sencillo.

Así por ejemplo, un número importante de compuertas en un canal de reparto a la salida de un sector, con varios elementos de control por conexión hidráulica (duplicidad), puede facilitar operaciones de mantenimiento, reparación o incluso de siembra o plantación de la vegetación en una determinada línea de flujo, pero sin embargo, hace muy complicado el conocimiento exacto del reparto de caudales entre líneas.

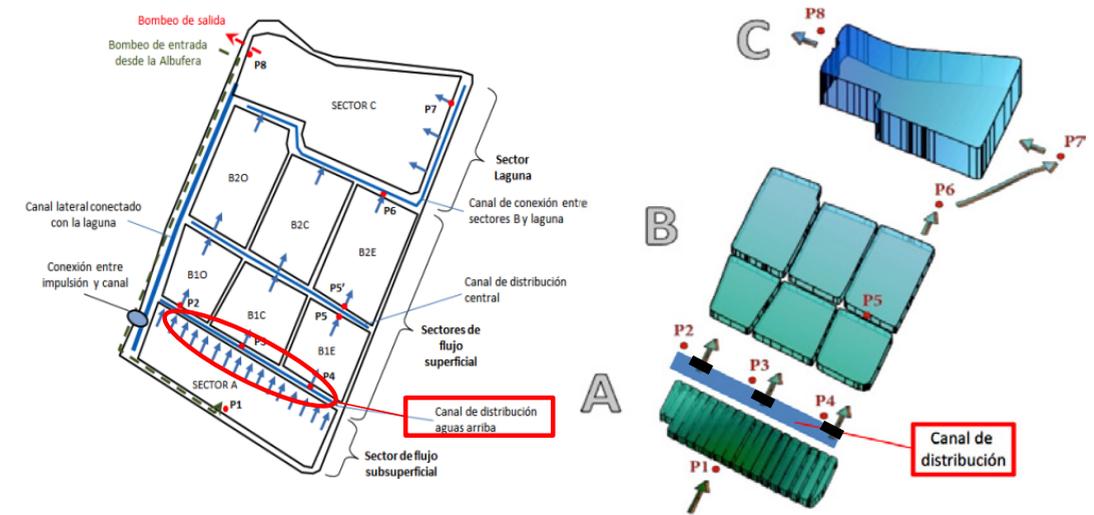
En este sentido, desde el diseño del propio HA deben tenerse en cuenta todos estos aspectos. En principio, es preferible un número de conexiones suficiente pero más bien reducido, evitando duplicidades y por tanto simplificando la gestión. No obstante, ese número debe ser suficiente tanto para la gestión de los flujos y niveles que se hayan establecido como para las posibles operaciones de reparación y mantenimiento de los propios dispositivos así como las que se requieran para la adecuada gestión de la vegetación (siembra, colonización, crecimiento, régimen de inundación, ...). Además, el diseño del HA debe ser tal que el funcionamiento hidráulico de estos

dispositivos de control sea el requerido (compuertas en desagüe libre, vertederos no anegados y bien aireados, ...). Dado que, aunque la alimentación al HA pueda ser por gravedad o por bombeo, la salida va a ser prácticamente siempre por bombeo, ya que es preceptivo que el HA funcione internamente por gravedad, la garantía del funcionamiento adecuado de los diferentes dispositivos de regulación y control se sustenta en una diferencia adecuada de cotas entre celdas interconectadas.

Normalmente, el conocimiento del reparto de caudales entre las diferentes líneas de flujo en función de las aperturas de las compuertas dentro de un canal de distribución, requeriría la monitorización en continuo prácticamente de todo el HA. Monitorización que debiera mantenerse el tiempo suficiente, con la alimentación ordinaria en cuanto a volúmenes a inyectar al sistema, y recogiendo todo el conjunto de maniobras de los órganos de control, para llegar así a recoger toda la casuística posible de funcionamiento.

En el HATP se dispone de control mediante compuertas en la propia entrada al humedal –pudiendo ser mayor la cantidad de agua de entrada por el lado izquierdo (Barranco del Poyo) o el derecho (Puerto de Catarroja)–, en la entrada y salida al canal de distribución intermedio que discurre entre fp y F4, y en la entrada y salida del canal que discurre entre la Laguna Educativa y la Laguna de Reserva (Figura 3). Mientras las compuertas de entrada permiten derivar mayor o menor porcentaje de agua a los tres sectores de flujo superficial (FG, fp y F4, tipo B), las compuertas de los canales intermedios permiten regular el porcentaje de entrada a cada una de las lagunas (en especial, qué parte del flujo saliente de fp, situado más o menos en el medio, circula hacia cada una de las lagunas).

En el HATM, el mejor ejemplo se encuentra a la salida del Sector A de Milia, en las conexiones



de los puntos P2, P3 y P4 que dan paso a las líneas de flujo Oeste, Centro y Este, del Sector B (Figura 55). Dado que todos estos puntos disponen de una compuerta de regulación, con una monitorización continua y prolongada se conocería con precisión suficiente, cuánta agua entra por la línea Este con su compuerta totalmente abierta cuando la Oeste lo está al 20% y la Centro al 50%, por ejemplo.

En cuanto al HATLI, éste no dispone de compuertas intermedias dentro del sector B, pero sí dispone de ellas a la entrada (aguas arriba de las celdas B2.1, B3.1 y B4.1) y a la salida (aguas abajo de las celdas B2.2, B3.3 y B4.3). Cuando se han alcanzado situaciones de flujo estacionario en el humedal (es decir, los caudales circulantes no dependían del tiempo, como sí ocurre durante las primeras horas de bombeo), se observa que el caudal circulante por la línea central (B3) es mayor que el que circula por las líneas laterales (B2+1 y B4), debido a que la línea central tiene más compuertas abiertas en la salida del sector B hacia la laguna.

En el caso de las compuertas de entrada, el efecto de la apertura de compuertas en el

reparto no es tan grande, por existir la conexión entre las primeras celdas de cada línea (B1.1 – B2.1 – B3.1 – B4.1), como ya se ha comentado.

Por la importancia de su conocimiento, en todo HA con una vida útil razonable, esta monitorización en continuo debiera llevarse a cabo. Con ella, se podría a su vez calibrar el correspondiente modelo matemático hidráulico y a partir de posteriores simulaciones tener 'controlada' toda suerte de situaciones posibles en cuanto a distribución de flujos en el HA.

C3.2 Calidad de aguas

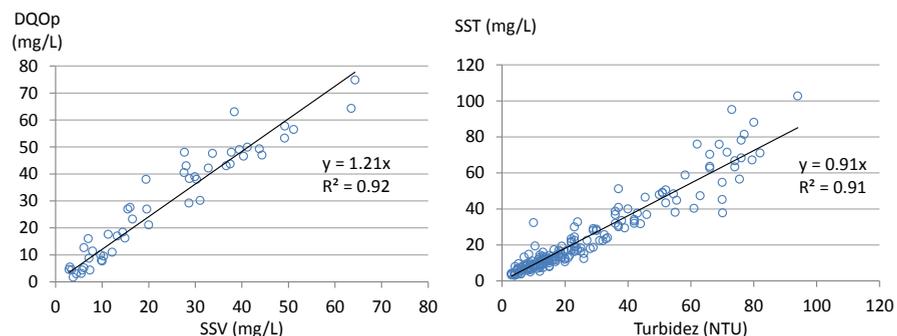
La monitorización de la calidad del agua en distintos puntos de los HHAA permite obtener diversas herramientas de gestión basadas en las variables monitorizadas, como son los modelos matemáticos. En el estudio de la calidad del agua se suelen distinguir dos tipos de modelos matemáticos:

- Modelos matemáticos empíricos
- Modelos matemáticos mecanicistas

Los modelos matemáticos **empíricos** constan de relaciones matemáticas obtenidas a

Figura 55
Elementos de conexión en HATM.

Figura 56
Modelos empíricos que relacionan diversas variables entre sí.



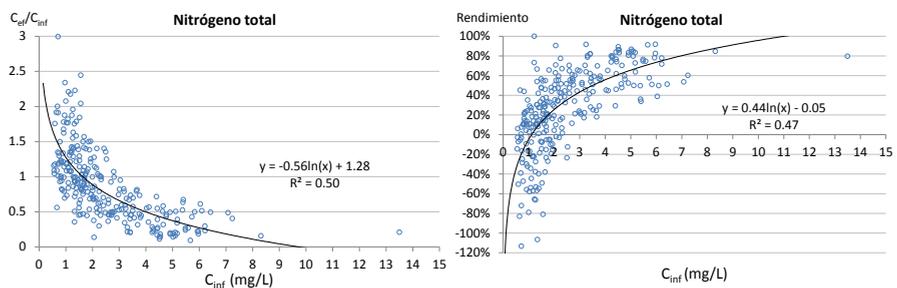
partir de datos experimentales (observados o medidos). Estas relaciones pueden ser lineales o no, univariantes o multivariantes.

En la Figura 56 se muestra algunos modelos empíricos obtenidos en el proyecto que relacionan diversas variables entre sí. Éstos nos permiten por ejemplo obtener el valor de una variable cuya medición es compleja a partir de otra variable de medición sencilla.

Otro tipo de modelos permiten estimar los resultados en la mejora de la calidad del agua. Algunas definiciones es preciso introducir en este momento:

- Velocidad de eliminación de contaminante: masa de contaminante eliminada por unidad de superficie y tiempo.
- Carga másica superficial de entrada/salida (CMS_{inf} , CMS_{ef} , $mg\ m^{-2}\ d^{-1}$): masa de contaminante que entra/sale por unidad de superficie y tiempo. Calculada como el producto de la concentración de entrada (C_{inf}) o salida (C_{ef}) y la carga hidráulica (CHS).

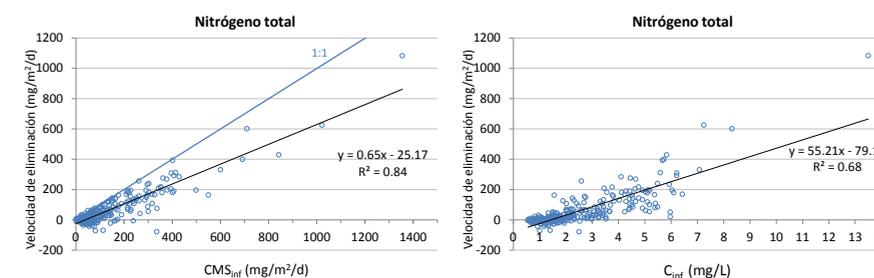
Figura 57
Relación entre la concentración de entrada y el rendimiento de eliminación, expresado como el ratio C_{ef}/C_{inf} (izda.) o como porcentaje (dcha.).



- Rendimiento de eliminación:
- Expresado como porcentaje de eliminación (%), calculado como el cociente entre la diferencia (masa de entrada-masa de salida) y la masa de entrada.
- Expresado como ratio entre la concentración de salida y la concentración de entrada (C_{ef}/C_{inf})

En la Figura 57 se muestran algunas de las relaciones que nos permiten obtener el rendimiento de eliminación de nitrógeno total en función de la concentración de entrada. Se observa claramente que los dos indicadores que se emplean revelan un mal funcionamiento para concentraciones de entrada bajas, esto es, se obtienen rendimientos negativos o ratio C_{ef}/C_{inf} mayores a la unidad. En contraste, ambos indicadores reflejan un buen funcionamiento de los HHA para C_{inf} altas.

Así mismo, empleando la variable nitrógeno total como ejemplo, la velocidad de eliminación presenta una fuerte dependencia de la CMS_{inf} (Figura 58 izda.). Respecto a los dos



Variable	Modelo de regresión lineal	R ²
Nitrógeno total	Velocidad de eliminación = $50.9 \cdot C_{inf} + 1287.1 \cdot CHS - 82.3$	0.73
Fósforo total	Velocidad de eliminación = $34.1 \cdot C_{inf} - 2.6$	0.23
Clorofila a	Velocidad de eliminación = $55.3 \cdot C_{inf} + 26767.8 \cdot CHS - 2080.9$	0.79
Sólidos en suspensión	Velocidad de eliminación = $60.7 \cdot C_{inf} - 823.3$	0.52
Materia orgánica (DQO)	Velocidad de eliminación = $54.5 \cdot C_{inf} - 1753.5$	0.59

componentes de la CMS_{inf} (C_{inf} y CHS), se observa que la velocidad de eliminación también depende en gran medida de la concentración de entrada (Figura 58 dcha.), mientras que la dependencia respecto a la CHS es poco significativa (correlación no mostrada). Sin embargo, si se hace una regresión lineal múltiple la CHS sí que aporta una variabilidad significativa, mejorando la bondad del ajuste de la ecuación para algunas variables (Tabla 11). Estos modelos empíricos representan una herramienta de gran utilidad de cara a estimar la velocidad de eliminación en función de la concentración de entrada y la carga hidráulica superficial, teniendo presente que son aplicables siempre que las variables se encuentren dentro de los rangos de variación para los cuales han sido obtenidos.

Recomendaciones

Dado que tanto el rendimiento de los HHA como la velocidad de eliminación de contaminantes presentan una relación positiva con la concentración de entrada, se recomienda:

- Aumentar la carga hidráulica superficial hacia valores altos dentro del rango probado, en torno a los $0.080\ m^3/m^2/d$, cuando las concentraciones de entrada son altas,

normalmente en primavera y otoño en el caso de lagunas eutróficas mediterráneas.

- Reducir la CHS, aunque no por debajo de $0.025\ m^3/m^2/d$ salvo que el contaminante de interés sea el nitrógeno, o incluso detener las celdas para tareas de mantenimiento (secados, siegas, retirada de peces grandes exóticos) cuando las concentraciones son bajas. En caso de que se opte por interrumpir el funcionamiento, es necesario mantener algunas de las celdas en operación para seguir ofreciendo un hábitat adecuado.

Los modelos matemáticos **mecanicistas** están basados en la ley de conservación de la materia y se desarrollan aplicando balances de materia a la masa de agua objeto de estudio. En el proyecto LIFE ALBUFERA se ha desarrollado un modelo de este tipo para modelar la calidad del agua del lago, de los HHA y la influencia de los últimos sobre el primero. En este caso los datos experimentales son empleados para calibrar las constantes cinéticas incluidas en el modelo, que son parámetros que reflejan la velocidad a la que se producen los procesos físicos, químicos y biológicos en la masa de agua. Una vez calibrados, este tipo de modelos son herramientas de extraordinaria utilidad para simular escenarios de operación y evaluar la

Figura 58
Dependencia de la velocidad de eliminación de nitrógeno total respecto a la carga másica superficial de entrada (izda.) y respecto a la concentración de entrada (dcha.).

Tabla 11
Modelos de regresión lineal (univariante o multivariante) para diversas variables de calidad del agua. La bondad del ajuste del modelo se expresa mediante el coeficiente de determinación (R^2). Las unidades de los parámetros son: velocidad de eliminación ($mg/m^2/d$; $\mu g/m^2/d$ para Clorofila a), C_{inf} (mg/L ; $\mu g/L$ para Clorofila a), CHS ($m^3/m^2/d$).

eficiencia de diferentes medidas para la recuperación de una masa de agua.

Estos escenarios muestran que la superficie total necesaria de HHAA destinados a la mejora de una masa de agua eutrofizada dependerá de diversos factores (disponibilidad de terrenos, dimensiones de la masa de agua a recuperar, principalmente), pero se ha podido estimar que para lograr una mejora significativa sería necesario una superficie equivalente a un anillo perimetral de anchura aproximadamente la quinta parte del diámetro equivalente de la masa de agua".

En los documentos "Documento técnico de ampliación y calibración del modelo Albufera" y "Documento técnico de simulaciones con el modelo Albufera"⁸ se describen detalladamente el modelo desarrollado y las simulaciones realizadas.

C4 COMPROBACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LAS VARIABLES HIDRÁULICAS DEFINIDAS EN LA GESTIÓN/ OPERACIÓN

Desde el punto de vista de la gestión de los HHAA, lo habitual es establecer los valores de referencia o estratégicos en relación al

cumplimiento de los objetivos planteados con la operación del propio HA. Así, es habitual fijar el volumen total de agua a tratar, los flujos –caudales– a que este volumen da lugar, y los niveles a mantener en cada una de las celdas del sistema, así como los tiempos de retención del agua en las mismas, directamente ligados con la mejora de la calidad de las aguas.

En nuestro caso, en el documento "Definición de la Estrategia de gestión de los tres humedales artificiales", en adelante DEG, y con el fin de facilitar la comparación de resultados, se homogeneizan en la medida de lo posible los factores de operación de los tres sistemas, *tancats* de Pipa, Milia e Illa. Se fija una CHS para los sectores B (flujo superficial) de los tres humedales artificiales y se varía el tiempo de retención hidráulica (TRH) modificando los calados. Para ello, se toma en cuenta la experiencia obtenida en los años previos de funcionamiento del *tancat* de la Pipa, con resultados satisfactorios para la gestión del sistema.

Los parámetros hidráulicos y los caudales a ingresar en cada sector de los sistemas son los que figuran en la Tabla 12.

Tras dos años de monitorización de estos valores de referencia establecidos para las

Tabla 12
Parámetros hidráulicos de funcionamiento de los sectores monitorizados, propuestos en la Estrategia de Gestión y reales.

Humedal artificial	CHS (m³/m²/d) Propuesta	CHS (m³/m²/d) Real	Calado (m) Propuesta	Calado (m) Real	TRH (d) Propuesta	TRH (d) Real
Tancat de la Pipa						
2014						
<i>f_p</i>	0.060	0.080	0.20	0.16	3.3	2.3
2015						
<i>f_p</i>	0.030	0.065	0.20	0.15	6.7	3.7
<i>FG</i>	0.060	0.030	0.20	0.20	3.3	9.3
Tancat de Milia (2014-15)						
<i>BE</i>	0.060	0.048	0.30	0.30	7.9	7.1
Tancat de L'Illa (2014-15)						
<i>B3</i>	0.060	0.033	0.40	0.48	6.7	14.6
<i>B4</i>	0.015	0.024	0.40	0.55	25.9	23.3

⁸ Ambos disponibles en la web del proyecto: <http://www.lifealbufera.org/index.php/es/documentos>.

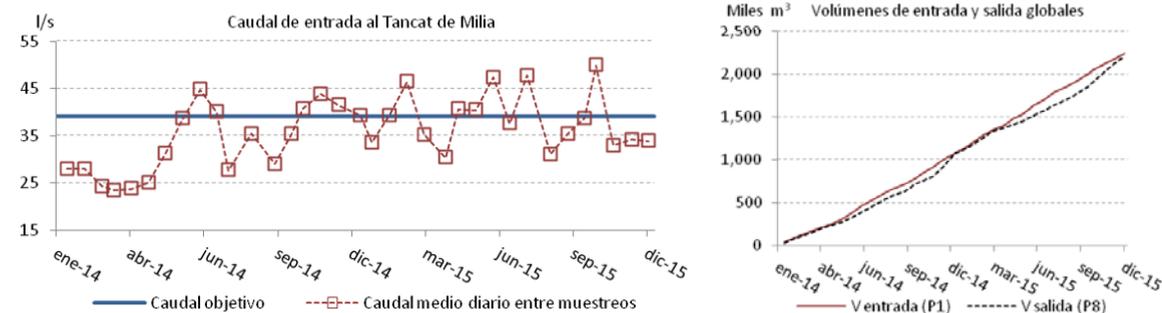


Figura 59
Evolución de caudales medidos y volúmenes acumulados tratados en HATM.

diferentes variables hidráulicas de interés, siguiendo los métodos y con los instrumentos descritos anteriormente, procede compararlos con los realmente empleados, observar su desviación, ver en qué medida esta desviación puede afectar a las conclusiones finales y constatar los motivos para corregirlos.

Existe en algunos sectores una desviación apreciable entre la CHS prevista y la real. Ello pone de manifiesto las dificultades operativas que han ido mencionándose a lo largo del presente manual. Por ejemplo, en la Figura 59 se muestran para el HATM los caudales medidos en la entrada en 2015 los días de monitorización de caudal y el volumen acumulado de entrada y salida durante el año:

Humedal artificial	Volumen previsto (Hm³)	Volumen real (Hm³)
HATP	4.26	3.10
HATM	2.47	2.25
HATLI	1.71	1.30
Total	8.44	6.65

Tabla 13
Volúmenes totales a tratar (previstos) y tratados (reales) en los HHAA.

Por ello, aunque se pueda producir un desajuste puntual de unos días en el régimen de caudales, mientras se mantenga el balance semanal/mensual, los resultados en cuanto a mejora de la calidad de las aguas y de los hábitats.

Se puede comprobar que se producen oscilaciones en las entradas asociadas a fallos técnicos en los bombeos (caídas de tensión, mal funcionamiento de los equipos informáticos, otros imprevistos...) que eran compensados con posterioridad (ver apartado B1.3.) procurando que el valor final anual se aproximara lo más posible al previsto.

El volumen total que en cada HA han entrado durante los dos años de monitorización frente al que se había previsto se muestra en la Tabla 13.

Se puede comprobar que en el cómputo global los caudales introducidos se han ajustado bastante bien al valor previsto. La mayor



D

Recomendaciones globales

A partir de la experiencia recogida en el proyecto LIFE ALBUFERA, se proponen finalmente una serie de ideas sobre cómo sería un HA destinado a mejorar simultáneamente la calidad de las aguas y la biodiversidad de la zona.

El HA ideal sería una combinación de HATP, HATM y HATLI puesto que se han visto aspectos complementarios en cada uno de ellos. El diseño consistiría en lo siguiente:

- Debe contar con los tres tipos de sectores: subsuperficial (A), superficial (B) y laguna somera (C) (HATM, HATLI).
- Si no se desea contar con un sector tipo A, hay que tener presente que un sector tipo B puede proporcionar los mismos rendimientos, excepto en la eliminación de DQO, siempre que la cobertura vegetal sea muy alta. Ello conlleva un esfuerzo importante en la gestión de la vegetación.
- La disposición ideal constaría de un primer sector subsuperficial (A), a continuación uno superficial poco profundo (B), tras él la laguna somera (C) y finalmente otro sector superficial profundo con alta cobertura vegetal (B). Tomando como referencia a HATM, la línea sería A-B1-C-B2.
- La superficie total debe ser aquella que cumpla con una CHS sobre los sectores A y B de entre 0.05 y 0.10 m³/m² d. En la fase de diseño, o bien se determina primero la superficie disponible y con ella se establece el caudal máximo a introducir, o bien se fija el caudal y se calcula la superficie.
- La superficie del sector C debe cumplir con una CHS entre 0.05 – 0.07 m³/m² d (HATM, HATLI). CHS de 0.02 m³/m² d en sectores C (HATP) son demasiado bajas e incrementan el TRH propiciando el deterioro de la calidad del agua (riesgo de eutrofización).
- El resumen de los dos puntos anteriores es que, de manera orientativa, la superficie puede distribuirse en terceras partes entre los tres elementos que constituyen el HA.

- En cuanto a la forma, la relación entre su longitud y ancho (L:A) debe quedar comprendida entre 3:1 y 1:1, pues, de esta manera, el reparto de flujos es lo suficientemente equilibrado y no se generan zonas muertas donde el agua permanece estancada durante largos periodos de tiempo. Estas relaciones no implican necesariamente que los contornos de las celdas sean rectos.
- Los taludes en los sectores B se recomiendan con una relación 3:2-2:1 mientras que en los sectores C se recomiendan 5:1-10:1.
- Los sectores C deben incluir pequeñas islas para favorecer el desarrollo de vegetación bajo distintos niveles de inundación y zonas de cría y descanso de aves, anfibios, reptiles, etc. Estas islas cortarán el posible oleaje originado por el viento, reduciendo así el riesgo de resuspensión de sedimentos. Desde el punto de vista hidrodinámico es importante que la longitud mayor del sector se sitúe perpendicular al viento predominante con el fin de minimizar dicha resuspensión.
- Los sectores A y B deben tener un fondo uniforme pero el sector C puede alternar zonas más o menos profundas con el fin de favorecer la presencia de macrófitos sumergidos, taludes vegetados y, en consecuencia, crear una mayor diversidad de ambientes que aumenten la capacidad de albergar una mayor diversidad de aves acuáticas.
- Con el fin de evitar vías de flujo preferente, la alimentación y las salidas de las celdas debe realizarse mediante compuertas separadas cada 30 m, como máximo (HATP, HATLI) y evitar que éstas se encuentren enfrentadas en la dirección del flujo. También es recomendable disponer de una buena densidad de vegetación frente a las entradas para lograr una buena distribución del flujo.
- Un beneficio añadido a poner el número de compuertas recomendado es que se evitan oscilaciones bruscas de nivel asociadas a cambios de caudal.

- La separación entre las celdas tipo B debe realizarse mediante motas que permitan el paso humano, máximo dos metros de anchura, y alturas máximas de 1 metro desde la base de la celda de aguas arriba (HATP). Las conexiones hidráulicas entre estas celdas deben ser mediante canales abiertos (HATP), nunca tuberías a presión (HATLI).
- En cuanto al tipo de conexiones, se recomiendan vertederos regulables en altura (los tablones de 5-10 cm serían su expresión más sencilla), ya que al mismo tiempo que controlan niveles, controlan caudales y permiten una fácil instrumentación.
- Es imprescindible que el equipamiento hidráulico dispuesto en las conexiones permita el aislamiento completo de las celdas, para poder vaciarlas durante las tareas de mantenimiento del humedal.
- Existirá un canal de reparto desde el sector A hacia los sectores B (HATM) pero no habrá canales de reparto entre celdas tipo B (HATP). Una vez el agua entre en el sector B la línea de flujo seguirá aguas abajo por el mismo sector.
- Se recomienda un canal de captación de aguas desde los sectores B al sector C siempre que las compuertas de salida del sector B no estén orientadas en la misma dirección que la compuerta de salida del sector C (HATM). También cuando en el caso de que existan dos lagunas se desee aportar agua a ellas desde cualquier sector B (HATP).
- Los niveles de agua en las celdas tipo B deben ir incrementándose a lo largo de la línea de flujo. De esta manera se favorece la presencia de distintos tipos de aves en función del calado que se alcance en cada una de ellas. Se recomienda entre 10-20 cm en la primera línea, 20-30 cm en la segunda línea y más de 40 cm en la tercera línea y siguientes.
- La vegetación será de eneas en las celdas más profundas, en las que si la profundidad lo permite se podría aprovechar para introducir vegetación sumergida. En las más

superficiales se proponen mezclas diversas de vegetación palustre (carrizo, lirios, enea, masiega, juncos...).

- En el sector subsuperficial la vegetación predominante será carrizo. No se aconseja plantar inicialmente una diversidad de plantas puesto que en un par de periodos de crecimiento el carrizo dominará al resto.
- Con el fin de complementar las funciones ecológicas del sector C y recuperar hábitats es necesario facilitar el desarrollo (espontáneo y/o asistido) de vegetación sumergida.
- La situación óptima es que la evacuación del agua sea por gravedad (HATLI); si no es posible, el bombeo deberá realizarse de la forma más continua posible. El punto de evacuación a la masa de agua deberá estar lo más alejado posible del punto de captación (HATP); es absolutamente inadecuado que estén próximos (HATM) puesto que eso impide el funcionamiento en continuo del HA.
- Se recomiendan al menos dos bombas con variador de frecuencia: una de capacidad de bombeo similar al caudal circulante medio al final del HA (20-60 l/s) y otra para evacuaciones de emergencias (vaciados rápidos, lluvias torrenciales) de hasta 500 m³/h. Si se puede disponer de tres bombas deberían ser dos pequeñas y una grande.
- En el caso de que el bombeo sea discontinuo se recomienda que se realice en horario de tarifa reducida.
- Con el fin de reducir la dependencia energética es recomendable el empleo de bombas solares directas. El empleo de estas bombas se limitaría a HHAA de reducida superficie (pocos miles de m²) ya que las capacidades de bombeo actuales son del orden de cientos de litros por hora.
- Las bombas deben ser gestionadas mediante un sistema SCADA que permita su acceso remoto.



E

- Allen R.G., Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith, 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Monografía 56). FAO Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. ISBN 92-5-304219-2
- Bos, M.G., 1976. Working group on small hydraulic structures. Discharge measurement structures.
- Brix, H., 1994. Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 29(4), pp.71-78.
- Chow, V.T., 1959. Open channel flow. London: McGRAW-HILL, 11(95), pp.99-136.
- Comín, 2014. Manual de restauración de humedales en cuencas agrícolas. Comarca de los Monegros. Accesible en http://www.creamagua.com/documentos/Manual_humedales.pdf.
- Cooper PF, Job GD, Green MB, Shutes RBE. 1996. Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment. Ed. WRC publications. ISBN 1.898920 27 3.
- Dunne, E. J., M. F. Coveney, E. R. Marzolf, V. R. Hoge, R. Conrow, R. Naleway, E. F. Lowe & L. E. Battoe, 2012. Efficacy of a large-scale constructed wetland to remove phosphorus and suspended solids from Lake Apopka, Florida. *Ecological Engineering* 42: 90-100.
- Dunne, E.J., M.F. Coveney, E.R. Marzolf, V.R. Hoge, R. Conrow, R. Naleway, E.F. Lowe, L.E. Battoe & P.W. Inglett, 2013. Nitrogen dynamics of a large-scale constructed wetland used to remove excess nitrogen from eutrophic lake water. *Ecological Engineering* 61: 224-234
- Dunne, E.J., M.F. Coveney, V.R. Hoge, R. Conrow, R. Naleway, E.F. Lowe, L.E. Battoe & Y. Wang, 2015. Phosphorus removal performance of a large-scale constructed treatment wetland receiving eutrophic lake water. *Ecological Engineering* 79: 132-142.
- FAO-Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 1997. Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía. (Boletín de Suelos de la FAO - 68). Departamento de Desarrollo Sostenible. ISBN 92-5-303406-8. <http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s06.htm> (consultado 29/07/2016).
- García, J y A. Corzo, 2008. Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Accesible en http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/2474/JGarcia_and_ACorzo.pdf (20/09/2016)
- Hijosa-Valsero, M., V. Matamoros, J. Martín-Villacorta, E. Bécares y J. M. Bayona (2010). Assessment of full-scale natural systems for the removal of PPCPs from wastewater in small communities. *Water Research*, 44, 1429-1439.
- Kadlec RH (2016). Large constructed wetlands for phosphorus control: a review. *Water* 2016, 8, 243; doi:10.3390/w8060243. Accesible en www.mdpi.com/journal/water.
- Kadlec, R.H. et al., 2000. Constructed wetlands for pollution control. Processes, performance, design and operation. IWA Publishing, London. ISBN 1 900222 05 1.
- Kadlec, R.H., Wallace, S.D., 2009. Treatment Wetlands, 2nd ed. CRC Press, Boca. Raton, FL.
- MAGRAMA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). 2013. Protocolo de análisis y cálculo de métricas de fitoplancton en lagos y embalses. MFIT-2013.
- Margalef, R. 1981. Distribución de los macrófitos de las aguas dulces y salobres del E y NE de España y dependencia de la composición química del medio. Fundación Juan March, Serie Universitaria, nº 157.
- Martín, M., N. Oliver, C. Hernández-Crespo, S. Gargallo y M.C. Regidor, 2013. The use of free water surface constructed wetland to treat the eutrophicated waters of lake L'Albufera de Valencia (Spain). *Ecological Engineering* 50:52-61.
- Martín, M., S. Gargallo, C. Hernández-Crespo, y N. Oliver, 2013b. Phosphorus and nitrogen removal from tertiary treated urban wastewaters by a vertical flow constructed wetland. *Ecological Engineering* 61:34-42.
- MMA (Ministerio de Medio Ambiente), 2004. Estudio para el desarrollo sostenible de l'Albufera de Valencia. Asistencia técnica TYPESA. Accesible en <http://www2.chj.gob.es/albufera/index.html>.
- Nairn, R.W. & W.M. Mitsch, 2000. Phosphorus removal in created wetland ponds receiving river overflow. *Ecological Engineering* 14: 107-126.
- Real Decreto 1/2016, de 8 de enero, por el que se aprueba la revisión de los Planes Hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Occidental, Guadalquivir, Ceuta, Melilla, Segura y Júcar, y de la parte española de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Oriental, Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana y Ebro.
- Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.
- Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental.
- Salas J.J., Pidre J.R., Cuenca I. 2007. Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales.
- Terzakis S, Fountoulakis MS, Georgaki I, Albantakis D, Sabathianakis I, Karathanasis AD, Kalogerakis N, Manios T, 2008. Constructed wetlands treating highway runoff in the central Mediterranean region. *Chemosphere* 72: 141-149.
- UNE-EN ISO 5667: 2006. Calidad del agua. Partes 1 a 3.
- USEPA, 2000. Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters. Office of Research and Development, Cincinnati, OhioEPA/625/R-99/010.
- Vymazal, J., 2012. Enhancing ecosystem services on the landscape with created, constructed and restored wetlands. *Ecological Engineering*, 37, 1-5.
- Vymazal, J., 2013. Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: a review. *Ecological Engineering* 61: 582-592.



LIFE12 ENV/ES/000685



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Instituto de Ingeniería del
Agua y Medio Ambiente



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

CONSEJO REGULADOR
DENOMINACIÓN
DE ORIGEN PROTEGIDA
D.O. CALAR



Con el apoyo de:



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE



Con la contribución del instrumento financiero LIFE+ de la Unión Europea