

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA EFICIENCIA DE MEZCLA EN DEPÓSITOS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

• Anna Mujal i Colilles • Allen Bateman-Pinzón •
• Vicente de Medina-Iglesias •
Universitat Politècnica de Catalunya, España

Resumen

El fenómeno de la mezcla en depósitos de abastecimiento de agua tiene un efecto directo en la calidad del líquido saliente —por la creación de zonas de mezcla pobre y la estratificación—, que puede tener efectos negativos en la salud pública. El diseño de un depósito de abastecimiento debe considerar las condiciones de entrada y salida, así como su orientación, en caída libre o *jet*, para prevenir la formación de esas zonas. En este artículo se presentan los experimentos realizados en un modelo físico a escala reducida, considerando tres entradas diferentes (una por tubería y dos en caída libre), fijándose como objetivo decidir cuál de estas entradas consigue la mejor eficiencia de la mezcla. Además, se han estudiado los efectos que pueden producir las columnas que sostienen el techo del depósito sobre la eficiencia de la mezcla. Se ha realizado un tratamiento digital de las imágenes, con resultados de tipo cualitativo, que muestran que el flujo que sale por la tubería consigue una eficiencia mayor que el que se produce por las caídas libres tanto en modelo como en prototipo, debido al momentum horizontal que la primera de ellas imprime al flujo. Es importante destacar que el tiempo para mezclar el volumen almacenado depende de la distancia entre la entrada y la pared opuesta, así como de su orientación. En términos de las columnas, despreciando los efectos viscosos de escala y teniendo en cuenta todo el depósito, las columnas tienen un efecto negativo en la eficiencia de la mezcla, a pesar de dividir el flujo creando zonas de turbulencia local, ya que absorben energía del flujo y deterioran la velocidad de la mezcla en general.

Palabras clave: tiempo de mezcla, depósito de abastecimiento, eficiencia, *jets*, modelo físico a escala reducida, escala de Reynolds, tratamiento de imágenes.

Introducción

Los depósitos de almacenamiento de agua son elementos funcionales importantes dentro del sistema de abastecimiento de agua. Construidos en sistemas de abastecimiento donde la fuente de agua no permite la extracción de un caudal constante durante todas las épocas del año, o el régimen de ahorro energético supone un bombeo a la población usuaria no constante, su función es almacenar el agua durante temporadas de extracciones altas, para así poder abastecer con la misma intensidad a la población en épocas donde el caudal extraído es inferior a la demanda, conocido como regulación.

El estudio de este tipo de estructuras resulta importante al ser una pieza clave dentro del sistema de abastecimiento de aguas debido a la influencia que tiene un mal uso de esta instalación en la salud pública. En función de las características del tanque, la mezcla entre el agua entrante y el agua almacenada —llamada también agua del medio— puede darse de una forma o de otra, generando diferentes mapas de tiempos de residencia. El tiempo de residencia resulta de elevada importancia debido a la dimensión que nos da en cuanto a la eficiencia de mezcla que se está dando en cada momento en el depósito. La DBO es uno de los estándares utilizados para medir la calidad del agua y

está relacionada con la concentración de microorganismos. En la fase de crecimiento, esta concentración varía siguiendo una curva exponencial en el tiempo (*i.e.* $c = c_0 e^{kT}$, donde c_0 es la concentración inicial, k es la constante de crecimiento del microorganismo y T es el tiempo de residencia), haciendo de la eficiencia de mezcla el parámetro a controlar para evitar una degradación de la calidad del agua. Las zonas con elevados tiempos de residencia son síntoma de una mala mezcla, llegándose a generar zonas de mezcla nula. Estas zonas resultan especialmente peligrosas en lo que se refiere a la generación de posibles problemas de salud pública: el estancamiento del agua provoca un aumento en el tiempo de residencia, haciendo que la concentración de DBO se dispare y obligando al vaciado completo de la zona estancada para poder derivar el agua a la red. Así, en tiempos de baja extracción de caudales debe controlarse la existencia de zonas muertas para poder derivar agua con la calidad suficiente, ya que, como se ha comentado, las zonas con poca mezcla —elevados tiempos de residencia— provocan la pérdida de parte del volumen almacenado.

La mezcla del agua entrante con la del ambiente y la generación de mapas de tiempos de residencia homogéneos se debe básicamente a la energía suministrada en la entrada, la relación del caudal entrante con el volumen, la geometría del tanque, el tipo de entrada y las características geométricas de ésta. La definición de mezcla puede ser vulnerable a discusiones, pero, en general, se apuesta por definir el tiempo de mezcla como el tiempo que tarda el depósito en renovar totalmente el agua almacenada, relacionado de manera directa con las características definidas anteriormente.

Puede haber también un fenómeno de mezcla debido a las diferencias de temperatura entre el agua entrante y la del ambiente, cosa que varía las densidades de ambos fluidos y provoca un tipo de mezcla o un fenómeno de estratificación, fenómenos totalmente distintos a los que se producen por la inyección de energía cinética pura.

En general, en tanques de abastecimiento de aguas, la mezcla se produce por el fenómeno relacionado con el flujo de energía. El *jet* que se forma en la entrada tiene un momentum característico que propicia la mezcla y además confiere ciertas características geométricas a la forma de mezclarse durante el proceso. Okita y Oyama (1963), basándose en estudios hechos anteriormente (Hyman, 1962; Fosset, 1973, y Simpson 1975), introducen la dependencia del tiempo de mezcla respecto la altura del volumen de agua. De esta forma, el tiempo de mezcla queda según la expresión (1):

$$\tau_m = \frac{KH^{1/2}D^{3/2}}{M^{1/2}} \quad (1)$$

Según Okita y Oyama, la constante K tiene un valor aproximado de 4.6, pero en un estudio posterior realizado por Rossman y Grayman (1999) adquiere un valor de 10.2, con la definición de tiempo de mezcla siguiente, donde V representa el volumen del tanque:

$$\tau_m = \frac{KV^{2/3}}{M^{1/2}} \quad (2)$$

Los mismos autores, que generalizan la ecuación de Okita y Oyama (1) para tanques rectangulares, argumentan que la diferencia en el valor de la constante puede deberse a distintos factores, entre los cuales destaca la definición más precisa de mezcla (95% de uniformidad en el trazador).

Este tipo de estudios también se utiliza en el diseño de tanques para acuicultura, donde es importante la renovación del agua interna, a fin de asegurar una buena calidad de vida de los peces.

La definición del fenómeno de mezcla se ha llevado a cabo, habitualmente, a través de modelos físicos a escala reducida. Esto confiere ciertas problemáticas al estudio, intrínsecas a cualquiera realizado con un modelo de este tipo y que, aparte, conlleva el uso del agua. En

general, todas las investigaciones nombradas anteriormente utilizan la semejanza de Froude para relacionar las escalas temporales con las escalas geométricas; en el artículo que se presenta a continuación se utiliza la semejanza de Reynolds como novedad, entendiendo que el fenómeno de mezcla debido a una cantidad energética entrante tiene más relación con las fuerzas turbulentas que con las fuerzas de gravedad.

La característica esencial que permite trabajar con un modelo físico reducido en el caso de estudio de mezcla tiene mucha relación con la autosemejanza que presenta el *jet* de entrada al tanque. Pope (2000) y Martín-Vide *et al.* (1989) aseguran a través de estudios experimentales que la autosemejanza en el *jet* se produce con valores del número de Reynolds superiores a 10 000.

En el presente artículo se resume el trabajo experimental realizado para comprobar la eficiencia de mezcla en un depósito de construcción real en la localidad de L'Ampolla, Tarragona, España, en función del tipo de entrada, la situación de ésta y también la influencia de las salidas de agua del depósito en la mezcla final. Además, introduce otra variación relacionada con la construcción de tanques de almacenamiento de agua para grandes poblaciones sobre la existencia de columnas en el interior del depósito, que pueden influir también en la eficiencia de la mezcla y, por tanto, en la calidad del agua.

El trabajo se realiza mediante un modelo físico reducido, construido en el Laboratorio de Morfodinámica Fluvial del grupo GITS-UPC del Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Descripción del prototipo

El depósito de almacenamiento de L'Ampolla consiste en una planta rectangular de 200 m de largo y 150 m de ancho, con 950 columnas para sustentar el techo que cubre dicho depósito, con un nivel máximo de agua de cinco metros. El

agua, proveniente de la estación potabilizadora, entra al depósito mediante una bomba, situada en la esquina derecha inferior de la planta que se muestra en la figura 1, hasta que se alcanza una altura de agua de 2.5 metros; a partir de ese momento se deriva el agua hacia cuatro tornillos de Arquímedes (figura 2), situados en la parte inferior de la mitad del lado largo de la planta que se muestra en la figura 1, opuestos a las salidas de agua. Entonces, la entrada de agua se realiza por caída libre, teniendo una caída mínima de 50 cm, puesto que la punta de estos tornillos se sitúa a una cota de 5.5 metros respecto de la base del depósito.

Para reducir costes se plantea entrar el agua al depósito por la mitad del lado corto de la planta, ahorrando longitud de tubería (2 m de diámetro) hasta en 175 metros. Son dos tipos de entrada los que se proponen en esta misma localización: entrar el agua por el mismo sistema de tornillos de Arquímedes previsto en el proyecto original, o directamente a través de la tubería localizada en el fondo del depósito.

Metodología de trabajo

Descripción del modelo

Los experimentos se realizaron en un modelo físico reducido a escala 80 respecto al prototipo. Las dimensiones principales se describen en el cuadro 1, en donde L es el lado largo de la base; B , el lado corto; H , la altura máxima de agua que permite el depósito; A_{dep} , el área de la base del depósito; Vol_{dep} , el volumen de agua máximo del depósito; Φ_{tub} , el diámetro de la tubería de entrada de agua, y A_{tub} es el área de la sección de la tubería de entrada de agua.

Siguiendo las instrucciones de las figuras 3 y 4, el depósito del modelo se alimenta del agua almacenada en dos depósitos de mezcla, uno de los cuales contiene agua limpia y, el otro, agua mezclada con trazador. De estos depósitos, mediante una bomba modelo (MH 10-3), llega el agua al depósito de nivel constante para proferir energía suficiente al

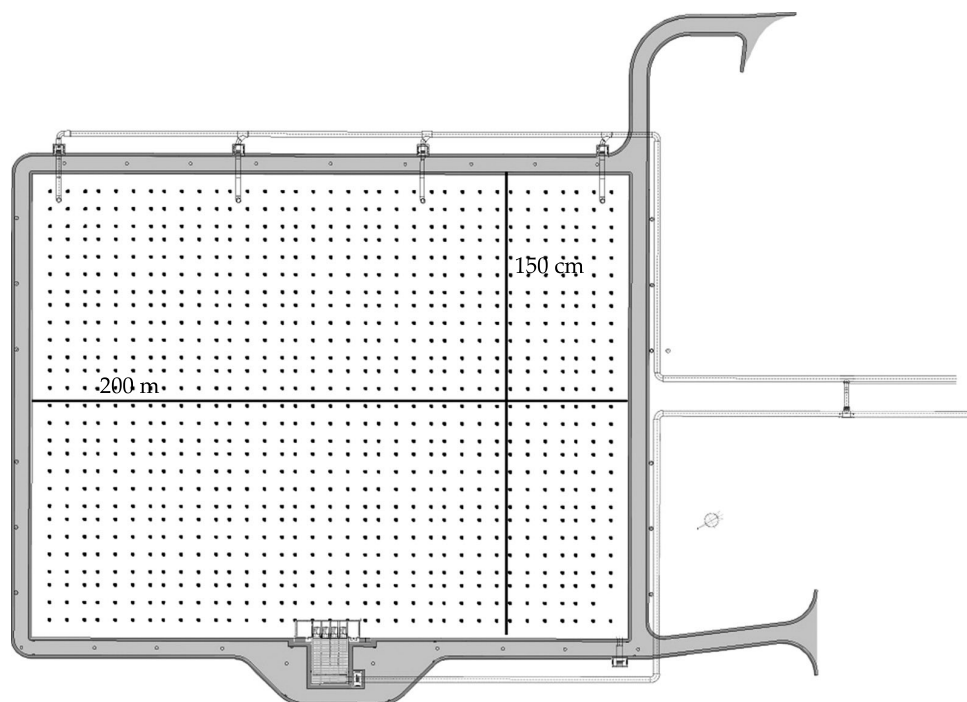


Figura 1. Planta del depósito de almacenamiento de L'Ampolla. Fuente: Dipòsit d'Aigua Potable a l'ETAP de L'Ampolla, RUBAU, S.A.

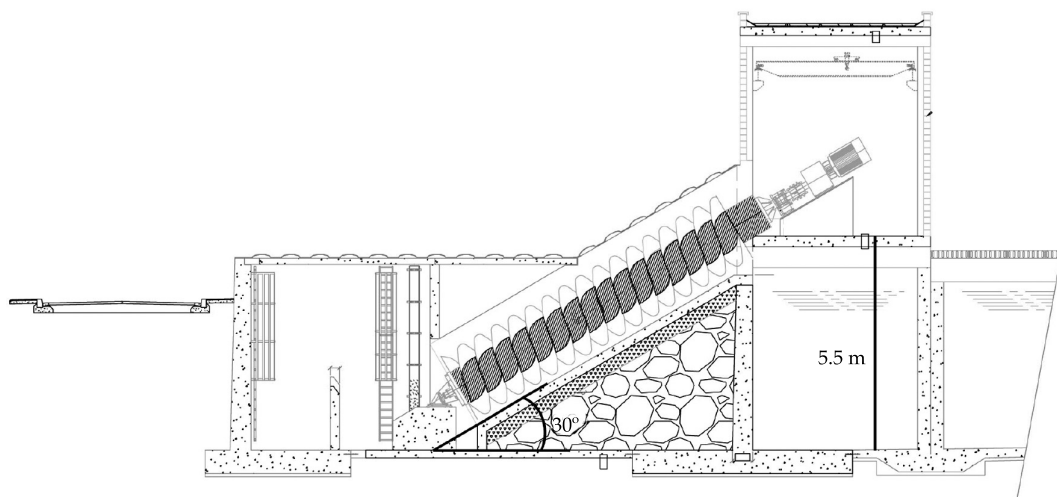


Figura 2. Perfil de un tornillo de Arquímedes. Fuente: Dipòsit d'Aigua Potable a l'ETAP de L'Ampolla, RUBAU, S.A.

Cuadro 1. Relación de las dimensiones geométricas entre el modelo y el prototipo, siguiendo una escala geométrica de 80.

	L (m)	B (m)	H (m)	A_{dep} (m ²)	Vol_{dep} (m ³)	Φ_{tub} (m)	A_{tub} (m ²)
Prototipo	200	150	5	30 000	150 000	2	3.14
Modelo	2.5	1.9	6.25E-02	4.7	292E-03	2.5E-02	4.91E-04

depósito del modelo. Del depósito de nivel constante se deriva el agua al depósito en estudio, pasando por un caudalímetro modelo B110-500 (B28SLM-HB) (0.01 l/min) y una válvula de precisión modelo CR-100 1" BSP. Una vez en el modelo, el agua se evacua a través de cuatro posibles salidas colocadas en la base del depósito, que recirculan el agua en caso de ser agua limpia y la deriva al alcantarillado en caso de ser agua ya con inicio de mezcla, previo paso por un panel de medida de caudales de cada una de las salidas. El trazador utilizado es un polvo químico biodegradable. En la figura 5 se muestra una fotografía durante la entrada de trazador en el modelo a escala reducida.

Se utiliza la semejanza de Reynolds para definir la escala cinemática, puesto que se considera que el fenómeno de mezcla es principalmente turbulento y las fuerzas viscosas

son más importantes que las fuerzas de gravedad. Con esta semejanza, la escala cinemática resulta inversamente proporcional a la geométrica, siendo la velocidad de modelo ochenta veces superior a la de prototipo:

$$\begin{aligned} \text{Re}_m &= \text{Re}_p \\ \frac{v_p}{v_m} &= \frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{\lambda_g} = \frac{1}{80} \end{aligned} \quad (3)$$

De esta forma, la escala temporal queda independiente del número de Reynolds:

$$\begin{aligned} \frac{v_p}{v_m} &= \frac{L_p T_m}{L_m T_p} = \frac{\lambda_g}{\lambda_t} \\ \lambda_t &= \frac{\lambda_g}{\lambda_v} = \lambda_g^2 \end{aligned} \quad (4)$$

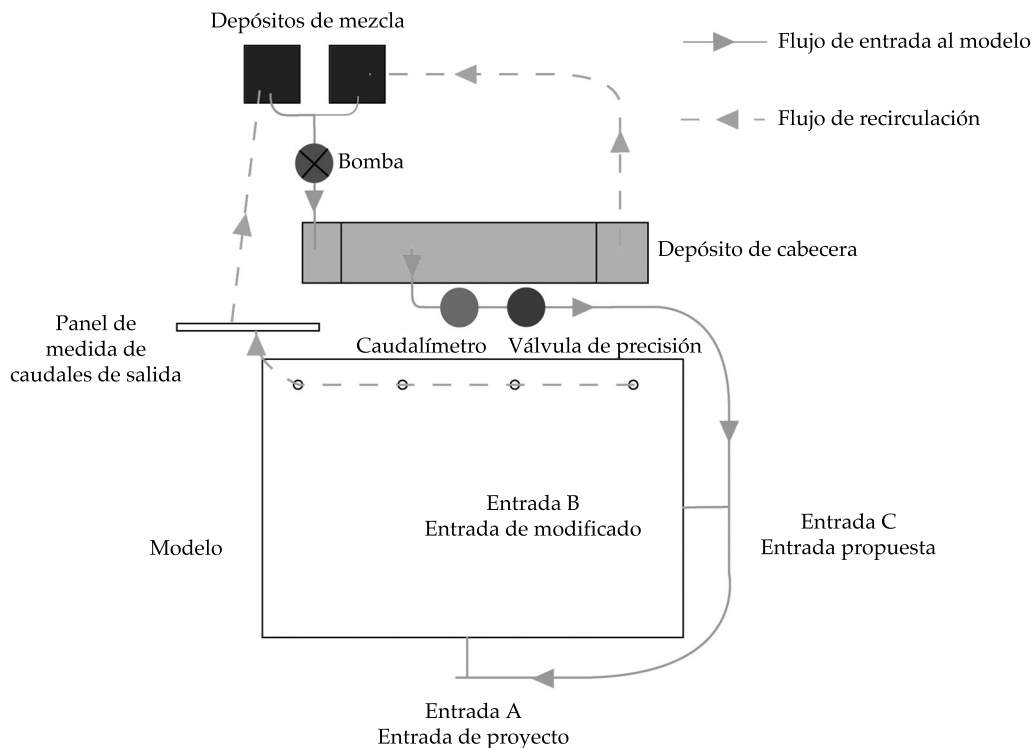


Figura 3. Esquema en planta del sistema del modelo.

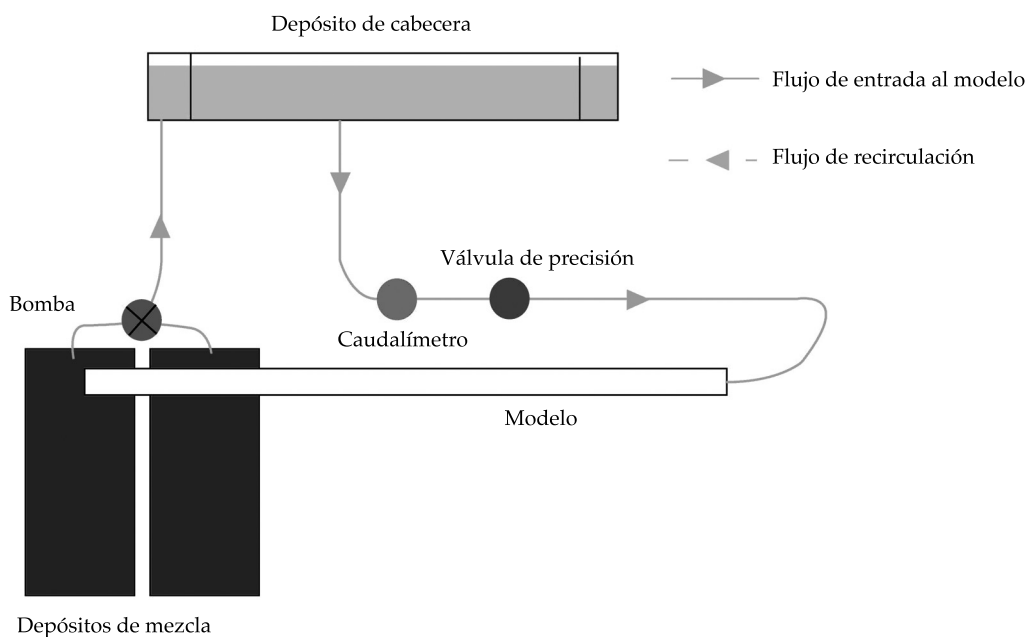


Figura 4. Esquema en alzado del sistema del modelo.

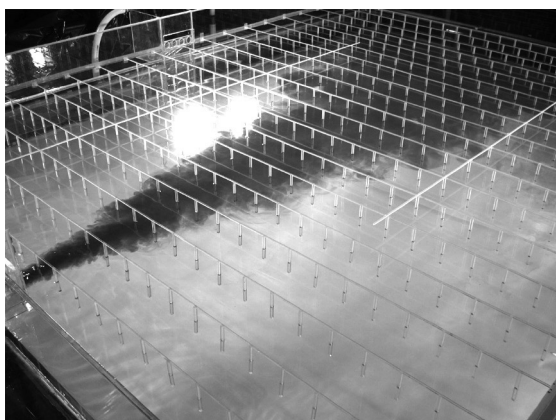


Figura 5. Ejemplo de un ensayo realizado entrando por la entrada propuesta C a través de tubería.

Esto supone proferir al modelo unos caudales extremadamente altos para poder mantener invariable el número de Reynolds entre el modelo y el prototipo, y las limitaciones del laboratorio de Morfodinámica Fluvial no permiten utilizar caudales tan altos.

Para solucionar este problema se parte de las características intrínsecas a los *jets*, que exhiben una autosemejanza con independencia de números de Reynolds, con un valor superior a 10 000. Si se utiliza la relación entre tiempos de permanencia (la relación entre caudales y la relación entre tiempos de difusión obtienen relaciones equivalentes), la escala temporal termina resultando la expresión (5):

$$\lambda_t = \frac{T_p}{T_m} = \frac{Vol_p Q_m}{Vol_m Q_p} = \lambda_g^3 \frac{Re_m A_m v_m L_p}{Re_p A_p v_p L_m} = \frac{1}{\lambda_v \lambda_g \lambda_{Re}} \lambda_g^3 \quad (5)$$

Siendo agua el líquido utilizado en el modelo y despreciando los efectos de temperatura, las viscosidades resultan iguales, quedando la escala temporal de la forma siguiente:

$$\lambda_t = \frac{\lambda_g^2}{\lambda_{Re}} \quad (6)$$

Escalar el número de Reynolds permite reducir la escala temporal y, por tanto, los caudales de entrada al modelo. Con esto, la escala cinemática aumenta, pasando a depender de la escala de Reynolds que se utilice. Evidentemente, por características de *jets*, y para asegurar la comparación entre modelo y prototipo, el número de Reynolds del modelo debe ser superior a 10 000. De esta forma, con las limitaciones del modelo, el caudal mínimo de entrada en el modelo se fija con un valor de $2.5\text{E-}04 \text{ m}^3/\text{s}$, con un Reynolds asociado de $1.27\text{E}+04$. El cuadro 2 indica los valores finales de las escalas utilizadas en todos los experimentos.

Ensayos realizados

Se propone el estudio de tres entradas de agua diferentes al depósito. Siguiendo la figura 6, la entrada A, situada en la mitad del lado largo de la base, corresponde a una entrada por caída libre concentrada en cuatro subflujos para simular la entrada real a través de tornillos de Arquímedes; la entrada B, de características similares a la entrada anterior, se sitúa en la mitad del lado corto, pero dentro del depósito, a cinco metros en relación con la misma pared; finalmente, la entrada C proporciona una

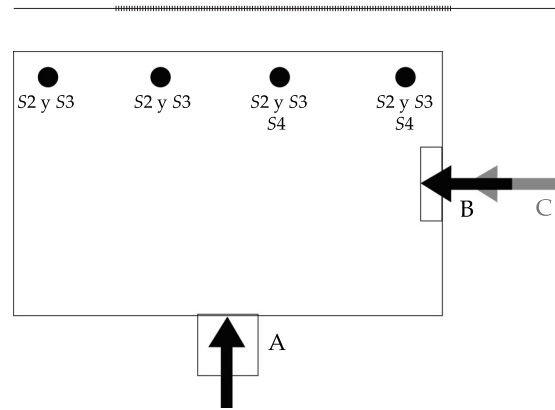


Figura 6. Esquema de las distintas entradas de estudio. Entradas A y B mediante caída libre; entrada C mediante tubería. S2: salidas activadas en la situación 2; S3: salidas activadas en la situación 3; S4: salidas activadas en la situación 4.

aportación de flujo a través de una tubería situada de manera perpendicular a la pared del lado corto de la base, a una altura igual a la mitad de la máxima supuesta en el depósito de cinco metros. La entrada A es la propuesta originalmente en proyecto y, las B y C son las modificadas.

Las situaciones de estudio que se plantean son cuatro: dos en flujo no permanente y dos en flujo permanente (valores en prototipo):

Cuadro 2. Relación de escalas utilizadas en los experimentos.

Situación	$\lambda_g = L_p / L_m$	$\lambda_Q = Q_p / Q_m$	$\lambda_v = v_p / v_m$	$\lambda_{Re} = Re_p / Re_m$	$\lambda_t = T_p / T_m$
1-3-4	80	$2.0\text{E}+05$	3.1	250	25.6
2	80	$1.2\text{E}+05$	1.8	150	42.7

Cuadro 3. Cantidad de ensayos realizados en función de la entrada de estudio y las situaciones definidas.
Ensayos realizados con columnas y sin columnas.

Entrada/ situación	Con columnas			Sin columnas		
	Proyecto	Propuesta		Proyecto	Propuesta	
	A	B	C	A	B	C
1	3	5	6		1	
2	1	1	1			3
3	1	1	3			3
4	1	1	4	1		

- Situación 1: no permanente. Caudal de entrada de 5 m³/s, caudal de salida nulo. Se llena el modelo desde una altura de agua de 3 a 5 m. La duración del ensayo en prototipo corresponde a 3 horas 20 minutos.
- Situación 2: no permanente. Caudal de entrada de 3 m³/s. Caudal de salida de 5 m³/s. Agua saliendo por las cuatro salidas con el mismo caudal por salida de 1.25 m³/s. Se vacía el depósito desde una altura de 5 a 3.1 m. La duración del ensayo en prototipo corresponde a 8 horas 3 minutos.
- Situación 3: permanente. Caudal de entrada y de salida de 5 m³/s. Agua saliendo por las cuatro salidas con el mismo caudal por salida de 1.25 m³/s. La duración del ensayo en prototipo corresponde a 8 horas 19 minutos.
- Situación 4: permanente. Caudal de entrada y de salida de 5 m³/s. Agua saliendo por las dos salidas más próximas a las entradas B y C, con el mismo caudal por salida de 2.5 m³/s. La duración del ensayo en prototipo corresponde a 8 horas 19 minutos.

En referencia a las columnas, se colocan 475 columnas de metacrilato de 7 cm de altura y sección 5 x 5 mm de forma equidistante en la base del depósito. El cuadro 3 muestra la cantidad de ensayos realizados en función de cada entrada, situación y colocación de columnas.

Tratamiento de imagen

Situada a tres metros de la base del depósito modelo se encuentra la cámara para grabar los distintos ensayos. Se utiliza una cámara Nikon D40X con un objetivo SP AF 17-50 mm F/2.8, con lente esférica. La apertura de trabajo es de F14, el tiempo de exposición de 1/8" por fotografía y la sensibilidad lumínica de 1600ASA. El *software* de grabación, con sistema operativo Linux, permite tomar fotos consecutivas, con un intervalo de tiempo de 1.4 segundos entre fotogramas.

Para la iluminación se utilizan nueve focos de 500 Watts cada uno, seis de los cuales son individuales de suelo, y los tres restantes son dobles de pie. Se coloca un paño de tela blanca entre el depósito y las fuentes de luz para difuminar sobre el área de trabajo.

La cámara se conecta a través de un cable USB a un ordenador portátil que almacena las fotografías en formato jpg. El objetivo marcado es poder evaluar la variación de la mancha del trazador con el tiempo, para ver el comportamiento del agua durante los ensayos. Se trata la imagen con la biblioteca de procesamiento de imágenes de *Matlab 7.1*, filtrándola para conseguir un formato binario. *Matlab* lee las imágenes, por defecto, como RGB, que permite plantearse un algoritmo de combinación de las matrices RGB para minimizar el ruido generado por la iluminación:

$$\text{Máx [azul, verde] - rojo} \quad (7)$$

Se escoge este algoritmo entre muchos, puesto que obtiene una mejor definición de la mancha de trazador azul. Se observa la contribución de cada intensidad de color en las figuras 7 y 8. En la figura 7 se muestra la zona donde se hace un perfil transversal de las intensidades de los tres colores. En la figura 8 se observan los valores individuales de rojo (R), azul (B) y verde (G), además pueden verse también los gradientes máximos de cambio, de cada una de las tres intensidades de color, coincidiendo con los límites de la mancha de agua entrando.

Una vez pasada la imagen a blanco y negro, se decide que el valor que define el inicio de mezcla corresponde a una intensidad de 75 dentro del histograma de valor de píxeles de la misma imagen de la figura 7 (ver figuras 9 y 10).

Aplicando un filtro a toda la imagen con el valor escogido de 75, ésta se transforma a formato binario, con el que ya puede calcularse la variable que se usará para los resultados: porcentaje de agua con inicio de mezcla (intensidad superior a 75) respecto al área de estudio total.

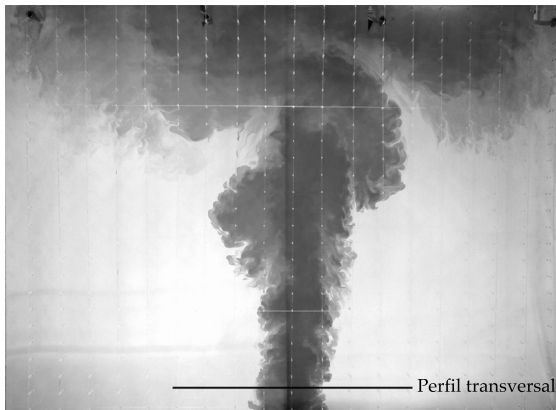


Figura 7. Ejemplo de imagen tomada por la cámara Nikon. Perfil transversal realizado para ver la intensidad de cada color de RGB.

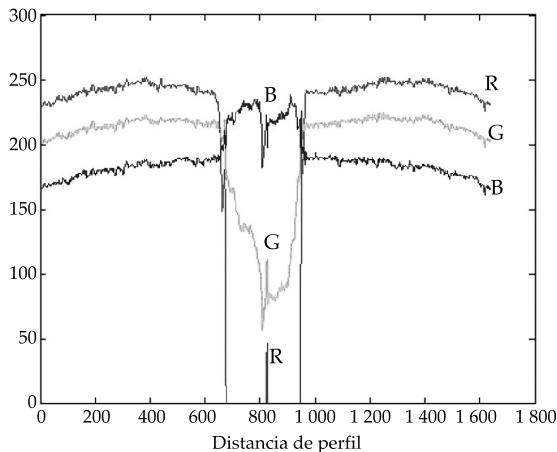


Figura 8. Perfil transversal realizado como indica la figura 7. Intensidades de rojo (R), verde (G) y azul (B). El azul predomina en la zona manchada, siendo el rojo el generado por la iluminación.

Resultados obtenidos

Se presentan los resultados obtenidos en los ensayos llevados a cabo a través del modelo

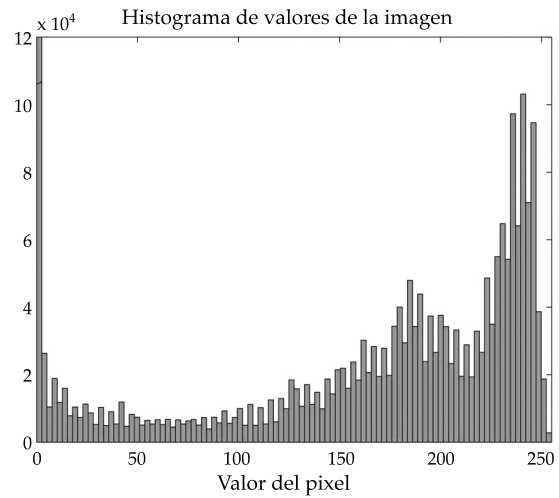


Figura 9. Histograma de valor de píxel de la imagen de la figura 7. El 0 corresponde a un píxel de color negro puro y el 255 corresponde al blanco puro. Los valores intermedios representan distintas intensidades de gris.

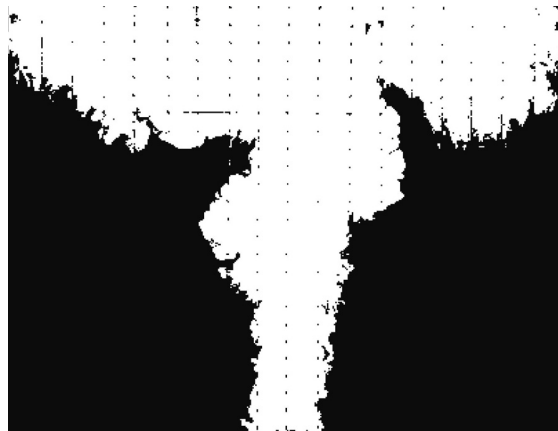


Figura 10. Imagen en formato lógico, donde los valores de píxel de la figura 7, ya tratada con el algoritmo (5), superiores a 75 se toman como blanco puro y los inferiores a 75 como negro puro.

físico a escala reducida, partiendo de las situaciones definidas anteriormente y las entradas de estudio consideradas al respecto (figura 6).

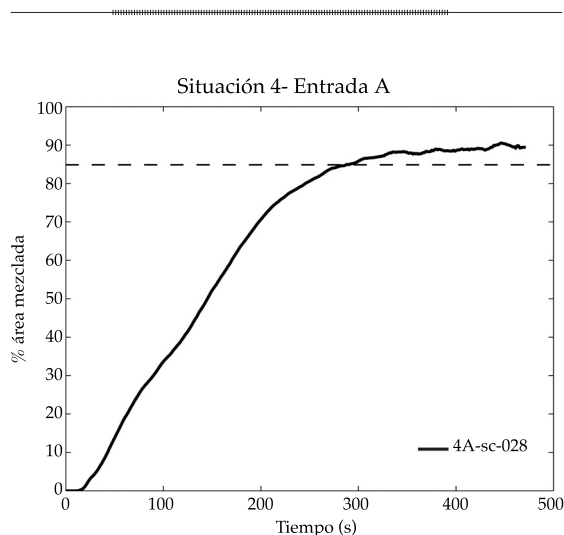


Figura 11. Resultados del ensayo 4A sin columnas, donde se observa el cambio de pendiente del gráfico alrededor del valor de inicio de mezcla de 85%.

El valor de referencia para comparar la rapidez de mezcla es del 85% de área mezclada debido al efecto de la viscosidad a partir de este punto. Se observa la aparición del *efecto viscoso* cuando aparece un cambio de pendiente que se observó en todos los ensayos en la gráfica tiempo contra porcentaje de área. Este cambio de pendiente indica un cambio de régimen del frente de la mezcla de turbulento a laminar. A la hora de comparar estos resultados en el prototipo, el efecto laminar no debe descartarse, pues siendo el Reynolds en el modelo un número con valor muy bajo y a pesar de aplicarle la escala, puede haber situaciones en que el Reynolds resulte del orden de 3 000 durante el uso habitual del depósito prototipo. Los cálculos para poder afirmar que el efecto laminar puede reproducirse se basan en la medida de la longitud de la mancha:

$$v = \frac{Q}{hL} \quad (8)$$

$$Re = \frac{vh}{\nu} = \frac{Q}{Lv} \quad (9)$$

Una vez calculado el perímetro de la mancha del agua entrante en modelo, la escala de Reynolds a aplicar para conocer el valor aproximado en prototipo es de 250.

Los resultados obtenidos para las distintas situaciones se muestran en la figura 12, donde se presenta el tiempo en segundos en el eje de abscisas y el porcentaje de área manchada en cada instante en el eje de ordenadas. Por lo tanto, los gráficos representan la velocidad con la que cada entrada favorece la mezcla en la situación correspondiente. En todos los casos se aprecia una tendencia lineal con dos pendientes principales: la que muestra el comportamiento turbulento del frente de mancha y la que marca el cambio a régimen laminar.

Observando la figura 12, en todos los casos la entrada más eficiente resulta ser la entrada C (entrada por tubería perpendicular al lado corto del depósito). En las entradas A y B, el agua entra por caída libre y con un momentum horizontal inicial mayor que en C; pero en estos dos casos, el flujo está dividido en cuatro subflujos que aumentan el área de fricción con el líquido ambiente y, por lo tanto, la disipación de energía.

Existe también un punto interesante a destacar, común en todas las gráficas de la figura 12: en el instante de choque entre el chorro y la pared contraria existe una variación de la velocidad de mezcla suficientemente importante como para tenerla en cuenta. Empezando por la situación 1, donde la divergencia entre la línea correspondiente a la entrada A y la correspondiente a B se produce justo en el instante en el cual el chorro entrando por A, choca contra su pared opuesta (figuras 13 y 14). Además, en la entrada B, en el choque del chorro contra la pared opuesta también se intuye un cambio de pendiente y una variación de la velocidad (figura 15).

En el resto de las situaciones, la casuística se repite mostrando cambios de pendiente en los choques con las paredes opuestas a la entrada.

Existe una diferencia observable entre las situaciones no permanentes (situaciones 1 y 2) y las situaciones permanentes (situaciones

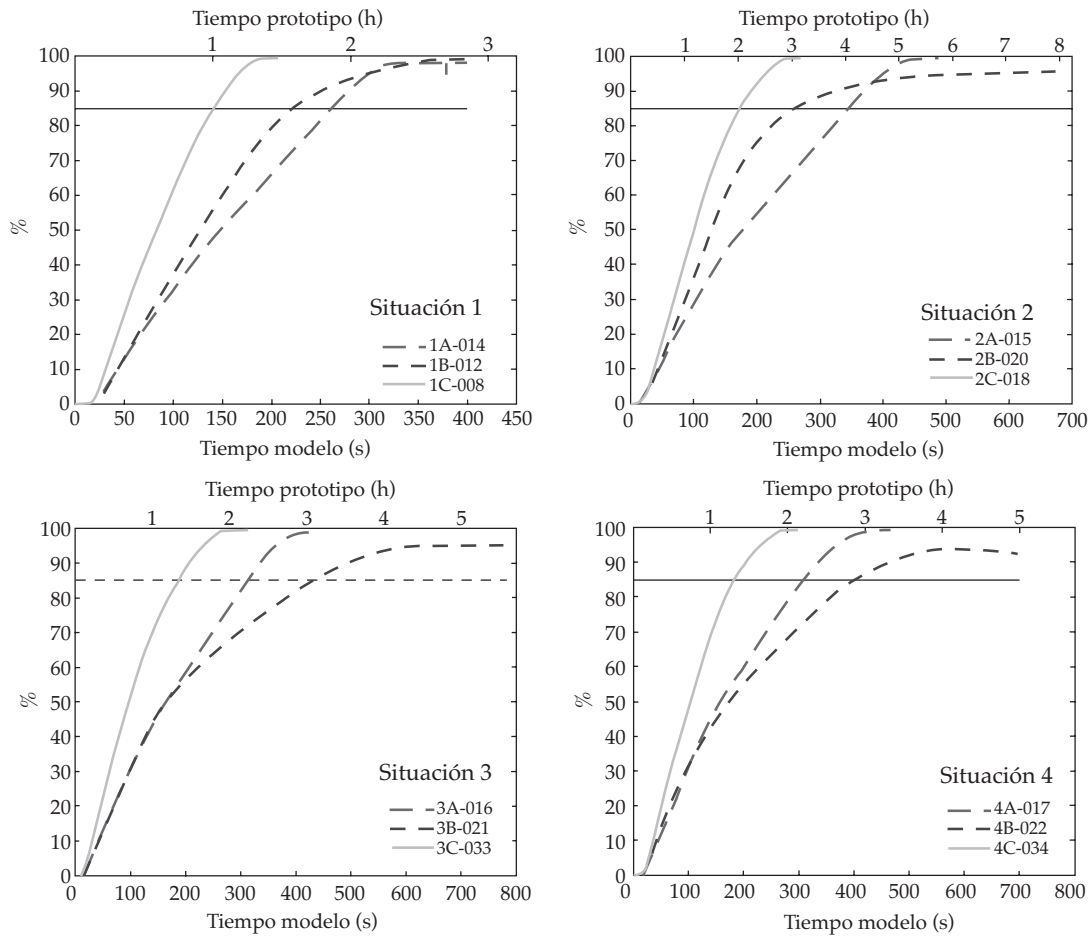


Figura 12. Resultado obtenido en la situación 1, situación 2, situación 3 y situación 4 con las tres entradas: entrada de proyecto (A) en línea y punto; entrada modificada (B) en línea discontinua; entrada en *jet* (C) en línea continua. La información que sigue a la letra corresponde al número de ensayo realizado.

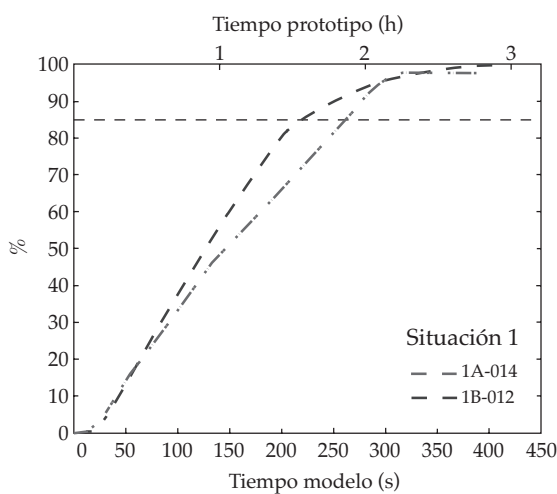


Figura 13. Situación 1: cambios de pendiente en la entrada A (1 y 2), en la entrada B (3).

3 y 4) (figura 12), referente a la eficiencia de la mezcla entre las entradas A y B. Si en las primeras situaciones la entrada A es menos eficiente que la entrada B, en las situaciones permanentes se cambian los órdenes, pasando a ser más eficiente la entrada A.

El hecho de que la entrada A sea más eficiente que la B en las situaciones permanentes 3 y 4 tiene relación con el momento a partir del cual divergen ambas gráficas (figuras 16 y 17). En estas situaciones, la entrada B se ve influenciada por las salidas y el chorro se desvía hasta chocar en el punto medio de la pared contigua, coincidiendo con el punto en el cual A choca contra su pared opuesta. Hasta ese momento las gráficas coinciden y

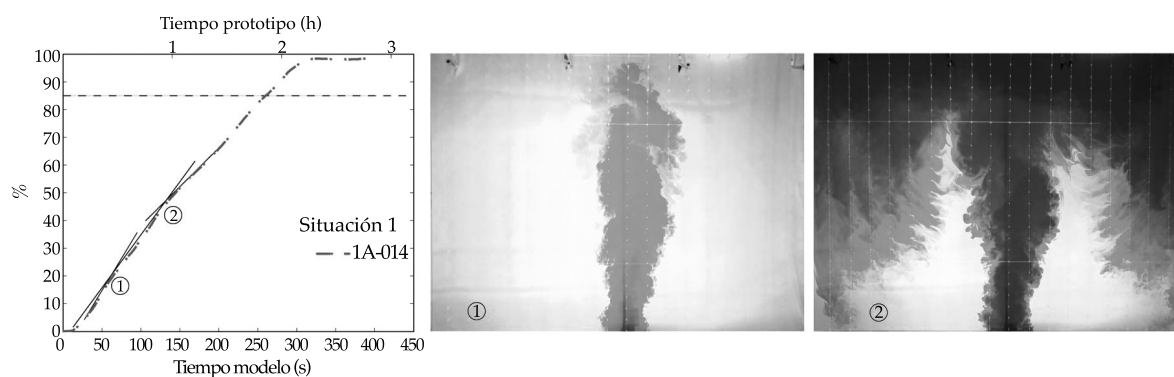


Figura 14. Cambios de pendiente en la entrada A: 1) choque contra la pared opuesta; 2) choque contra la pared que contiene la entrada.

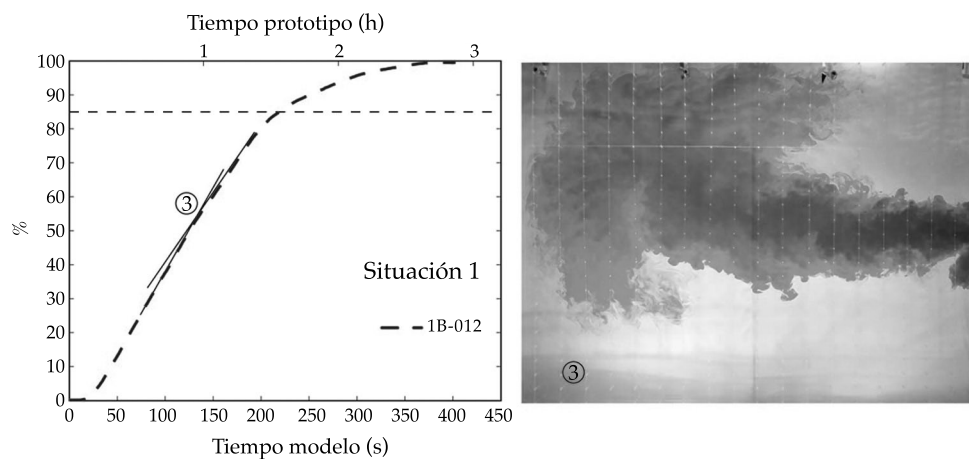


Figura 15. Cambios de pendiente en la entrada B: 3) choque contra la pared opuesta.

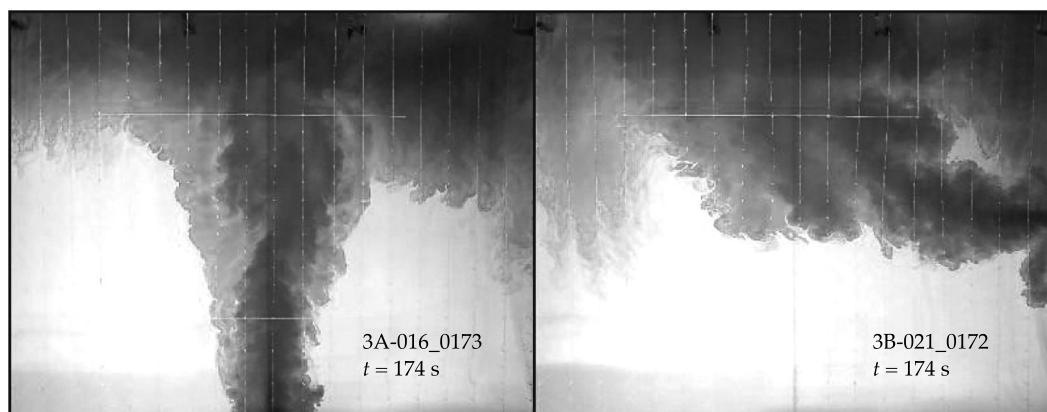


Figura 16. Instante a partir del cual divergen las gráficas de las entradas A y B en la situación 3.

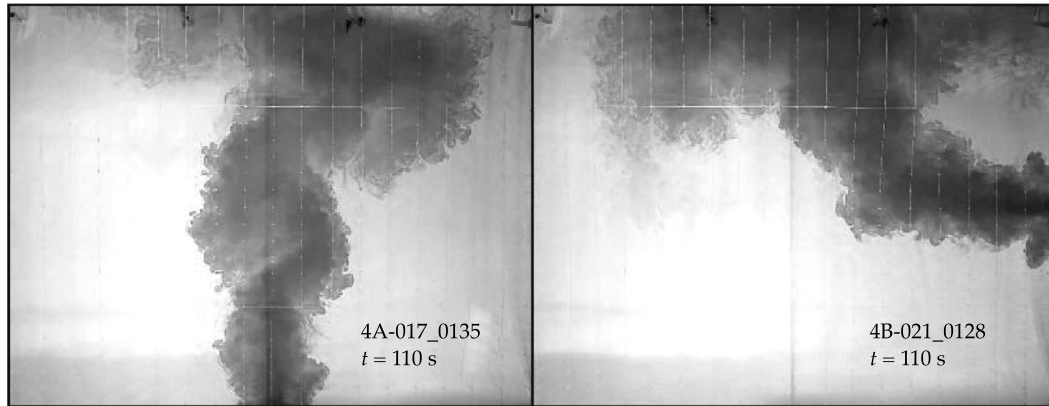


Figura 17. Instante a partir del cual divergen las gráficas de las entradas A y B en la situación 4.

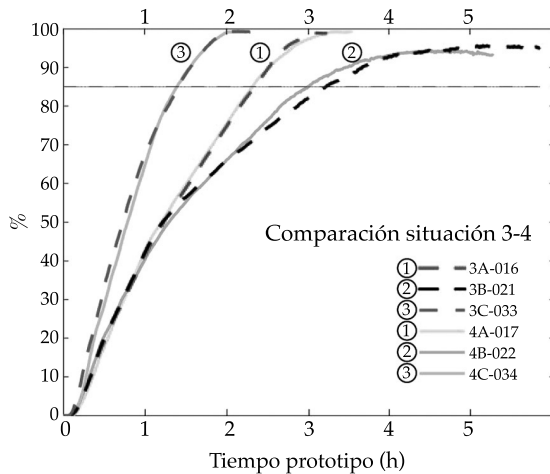


Figura 18. Comparación de las situaciones 3 y 4. Línea discontinua: situación 3; línea continua: situación 4.

lo hacen hasta divergir justo cuando el flanco derecho del chorro de B, formado al colisionar éste con la pared contigua, se encuentra con el flujo entrante. En ese momento, tanto en la situación 3 como la 4, el flanco izquierdo de B tiene que mezclar más de la mitad del volumen total con la mitad de energía que en el caso del agua entrando por A, donde son los dos flancos los que mezclan la misma cantidad de volumen.

Comparando las situaciones 3 y 4 (figura 18), se comprueba que la eficiencia de mezcla es independiente de la combinación utilizada para las salidas, siempre y cuando el caudal extraído sea el mismo. La situación 3 difiere de la 4 respecto a la cantidad de salidas por las cuales sale el agua del depósito: cuatro salidas en la situación 3 y dos salidas en la situación 4.

En el cuadro 4 se comprueban estos resultados, puesto que las diferencias entre la 3ª y 4ª columna son mínimas.

Cuadro 4. Resultados obtenidos en prototipo correspondientes a un volumen mezclado del 85% del total.

Entrada	Situación 1 No permanente	Situación 2 No permanente	Situación 3 Permanente	Situación 4 Permanente
A	1 h 51'	4 h 7'	2 h 13'	2 h 11'
B	1 h 33'	3 h 8'	3 h 3'	2 h 49'
C	56'	2 h 3'	1 h 20'	1 h 18'

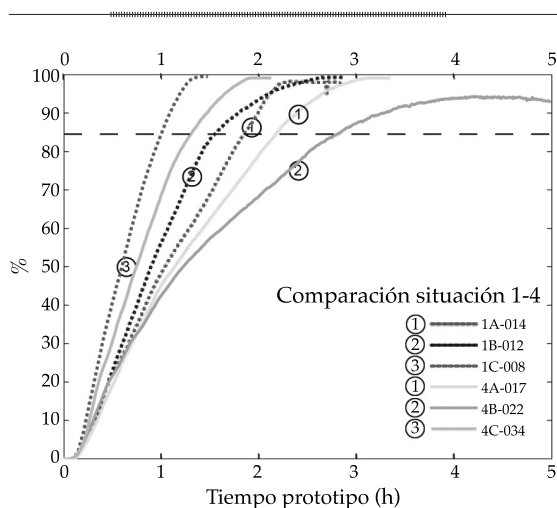


Figura 19. Comparación entre las situaciones 1 y 4. Línea discontinua: situación 1; línea continua: situación 4.

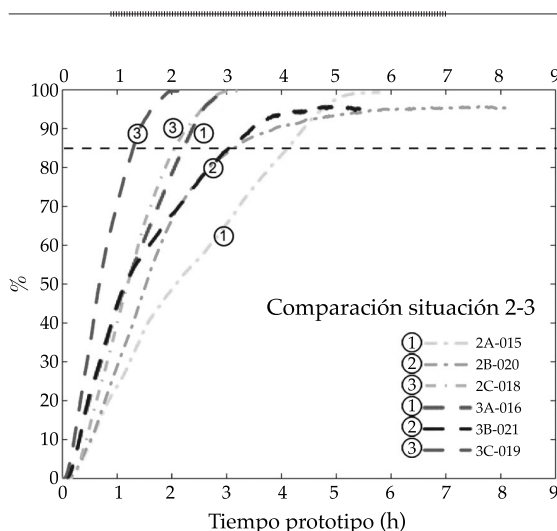


Figura 20. Comparación entre las situaciones 2 y 3. Línea discontinua: situación 2; línea continua: situación 3.

Comparando las figuras 19 y 20 con el cuadro 4, se constata que la situación 2 es la más desfavorable a la eficiencia de la mezcla y que, como se ha dicho anteriormente, la entrada C es la más eficiente en todos los casos.

Según la fórmula propuesta por Okita y Oyama (1963) (ecuación (2)), el tiempo de residencia debería ser el mismo en las

situaciones 2, 3 y 4; sin embargo, el hecho de que la situación 2 sea no permanente modifica el resultado, haciendo imposible su aplicación para argumentar las diferencias.

Comparativa con columnas

Otro de los trabajos realizados en esta investigación es la influencia que generan las columnas en la eficiencia de la mezcla. No es motivo de este estudio ver la cantidad óptima de columnas que generan un efecto positivo en la mezcla y por lo tanto se limita a una descripción de la influencia de un número concreto de columnas colocadas paralelas a las paredes del depósito.

La figura 21 muestra cómo el efecto laminar mencionado anteriormente se hace más evidente en los ensayos sin columnas. De esta forma se hace necesaria una extrapolación lineal de las gráficas de los ensayos sin columnas, porque el efecto laminar se presenta antes de la mezcla del 85% en algunos casos. Este efecto laminar se pudo comprobar durante los ensayos, al formarse una celda persistente, pero con tendencia a la desaparición en los ensayos sin columnas (figura 22).

De esta forma se concluye que las columnas generan una división del flujo y una turbulencia local que favorece la mezcla local, pero que en general frenan el fluido y absorben su energía, disminuyendo la eficiencia de la mezcla global. El cuadro 5 muestra los resultados obtenidos en los ensayos con columnas y la extrapolación hasta el 85% de mezcla de los ensayos sin columnas.

Conclusiones

El pilar de esta investigación se basó en la autosemejanza de los chorros o *jets*. Este concepto permitió crear un modelo a escala reducida en el que la geometría del chorro es la principal baza y, por tanto, el tiempo de permanencia en el volumen del depósito, la variable a escalar. Se abandonó la idea que muchos autores han utilizado acerca de realizar

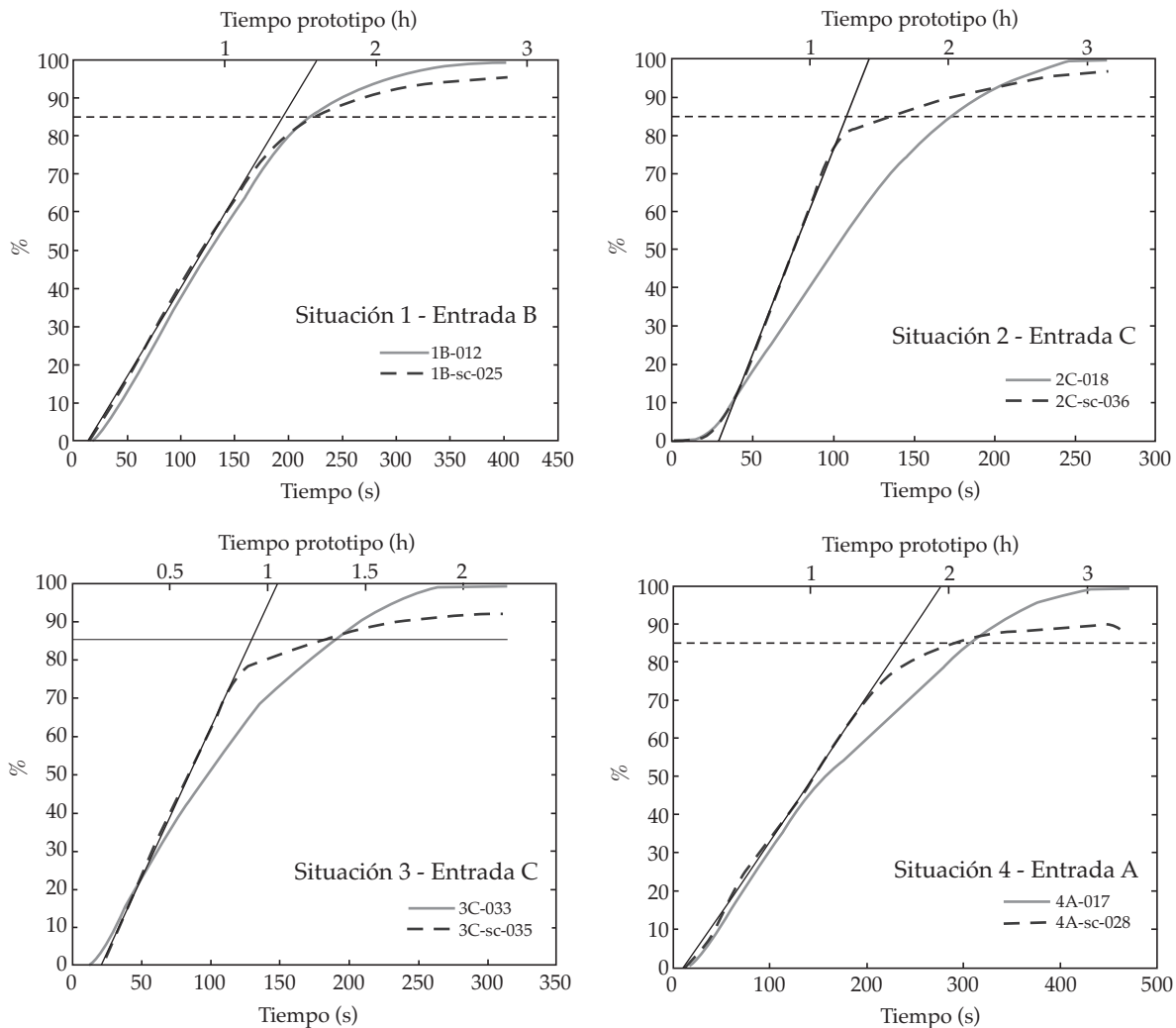


Figura 21. Comparación entre distintos ensayos con columnas y sin columnas. Línea continua: ensayos con columnas; línea discontinua: ensayos sin columnas.

un modelo utilizando la escala de Froude, porque justo en este tipo de modelos las fuerzas de peso no son relevantes. En cambio, el proceso de mezcla es de tipo turbulento, por lo que las variables más relevantes son las cinemáticas, en donde el número de Reynolds es la relación adimensional principal. La propia autosemejanza de los chorros permitió tener una escala diferente a la unidad entre los números de Reynolds del modelo y del prototipo.

En función de los resultados expuestos en el apartado anterior, las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- Influencia del tipo de entrada en la eficiencia de la mezcla. En todas las situaciones, la entrada más eficiente resulta ser C, es decir, el *jet* entrando directamente en el depósito, perpendicular a la pared, y por el lado corto de la planta rectangular. Viendo cuál de las opciones de localización

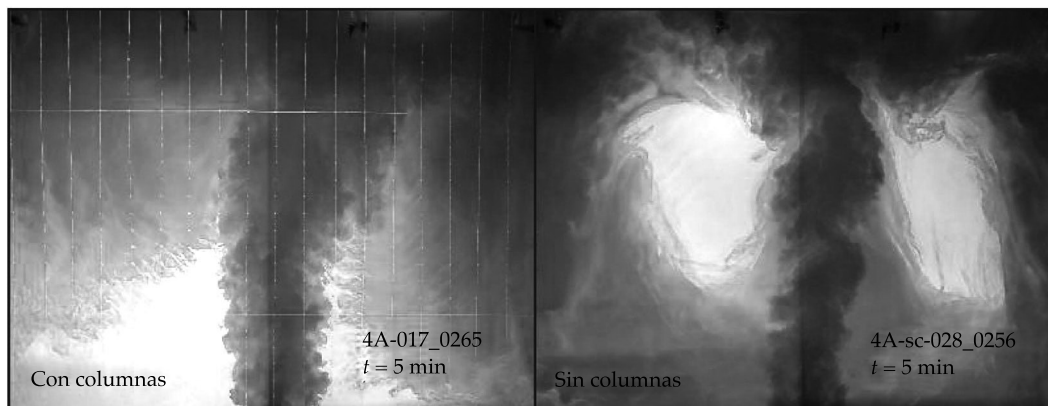


Figura 22. Foto comparativa entre un ensayo con columnas, derecha (situación 4, entrada A), y un ensayo sin columnas, derecha (situación 4, entrada A).

Cuadro 5. Resultados de los ensayos sin columnas. Tabla comparativa entre los valores obtenidos en un 85% de la mezcla y una aproximación lineal de los ensayos sin columnas despreciando el efecto laminar.

Ensayo	Con columnas	Sin columnas	
		Resultado exacto	Aproximación lineal
		$T(85\%)$	$T(85\%)$
1B	1 h 33'	1 h 36'	1 h 23'
2C	2' 53"	2' 18"	1' 48"
3C	1 h 20'	1 h 17'	55'
4A	2 h 11'	2 h 4'	1 h 41'

de entrada resulta mejor, comparamos las entradas A y B en las cuatro situaciones. En las situaciones no permanentes, la eficiencia mejora cuando la entrada se sitúa en la mitad del lado corto (entrada B), puesto que el primer choque que se produce supone una disminución de velocidad mayor en el chorro entrando por la entrada A. Sin embargo, en las situaciones permanentes, entrando el agua por la mitad del lado largo (entrada A), la eficiencia resulta mejor debido a la influencia de las salidas colocadas en el lado contiguo a la entrada B. Esto indica que en las situaciones no permanentes, las salidas adquieren relevancia, haciendo que se homogeneice mejor la mezcla en el caso del agua entrando por B y que además se

frene la mezcla del agua restante en el caso de la entrada A.

- Situación de vaciado más desfavorable en cualquier caso. Comparando todas las situaciones en cada una de las entradas, en prototipo resulta más lenta la mezcla cuando el depósito está funcionando en régimen no permanente de vaciado. Así, la situación 2 puede resultar hasta más de tres veces más lenta que la situación 1, cuyos resultados son los mejores. La situación de vaciado corresponde hidrodinámicamente a una aceleración del flujo en la dirección del movimiento del líquido: dentro del volumen de control (depósito) sale más flujo del que entra. La situación de llenado corresponde hidrodinámicamente a una desaceleración del flujo. Es habitual en mecánica de los

flujos que las desaceleraciones provoquen más choques entre las partículas de fluido y por tanto más pérdidas de energía y por ende, más mezcla entre las mismas, por lo que el resultado obtenido parece lógico y corresponde con las ideas básicas de la mecánica.

- Influencia de las dimensiones del depósito: tratándose de un depósito rectangular, la eficiencia de la mezcla se basa en la distancia entre la entrada y su pared opuesta. Viendo los resultados en las situaciones permanentes, las gráficas que representan las entradas a través de tornillos de Arquímedes empiezan a divergir en el punto en el cual el chorro formado por la entrada A choca contra la pared opuesta (mitad del lado largo de la planta en la situación de las salidas); en las situaciones no permanentes, la divergencia aparece cuando un chorro entrando por B choca contra su pared contigua (mitad del lado largo de la planta en la situación de las salidas).
- Influencia negativa de las columnas en la eficiencia de la mezcla: las columnas actúan frenando el flujo, a pesar de propiciar la mezcla local al dividirlo.
- En el nivel constructivo, los resultados obtenidos permiten extraer algunas sugerencias generales para el diseño de otros tanques. A fin de evitar la existencia de zonas muertas puede ser interesante colocar más de una entrada de agua en el depósito, de forma que se puedan romper los vórtices que confinan dichas zonas. El cambio de regulación del mismo depósito también puede ser otro de los factores que evite la generación de puntos con elevados tiempos de residencia. En lo que se refiere a las columnas, se deja para investigaciones posteriores el estudio del número óptimo de columnas en función de la geometría de diseño.

Los efectos de escala resultan más visibles en los ensayos donde no se usaron columnas,

sin embargo este efecto aparece a partir de un porcentaje de volumen mezclado (85% aproximadamente) y por lo tanto las comparaciones con los ensayos con columnas son factibles hasta este límite. Entonces, se llega a la conclusión de que las columnas frenan el flujo, disminuyendo la energía del frente y por lo tanto la eficiencia potencial de la mezcla.

Evidentemente la investigación deja muchos flancos abiertos para continuarla, sobre todo para fijar resultados cuantitativos y mejorar la ecuación que plantearon Rossman y Grayman (1999), trabajar con las dimensiones óptimas, la cantidad adecuada de columnas y el número de Reynolds de la entrada.

En el nivel de proyecto constructivo, dicha investigación sirvió para mejorar el proyecto redactado para la construcción del depósito en L'Ampolla durante el proceso de construcción, mejorando de esta forma la futura calidad del agua de boca que abastecerá el campo de Tarragona. Además, la disminución de columnas que se planteó a raíz de este estudio, junto con el complemento de cálculo estructural, permitió acortar el periodo constructivo, al tratarse de la mitad de columnas que las planteadas en proyecto.

En todo el proceso de investigación se dejó de lado la influencia de la temperatura, efectos de estratificación, de empuje local y otros efectos producidos por la diferencia de temperatura entre las partes. Sin embargo, se cree que en algunos momentos del funcionamiento del sistema, la influencia de la temperatura puede influir sensiblemente en los resultados.

Agradecimientos

El presente trabajo se pudo realizar gracias a la empresa constructora Construcciones Rubau, S.A., especialmente por el carácter emprendedor de los ingenieros Marc Massanas y Manuel Rebollo. También se agradece la colaboración e inquietud científica mostrada por el personal del Consorcio de Aguas de Tarragona, que ha permitido conducir la investigación en todo momento.

Notación

τ_m	Tiempo de mezcla.
K	Constante de mezcla.
H	Altura de depósito.
D	Diámetro de depósito.
M	Cantidad de movimiento de entrada.
V	Volumen de depósito.
L	Longitud de la base.
B	Ancho de la base.
A_{dep}	Área de la base.
Vol_{dep}	Volumen de la base.
Φ_{tub}	Diámetro del tubo de entrada.
A_{ub}	Área del tubo de entrada.
Re_m	Reynolds del modelo.
Re_p	Reynolds del prototipo.
ν_m	Viscosidad del modelo.
ν_p	Viscosidad del prototipo.
L_m	Diámetro de la entrada de agua al modelo.
L_p	Diámetro de la entrada de agua al prototipo.
T_m	Tiempo de permanencia en el modelo.
T_p	Tiempo de permanencia en el prototipo.
A_m	Área de la entrada de agua al modelo.
A_p	Área de la entrada de agua al prototipo.
v_m	Velocidad de entrada al modelo.
v_p	Velocidad de entrada al prototipo.
Q_m	Caudal de entrada al modelo.
Q_p	Caudal de entrada al prototipo.

Vol_m	Volumen de agua en el modelo.
Vol_p	Volumen de agua en el prototipo.
λ_g	Escala geométrica.
λ_v	Escala cinemática.
λ_{Re}	Escala de Reynolds.
λ_t	Escala temporal.
λ_Q	Escala de caudales.

Recibido: 27/08/09

Aprobado: 15/12/10

Referencias

- OKITA, N. and OYAMA, Y. Mixing Characteristics in Jet Mixing. *Japanese Chemical Engrg.* Vol. 1, No. 1, 1963, pp. 94, 101.
- ROSSMAN, L.A. and GRAYMAN, W.M. Scale-Model Studies of Mixing in Drinking Water Storage Tanks. *Journal of Environmental Engineering.* Vol. 125, 1999, pp. 755-761.
- POPE, E.B. *Turbulent Flows.* Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- MARTÍN-VIDE, J.P., CISNEROS, A., and DOLZ, J. *Similarity for Turbulent Mixing Vessels. Reynolds Number Effect.* Vol. 1. XXIII Congress of the IAHR, Ottawa, August, 1989, pp. 231-238.
- OCA, J., MASALÓ, I., and REIG, L. Comparative Analysis of Flow Patterns in Aquaculture Rectangular Tanks with different Water Inlets Characteristics. *Aquaculture Engineering.* Vol. 31, Iss. 3-4, October 2004, pp. 221-236.
- WALTER, H. *Graf. Fluvial Hydraulics. Flow and transport processes in channels of simple geometry.* England: Ed. Wiley, 1998.

Abstract

MUJAL I COLILLES, A., BATEMAN-PINZÓN, A. & DE MEDINA-IGLESIAS, V. *Experimental study of mixing efficiency in water storage tanks. Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. II, No. 3, July-September, 2011, pp. 77-95.*

The phenomenon of mixing in drinking water storage tanks and reservoirs has a direct effect on the quality of outgoing water due to the creation of poor mixing zones and volume stratification, which can produce negative effects on public health. The design of a storage tank must consider the conditions of the inlets and outlets, as well as their orientation (vertical or horizontal) to prevent the formation of these zones. This article presents experiments done at a reduced-scale physical model with three different inlets (a pipe and two waterfalls) in order to determine which of these inlets achieved the best mixing efficiency. Moreover, the effects on mixing efficiency by columns that support the roof of the tank were studied. A digital image technique was conducted with qualitative results that show that the flow leaving through a pipe obtains better efficiency than that of waterfalls, in both the model and the prototype, because of the horizontal momentum that the former exerts on the flow. It is important to note that the time taken to mix the stored volume depends on the distance between the inlet and the opposite wall, as well as its orientation. In terms of columns, neglecting the viscous scale effects and taking into account the whole tank, the columns have a negative effect on mixing efficiency, even though they divide the flow and create zones of local turbulence since they absorb energy from the flow and generally decrease the mixing speed.

Keywords: mixing time, water supply storage tank, efficiency, jets, physical scaled model, Reynolds scale, image processing.

Dirección institucional de los autores

M.C. Anna Mujal i Colilles
Dr. Allen Bateman-Pinzón
M.C. Vicente de Medina-Iglesias

Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos
Universitat Politècnica de Catalunya
C. Jordi Girona, 31
08034 Barcelona, ESPAÑA
Teléfono: +34 (93) 4054 196
anna.mujal@gits.ws
allen.bateman@gits.ws
vicente.medina@gits.ws