

## **DISEÑO DE EMBALSES URBANOS PARA MITIGACIÓN DE CRECIDAS Y SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS**

*Riccardi, G.A. <sup>(1)(2)(3)</sup>; Basile, P.A. <sup>(1)(2)</sup>; Aguzzi, I. <sup>(1)</sup>*

<sup>(1)</sup>Departamento de Hidráulica, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario

<sup>(2)</sup>Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario

<sup>(3)</sup>Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario

Riobamba 245 bis. S2000EKE Rosario. Santa Fe.

E-mail: riccardi@fceia.unr.edu.ar

### **Resumen**

En este trabajo se describe el planteo del diseño de un embalse urbano para ser utilizado para atenuación de crecidas y como sedimentador de una gran parte de la fracción sólida que contiene. El diseño como sedimentador se lleva a cabo a partir de la curva de velocidades que se obtiene del análisis basado en turbidimetría y en las curvas de velocidades de sedimentación típicas halladas en la bibliografía. El método se aplica a modo de ejemplo en una pequeña cuenca urbana de Rosario, densamente poblada de 11 ha de extensión superficial, de la cual se han aforado en ciertos eventos valores de lluvia-caudal y concentración de sólidos en suspensión. En el caso de estudio se analizan los porcentajes de remoción de acuerdo a distintos tipos de sólidos en suspensión a partir de fijar el volumen del reservorio con el criterio de atenuación de crecidas. En los casos de sedimentos muy finos con baja velocidad de sedimentación  $v_{sed\ 50\%} = 0.70$  m/h se alcanzan valores máximos de remoción del 6% para los volúmenes con mayores tiempos de permanencia. Por otro lado, para el caso de los sólidos una velocidad de sedimentación del orden de  $v_{sed\ 50\%} = 10$  m/h, se alcanza una remoción máxima del 70% y una remoción promedio del 50%.

### **Introducción**

En el diseño de embalses urbanos para atenuación de crecidas es de uso frecuente el criterio de restituir las condiciones de caudal existente antes de las perturbaciones introducidas por las urbanizaciones u otras intervenciones que implican aumento de

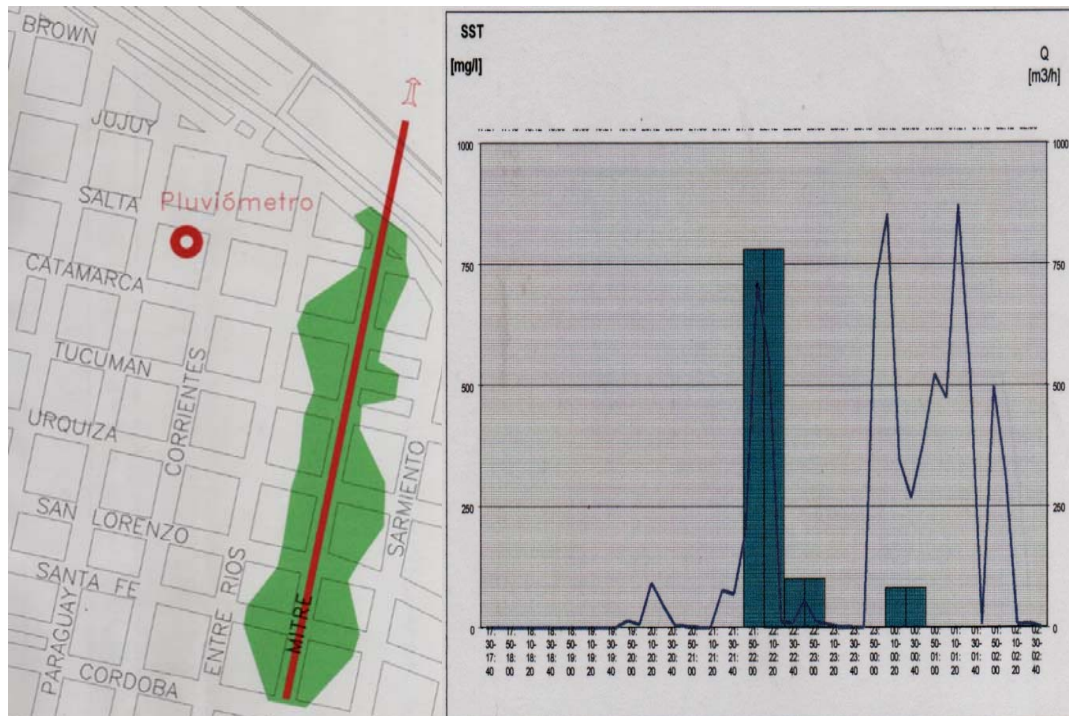
caudales y volúmenes de escorrentía. Este criterio conduce la definición del volumen necesario del embalse y la correspondiente obra de descarga del mismo. Las impermeabilizaciones, según sus características, pueden llegar a elevar entre 5 y 10 veces el caudal preexistente en tanto que el volumen de la escorrentía puede llegar a elevarse entre 3 a 5 veces. En este contexto, el diseño hidráulico ampliamente utilizado determina el volumen para corregir esta alteración al menos en términos de caudales máximos (Riccardi, 2004). Otro de los aspectos críticos que debe comenzar a abordarse en el diseño, es la capacidad del embalse para la remoción de sedimentos del escurrimiento pluvial. Al producirse una precipitación, la escorrentía moviliza todo tipo de partículas que se encuentran en la superficie y que a su vez contienen diferentes contaminantes como pueden ser metales pesados, hidrocarburos, fosfato, nitratos, nitrógeno, PCB, entre otros. Las características de estas partículas: granulometría, velocidad de sedimentación, densidad, etc. y la concentración de contaminantes, dependen de cada cuenca en particular y es por ello, dificultosa su caracterización. Una metodología que se ha comenzado a usar son los embalses con fines de retención de sedimentos de determinadas fracciones de los sólidos en suspensión donde el volumen del reservorio resulta ser el que satisfaga condiciones de atenuación de crecidas como así también de permanencia para la sedimentación. Para el diseño y optimización de estos dispositivos es necesario conocer la velocidad de sedimentación de las partículas (Arman et al., 2009; Basile et al., 2015; Semadeni-Davies, 2009; Aguzzi, 2015).

### **Aplicación al diseño de un embalse urbano**

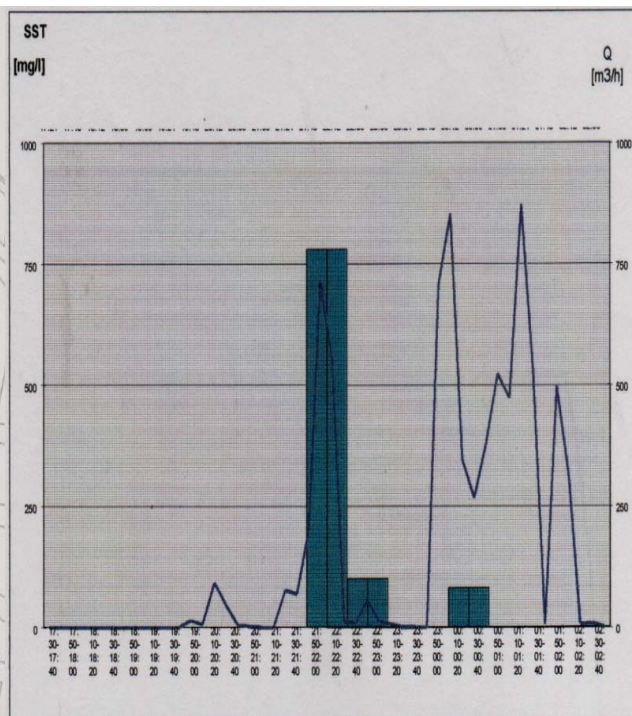
El trabajo se enfoca en la propuesta del diseño de un embalse urbano para ser utilizado como sedimentador de una gran parte de la fracción sólida que contiene. El diseño es meramente ilustrativo aspirándose que en el futuro se transforme en una práctica habitual en la materia. La originalidad que aporta tiene que ver con que el diseño como sedimentador se lleva a cabo a partir de la curva de velocidades determinada por Aguzzi (2015) que se obtiene del análisis basado en turbidimetría y en las curvas de velocidades de sedimentación típicas que se pueden encontrar en la bibliografía. Se utiliza como ejemplo el diseño de un embalse para control de escurrimiento y sedimentos en la cuenca de aporte del Túnel Colector Mitre, componente del sistema de drenaje pluvial de denominado “Radio Antiguo” de la ciudad de Rosario, que fuera analizada Baud (2002) en su trabajo de caracterización de escurrimiento pluvial urbano.

### ***Descripción general de la cuenca y producción de sedimentos en un evento***

La cuenca está definida fundamentalmente a lo largo de 800 m de longitud, con sentido de escurrimiento sur-norte con una superficie de 11 Ha y pendiente superficial en el orden del 3 por mil. Se trata de una zona con un grado de impermeabilización cercano al 80%, con concentración de población elevada, altamente transitada por vehículos y peatones y con importante actividad comercial (Figura 1). Debido a que esta área de la ciudad posee un sistema unitario, muy pocos inmuebles tienen desagües pluviales que descarguen en la calzada. Por ello, buena parte del efluente del Túnel Mitre proviene del agua que cae sobre las calles y veredas. En dos eventos de baja recurrencia Baud (2002) realizó mediciones de lluvias, caudales salientes y concentración de sedimentos caracterizando el efluente pluvial (TSS, DQO, Hidrocarburos, Coliformes). Las concentraciones de sedimentos en suspensión halladas son empleadas para el diseño del embalse. En la Figura 2 se presenta el hidrograma y el sedimentograma aforado en la precipitación del 24/25 de abril de 1999 con una  $P= 42$  mm y  $D= 456$  min ( $R\approx 0.5$  años). El caudal máximo en conducto fue  $Q_{max}= 0.243$  m<sup>3</sup>/s y la concentración máxima de sólidos totales en suspensión alcanzó  $TSS_{max}= 760$  mg/l, superando los 500 mg/l que fija la normativa vigente.



**Figura 1.** Cuenca del Túnel Mitre

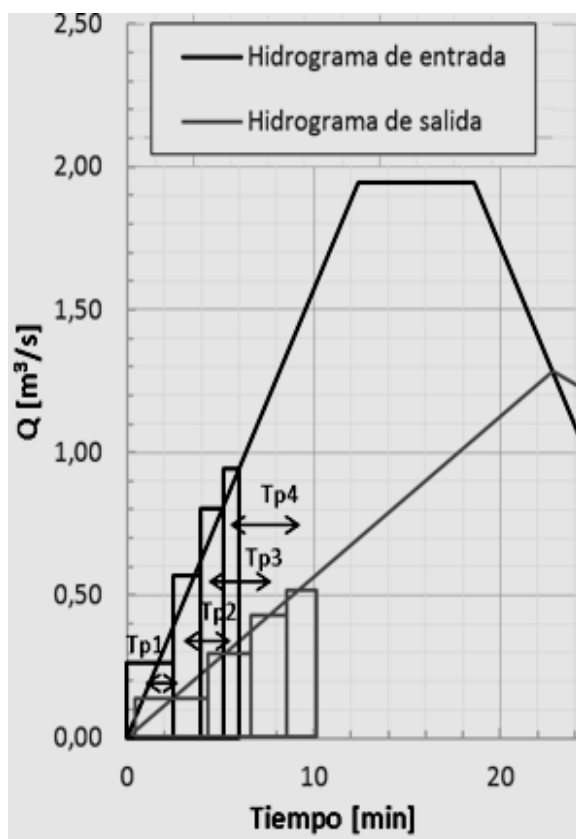


**Figura 2.** Hidrograma y sedimentograma. Aforo 24/25/04/1999

*Fuente:* Baud (2002).

### ***Diseño del embalse para atenuación de crecidas y sedimentación***

Se sabe que el máximo volumen de agua que se produce en un embalse depende directamente del hidrograma de entrada y del de salida. Dicho volumen será igual al área definida entre ambos hidrogramas. Para la cuenca en estudio se analizaron dos casos de diseño de un reservorio de 2.0 m de profundidad con el objeto de comparar los resultados al variar ciertos parámetros. El primer diseño se basa en calcular el reservorio a partir de un hidrograma de entrada vinculado a una lluvia con una recurrencia  $R=2$  años y un hidrograma de salida relacionado al caudal que se supone anterior a la impermeabilización de la cuenca. El segundo caso es considerar un caudal máximo saliente igual a la mitad del caso anterior. El cálculo de la remoción de sólidos se hace a partir de la velocidad media de sedimentación  $v_{sed\ 50\%}$  y considerando un fraccionamiento de los hidrogramas de entrada y salida en 100 partes con el mismo volumen, y puede calcularse el tiempo de permanencia para cada uno de esas porciones de volumen a partir de la distancia entre los centroides de volumen entrante y saliente (Figura 3), estimándose luego el porcentaje de remoción de sólidos para cada parte.



Se analizaron dos tipos de sólidos en suspensión, en primer lugar se considera que los sólidos son muy finos como caolinita y se utiliza la curva de velocidades de sedimentación obtenida por turbidimetría en el laboratorio del INSA de Francia por Aguzzi (2015) para determinar el porcentaje de remoción. Como los sólidos presentes en la cuenca en estudio son mas gruesos que la caolinita, se determina luego el porcentaje de remoción de sólidos a partir de las curvas de velocidades de sedimentación propuestas por Basile et al., (2015), para los sólidos en suspensión caracterizados por Baud (2002) en esta cuenca.

**Figura 3.** Discretización de los hidrogramas

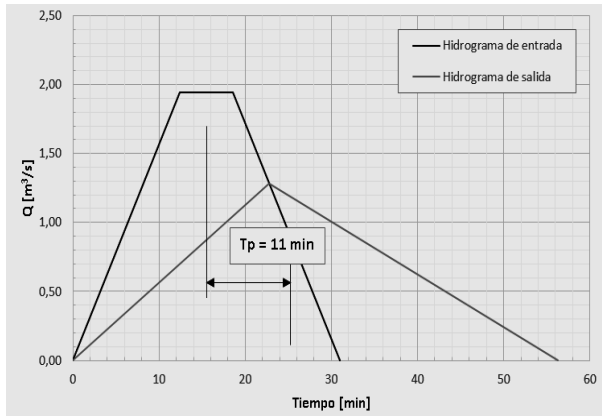
### Caso 1

Área  $A= 11$  ha; tiempo de concentración  $T_c= 12$  min; Coeficiente de escurrimiento actual  $C_{\text{actual}} = 0.70$ ; Coeficiente de escurrimiento antes de la urbanización  $C_{\text{antes urb}} = 0.40$ ; caudal máximo saliente (para  $D=T_c$ )  $Q_{\text{max sal}}=1.28$  m<sup>3</sup>/s; Concentración máxima de sólidos en suspensión TSS= 750 mg/l. Las curvas IDR empleadas corresponden a las de la Estación Rosario Aero (Basile et al., 2009). Una síntesis de los volúmenes necesarios para cada duración se presenta en la Tabla 1. Como puede observarse para una lluvia con un duración  $D = 18.58$  min se produce la demanda del máximo volumen en el embalse igual a 577.98 m<sup>3</sup>. Se adopta un reservorio con las siguientes dimensiones: Altura  $h= 2.0$  m; Ancho  $B= 10$  m; Largo  $L= 30$  m; Area en planta 300 m<sup>2</sup>; Volumen  $V= 600$  m<sup>3</sup>. El tiempo de permanencia, que en promedio es igual a la distancia entre los centroides de los hidrogramas, es aproximadamente igual a 11 minutos (Figura 3):

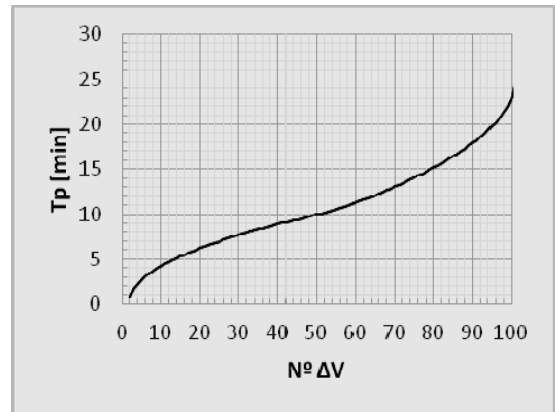
	D [min]	I [mm/hs]	Q [m <sup>3</sup> /s]	Qs [m <sup>3</sup> /s]	V [m <sup>3</sup> ]
<b>Tc</b>	12,39	104,90	2,24	1,28	504
<b>1,25 Tc</b>	15,48	97,36	2,08	1,28	566
<b>1,50 Tc</b>	<b>18,58</b>	<b>90,88</b>	<b>1,94</b>	<b>1,28</b>	<b>578</b>
<b>1,75 Tc</b>	21,68	85,26	1,82	1,28	561
<b>2 Tc</b>	24,77	80,32	1,72	1,28	532

**Tabla 1.** Caudales y volúmenes para distintas duraciones de lluvia. CASO 1

Al realizar el análisis de dividir los hidrogramas en 100 intervalos de mismo volumen se observa que hay porciones de volumen que prácticamente transitan por el reservorio sin tiempo de permanencia y que hay otras porciones que llegan a permanecer 23 minutos en el embalse. Para cada porción de volumen el tiempo de permanencia se presenta en la Figura 4.



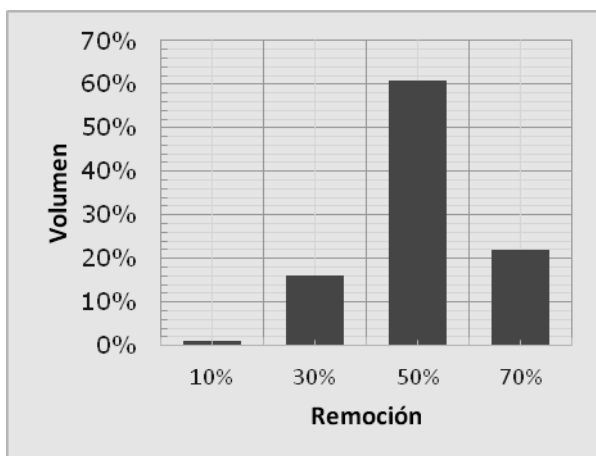
**Figura 3.** Tiempo de permanencia promedio Caso 1.



**Figura 4.** Tiempo de permanencia para cada porción de volumen Caso 1.

Luego, conociendo el tiempo de permanencia para cada fracción de volumen, la altura del reservorio y proponiendo la velocidad de sedimentación, se puede conocer el porcentaje de remoción de sólidos. Los resultados indican que para el caso de que los sólidos sean caolinita con  $v_{sed\ 50\%} = 0.70\text{ m/h}$  ( $D_{50} = 18\ \mu\text{m}$ ) la remoción es muy baja, alcanzando valores máximos del 6% para los volúmenes con mayores tiempos de permanencia. Sin embargo, en promedio, no supera el 3%. Por otro lado, para el caso de los sólidos típicos como los hallados por Baud (2002) a los cuales se les puede asociar una velocidad de sedimentación  $v_{sed\ 50\%} = 10\text{ m/h}$  ( $D_{50} = 70\ \mu\text{m}$ ), se alcanza una remoción máxima del 70% y una remoción promedio del 50% (Figura 5).

Se calcula además, que para este tipo de sólidos, sólo se vuelca en el cuerpo receptor un



**Figura 5.** Porcentaje de volumen para cada porcentaje de remoción Caso 1 (Aguzzi,2015).

17% del volumen de agua con concentraciones mayores a la de la normativas  $TSS_{permitido} = 500\text{ mg/l}$ . Se determina que se depositan apropiadamente 826 kg de sólidos, que representan menos del 1% del volumen total del reservorio para la concentración adoptada en el evento de estudio. Se concluye que no hay una pérdida considerable de volumen.

## Caso 2

Aplicando la misma metodología pero asumiendo una mayor capacidad de atenuación de caudales en el reservorio de modo que el caudal saliente sea la mitad del caso anterior, se llega a una demanda de volumen de reservorio de  $V = 1572 \text{ m}^3$  para una lluvia con una duración  $D = 31.16 \text{ min}$ . Se adopta un reservorio con las siguientes dimensiones: Altura  $h = 2 \text{ m}$ ; Ancho  $B = 16 \text{ m}$ ; Largo  $L = 50 \text{ m}$ ; Área en planta  $= 800 \text{ m}^2$ ; Volumen  $V = 1600 \text{ m}^3$ . El tiempo de permanencia, que en promedio es igual a la distancia entre los centroides de los hidrogramas, es aproximadamente igual a 44 min (figura 6). Al realizar el análisis de dividir los hidrogramas en 100 intervalos de mismo volumen se obtiene relación del tiempo de permanencia de cada porción (Figura 7). Luego, conociendo cada tiempo de permanencia y la profundidad del reservorio, se puede conocer el porcentaje de remoción de sólidos. Se pudo establecer que para el caso de que los sólidos sean caolinita la remoción alcanza un valor máximo del 57% para el caso de la última porción de volumen que tiene el mayor tiempo de permanencia y un valor promedio del 19%. Por otro lado, para el caso de los sólidos típicos, se alcanza una remoción máxima del 90% y una remoción promedio del 73%. Se calcula además, que para este tipo de sólidos, sólo se vuelca en el cuerpo receptor un 1% del volumen de agua con concentraciones mayores a 500 mg/l. Además, se determina que se depositarían apropiadamente 1708.2 kg de sólidos, que representan menos del 1% del volumen total del reservorio para la concentración adoptada en el evento de estudio. Se concluye que no hay una pérdida considerable de volumen.

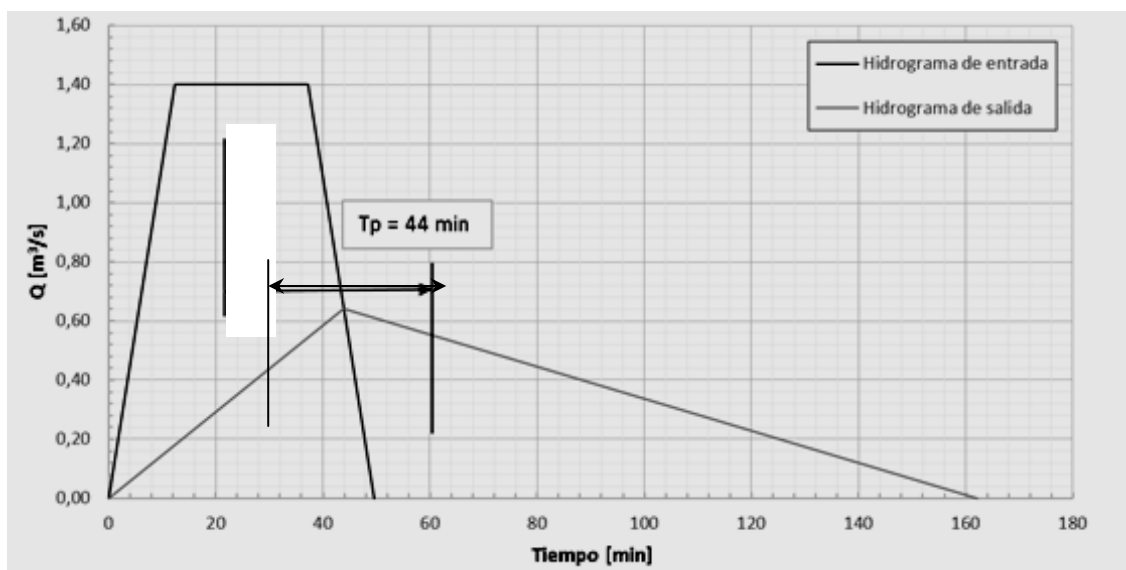
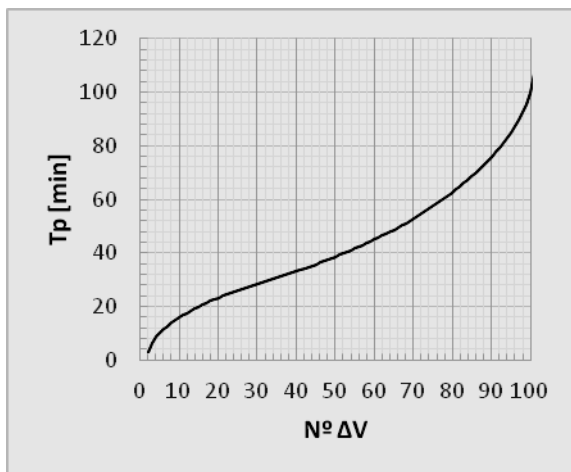
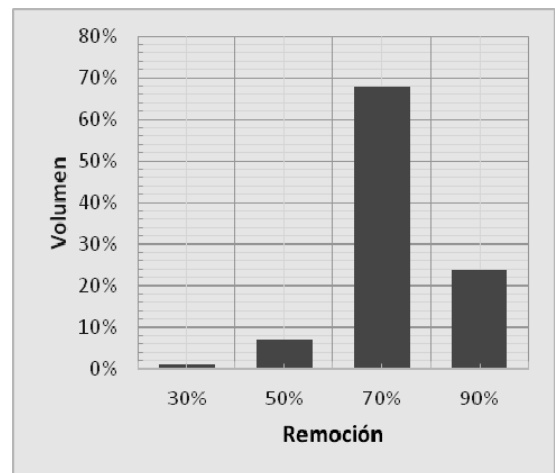


Figura 6. Tiempo de permanencia promedio Caso 2.



**Figura 7.** Tiempo de permanencia para cada porción de volumen Caso 2



**Figura 8.** Porcentaje de volumen para cada porcentaje de remoción Caso 2 (Aguzzi, 2015)

Se ha presentado una metodología para el diseño de un embalse como atenuador de crecidas y sedimentador de partículas de escurrimiento pluvial urbano. Utilizando el método clásico de cálculo de reservorios, basado en restaurar el caudal natural de la cuenca) para una recurrencia de 2 años y se asume una velocidad media de sedimentación de  $v_{sed\ 50\%} = 10\text{ m/h}$  ( $D_{50} = 70\ \mu\text{m}$ ), se alcanza una remoción de sólidos y contaminantes lo suficientemente alta como para estar por debajo del límite que impone la normativa para el vuelco (500 mg/l).

Además, se verifica que para concentraciones de escurrimiento pluvial aforadas en estudios antecedentes en Rosario por Baud (2002) de 760 mg/l, no hay una pérdida relevante de volumen del reservorio dado que para los casos de estudio no hubo una pérdida mayor al 1%. Por lo tanto, es esperable que estos reservorios no requieran de una limpieza periódica lo que hace económico su mantenimiento.

En el caso de asumir como sedimentos en suspensión muy finos como caolinita ( $D_{50} = 18\ \mu\text{m}$ ), el porcentaje de remoción es significativamente más bajo que para los sólidos típicos ya que no supera el 6% (Caso 1) en tanto que en el caso 2 se alcanza una del 19% en promedio, aunque a costa de un aumento del 40% del volumen del reservorio.

A nivel regional, la falta de monitoreo acerca de la calidad del escurrimiento pluvial urbano hace por el momento incierto el diseño de sedimentadores. Para un abordaje más profundo será necesario poner en marcha un programa de muestreo de efluentes para su caracterización física y química. De esta forma, se tendrá una noción más certera de los contaminantes presentes en nuestra región en el drenaje pluvial y se podrán analizar y



emprender tanto medidas no estructurales como acciones estructurales para mitigar sus efectos.

**Agradecimiento.** Los autores agradecen a la UNR por el apoyo brindado con los PID IING509 y IING514.

### **Bibliografía**

1. Arman A., Fathi Moghadam M., Samadi H. and Emamgholizadeh S. (2009), Fall Velocity of Cohesive Sediments in Dez Dam Reservoir, *Research Journal of Environmental Sciences*, 3(1): 71-79
2. Aguzzi I. (2015) Un aporte al Diseño de Sedimentadores para Esguurrimiento Pluvial: planteo de un nuevo Método basado en Turbidimetría para la Determinación de Velocidades de Sedimentación, Proyecto Final Carrera Ingenierai Civil, FCEIA, UNR. 132p.
3. Basile, P., Riccardi, G., y Aguzzi, I. (2015). Revisión de ecuaciones de velocidad de caída terminal de partículas de sedimento. *Séptimo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*. Montevideo, Uruguay. 14p.
4. Basile P., Riccardi G., Zimmermann E., Scuderi C., Stenta H. y Gonzalez A. (2009), Derivación de Curvas Intensidad-Duración-Recurrencia unificadas para la ciudad de Rosario, Santa Fe, Argentina. *XXII Congreso Nacional del Agua*. Trelew, Chubut. 12p
5. Baud, L. (2002). Caracterización del esguurrimiento pluvial en cuencas urbanas. *Tesis de Carrera de Especialización en Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. CIS, FCEIA, UNR. 80p.
6. Riccardi G. (2004), Hidrología en Medios Antropizados, Cap. 12 Diseño de Embalses, Material Curso de Posgrado, FCEAI, UNR, 80p.
7. Semadeni-Davies A. (2009), Fall Velocities of Stormwater Sediment Particles, *Technical Report*, Auckland Regional Council. 95p.