

PREDIMENSIONAMIENTO DE DEPÓSITOS DE RETENCIÓN EN REDES DE ALCANTARILLADO

Hans Paul Sánchez Tueros

Grup de Recerca FLUMEN
Dep. de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. UPC
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Jordi Girona 1-3. D-1. 08034 BARCELONA

1 Planteamiento del problema

Uno de los principales problemas que sufren las ciudades ubicadas en zonas de fuertes precipitaciones, es el asociado a la evacuación de sus aguas pluviales. El mal funcionamiento de la red de alcantarillado origina grandes pérdidas económicas y sociales, por lo que la preocupación de los ingenieros ha sido siempre buscar los métodos más idóneos para drenar las ciudades sin que se produzcan daños y que a la vez estén al alcance presupuestario de los ayuntamientos. Esta tarea es necesaria en muchas ciudades, ya sea porque los diseños de los colectores se hicieron sin datos fiables de lluvia o porque se emplearon cálculos y verificaciones que no representan el comportamiento real del flujo, o simplemente por el aumento de las zonas urbanas que origina la ampliación de la red de drenaje y la impermeabilización del suelo, elevando los caudales de escorrentía más de lo que puede evacuar el colector.

Para hacer frente a este problema se puede recurrir a adecuar las dimensiones del colector para que pueda drenar los caudales requeridos, es decir, construir o reconstruir el colector con las nuevas dimensiones. Esta medida puede ser difícil desde el punto de vista económico por lo que implica la ejecución de nuevas obras, la rehabilitación de colectores existentes y no sólo en puntos localizados sino a lo largo de toda la red, lo que origina la sobre-elevación de los costes por causas indirectas como: la obstrucción del tránsito de vehículos, la reposición y cuidado de las líneas de otros servicios (luz, gas, agua, teléfono, etc.). Incluso muchas veces por falta de espacios disponibles es imposible ampliar la red, por lo que se requiere utilizar otras medidas.

Los depósitos de retención, en sus diferentes variantes, hoy en día se han convertido en uno de los métodos propuestos con mayor frecuencia para solucionar los problemas de falta de capacidad de las redes, pero hay que indicar que muchas veces se sugiere su empleo sin tener un conocimiento cuantitativo de la magnitud del depósito que se requiere.

En este capítulo se pretende dar a conocer las herramientas necesarias para tener una noción cuantitativa de la magnitud de depósito que requerimos para laminar el caudal punta de un hidrograma de entrada.

El conocimiento aproximado de la magnitud de depósito que se necesita es muy importante para planificar los espacios y la definición del tipos de depósito que se requiere. Para posteriormente hacer el diseño definitivo.

2 Tipos de depósito de retención

Los depósitos retención podemos dividirlo en dos tipos: los depósitos de retención sin derivación y los depósitos de retención con derivación: Dentro de estos grupos podemos distinguir según su tipo de salida: salida libre o salida anegada.

2.1 Depósitos de retención sin derivacion

También llamados depósitos en serie o en línea (on line storage basin), son depósitos que están ubicados en la traza del colector, de manera que todo el flujo circulante atraviesa el depósito de retención, y cuya función consiste principalmente en atenuar los caudales punta aprovechando la capacidad de almacenamiento y laminación que tenga el depósito. En este tipo de depósitos, el parámetro hidráulico más importante es el área en planta que controla los niveles de agua en el depósito. (véase Figura 1 y Figura 2)

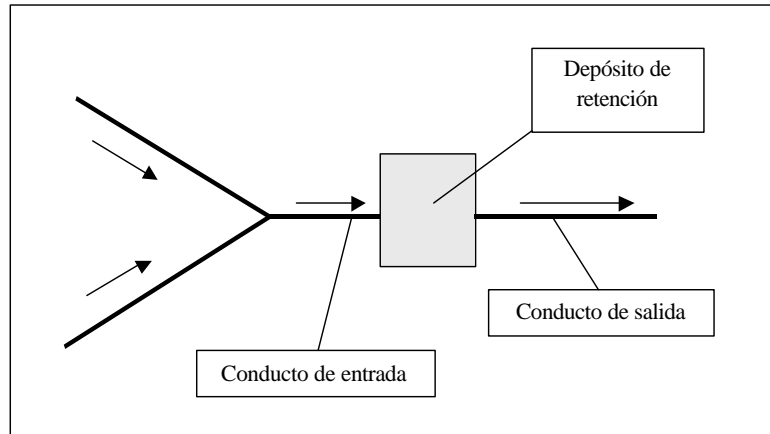


Figura 1: Esquema de una red con depósito sin derivación

El funcionamiento de estos depósitos dentro de la red es muy similar a la gestión de cuencas hidrográficas, donde las soluciones a la mejora del comportamiento de la red fluvial pasan por una adecuación de los cauces y por la ejecución de obras como los embalses de laminación, cuyo objetivo es proteger el tramo de cauce y las poblaciones existentes aguas abajo del embalse. El funcionamiento de un embalse de laminación es un problema clásico de atenuación de un hidrograma de caudal que entra en el embalse, fruto de una crecida aguas arriba, y su salida controlada por los órganos de desagüe (aliviadero, desagües de fondo y medio fondo) de manera que el caudal punta de salida del embalse sea inferior al de entrada y de magnitud tal que no produzca daños aguas abajo del embalse. Aprovechando esta idea clásica y aplicándola a un problema como el del drenaje urbano, tenemos que a pequeña escala en la red de drenaje, los

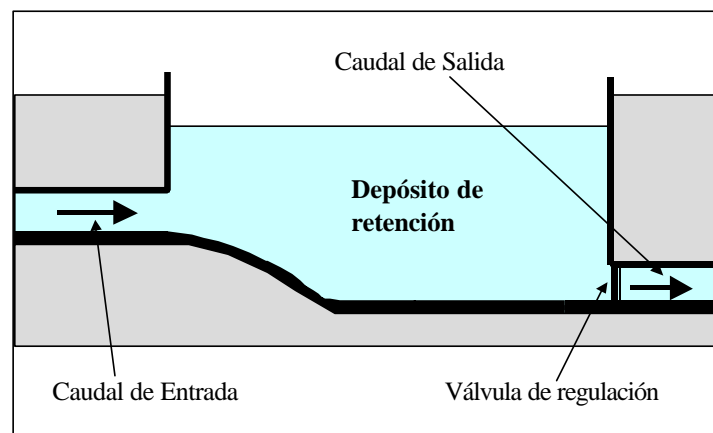


Figura 2: Depósito sin derivación con válvula u orificio de regulación

mismos elementos que en una cuenca hidrográfica; los colectores de la red son similares a los cauces naturales y la necesidad de que no se desborden es la misma en ambos casos. Para proteger una zona de la red del desbordamiento podemos reducir los caudales circulantes poniendo un embalse de laminación que en el caso de drenaje urbano reciben el nombre de depósitos de retención (detention basin)

2.2 Depósitos de retención con derivación

Estos depósitos también reciben el nombre de depósitos en paralelo, y se caracterizan porque parte de las aguas circulantes por la red son derivadas mediante una estructura de alivio y una conducción a un depósito ubicado fuera de la red, (por lo que se les denomina "off-line storage basin") reteniéndose allí para luego ser evacuadas.

Lo más significativo de este tipo de depósitos es su volumen de almacenamiento, siendo necesario que se cuente con una capacidad suficiente para almacenar los volúmenes requeridos, no siendo tan crucial el valor de la superficie del depósito a diferencia del depósito en línea, (véase Figura 3).

El funcionamiento de este tipo de depósitos es muy simple, ya que consiste en guardar o almacenar en un depósito el agua que no cabe en la red, para luego ser evacuada progresivamente una vez haya pasado la tormenta. Lo que importa de este depósito es el volumen que almacene, que debe ser igual o mayor a la precipitación de diseño menos lo que soporte la red.

En tiempo seco algunos depósitos son utilizados para diferentes fines (estacionamientos, parques, campos deportivos, etc.), porque no circulan por los caudales residuales y solo cumple su función real cuando los caudales generados por la lluvia sobrepasan el caudal admitido por la red. Un clásico ejemplo se muestra en la Figura 4, donde la superficie del depósito está siendo usada como un campo deportivo. Se trata de un depósito de retención con derivación, que controla los flujos de escorrentía para caudales mayores a los 10 años de periodo de retorno.

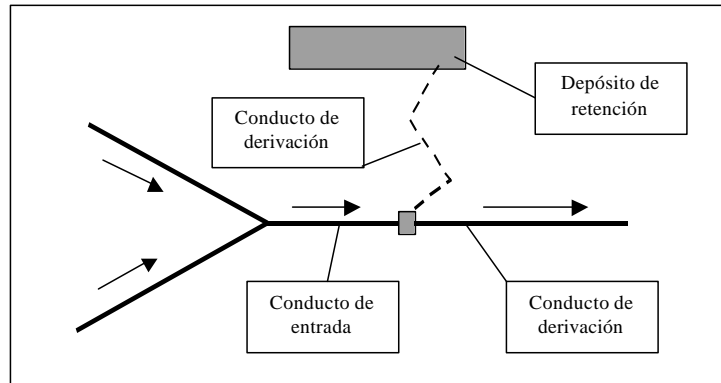


Figura 3: Esquema de una red con depósito de retención con derivación



Figura 4: Depósito de retención con derivación, en Denver. Está siendo usado como campo deportivo en épocas de tiempo seco

3 Predimensionamiento de depósitos de retención

Siempre se debe tener en cuenta que el correcto dimensionamiento hidráulico de los depósitos de retención se realiza mediante un modelo matemático que trabaje con las ecuaciones completas de Sant Venat, de tal manera que simule el flujo tanto en la red como en el depósito de forma conjunta e interactiva.

Sin embargo antes de hacer un diseño definitivo del depósito es necesario hacer una planificación del proyecto, donde sepamos de antemano cual será la ubicación de nuestro depósito. Para ello es necesario tener conocimiento de la magnitud aproximada de depósito que necesitamos para satisfacer nuestra demanda de restricción de caudal. Este valor lo debemos obtener de una manera fácil y con poca información que normalmente se tiene cuando se empieza a planificar.

En la literatura técnica se han encontrado una gran cantidad de fórmulas empíricas que nos ayudan a definir un tamaño de depósito. Entre éstas formulas podemos mencionar las más conocidas:

Ecuación	Autor
$\frac{S_{max}}{S_R} = \left(1 - \frac{Q_p}{I_p}\right)^2$	Abt and Grigg
$\frac{S_{max}}{S_R} = 0.660 - 1.76 \left(\frac{Q_p}{I_p}\right) + 1.96 \left(\frac{Q_p}{I_p}\right)^2 - 0.730 \left(\frac{Q_p}{I_p}\right)^3$	Soil Conservation Service (I y Ia)
$\frac{S_{max}}{S_R} = 0.682 - 1.43 \left(\frac{Q_p}{I_p}\right) + 1.64 \left(\frac{Q_p}{I_p}\right)^2 - 0.804 \left(\frac{Q_p}{I_p}\right)^3$	Soil Conservation Service (II y III)
$S_{max} = I_p t_d - Q_p \left(\frac{t_d + T_c}{2}\right)^2$	Aron and Kibler

donde:

- $S_{[max]}$ = Volumen máximo del depósito.
- S_R = Volumen del hidrograma de entrada.
- Q_p = Caudal punta del hidrograma de salida.
- I_p = Caudal punta del hidrograma de entrada.
- T_c = Tiempo de concentración.
- t_d = Tiempo de duración de la lluvia.

La mayoría de las fórmulas que se encuentran son aplicables a depósitos de retención con derivación, donde no existe ninguna interacción depósito-red.

También se puede obtener el volumen del depósito de forma gráfica como se observa en la Figura 5: Se traza la curva del volumen acumulado del hidrograma de entrada a lo largo del tiempo. También se traza el volumen acumulado del hidrograma de salida, si consideramos que el caudal de salida es constante e igual al máximo caudal permitido por la red, la curva del volumen de salida sería un recta. Entonces el volumen de nuestro depósito sería igual a la máxima diferencia entre estas curvas.

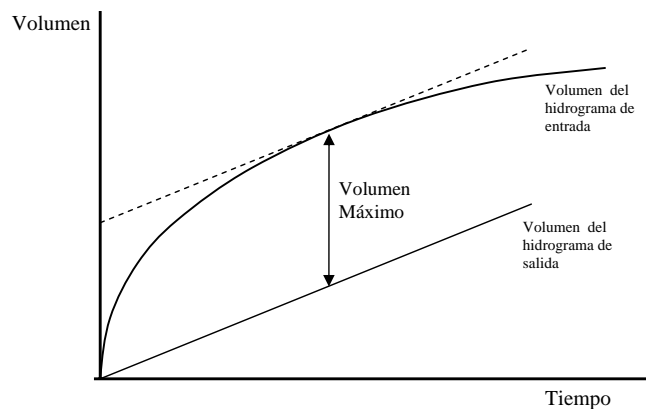


Figura 5: Método gráfico para el cálculo de volumen de depósitos de retención

En la Universidad Politécnica de Cataluña se han realizado algunos estudios hidráulico con la finalidad de facilitar y brindar en forma gráfica la posibilidad de obtener las dimensiones aproximadas del depósito de retención y tener una idea rápida de la magnitud de depósito que se requiere para laminar un cierto caudal de entrada. Pero este procedimiento de ninguna manera puede sustituir a los estudios detallados que se deben hacer cuando se llegue a la etapa de diseño.

Estas herramientas de prediseño en forma de ábacos fueron elaboradas a través de simulaciones hidráulicas para diferentes tipos de depósitos, y en los que se ensayaron varias combinaciones de superficies de depósitos, anchos de conducto de salida, tipos de vertedero y diferentes hidrogramas de entrada. Teniendo en cuenta que todos los hidrogramas de entrada son de forma triangular con dimensiones proporcionales al hidrograma unitario triangular del Soil Conservation Service[1], tal y como se muestra en la Figura 6.

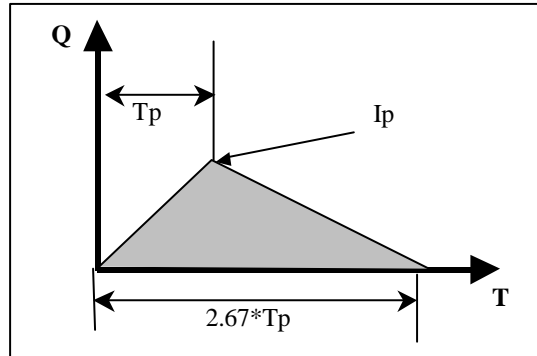


Figura 6: Hidrograma Unitario del Soil Conservation Service

En total se han llegado a simular casi unas 10 mil combinaciones para cada tipo de depósito. El intervalo de variación de parámetros ensayado fue: en caudal punta del hidrograma de entrada desde los 5 hasta los 50 m^3/s , en ancho de conducto de salida desde los 2 hasta los 8 metros, en longitud de vertedero desde los 2 hasta los 8 metros, en superficies de depósito desde los 5 mil hasta los 50 mil metros cuadrados.

Con los resultados obtenidos se propusieron una serie de ábacos para su empleo a la hora de predimensionar los depósitos de retención.

Los tipos de depósitos que se han analizado son los siguientes:

- Depósitos de retención sin derivación.
 - Con salida libre o anegada, sin considerar la influencia del conducto de salida.
 - Con salida libre y considerando la influencia del conducto de salida.
 - Con salida anegada y considerando la influencia del conducto de salida.
- Depósitos de retención con derivación.
 - Vertido lateral sin considerar la interacción depósito-red.
 - Vertido lateral considerando la interacción depósito-red

A continuación explicaremos cada uno de estos casos.

3.1 Predimensionamiento de depósitos de retención sin derivación

3.1.1 Con salida libre y anegada, sin considerar la influencia del conducto de salida

Akan (Akan, 2003) realiza unos estudios de tipo numérico, para depósitos de retención sin derivación, con estructura de salida en forma de orificio o vertedero.

La geometría de los depósitos puede ser cualquiera, y se considera tanto depósitos naturales o artificiales. La relación de la altura de agua (h) con el volumen de almacenamiento (s) de los depósitos debe estar expresada como:

$$s = bh^c \tag{1}$$

donde la constante c es adimensional, y la constante b tiene dimensiones de $(\text{longitud})^{3-c}$. Estas constantes dependen de la geometría y el tamaño del depósito. Para depósitos de paredes verticales la constante $c = 1$ y b equivale a la superficie en planta del depósito. Si la relación altura-volumen está dada en forma tabular, las constantes b y c pueden ser encontradas a través del análisis de mínimos cuadrados.

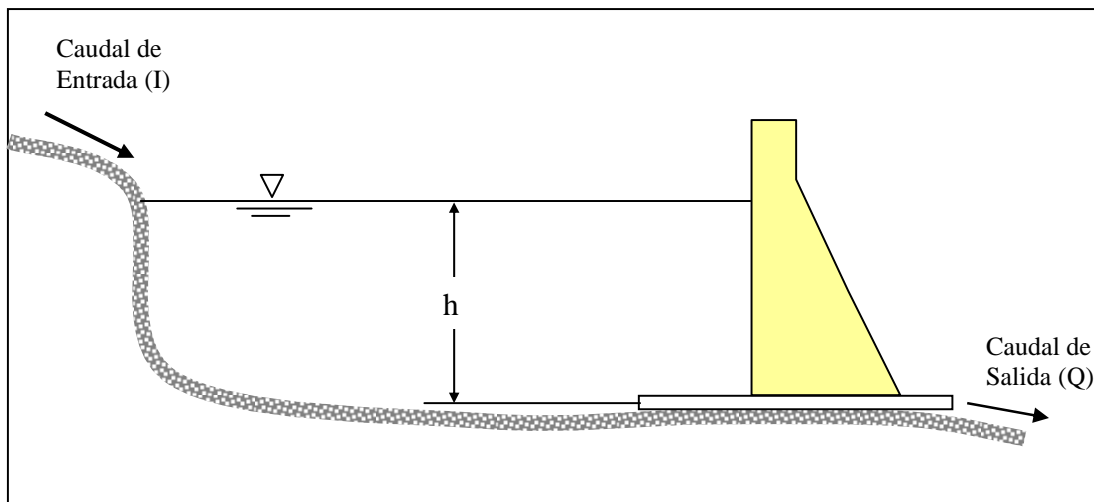


Figura 7: Esquema de depósito de retención analizado por Akan

El método de estudio se basa en depósitos con salida libre, sin estar afectado por las condiciones aguas abajo del conducto de salida, se calcula con la combinación de la ecuación de la conservación de la masa (ec. 2), la ecuación que relaciona la altura de descarga del depósito con el volumen almacenado (ec. 1) y una expresión que describe el paso del flujo a través de la estructura de salida, ya sea para orificios (ec. 3) o vertederos (ec. 4). El resultado lo expresa en ecuaciones diferenciales, los cuales los resuelve por diferencias finitas y finalmente los generaliza en parámetros adimensionales que son presentados en diversas gráficas.

$$I - Q = \frac{ds}{dt} \tag{2}$$

$$Q = k_o \cdot a_o \cdot \sqrt{2gh} \quad (3)$$

$$Q = k_w \cdot L \cdot h^{3/2} \quad (4)$$

donde, I es el caudal de entrada, Q es el caudal de salida, ds es el incremento del volumen de almacenamiento en un tiempo dt , siendo este el diferencial de tiempo, a_o es el área del orificio, k_o coeficiente de descarga del orificio, k_w es el coeficiente de descarga del vertedero y L es el ancho del vertedero, g es la aceleración de la gravedad, y h es la altura de carga.

La representación gráfica de los resultados para depósitos con salida tipo orificio (ver Ábaco 1) se realiza utilizando parámetros adimensionales como Q^* , P y F los cuales están definidos como:

$$Q^* = \frac{Q_p}{I_p} \quad (5)$$

$$P = \frac{t_p \cdot k_o \cdot a_o \cdot \sqrt{2g}}{b^x \cdot S_R^{1-x}} \quad (6)$$

$$F = \frac{I_p t_p}{S_R} \quad (7)$$

donde: Q_p es el caudal punta del hidrograma de salida del depósito en m^3/s , I_p es el caudal punta del hidrograma de entrada en m^3/s , t_p es el tiempo de ocurrencia del caudal pico de entrada en segundos, S_R es el volumen total de escorrentía del hidrograma de entrada en m^3 , b y c son los coeficientes que relacionan el volumen de almacenamiento del depósito con la altura de descarga (ec. 1), x es un coeficiente que es igual a $0.5/c$ para salida tipo orificio (en depósitos rectangulares $c=1$ entonces $x=0.5$), y para salidas tipo vertedero $x = 1.5/c$.

Para depósitos de retención con salidas tipo vertedero, Akan presenta otros ábacos de predimensionamiento (véase Ábaco 2). Estos gráficos fueron realizados siguiendo la misma metodología que los de orificio, variando sólo el parámetro P que está definido por los valores de la geometría del vertedero (ec. 8):

$$P = \frac{t_p \cdot k_w \cdot L \sqrt{2g}}{b^x} \cdot S_R^{x-1} \quad (8)$$

Los resultados de los ábacos de predimensionamiento están realizados para cualquier hidrograma de entrada de forma triangular

Ejemplo de Aplicación 1:

Una red ha sido diseñada para evacuar un caudal máximo de $13.5 m^3/s$. Debido a la expansión de la ciudad, el hidrograma de escorrentía de diseño se ha incrementado a $20 m^3/s$ con un

tiempo pico de 1 hora. Se necesita conocer aproximadamente las dimensiones de un depósito de retención que pueda laminar el caudal del nuevo hidrograma, para solucionar el problema, sabiendo que el depósito evacuará sus aguas por un orificio de diámetro 1.7 m y coeficiente de descarga $K_o=0.75$. El depósito será de paredes verticales.

Como datos tenemos: $Q_p=13.5 \text{ m}^3/\text{s}$, $I_p=20 \text{ m}^3/\text{s}$, $t_p=3600 \text{ seg}$, $D=1.7 \text{ m}$, $c=1$, por ser el depósito de paredes verticales, necesitamos conocer b , que es igual al área en planta del depósito.

Calculamos Q^* (ec. 5) que es igual a 0.675, y F (ec.7) es 0.75, ingresamos al Ábaco 1, hallamos el valor de $P=0.90$. Reemplazamos el valor de P en la ecuación (ec. 6), despejamos el valor de b , ya que conocemos las otras variables ($b=10628 \text{ m}^2$).

Para evaluar la altura del depósito despejamos h de la ecuación (ec. 3), resultando $h=2.85 \text{ m}$. A este valor se le añadirá el resguardo correspondiente.

Por lo tanto para solucionar el problema necesitamos un depósito de paredes verticales de 10.628 m^2 de superficie en planta y una altura efectiva de 2.85 m., aproximadamente. Que hacen un volumen de almacenamiento de 30337 m^3 .

3.1.2 Con salida libre y considerando la influencia del conducto de salida

Se realizó un análisis de depósitos de retención sin derivación, con salida libre, pero considerando la influencia del conducto de salida (H. Sánchez - 1988), para lo cual, se desarrolló un modelo matemático para simular numéricamente el comportamiento hidráulico de un esquema de drenaje, en flujo no permanente, formado por un depósito de retención al que entra un hidrograma triangular con dimensiones proporcionales al hidrograma unitario triangular del Soil Conservation Service [1]. Sale por un conducto que puede ser de sección rectangular o circular, de longitud suficientemente larga, como para que las condiciones de contorno del conducto aguas abajo no influya en el desagüe del depósito.

El análisis hidráulico de este esquema se basa en resolver las variables de transición entre el depósito y el conducto de salida (calado y_k , velocidad v_k y altura h del depósito) como se puede ver en la Figura 8, para ello se resuelve conjuntamente la ecuación de la conservación de la masa del depósito (ec. 9), la ecuación de la conservación de la energía entre el depósito y el conducto de salida (ec. 10) y la ecuación asociada a la característica negativa del flujo no permanente en la salida de depósito (ec. 11), que precisamente es la influencia del conducto de salida.

$$I - Q = \frac{dh}{dt} \cdot Sup \tag{9}$$

$$\left(\frac{1}{2g}\right) \cdot v_k^2 + y_k = h \tag{10}$$

$$v_k - v_s - \frac{g}{c_s} \cdot (y_k - y_s) + g \cdot \Delta t \cdot (I_{fs} - I_o) = 0 \tag{11}$$

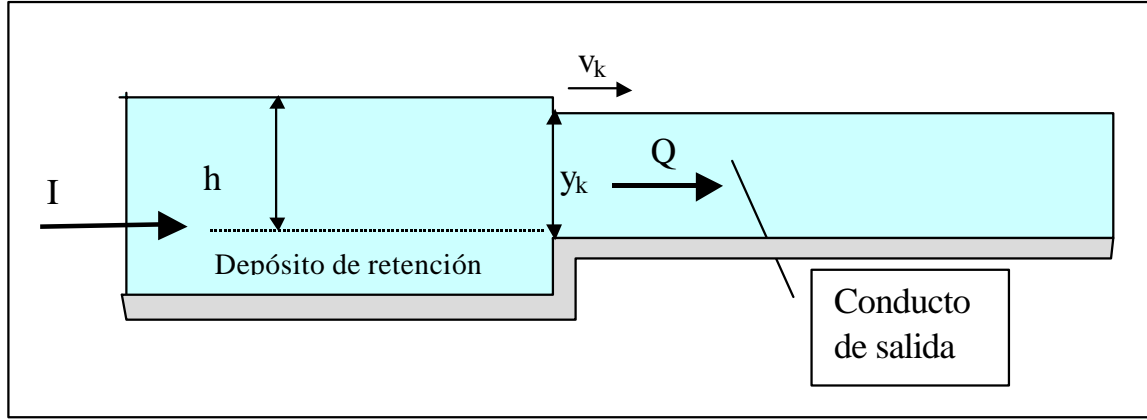


Figura 8: Interacción entre el depósito y el conducto de salida

Con los resultados de las simulaciones se realizaron ábacos, que relacionan el porcentaje de laminación del depósito con parámetros dimensionales que están en función de las características del hidrograma de entrada, las dimensiones del depósitos y las dimensiones del conducto de salida.

Para conductos de salida tipo rectangular, se propone la gráfica que se muestra en el Ábaco 3 donde se relaciona el porcentaje de laminación (%Lam) (ec. 12) y un parámetro L (ec. 13), Definido como:

$$\%Lam = \frac{I_p - Q_p}{I_p} \times 100 \quad (12)$$

$$L = Q_b^{-3/4} \cdot \frac{Sup}{t_p} \cdot \sqrt{\frac{I_p}{B}} \quad (13)$$

donde I_p es el caudal punta del hidrograma de entrada en m^3/s , Q_p es el caudal punta del hidrograma de salida del depósito en m^3/s , Q_b es el caudal base del hidrograma de entrada en m^3/s , t_p es el tiempo de ocurrencia del caudal punta del hidrograma de entrada al depósito, en segundos, Sup es el valor de la superficie del depósito, en m^2 y B es el ancho del conducto de salida del depósito, expresado en metros.

Para calcular la altura máxima del nivel del agua en el depósito (H_{max}) se propone el Ábaco 4 que relaciona este parámetro, en metros, con un parámetro G (ec. 14), que está en función de las características del hidrograma de entrada, de las dimensiones de depósito y del conducto de salida.

$$G = \frac{I_p^{3.5} \times t_p}{Sup \times B^{2.5}} \quad (14)$$

Utilizando el mismo procedimiento descrito para realizar los ábacos de depósitos con conducto

de salida rectangular, se propone Ábacos para conductos de salida circular. Con la diferencia de que en lugar de utilizar como variable el ancho del conducto de salida (B) se utilizó el diámetro del conducto (D), además de que se agregó otro parámetro que es el número de conductos (N), con lo cual se da la posibilidad de utilizar una batería de conductos iguales como salida. Los ábacos propuestos consisten en un gráfico que relaciona el porcentaje de laminación (%Lam) (ec. 12) con un parámetro "X" (ec. 15) véase Ábaco 5 y la altura máxima del depósito (Hmax) con el parámetro "Y" (ec. 16), véase Ábaco 6.

$$X = \frac{Sup}{N \times D \times t_p^{0.7}} \times \sqrt{\frac{I_p}{Q_b}} \quad (15)$$

$$Y = \frac{I_p}{N \times D} \times \sqrt{\frac{t_p}{Sup}} \quad (16)$$

Ejemplo de Aplicación 2

En una ciudad se desea proyectar un depósito de retención para poder laminar el caudal punta del hidrograma de escorrentía de entrada que tiene las siguientes características: $I_p = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ y $t_p = 1 \text{ hora}$; a un hidrograma que tenga como caudal punta $12 \text{ m}^3/\text{s}$. El colector está formado por un conducto rectangular de 2 m ., de ancho. Por el colector normalmente circula un caudal base de $2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Como dato tenemos, $I_p=20 \text{ m}^3/\text{s}$, $t_p = 3600 \text{ seg.}$, $Q_b=2 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_p=12 \text{ m}^3/\text{s}$ y $B=2 \text{ m}$. Se calcula el porcentaje de laminación que vamos a aplicar, para lo cual utilizamos la ecuación (ec. 12), de donde $\%Lam=40 \%$, con este valor ingresamos en el Ábaco 3 para interpolar en la curva respectiva de $Q_b/I_p=0.1$, y hallamos el valor del parámetro $L=7.6$, con este valor vamos a la ecuación (ec. 13) y despejamos el valor de la superficie del depósito, siendo $Sup = 14550 \text{ m}^2 = 15000 \text{ m}^2$.

Finalmente para calcular la altura del depósito calculamos con la ecuación (ec. 14) el parámetro $G = 1517 = 1.52E+03$, con este valor ingresamos en el Ábaco 4 de donde tenemos que $H_{max}=3.8 \text{ m}$.

Por lo tanto necesitaremos un depósito de $15 \text{ mil metros cuadrados}$ de superficie en planta y 3.8 metros de altura útil.

3.1.3 Con salida sumergida y considerando la influencia del conducto de salida

Como una manera de complementar los estudios de predimensionamiento de depósitos de retención antes realizados, en la ETSECCPB se realizó un análisis de depósitos de retención sin derivación, con salida sumergida y considerando la influencia aguas abajo del conducto de salida (S. Vázquez, 2000), para lo cual, se desarrolló un modelo matemático que simula numéricamente el comportamiento hidráulico en flujo no permanente de un esquema de drenaje como se muestra en la Figura 9, el cual está formado por un depósito de retención al que entra un hidrograma triangular e igual que en los anteriores casos, con dimensiones proporcionales al hidrograma unitario triangular del Soil Conservation Service.

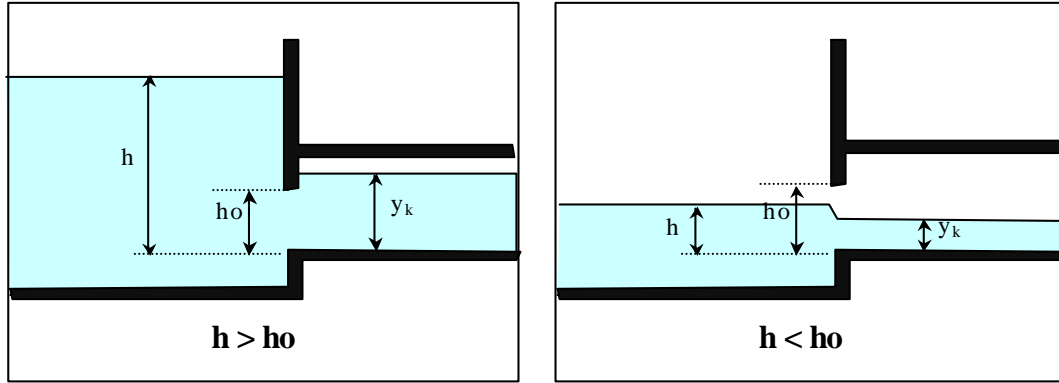


Figura 9: Corte longitudinal de esquema de desagüe de depósito por orificio

Este hidrograma sale por un conducto de sección rectangular, de longitud suficientemente larga, como para que las condiciones de contorno del conducto aguas abajo no influya en el desagüe del depósito. La salida del depósito se realiza por un orificio también de sección rectangular del mismo ancho que el conducto de salida y una altura igual a h_0 .

El análisis hidráulico del depósito se realiza basándose en tres ecuaciones: la ecuación de la conservación de la masa (ec. 9), la ecuación de la conservación de la energía (ec. 10), si el nivel de agua en el depósito no cubre totalmente el orificio, de lo contrario, si cubre totalmente el orificio utilizará la ecuación de desagüe de orificio (ec. 17) y la tercera ecuación es la que considera la influencia del conducto de salida: la ecuación de flujo asociada a la característica negativa del conducto de salida en el punto de intersección con el depósito (ec. 11).

$$Q = C_d A_o \sqrt{2g(h - y_k)} = y_k v_k B \quad (17)$$

donde C_d es el coeficiente de descarga de orificios, A_o es el área abierta del orificio, que en caso de ser rectangular como fue desarrollado en este ensayo será igual a $(h_0 \cdot B)$, B es el ancho del conducto de salida, v_k y y_k es la velocidad y el calado en el punto inicial del conducto de salida. h es el nivel de agua en el depósito con respecto al fondo del conducto de salida.

Los resultados de los ensayos numéricos se presentan gráficamente, donde se establecen curvas en función de dos parámetros Q^* (ec. 18), y S' (ec. 19). Cada curva representa los resultados para un determinado caudal punta del hidrograma de entrada (I_p). El conjunto de estas curvas permite proponer un ábaco, y cada ábaco representa los resultados para cada altura de orificio, es decir para cada valor de h_o , (véase Ábaco 7, Ábaco 8, Ábaco 9, Ábaco 10, y Ábaco 11).

$$Q^* = \frac{Q_p}{I_p} \quad (18)$$

$$S' = \frac{S_{up}}{t_b \cdot B^2} \quad (19)$$

donde Q_p es el caudal punta del hidrograma de salida m^3/s , I_p es el caudal punta del hidrograma de entrada m^3/s , Sup es la superficie en planta del depósito en m^2 , t_b es el tiempo base del hidrograma de entrada en segundos y B es el ancho del conducto de salida en metros.

Para calcular la altura máxima del nivel del agua en el depósito, se trazaron curvas donde se grafica el caudal punta del hidrograma de entrada (I_p) dividido entre el nivel máximo de la altura del agua en el depósito (H_{max}), relacionando con el parámetro S' (ec. 19). Cada curva representa los valores para una determinada altura de orificio (h_0), y un conjunto de estas curvas forman un ábaco con los resultados de un mismo ancho de conducto de salida (B). (Véase Ábaco 12, Ábaco 13, Ábaco 14 y Ábaco 15).

Ejemplo de Aplicación 3

Se necesita construir un depósito de retención con salida por orificio, para laminar el caudal punta de un hidrograma de entrada de $25 m^3/s$ a $7 m^3/s$ y se sabe que el hidrograma de entrada tiene un tiempo base de 1 hora. El conducto de salida es rectangular con una anchura de 2 m. ¿Qué dimensiones aproximadamente debería tener el depósito, si el orificio es rectangular de la misma anchura del conducto de salida y tiene una abertura de 0.6 m.?

En este caso conocemos los siguiente datos: $I_p=25 m^3/s$, $Q_p=5 m^3/s$, $h_0=0.6 m.$, $t_b=3600$ seg., $B=2 m$. Con la ecuación (ec. 18) calculamos el valor de $Q^*=0.28$, para ingresar al Ábaco 9 en el cual interceptamos en la curva que corresponde al $I_p = 25 m^3/s$, y obtener el parámetro $S'=0.28$.

En la ecuación (ec. 19), reemplazamos el valor de S' y calculamos el área de la superficie del depósito, $Sup = 4032 m^2$. Para calcular la altura del nivel del agua en el depósito recurrimos al Ábaco 12 que es el que corresponde a un colector de anchura $B = 2 m.$, en donde con el valor de S' que hemos hallado, interceptamos a la curva que corresponde a $h_0 = 0.6 m$ y obtenemos, el valor de I_p/H_{max} , de lo cual deducimos que $H_{max} = 7.35 m$.

Por lo tanto para laminar el caudal fijado, es necesario un depósito de aproximadamente $4032 m^2$ de superficie y $7.358 m$ de altura útil, haciendo un volumen de almacenamiento de aproximadamente $30000 m^3$

3.2 Predimensionamiento de depósitos de retención con derivación

3.2.1 Vertido sin considerar la interacción depósito-red

Se ha realizado un estudio numérico del comportamiento hidráulico de depósitos de retención con derivación, con salida libre y sin considerar la interacción depósito-red (H. Sánchez – 1998), para lo cual se han creado modelos matemáticos que resuelvan hidráulicamente un esquema de drenaje formado por una red, que tiene una cámara de captación o derivación que se encarga de derivar el exceso de escorrentía a un depósito ubicado fuera de la red, mediante un conducto de derivación, donde se almacena los excedentes de caudal y posteriormente son evacuados, (véase Figura 10).

Los cálculos hidráulicos de sistema de drenaje se desarrollaron resolviendo en régimen no

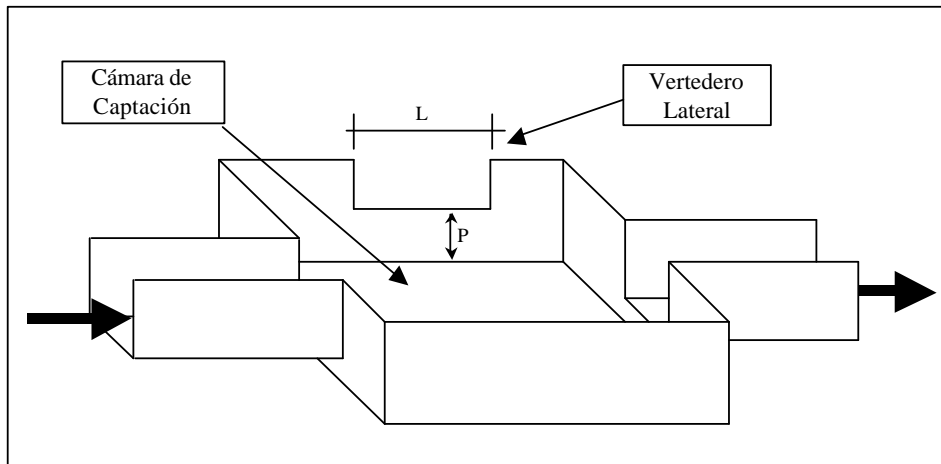


Figura 10: Vista en perspectiva del esquema de depósito con derivación libre

permanente todo el esquema de drenaje, al que ingresa un hidrograma triangular con dimensiones proporcionales al hidrograma unitario triangular del Soil Conservation Service. La cámara de captación se considera como un depósito sin derivación con dimensión de superficie muy reducida, para que no afecte en la laminación. Para ello se utilizó un sistema de ecuaciones formado por la ecuación de la conservación de la masa (ec. 20), la ecuación de la conservación de la energía (ec. 10), y la ecuación de las características negativas del conducto de salida (ec. 11).

$$I - Q - Q_v = \frac{dh}{dt} \cdot Sup \quad (20)$$

donde I es el caudal de entrada a la cámara de captación, Q es el caudal que sale de la cámara de captación por el conducto de salida, Q_v es el caudal que sale de la cámara de captación por el vertedero lateral (ec. 4), el cual a su vez está en función de la geometría del vertedero y el nivel del agua h en la cámara de captación y Sup es la superficie de la cámara de captación.

Con los resultados de estos ensayos se propone el Ábaco 16, donde se relaciona el porcentaje de laminación (ec. 12) con el parámetro R (ec. 21), que está en función del volumen del depósito de retención (V_d) en metros cúbicos y el tiempo de ocurrencia del caudal pico del hidrograma de entrada (t_p) en segundos.

$$R = \frac{V_d}{t_p} \quad (21)$$

En el Ábaco 16 se puede ver que el porcentaje de laminación está directamente relacionado con el volumen del depósito de retención, es decir a mayor porcentaje de laminación necesitaremos mayor volumen del depósito, sin influir directamente las dimensiones geométricas del vertedero ni del conducto de salida, puesto que estos valores indirectamente influyen en la laminación, ya que si bajamos la altura del vertedero (P), haremos que mayor cantidad de agua se derive por el vertedero por lo cual mayor será el volumen del depósito y también será mayor la laminación, al igual ocurre con los parámetros de longitud del vertedero (L) y ancho del conducto de salida (B). Existen muchas combinaciones de estos tres parámetros con el que se puede obtener la misma laminación y por ende aproximadamente el mismo volumen de almacenamiento.

Ejemplo de Aplicación 4

Existe una red de alcantarillado que está diseñado para evacuar como máximo un caudal de $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Se sabe que en los últimos tiempos por el incremento de las zonas urbanas y la impermeabilización de los suelos la escorrentía superficial se ha incrementado calculándose en un caudal pico de $35 \text{ m}^3/\text{s}$ el cual tiene ocurrencia a la hora de iniciarse la escorrentía. Para solucionar este problema se pretende construir un depósito de retención que esté ubicado fuera de la red, por razones de espacio y se desea saber aproximadamente cuánto volumen debe tener este depósito.

Los datos que conocemos son los siguientes: $I_p=35 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_p= 20 \text{ m}^3/\text{s}$ y $t_p=3600 \text{ seg}$. De la ecuación (ec. 12), calculamos el porcentaje de laminación $\%Lam=43 \%$, con este valor ingresamos al Ábaco 16 y en la curva que corresponde a un I_p de $35 \text{ m}^3/\text{s}$ interpolamos y obtenemos el valor del parámetro $R=15.5$, del cual despejamos el valor del volumen del depósito según la ecuación (ec. 21). Por lo tanto necesitamos un volumen útil de depósitos de $55.800,00 \text{ m}^3$.

3.2.2 Vertido lateral considerando la interacción depósito-red

Se ha realizado estudios de depósitos de retención con salida libre y considerando la interacción depósito-red (S. Vázquez, 2000), lo que significa que el depósito de retención está muy cerca de la cámara de derivación (véase Figura 11) de tal manera que las aguas ingresen al depósito a través del vertedero lateral y también estas puedan retornar a la red según las circunstancias hidráulicas que se presenten.

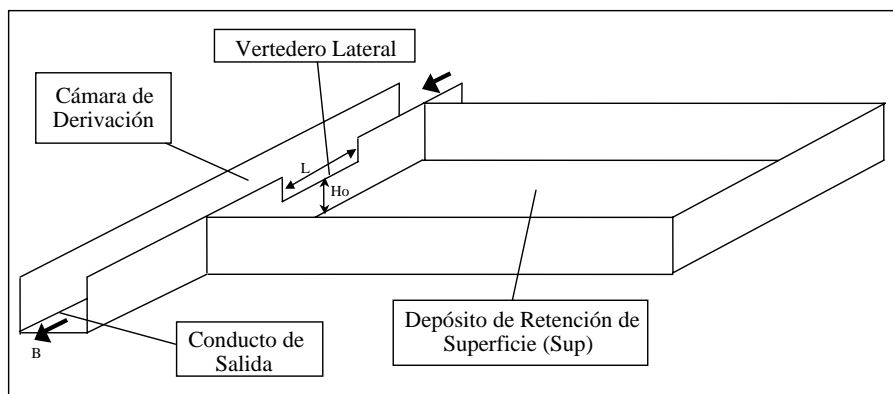


Figura 11: Perspectiva del esquema de depósito con derivación influenciada

La solución hidráulica del esquema de drenaje pasa por resolver en régimen no permanente la cámara de derivación, como si se tratara de un depósito en línea, pero cuya superficie será muy pequeña.

Las ecuaciones a utilizar son: la ecuación de la conservación de la masa en la cámara de derivación, la ecuación de la conservación de la energía entre la cámara y el conducto de salida y la ecuación de las características negativas en el punto de unión del conducto de salida y la cámara de derivación.


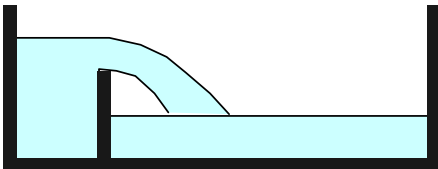
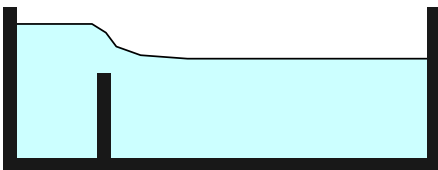
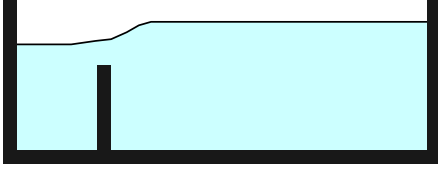
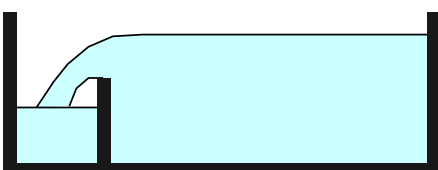
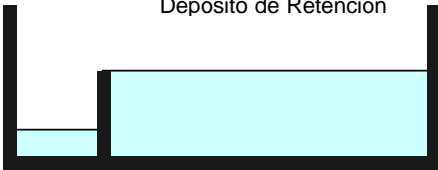
<p style="text-align: center;">Depósito de Retención</p> 	<p>FASE 1: Comienza el ascenso del agua en la cámara de derivación. La altura del agua no ha alcanzado la altura del vertedero, no entra agua al depósito por lo tanto no hay laminación.</p>
<p style="text-align: center;">Depósito de Retención</p> 	<p>FASE 2: Al superar el agua la cota del vertedero, se inicia el vertido al depósito de retención, ascendiendo el nivel del agua en el depósito hasta alcanzar la cota del vertedero</p>
<p style="text-align: center;">Depósito de Retención</p> 	<p>FASE 3: En este instante el flujo a través del vertedero ya no es libre sino sumergido.</p>
<p style="text-align: center;">Depósito de Retención</p> 	<p>FASE 4: En esta parte el caudal de entrada a la cámara ha descendido, el nivel del agua en el depósito es mayor que en la cámara, por lo cual el flujo se invierte produciéndose un retorno de agua a la red.</p>
<p style="text-align: center;">Depósito de Retención</p> 	<p>FASE 5: Aquí el agua en la cámara desciende por debajo de la cota del vertedero y el retorno de agua del depósito a la cámara se realiza como un vertido libre.</p>
<p style="text-align: center;">Depósito de Retención</p> 	<p>FASE 6: Aquí el nivel del agua en el colector retorna al del caudal base, quedando solo almacenada la parte que no puede salir por el vertedero, para que luego sea desaguado por otros medios.</p>

Figura 12: Fases de comportamiento de depósitos con vertido lateral considerando la interacción depósito-red

Para la simulación hidráulica de este esquema se tuvo en cuenta las distintas fases que presenta el comportamiento de este tipo de depósitos, como se muestra en la Figura 12.

Los resultados de todos los ensayos que se hicieron fueron graficados relacionando la laminación Q^* (ec. 5) con un parámetro P (ec. 22), que está en función de la superficie del depósito (Sup) en metros cuadrados, el tiempo base del hidrograma de entrada (tb) en segundos, la longitud del vertedero (L) en metros y la altura del vertedero (Ho) también en metros.

$$P = \frac{Sup}{t_p} \cdot \left(\frac{L}{Ho} \right)^{0.3} \quad (22)$$

Salieron curvas que representan los resultados para un determinado ancho de conducto de salida (B) y el conjunto de curvas forman un ábaco para cada caudal punta del hidrograma de entrada. (véase Ábaco 17, Ábaco 18 y Ábaco 19).

De igual manera para calcular la altura máxima del nivel del agua en el depósito los resultados se expresaron en gráficas que relacionan un parámetro F (ec. 23), con otro parámetro N (ec. 24); (véase Ábaco 20). Estos parámetros están en función de la superficie del depósito (Sup) en m^2 , la altura máxima del nivel del agua ($Hmax$) en metros, el tiempo base del hidrograma de entrada (tb) en segundos y el ancho del conducto de salida (B) en metros.

$$F = \frac{Sup \cdot H_{max}}{t_b} \quad (23)$$

$$N = \frac{Sup}{t_b \cdot B} \quad (24)$$

Ejemplo de Aplicación 5

Se tiene una red de alcantarillado de 2 metros de ancho, al que se le pretende construir un depósito de retención para laminar el hidrograma de entrada, que tiene un caudal punta de $35 \text{ m}^3/\text{s}$ y un tiempo base de una hora y media, a un hidrograma con caudal punta de $21 \text{ m}^3/\text{s}$. Para ello se pretende construir un depósito de retención con derivación. Se ha planteado poner un vertedero de una altura de 2 metros y una longitud de 6 metros..

Como datos del problema tenemos: $I_p=35 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_p=21 \text{ m}^3/\text{s}$, $tb=5400 \text{ seg.}$, $B=2 \text{ m.}$, $Ho=2 \text{ m.}$, $L=6 \text{ m.}$

- De la ecuación (ec. 5), calculamos $Q^*=0.6$
- Del Ábaco 18 obtenemos $P = 3.8$
- Reemplazando la ecuación (ec. 22); tenemos $Sup = 14,758 = 15,000 \text{ m}^2$
- Con la ecuación (ec. 24), calculamos, $N = 1.40$
- Del Ábaco 20 obtenemos $F = 11.2$
- Y de la ecuación (ec. 23); despejamos $Hmax = 4.0 \text{ metros.}$

Por lo tanto necesitaríamos un depósito de 15 mil metros cuadrados de superficie con una altura útil de 4 metros.

4 Modelo de predimensionamiento de depósitos

Con la finalidad de simplificar aún más las aproximaciones se ha creado un Modelo matemático que se encarga de predimensionar los depósitos según la información que se le de. Este modelo sólo se encarga de interpolar los valor de la curva en el ábaco que le corresponda. El modelo está disponible gratuitamente en la Página Web de FLUMEN (<http://www.flumen.upc.edu>).

5 Referencias

Akan, A.O. (1990) "Single Outlet Pond Analysis and Design" Journal of irrigation and Drainage Engineering, 116(4), with permission ASCE

Akan, A. O (1993) "Urban Stormwater Hydrology". Technomic Publishing Company, U.S.A.

Akan, A. O (2003) "Urban Hydrology Hydraulics, And Stormwater Quality ". John Wiley & Sons, INC, U.S.A.

ASCE (1985) "Stormwater Detention Outlet Control Structures" Task Committee on the Design of Outlet Control Structures. New York

ASCE (1992) "Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems", ASCE Manual of Engineering Practice n. 77. New York.

Gómez, Manuel (1988) "Contribución al Estudio del Movimiento Variable en Lámina Libre en las Redes de Alcantarillado. Aplicaciones". Tesis Doctoral. ETSECCPB - UPC.

Koral, Saatci (1976) "Dimensions of Storm Water Basins" Gas-Wasser-Abwasser.

Larry W. Mays (2001) "Stormwater collection systems design handbook" McGraw-Hill.

Munz, W. (1975) "Dimensions of Storm Water Basins" Gas-Wasser-Abwasser n. 3

Sánchez H., (1998) "Análisis del Pre-dimensionamiento de Depósitos de Retención en Redes de Alcantarillado". Tesina. ETSECCPB - UPC. Barcelona.

Stahre, P., Urbonas, B. (1990) "Stormwater Detention". Prentice Hall. Englewood Cliffs.

Vázquez S. (2000) "Predimensionamiento de Depósitos de Retención". Tesina. ETSECCPB-UPC. Barcelona.