

Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales

Francisco Pazmiño Gavilánez e-mail: sfpazmino@uta.edu.ec
Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato. Ambato – Ecuador.

Rodney Hechavarría Díaz e-mail: ro.hechavarria@uta.edu.ec
Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato. Ambato – Ecuador.

Fabián Rodrigo Morales Fiallos e-mail: frmorales@uta.edu.ec
Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato. Ambato – Ecuador.

Jorge León Mantilla e-mail: jleonm@uta.edu.ec
Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato. Ambato – Ecuador.

RESUMEN

Este estudio experimental, realizado en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Técnica de Ambato, utilizó una plataforma experimental de sumideros en media vía para diferentes caudales a escala reducida 1:4. Se consideraron dos casos para analizar su eficiencia hidráulica. Caso 1: un solo sumidero ubicado en la calle (caso referencia o S1). Como alternativa experimental Caso 2: dos sumideros en serie ubicados en la calle. Se trabajó con una variación de 2 y 4 % en la pendiente transversal de la vía (bombeo) y de 0,5 a 12 % en la pendiente longitudinal. Los resultados muestran la necesidad de ubicar uno o dos sumideros en dependencia de la eficiencia de captación hidráulica que se desee; igualmente, se estudia la influencia de las pendientes transversales y longitudinales en la eficiencia hidráulica.

Palabras clave: aguas pluviales, eficiencia hidráulica, sumideros.

Experimental calculation of hydraulic efficiency of rain water drain inlets

ABSTRACT

This experimental study was conducted at the Laboratory of Hydraulics of the Technical University of Ambato. It was used an experimental platform with a drain inlet in just one side of the road (scale 1: 4). Two cases were considered in order to analyze their hydraulic efficiency, both located in the street. Case 1 consisted of a single drain inlet (reference). Case 2 consisted of two serial drain inlets. Both cases were worked on with a variation of 2 and 4 % in the transverse slope and 0,5 to 12 % in the longitudinal slope. Results showed that placing two serial drain inlets, in general, can achieve higher hydraulic collecting efficiency with respect to the case of a single drain inlet. It was also studied the role of transverse and longitudinal slopes.

Keywords: rainwater, hydraulic efficiency, drain inlets.

INTRODUCCIÓN

El agua proveniente de precipitaciones atmosféricas, una vez que se encuentra en la superficie, corre a lo largo de las calles pendiente abajo; su presencia hace que los materiales constitutivos de la estructura vial tengan comportamientos particulares a diferentes sollicitaciones.

Es importante, entonces, controlar el agua de cualquier origen para precautelar la obra vial y, de esta manera, que los materiales se mantengan dentro de las condiciones previstas en su diseño y construcción (Sánchez y Martínez 2014).

Esto se consigue con un adecuado sistema de drenaje constituido por conductos diseñados hidráulicamente.

Hoy día existen numerosos trabajos técnicos referidos al comportamiento hidráulico de las alcantarillas y sus condiciones de diseño (Djordjevic et al. 2013), además de manuales de carreteras, que incluyen instrucciones y criterios de dimensionamiento hidráulico.

Sin embargo, el problema de maximizar el caudal captado por escorrentía en las alcantarillas, no es tan copioso en la literatura científica y éste ha tenido que ser replanteado en diversos países debido al impacto urbanizador.

Es importante, entonces, una revisión de las respectivas normas en cada una de las regiones.

Por ejemplo, en el ámbito iberoamericano se puede encontrar algunos trabajos donde concluyen que los sumideros fuera de la calle eran más eficientes; igualmente se han obtenido mejoras en la eficiencia incorporando zonas de influencia o de encauzamiento del flujo hacia el sumidero; estudios estos realizados en Chile (Cortez y Kaliski 2008).

Asimismo, (Rincón y Muñoz 2013) introdujeron cambios en el modelo matemático donde se tomó en cuenta la influencia de la variabilidad temporal de la lluvia; esto permitió predecir con mayor precisión el comportamiento hidráulico de un sistema de drenaje, estudio realizado en Venezuela.

Por otra parte, en España, (Conesa y García 2010) proponen criterios hidromorfológicos para la mejora de la eficiencia de obras de drenaje pequeñas en pasos de carreteras sobre ramblas o barrancos. Sobre este tema (Martins et al. 2014) en Portugal, también propone nuevos coeficientes de descarga para la caracterización del comportamiento hidráulico de un barranco o depresión en condiciones de drenaje.

Fuera del ámbito iberoamericano se puede encontrar un número importante de trabajos relacionados con el tema de cómo mejorar el caudal de agua captado en los sumideros; por ejemplo Gezder and Gökdağ (2014).

También se encuentran investigaciones, por ejemplo, en Alemania y Estados Unidos, con diseños y resultados similares a algunos estudios realizados por acá en esta región (Kemper and Schlenkhoff 2015).

En Ecuador, el planteamiento teórico para el diseño del alcantarillado pluvial considera que el agua de lluvia, una vez en la superficie, instantáneamente se encuentra en el interior de la tubería de conducción; sin embargo, en la realidad esto no ocurre, porque el agua de lluvia fluye por la calzada y solo un porcentaje del caudal total es atrapado por el sumidero.

Esto significa que, con gran probabilidad, ocurrirán inundaciones con sus peligros e incómodas consecuencias (Rosales et al. 2015); por otra parte, en un determinado intervalo, la tubería de conducción quedará sobredimensionada.

Teniendo en cuenta que Ecuador tampoco escapa del fuerte impacto urbanizador producido en los últimos años sobre las cuencas hidrográficas y la modificación de la respuesta de las mismas bajo un episodio de lluvia, se hace necesario un estudio con rigor científico-técnico sobre el comportamiento de los sumideros, en cuanto a la eficiencia del caudal captado por escorrentía en la vía urbana.

Este trabajo tiene por objetivo estudiar el comportamiento hidráulico en dos tipos de sumideros y, encontrar los coeficientes de descarga. Se considera para estudio el Sumidero Tipo 0,45, un diseño estandarizado por las diferentes instituciones (figura 1). Denominación asignada por la dimensión de la rejilla en el sentido longitudinal de la calle; en este trabajo se le denomina T45.

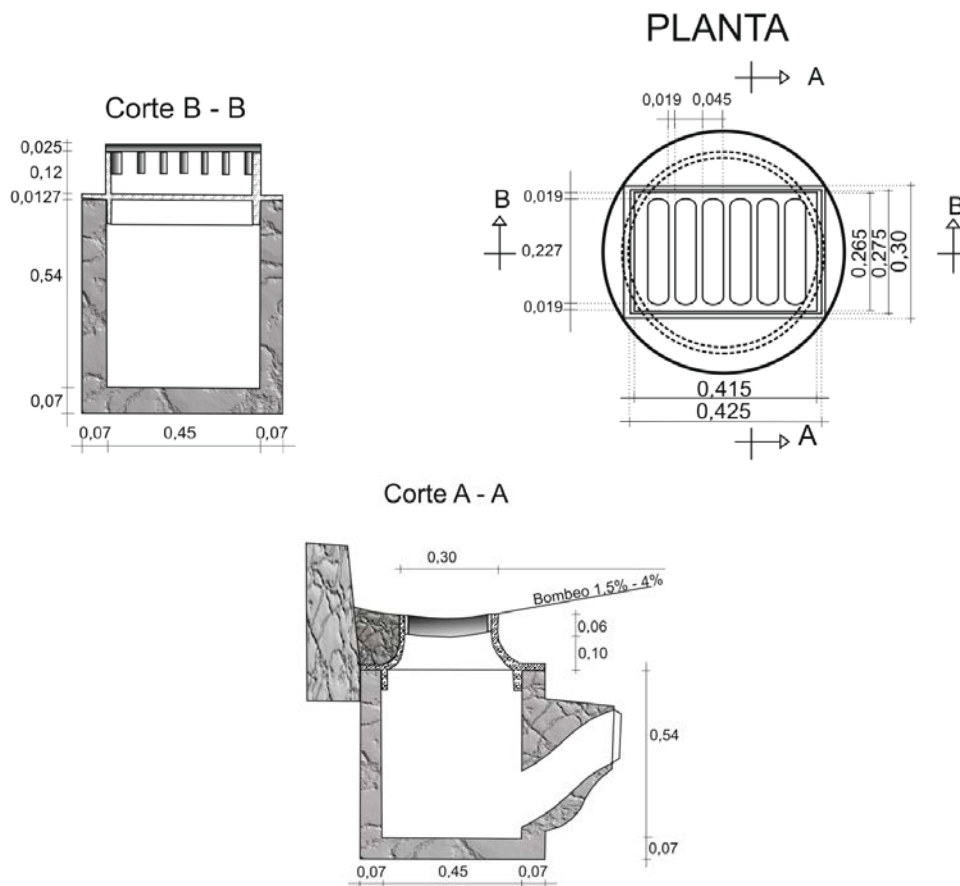


Figura 1. Implantación Sumidero Tipo T45. Corte longitudinal (arriba izquierda), vista superior (arriba derecha), corte trasversal a la calzada

TRABAJO EXPERIMENTAL

Se ha diseñado y construido un canal que modela la media vía, instalado y acoplado al canal hidrodinámico que forma parte del equipamiento del laboratorio. El mismo está construido en madera terciada e impermeabilizado y consta de dos secciones.

La primera es un estabilizador de flujo, al cual ingresa el agua desde al canal hidrodinámico donde es receptada en un depósito rectangular en cuyo fondo existe un deflector cónico que sirve para amortiguar la turbulencia.

Cuando en este depósito sube el nivel, se ahoga el resalto hidráulico y para uniformizar el flujo hacia la salida al modelo de la media vía, se implanta a la salida una pantalla (tipo panel) elaborada con una estructura de malla metálica de 12 cm de espesor, conteniendo en su interior grava de diámetro 2 cm en promedio.

Con esto se consigue uniformizar el flujo y permitir el ingreso del agua a la media vía. La segunda, comprende una sección de experimentación que consta de una media vía, los modelos de sumideros y el vertedero de medida de caudal captado (figura 2).

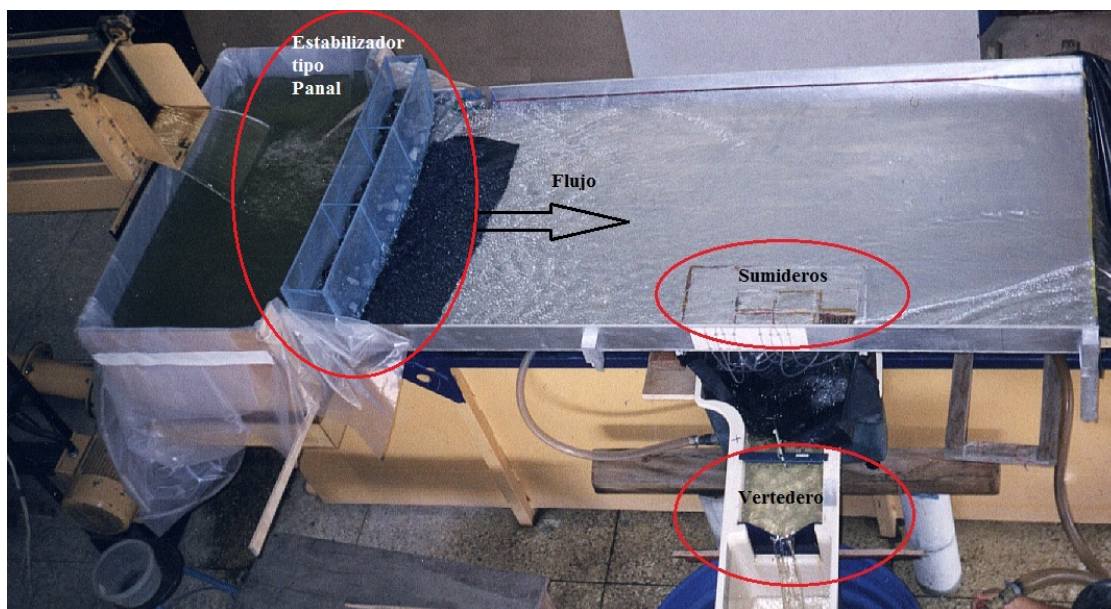


Figura 2. Plataforma experimental de sumideros en media vía.

La estación consiste en un circuito hidráulico de pendientes variables que representa una calle de hormigón a escala 1:4. Se registra el caudal de alimentación y el caudal captado por el sumidero, proveniente de un estabilizador tipo panel

Como alternativa al modelo S1 (figura 3), que consiste en un solo sumidero T45 colocado en el extremo de la calle, se ha diseñado otro modelo para estudiar cómo varía la eficiencia del caudal captado en los diferentes tipos de combinaciones de sumideros, para medir su

comportamiento (figura 4). Estos diseños fueron escogidos para su análisis debido a su frecuente implantación en las calzadas sin un criterio técnico.

Se utilizó, para los experimentos, el laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, de la Universidad Técnica de Ambato, en donde se realizaron todas las mediciones. La plataforma experimental, y todo el diseño, están dimensionados a escala 1:4.

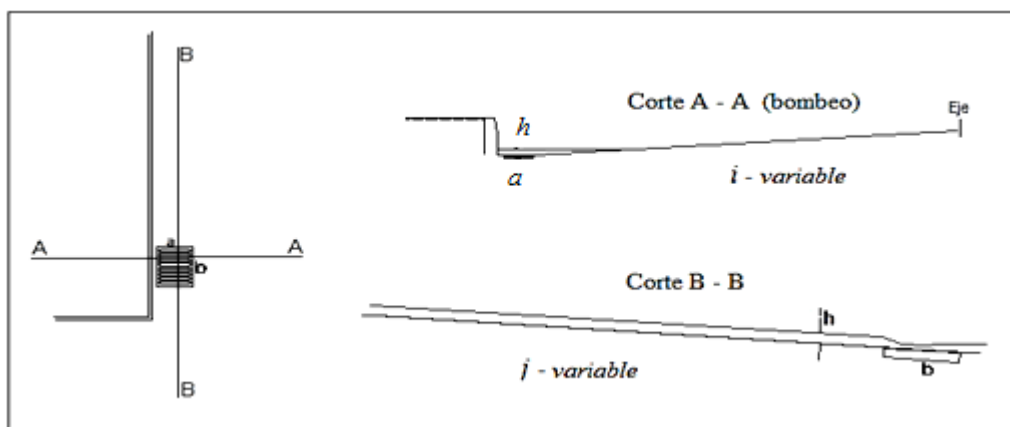


Figura 3. Modelo S1 de sumideros y sus parámetros geométricos:
 a y b son las dimensiones del sumidero, ancho y largo respectivamente,
 las variables i y j son la inclinación transversal y longitudinal
 de la calle en ese orden

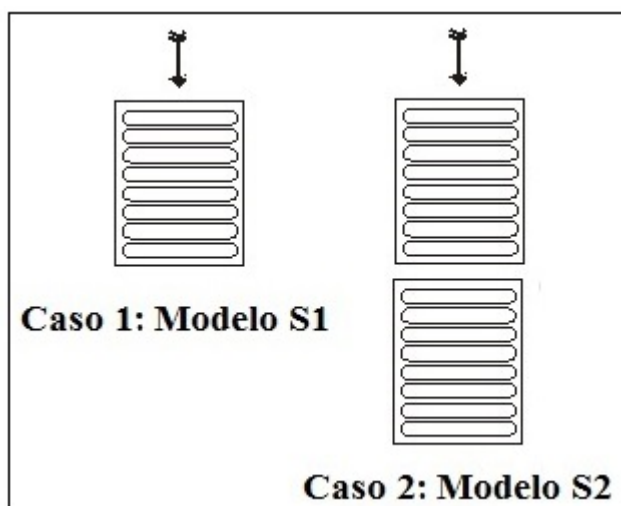


Figura 4. Combinaciones de los sumideros T45 utilizados en el laboratorio:
 Modelos S1 (un solo sumidero) y S2 (dos en serie)

En la tabla 1 se establecen los parámetros físicos y geométricos y sus dimensiones a escala reducida o de laboratorio. Asimismo, en la figura 5A se observa un corte de la vía utilizada en el laboratorio para simular la calle y sus dimensiones en la figura 5B.

Tabla 1. Valores de los parámetros físicos y geométricos de trabajo en el laboratorio a escala reducida

Parámetro	Escala reducida
a (m)	0,066 – 0,091
b (m)	0,104 – 0,129
Media vía (m)	0,95
Caudal Q (L/s)	0 – 7,19
Coefficiente de rugosidad: n	0,013
Pendiente transversal i (%)	2 y 4
Pendiente longitudinal j (%)	0,5, 4, 8, 12
Diseños	S1 y S2

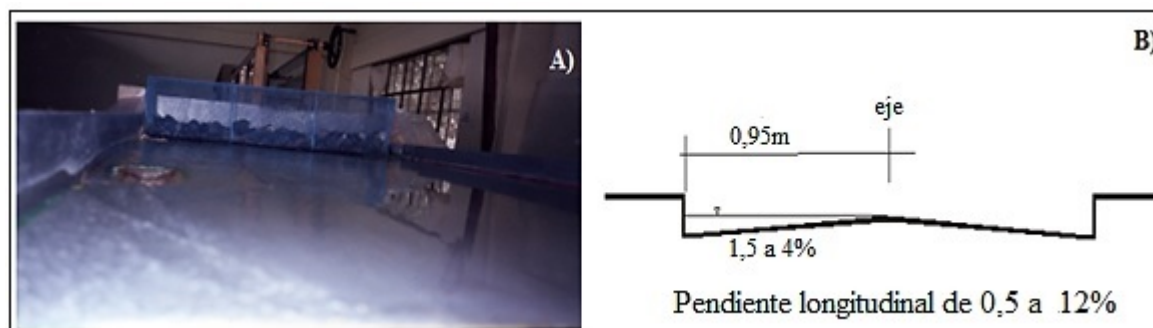


Figura 5. A) Trabajo en laboratorio, B) Esquema de la sección transversal

ASPECTOS TEÓRICOS

Análisis dimensional

El diseño hidráulico en el laboratorio debe ser geométrica y dinámicamente semejante a los valores a escala real o en vía. Para cumplir con estas condiciones de similitud debe verificarse que la razón entre los números de Froude (F_r) en ambas escalas sea uno, ecuación (1).

$$\frac{F_r^{vía}}{F_r^{lab}} = 1 = \frac{v_e}{\sqrt{g_s L_s}} \quad (1)$$

donde: L_e y v_e son la razón, en ambas escalas, entre las longitudes y velocidades, respectivamente.

Siendo el factor de escala $g_e = 1$, la escala de caudal Q_e queda, ecuación (2).

$$Q_e = \frac{Q_{vía}}{Q_{lab}} = L_e^{5/2} \quad (2)$$

Teniendo en cuenta los valores de caudales máximos, tanto en vía como en el laboratorio y, empleando la ecuación (2) se obtiene la escala de trabajo, ecuación (3).

$$\frac{Q_{vía}}{Q_{lab}} = \frac{230}{7,21} = L_e^{5/2} = 31,9 \quad (3)$$

de donde se obtiene el valor de la escala, ecuación (4).

$$L_e = 3,995 \cong 4 \quad (4)$$

Análisis de rugosidad

De acuerdo con (Chow 1994) se establece como coeficiente de rugosidad $n = 0,016$ y de la ecuación (5) de la velocidad de Manning:

$$v = \frac{1}{n} \left(R^{2/3} \right) j^{1/2} \quad (5)$$

donde: R es el radio hidráulico, j es la pendiente longitudinal y n el coeficiente de rugosidad.

Si se despeja n en la ecuación (5) queda la ecuación (6).

$$n = \frac{1}{v} R^{2/3} j^{1/2} \quad (6)$$

Si se establece n_e como la razón entre ambas escalas, utilizando la ecuación (6), se tiene la ecuación (7).

$$n_e = \frac{\frac{1}{v_{vía}} R_{vía}^{2/3} j_{vía}^{1/2}}{\frac{1}{v_{lab}} R_{lab}^{2/3} j_{lab}^{1/2}} \quad (7)$$

Teniendo en cuenta las relaciones expresadas en las ecuaciones (8) y (9).

$$v_e = \frac{v_{vía}}{v_{lab}} = L_e^{1/2}; \quad R_e = \frac{R_{vía}}{R_{lab}} = L_e; \quad j_e = \frac{j_{vía}}{j_{lab}} = 1 \quad (8)$$

$$n_e = \frac{1}{V_e} R_e^{2/3}; \quad n_e = \frac{1}{L_e^{1/2}} L_e^{2/3} \quad (9)$$

Por lo que finalmente se tiene que $n_e = L^{1/6}$ teniendo en cuenta la ecuación (4) y se concluye que $n_e = 1,26$, de donde $n_{lab} = 0,013$ (ver tabla 1).

Eficiencia hidráulica

El caudal captado (Q_c) en el sumidero depende de los elementos adimensionales: i, j y Fr , que corresponden a las pendientes transversal y longitudinal y el número de Froude respectivamente. Q_c tiene relación directa con el caudal de alimentación a través de la ecuación (10).

$$Q_c = Q \cdot f(i, j, Fr) \quad (10)$$

La eficiencia hidráulica del sumidero se define mediante la ecuación (11).

$$E = \frac{Q_c}{Q} = f(i, j, Fr) \quad (11)$$

RESULTADOS

Las figuras 6, 7, 8 y 9 resumen gráficamente los resultados de la eficiencia de captación de cada configuración de sumidero, tanto el S1 como el S2, en función del caudal total, para las diferentes variaciones de pendientes longitudinales y transversales (bombeo).

Se aprecia en todos los casos que la eficiencia hidráulica es inversamente proporcional al caudal, es decir, a medida que el caudal crece es más difícil que el agua se escurra en los sumideros.

De ahí la importancia en obtener valores de i, j y de configuraciones que hagan el sumidero lo más eficiente posible.

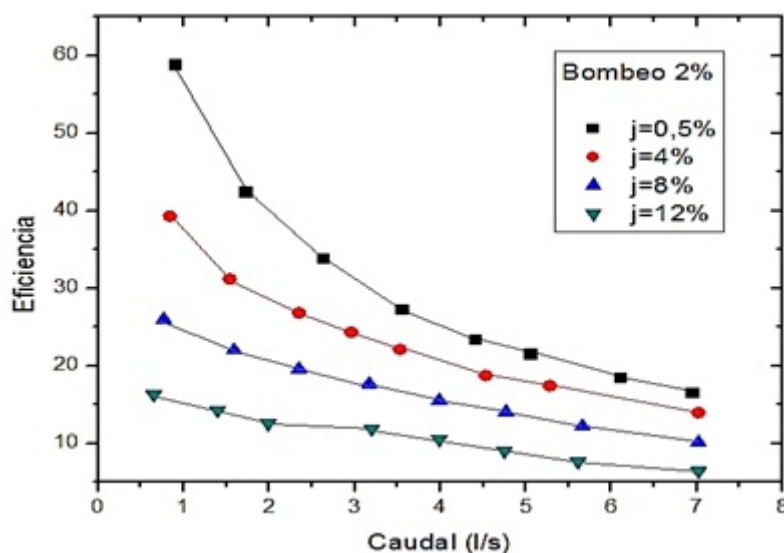


Figura 6. Eficiencia de captación (E) vs. Caudal (Q), en el modelo S1, con bombeo del 2% ($i=2$) y diferentes valores de pendiente longitudinal ($j=0,5, 4, 8, 12\%$).

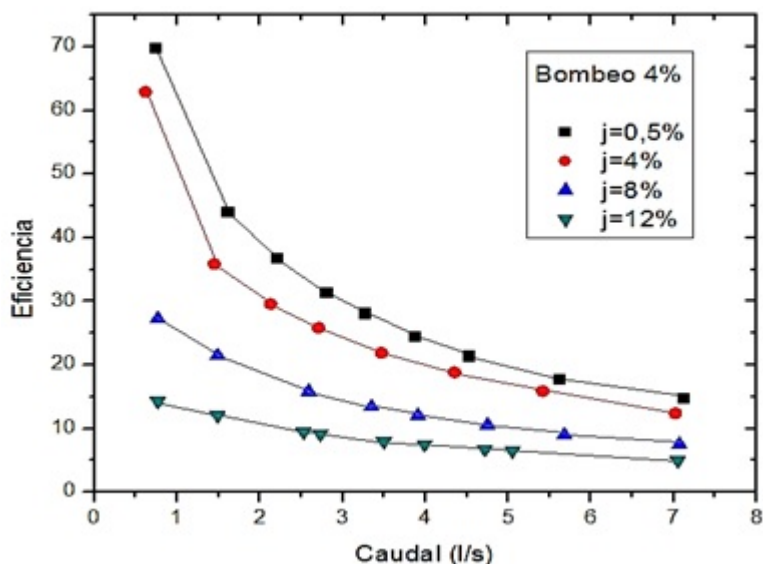


Figura 7. Eficiencia de captación (E) vs. Caudal (Q), en el modelo S1, con bombeo del 4% ($i=4$) y diferentes valores de pendiente longitudinal ($j=0,5, 4, 8, 12\%$).

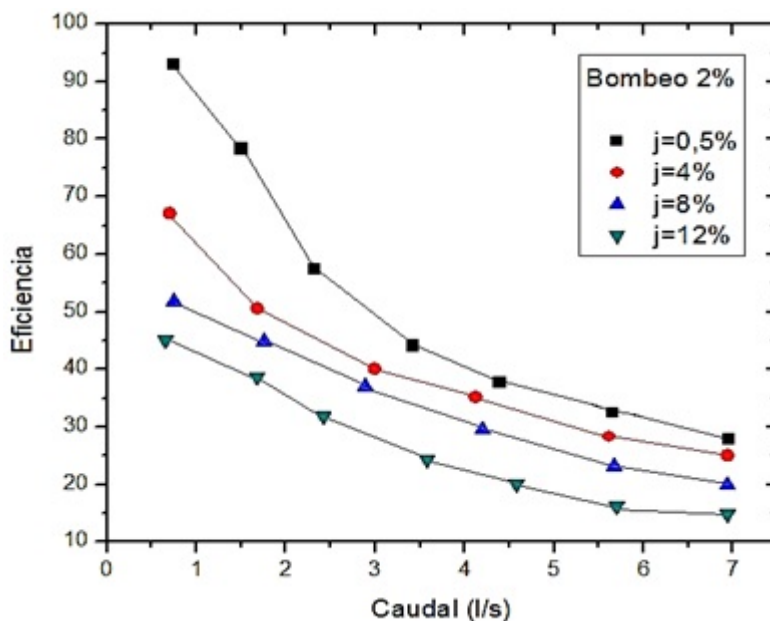


Figura 8. Eficiencia de captación (E) vs. Caudal (Q), en el modelo S2, con bombeo del 2% ($i=2$) y diferentes valores de pendiente longitudinal ($j = 0,5, 4, 8, 12\%$).

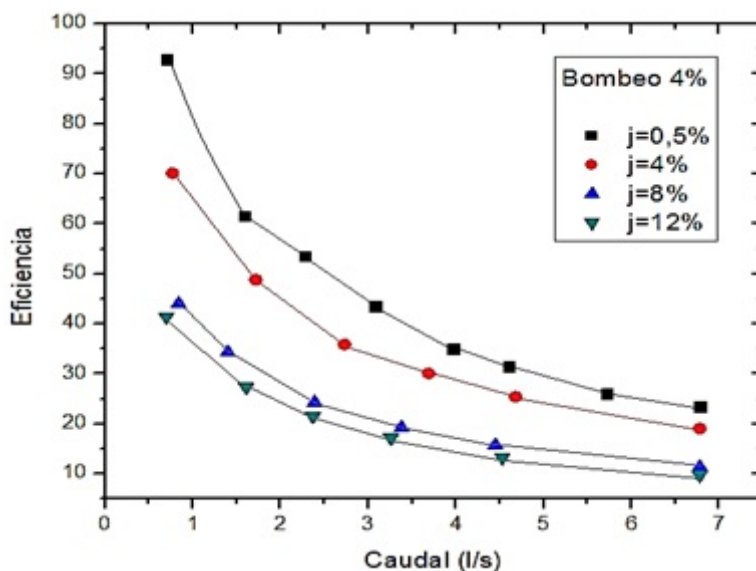


Figura 9. Eficiencia de captación (E) vs. Caudal (Q), en el modelo S2, con bombeo del 4% ($i=4$) y diferentes valores de pendiente longitudinal ($j= 0,5, 4, 8, 12\%$).

Como se aprecia en los cuatro gráficos anteriores, la eficiencia hidráulica en función del caudal (E vs. Q) según los resultados experimentales, tienen un comportamiento que puede ser ajustado a una función potencial decreciente del tipo de la ecuación (12).

$$E(Q) = \beta \cdot Q^{-\alpha} \quad (12)$$

donde:

α y β son parámetros adimensionales de ajuste; $\alpha = \alpha(j)$ depende de la pendiente longitudinal j y toma valores entre $0 < \alpha < 1$. Mientras que $\beta = \beta(i, j)$ depende de ambas pendientes longitudinal y transversal i, j asimismo, toma valores entre $(0 < \beta < 100)$.

Teniendo en cuenta lo anterior y la ecuación (11), se puede reescribir la ecuación (12) de la siguiente manera, ecuación (13).

$$E(i, j, Q) = \beta(i, j) \cdot Q^{-\alpha(i)} \quad (13)$$

donde se nota la dependencia explícita de la eficiencia en función de todas las variables.

La tabla 2 muestra los valores numéricos de los coeficientes de ajuste α y β para el caso S1, los que serán importantes para estimar la eficiencia de un sistema, en diferentes situaciones topográficas.

Tabla 2. Valores numéricos de los parámetros α y β para el sumidero S1 y sus respectivos coeficientes de determinación ajustado R^2_{adj}

	$j=0,5\%$	$j=4\%$	$j=8\%$	$j=12\%$
$i=2\%$	$\alpha=0,68$ $\beta=60,31$ $R^2_{adj}=0,999$	$\alpha=0,65$ $\beta=47,19$ $R^2_{adj}=0,998$	$\alpha=0,58$ $\beta=25,73$ $R^2_{adj}=0,998$	$\alpha=0,47$ $\beta=13,91$ $R^2_{adj}=0,989$
$i=4\%$	$\alpha=0,56$ $\beta=56,30$ $R^2_{adj}=0,997$	$\alpha=0,38$ $\beta=31,55$ $R^2_{adj}=0,998$	$\alpha=0,41$ $\beta=25,44$ $R^2_{adj}=0,999$	$\alpha=0,19$ $\beta=14,42$ $R^2_{adj}=0,998$

La tabla 3 muestra los valores numéricos de los coeficientes de ajuste α y β para el caso S2, los que serán importantes para estimar la eficiencia de un sistema, en diferentes situaciones topográficas.

Tabla 3. Valores numéricos de los parámetros α y β para el sumidero S2 y sus respectivos coeficientes de determinación ajustado R^2_{adj}

	$j=0,5\%$	$j=4\%$	$j=8\%$	$j=12\%$
$i=2\%$	$\alpha=0,55$ $\beta=77,32$ $R^2_{adj}=0,987$	$\alpha=0,60$ $\beta=63,61$ $R^2_{adj}=0,996$	$\alpha=0,65$ $\beta=41,36$ $R^2_{adj}=0,999$	$\alpha=0,64$ $\beta=35,28$ $R^2_{adj}=0,999$
$i=4\%$	$\alpha=0,55$ $\beta=86,94$ $R^2_{adj}=0,998$	$\alpha=0,42$ $\beta=60,69$ $R^2_{adj}=0,989$	$\alpha=0,41$ $\beta=45,25$ $R^2_{adj}=0,998$	$\alpha=0,39$ $\beta=36,12$ $R^2_{adj}=0,999$

En las tablas 2 y 3 se muestran los valores de ajuste de los parámetros α y β , si bien estos valores fueron obtenidos en el laboratorio, si se tiene en cuenta las ecuaciones (2) y (4), los parámetros α y β tienen, igualmente, validez en condiciones de caudales a escala real. Igualmente, se nota que los valores de R^2_{adj} fueron muy cercanos a 1 en todos los casos, indicando de la buena calidad de los ajustes.

Este resultado es especialmente importante puesto que a través de la ecuación (12) directamente se puede predecir la eficiencia hidráulica que tendrá un sumidero determinado en condiciones a escala real.

DISCUSIÓN

Se pudo observar que la eficiencia de captación es inversamente proporcional al caudal y la pendiente longitudinal de la calle; en cambio, ésta aumenta al incrementar la pendiente transversal en concordancia con Cortez y Kaliski (2008).

La pendiente transversal (bombeo) desarrolla un rol importante en la eficiencia de captación del sumidero, solo si la pendiente longitudinal es pequeña, menor que el 4 %.

Por lo tanto, en una vía con pendiente longitudinal grande (típico de la zona andina), la pendiente trasversal no influye significativamente.

Se comprobó que la eficiencia de captación aumenta siempre en el modelo S2 con respecto al modelo S1; es decir, al colocar dos sumideros en serie, se tendrá una mejor eficiencia hidráulica; por lo que, en dependencia de la eficiencia hidráulica que se desee, se podrá implementar un modelo u otro.

Se calcularon los parámetros de ajuste α y β en la ecuación (12), de esta manera se puede predecir cuál será la eficiencia del sistema hidráulico en los casos estudiados.

En el modelo S2 la eficiencia hidráulica es mayor que el modelo S1, pero no necesariamente los valores de eficiencia se duplican.

CONCLUSIONES

- En la ejecución de este trabajo experimental, la eficiencia hidráulica y la influencia de la pendiente longitudinal y transversal de la calzada han sido investigadas.
- A pesar de los resultados positivos, al agregar otro sumidero, desde el punto de vista de la eficiencia hidráulica, tendrá que evaluarse en cada caso particular el impacto de esta intervención en la calle. Especialmente, en el tránsito vehicular que tenga lugar en la vía.
- Se calcularon los coeficientes α y β para varios casos de forma tal que mediante la ecuación (12) se puede predecir la eficiencia hidráulica, a escala real, de la configuración de sumidero seleccionada.

RECOMENDACIONES

- Para conseguir una correcta implantación de los sumideros en la vía se debe analizar el esquema geométrico de cada calle, particularmente su sección transversal, para decidir si se debe construir un sumidero en cada lado o solo en el lado bajo.
- En las intersecciones de calles, en especial, cuando se deba impedir el flujo transversal, pueden crearse pequeñas depresiones para garantizar la completa captación de las aguas. No se debe ubicar sumideros en lugares donde puedan interferir otros servicios públicos como electricidad y telefonía.

REFERENCIAS

- Chow V. T.** (1994). “Hidráulica de canales abiertos”. ISBN 958-600-228-4, McGraw-Hill Interamericana S.A., Santafé de Bogotá, Colombia.
- Conesa C. y García R.** (2010). “Criterios hidromorfológicos para la mejora de la eficiencia de obras de drenaje pequeñas en pasos de carreteras sobre ramblas”, *Revista Papeles de Geografía*, 1(51-52):85-94, ISSN 0213-1781, Universidad de Murcia, Murcia, España.
- Cortez R. y Kaliski E.** (2008). “Estudio Experimental del funcionamiento de sumideros de aguas lluvias. Caso: incorporación de zonas de influencia”. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia.
- Djordjevic S., Saul A. J., Tabor G. R., Blanksby J., Galambos I., Sabtu N. and Sailor G.** (2013). “Experimental and numerical investigation of interactions between above and below ground drainage systems”. *Water Science & Technology*, 67(3): 535–542, ISSN 1996–9732, IWA Publishing, London, UK.
- Gezder V. and Gökdağ M.** (2014). “Surface drainage of urban streets and the example of Erzurum”, *Iğdır Univ. J. Inst. Sci. & Tech*, 4(3):41-51, ISSN 2146-0574, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Ana Bilim Dalı, Ulaştırma, İnşaat, Erzurum, Türkiye.
- Kemper S. and Schlenkhoff A.** (2015). “Determination of the hydraulic efficiency of intake structures like grate inlets and screens in supercritical flow”. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, 28 June – 3 July, The Hague, Netherlands.
- Martins R., Leandro J. and Fernandes R.** (2014). “Characterization of the hydraulic performance of a gully under drainage conditions”. *Water Science & Technology*, 69(12):2423-2430, ISSN 1996–9732, IWA Publishing, London, UK.
- Rincón J. C. y Muñoz F.** (2013). “Diseño hidráulico de sistemas de drenaje dual a través del modelo SWMM”, *Ing. Hidráulica y Ambiental*, 34(2):103-117, ISSN 1815–591X, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana.
- Rosales M. S., Salas, J. A. y Rodríguez, A.** (2015). “Manejo del drenaje pluvial mediante control de la fuente de escurrimientos superficiales”. *Revista Cultura Científica y Tecnológica* 56(12):5-14, ISSN 2007-0411, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México.
- Sánchez L. A. y Martínez Y.** (2014). “Propuesta de un nuevo enfoque para evaluar la peligrosidad por inundaciones pluviales”. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(6):53-67, ISSN 2007-2422, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México.