

# **XIX SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA**

## **COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE CÁMARAS (POZOS) DE CONEXIÓN DE GRANDES COLECTORES**

*Eccehomo Quejada<sup>1</sup>, Mario Moreno<sup>1</sup> y Juan Saldarriaga<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Investigadores, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA–, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia; emails: [e.quejada86@uniandes.edu.co](mailto:e.quejada86@uniandes.edu.co), [mario-mo@uniandes.edu.co](mailto:mario-mo@uniandes.edu.co)*

<sup>2</sup>*Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental - Director, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA–, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia; email: [jsaldarr@uniandes.edu.co](mailto:jsaldarr@uniandes.edu.co)*

### **RESUMEN:**

Este trabajo presenta el comportamiento hidráulico del flujo en cámaras de confluencia de colectores de gran diámetro en sistemas de alcantarillado, resultante, del modelado físico de este tipo de estructuras bajo condiciones de laboratorio. Se analizaron diferentes configuraciones de fondo para la cámara de conexión y múltiples escenarios de flujo, identificándose los diferentes fenómenos hidráulicos a que se pueden ver sometidas este tipo de estructuras, los cuales, pueden ser indeseables para su estabilidad, durabilidad y desempeño. Se encontraron también importantes errores en el cálculo de las pérdidas de energía en la cámara a través del empleo de metodologías convencionales.

### **PALABRAS CLAVES:**

Sistemas de alcantarillado, Cámaras de conexión, Interceptores.

### **ABSTRACT:**

The following paper presents the behavioral patterns of the hydraulic flow in large-diameter Junction Chambers in urban sewer systems, that appears as a result of the physical modeling of this type of structures under lab conditions. Different floor configurations for the connection chambers were analyzed as well as multiple flow scenarios. In this way, it is possible to identify the different hydraulic phenomena to which these structures might be subject to, and which may jeopardize stability, durability and performance. This analysis may be used to update head-loss calculation techniques, by studying identified inaccuracies in the current conventional method.

### **KEYWORDS:**

Sewerage systems, Junction chambers, Interceptor sewers.

## INTRODUCCIÓN

El estudio hidráulico de estructuras para la conexión de colectores de gran diámetro e interceptores de sistemas de alcantarillado, se ha venido intensificando en las últimas décadas con el fin de mejorar su desempeño hidráulico por el hecho de recibir grandes caudales (para el caso de estudio  $32 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

La geometría más comúnmente usada para las estructuras de conexión de colectores de gran diámetro son las cámaras cilíndricas; denominadas cámaras (o pozos) de unión, conexión o confluencia de flujos. La topología de la red de alcantarillado y las exigencias actuales en cuanto a localización óptima de plantas de tratamiento de aguas residuales, en general, obliga a que los conductos que se conectan a una cámara de unión tengan diversos ángulos entre ellos, para las diferentes cámaras de un sistema. También estos conductos llegan con diferentes alturas con respecto al fondo de la cámara y además el fondo de dicha estructura cuenta con diferentes posibilidades de configuración para la conducción del flujo que entra a la cámara hasta el ducto de salida. Estos elementos hacen que la predicción del comportamiento hidráulico del flujo en la estructura de conexión sea complejo, generándose incertidumbre en cuanto al correcto desempeño de la misma.

Adicionalmente, un claro establecimiento de los posibles controles hidráulicos del flujo en la estructura, conjuntamente con una buena estimación de la pérdida de energía en esta, es una tarea esencial para el buen funcionamiento de la cámara desde un punto de vista hidráulico.

Las pérdidas de energía en las cámaras de unión pueden ser la causa de malos desempeños de estas estructuras. En muchos sistemas de alcantarillado sobrecargados (es muy probable que) las pérdidas menores causadas por empalmes, conexiones de entrada, conexiones domiciliarias y otros aditamentos excedan las pérdidas por fricción y reduzcan significativamente la capacidad del sistema (Marsalek, 1984).

Bo Pedersen & Mark, 1990, reconocen la falta de conocimiento para el cálculo de las pérdidas de energía en las cámaras, en donde el principal problema es que el área de flujo efectiva en esta es desconocida.

Algunos estudios sobre el comportamiento del flujo considerando caídas han sido llevados a cabo por (Rajaratnam & Chamani, 1995), (Chanson, 1996), (Chamani & Beirami, 2002), (Pagliara & Dazzini, 2002), (Chamani, Rajaratnam, & Beirami, 2008), los cuales estrictamente no abarcan la complejidad del flujo en una cámara, incluyendo las posibles alternativas geométricas del fondo. Varios de estos estudios se desarrollaron con canales experimentales de sección rectangular. Una lista amplia de referencias y bibliografía sobre el flujo en cámaras, incluyendo pérdidas de energía, puede encontrarse en O'Loughlin & Stack, 2002.

El objetivo del trabajo era el de determinar las características del flujo e identificar los diferentes fenómenos hidráulicos que se pueden presentar en las estructuras de conexión de grandes interceptores, para diferentes configuraciones del fondo de la misma y teniendo en cuenta la transitoriedad de los flujos de acceso. Además, también se tenía como objetivo secundario el analizar las pérdidas de energía que se producen en estas estructuras.

El trabajo desarrollado estuvo motivado por la necesidad de entender el comportamiento hidráulico de las estructuras (cámaras) de unión de los nuevos grandes interceptores de Bogotá. En esta investigación se modeló la estructura de conexión de los interceptores Fucha-Tunjuelo (IFT), Tunjuelo bajo (ITB), con el interceptor de salida, denominado interceptor Tunjuelo-Canoas (ITC). Los interceptores IFT e

ITB deben desviar las aguas residuales de las cuencas del río Fucha y río Tunjuelo (dos de las cuencas urbanas más importantes de la ciudad de Bogotá), antes de su vertimiento al río Bogotá. El ITC conduce esta agua hasta la futura planta de tratamiento de aguas residuales de Canoas, localizada al sur occidente de Bogotá, fuera de la ciudad.

## METODOLOGÍA

El sistema de interceptores y estructura de conexión modelado consiste de dos túneles o interceptores de gran diámetro (IFT e ITB) llegando a la estructura de conexión y confluyendo a  $45^\circ$ , la estructura de conexión y un interceptor de salida (ITC) con destino a la futura planta de tratamiento de aguas residuales de Canoas en Soacha, municipio al sur de Bogotá, como se muestra en la Figura 1 y la Figura 2.

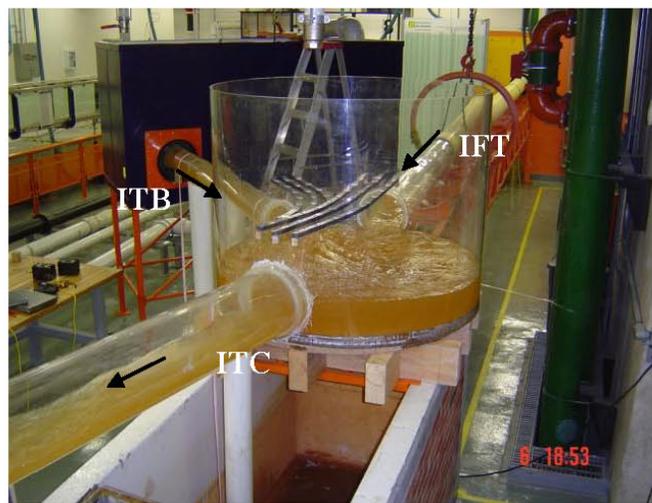


Figura 1.- Modelo Físico de la Estructura de Conexión e Interceptores.

Se construyó entonces un modelo físico en acrílico a escala 1:16 del sistema descrito. La razón de fabricar el modelo en acrílico es que a través de este material se pueden visualizar los fenómenos hidráulicos. Además, la rugosidad del acrílico para modelos a escala alrededor de 1:10 a 1:20, en general representa bien la rugosidad de prototipos a construirse en concreto. De todas formas el caso de estudio implica un análisis localizado; por ende en la estructura de conexión son más importantes los efectos gravitacionales y de presión y no los de fricción.

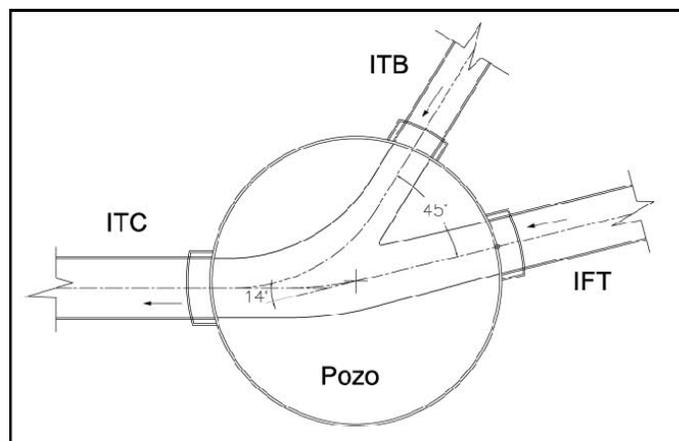


Figura 1.- Esquema del Modelo Físico Visto en Planta.

El modelo se construyó con base en el criterio de similitud de Froude con las escalas de las variables hidráulicas mostradas en la Tabla 1, con lo cual, las dimensiones finales de los interceptores y cámara de confluencia tanto para el modelo físico, como para el futuro prototipo son las mostradas en la Tabla 2.

**Tabla 1.- Escalas de Similaridad Bajo el Criterio de Similitud de Froude.**

Variable	Relación	Escala
Longitud ( $E_L$ )	$E_L$	16
Área ( $E_L^2$ )	$E_L^2$	256
Volumen ( $E_L^3$ )	$E_L^3$	4096
Tiempo ( $E_t$ )	$\sqrt{E_L/E_g}$	4
Velocidad ( $E_v$ )	$\sqrt{E_L E_g}$	4
Caudal ( $E_Q$ )	$\sqrt{E_L^5 E_g}$	1024
Fuerza ( $E_F$ )	$E_L^3 E_g$	4096
Presión ( $E_P$ )	$E_L E_g$	16
Pendiente ( $E_s$ )	1	1

**Tabla 2.- Dimensiones del Modelo y Prototipo.**

Variable		Modelo	Prototipo
IFT	Diámetro	0,234 m	3,75 m
	Pendiente	0,05 %	0,05 %
	Longitud	9,7 m	155,0 m *
	Caída de fondo	0,084 m	1,35 m
	Caudal de diseño	20,34 L/s	20,829 m³/s
ITB	Diámetro	0,172 m	2,75 m
	Pendiente	0,125 %	0,125 %
	Longitud	2,5 m	40,0 m *
	Caída de fondo	0,089 m	1,43 m
	Caudal de diseño	12,43 L/s	12,726 m³/s
ITC (Salida)	Diámetro	0,263 m	4,20 m
	Pendiente	0,112 %	0,112 %
	Longitud	2,70 m	43,2 m *
	Caída de fondo	0,0 m	0,0 m
	Caudal de diseño	31,68 L/s	32,442 m
Cámara (Pozo)	Diámetro	1,25 m	20,0 m
	Altura	1,20 m	19,2 m

\* Las longitudes de los interceptores mostradas en la Tabla 2 para el prototipo son las correspondientes al modelo físico construido; en realidad estas son del orden de decenas de kilómetros.

El análisis hidráulico de este sistema incluyó el estudio de cuatro configuraciones diferentes del fondo de la estructura de conexión, así:

- 1- Configuración de fondo plano
- 2- Cañuela de banca completa (original del prototipo) \*\*\*

3- Cañuela de media banca

4- Modificación de la configuración 2 (mejora en la curvatura de confluencia en la cañuela).

\*\*\* Cañuela es el término usualmente empleado en Colombia para referirse a la geometría en forma de U dada al fondo de la estructura que conecta las tuberías con el fin de reducir perturbaciones al flujo en dicha estructura.

Con base en los caudales de diseño de los interceptores, presentados en la Tabla 2 tanto para el prototipo como para el modelo, se establecieron diversos escenarios de flujo combinando entre los interceptores que llegan a la estructura de conexión: caudal máximo (caudal de diseño), caudal medio (la mitad del caudal de diseño en cada interceptor) y caudal mínimo (caudal mínimo de operación), como se muestra en la Tabla 3, la cual presenta los escenarios analizados para las configuraciones de fondo 1 y 2.

**Tabla 3.- Escenarios de Caudal para las Configuraciones 1 y 2.**

Configuración 1			Configuración 2		
Escenario	Interceptor 1	Interceptor 2	Escenario	Interceptor 1	Interceptor 2
1	$Q_{MED}$	$Q_{MED}$	15	$Q_{MAX}$	$Q_{MAX}$
2	$Q_{MAX}$	$Q_{MAX}$	16	$Q_{MAX}$	-
3	$Q_{MAX}$	-	17	-	$Q_{MAX}$
4	-	$Q_{MAX}$	18	$Q_{MED}$	$Q_{MED}$
5	$Q_{MED}$	-	19	$Q_{MAX}$	$Q_{MED}$
6	-	$Q_{MED}$	20	$Q_{MED}$	$Q_{MAX}$
7	$Q_{MAX}$	$Q_{MED}$	21	$Q_{MED}$	-
8	$Q_{MED}$	$Q_{MAX}$	22	-	$Q_{MED}$
9	$Q_{MIN}$	$Q_{MIN}$	23	$Q_{MIN}$	$Q_{MIN}$
10	$Q_{MED}$	$Q_{MIN}$	24	$Q_{MED}$	$Q_{MIN}$
11	$Q_{MIN}$	$Q_{MED}$	25	$Q_{MIN}$	$Q_{MED}$
12	-	$Q_{PRES}$	26	$Q_{MIN}$	$Q_{MAX}$
13	$Q_{PRES}$	-	27	$Q_{MAX}$	$Q_{MIN}$

Para la medición de los caudales en los interceptores se empleó un caudalímetro ultrasónico no invasivo serie UF 801-P ubicado previo al tanque de suministro al interceptor IFT y un vertedero triangular de pared delgada de  $60^\circ$  en el tanque que alimenta el ITB. Las mediciones de nivel de agua en los colectores y en la estructura de conexión fueron registradas mediante un sensor de nivel ultrasónico UB400-12GM-I-V1. En la Figura 3 se muestran estos dispositivos. También, se le adicionó al flujo colorante mineral para observar las trayectorias del flujo en la cámara de conexión e identificar la presencia de zonas muertas o de estanqueidad. Aguas abajo del interceptor de salida (ITC) se impuso un control hidráulico para alcanzar la profundidad normal en este interceptor, calculada mediante el uso del programa EPA SWMM para los escenarios probados.

En la ejecución de cada prueba, en primer lugar se fijaban los caudales de los interceptores de llegada a la cámara para el escenario analizado; luego se establecía la profundidad normal aguas abajo del interceptor de salida mediante la estructura de control; seguidamente se registraba el nivel de flujo a lo largo de cada una de las tuberías y en diferentes puntos de la estructura de conexión. Eventualmente también se adicionaba el colorante mineral en algunos escenarios.

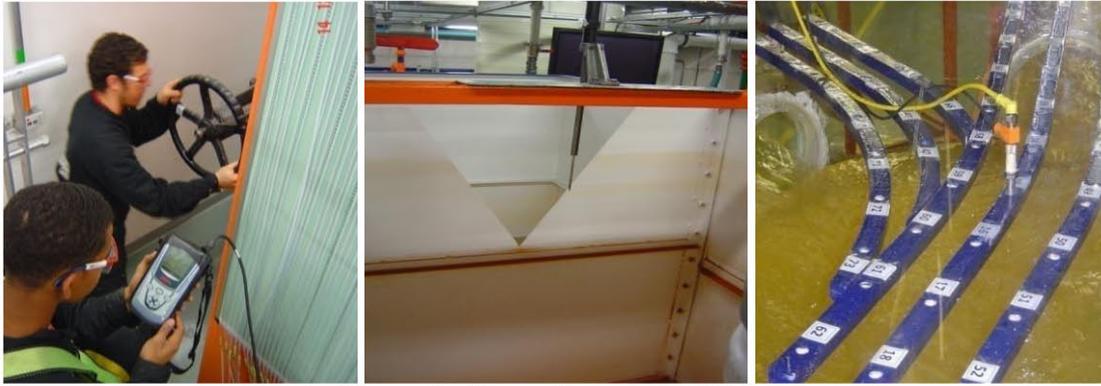


Figura 3.- Dispositivos de medición.

### ***Perdidas de energía***

El cálculo de la pérdida de energía en la estructura de conexión se llevó a cabo en forma analítica y experimental. El proceso analítico resulta del producto del coeficiente de pérdidas y la correspondiente altura de velocidad, como se muestra en la Ecuación 1.

$$H_m = K \left( \frac{V^2}{2g} \right) \quad [1]$$

donde  $H_m$  = Pérdida de altura en la cámara;  $K$  = Coeficiente de pérdidas menores;  $V$  = Velocidad de flujo en el conducto correspondiente;  $g$  = Aceleración gravitacional.

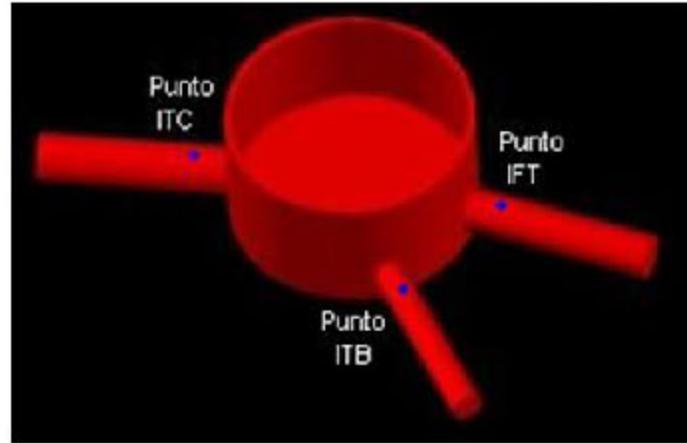
En la estimación de las pérdidas se tuvieron en cuenta diferentes metodologías, tales como: método genérico, método AASHTO, método estándar y método HEC-22. Estos métodos han sido los más utilizados en el cálculo de las pérdidas de energía en las cámaras de los sistemas de alcantarillado, sin embargo, implícitamente todos contienen algún grado de empirismo o de subjetividad en la obtención del coeficiente de pérdidas menores. En la Tabla 4 se da alguna idea de esto, ordenados según se ha considerado de menor a mejores resultados.

Tabla 4.- Métodos Tradicionales para el Cálculo de Pérdidas en Cámaras.

Metodología	Características
Método Absoluto	Es totalmente subjetivo, implica un valor de pérdida constante.
Método Estándar	$K$ depende básicamente de las condiciones geométricas; su valor está preestablecido según el fondo de la cámara y el número y orientación de los ductos que llegan a esta.
Método Genérico	Similar al método estándar, con la diferencia de tener en cuenta la Hidráulica tanto del ducto de salida como del de entrada.
Método AASHTO	Permite más de dos conductos de entrada y también tiene en cuenta la hidráulica en ambos conductos, los coeficientes de pérdidas están definidos y no son asignados como en el caso del método Genérico.
Método HEC-22	Es un método más completo. Involucra un buen número de variables; por ejemplo considera la existencia de caídas de flujo.

Otro método más reciente para la estimación de las pérdidas de energía en cámaras, el cual es válido desde la condición de flujo a superficie libre hasta condiciones de presurización, es el método de pérdida de potencia o energía. Este método es más complicado que los anteriores y demanda un proceso iterativo complejo.

La pérdida de energía experimental en la estructura de conexión se calculó como la diferencia de energía entre la tubería de entrada hidráulicamente dominante y la energía de la tubería de salida (ITC). En el cálculo de la pérdida de energía experimental y teórica se utilizó el esquema mostrado en la Figura 4, en el cual se indican los tres puntos de medición tenidos en cuenta para evaluar la energía.



**Figura 4.-** Esquema para la Estimación de la Energía en los Interceptores.

La energía en cada tubería se evaluó con base en la ecuación de Bernoulli, Ecuación 2, tomando como plano de referencia la cota mínima del tubo ITC en el punto correspondiente.

$$H = Z + h + \frac{V^2}{2g} \quad [2]$$

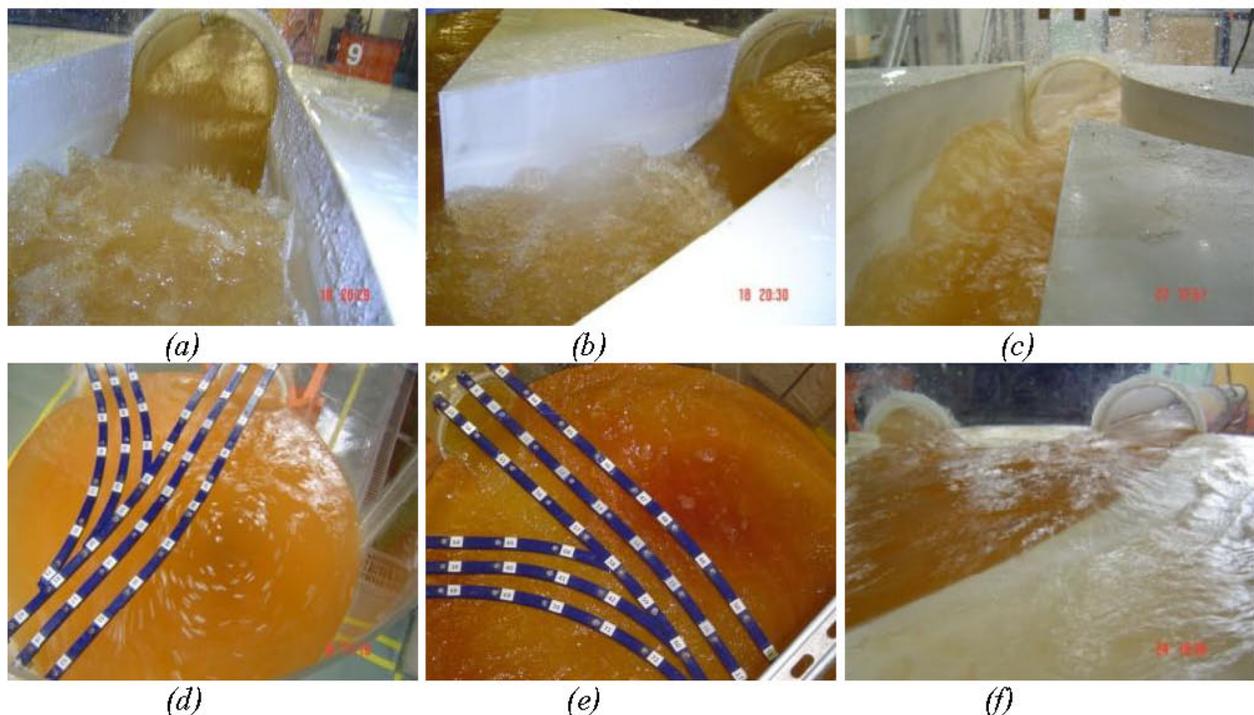
donde H = Energía total en el sitio de interés; Z = Elevación con respecto al Datum; h = Profundidad del flujo.

## RESULTADOS

En el modelo físico se evidenció la ocurrencia de diferentes fenómenos hidráulicos, localizados principalmente en la estructura de conexión, con base en la configuración de fondo instalada y en la magnitud y combinación de los caudales de confluencia. Estos fenómenos suelen tener efectos indeseables tanto para las estructuras como para el sistema de drenaje en general.

Los fenómenos encontrados incluyen: 1) Resaltos hidráulicos tanto en la estructura de confluencia, como en el interior de colectores, 2) Ondas de choque en la estructura de conexión, 3) Flujo tipo vórtice al interior de la estructura de conexión, 4) Zonas muertas o de estanqueidad en la estructura de conexión, 5) Desbordamiento del flujo en cañuelas de la estructura de conexión, 6) Sumergimiento o remanso del flujo de entrada a la cámara. En la Figura se muestran los fenómenos encontrados.

En la configuración de fondo plano (sin cañuela) se presentaron zonas muertas o de estanqueidad, zonas donde había flujo de tipo vórtice y para algunas combinaciones de caudal en los colectores de entrada se presentó un efecto de remanso.

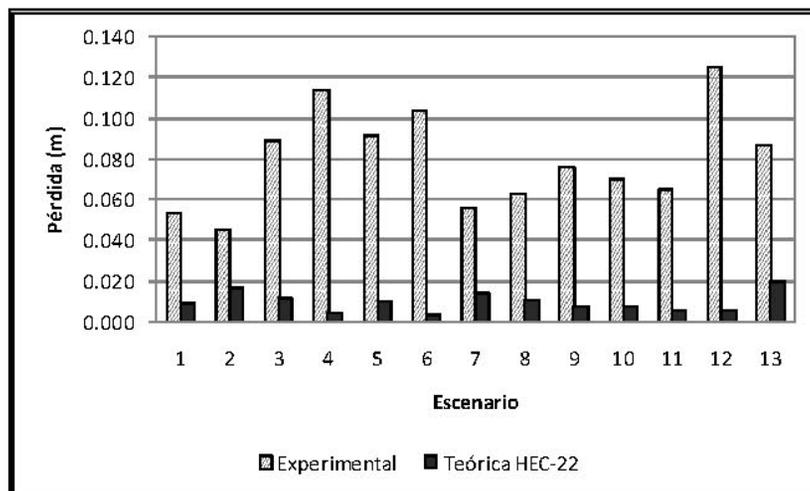


**Figura 5.-** Fenómenos hidráulicos: (a) y (b) Resaltos hidráulicos, (c) Onda de Choque, (d) Flujo tipo vórtice, (e) Zonas de estanqueidad, (f) Desbordamiento del flujo y remanso del flujo de entrada.

En la configuración de cañuela de banca completa (original del prototipo) y la configuración 4 (modificación de la cañuela) ocurrieron resaltos hidráulicos y ondas de choque en la estructura de conexión, además, se presentó efecto de remanso en algunos escenarios.

Para la configuración de cañuela a media banca se encontraron los mismos fenómenos que en las configuraciones 2 y 4, además de presentarse desbordamiento del flujo desde la cañuela.

En la Figura 6 y en la Figura 7 se muestran los resultados de las pérdidas de energía experimentales y las pérdidas de energía teóricas (método del HEC-22) para la configuración 1 y la configuración 2 (los escenarios son los presentados en la Tabla 3). Se observa que hay una gran variación entre las pérdidas medidas en el modelo físico y las de la metodología del HEC-22.



**Figura 6.-** Pérdidas de Energía en el Modelo de la Estructura de Confluencia. Configuración 1.

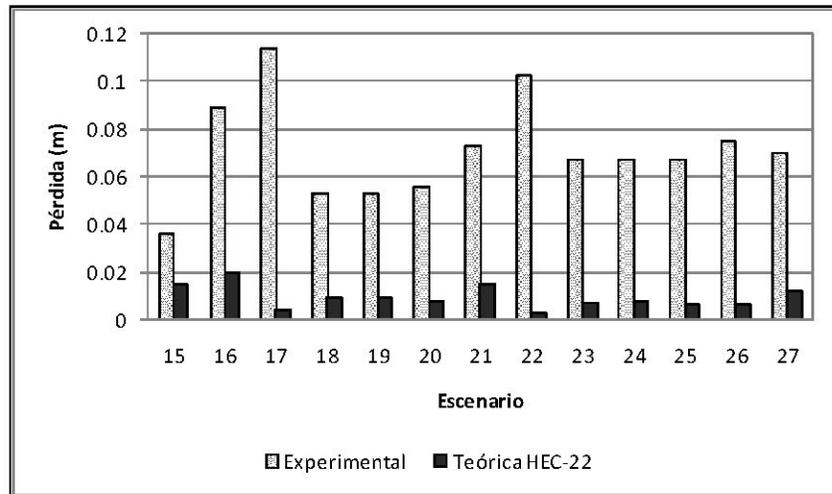


Figura 7.- Pérdidas de Energía en el Modelo de la Estructura de Confluencia. Configuración 2.

En general, para los diferentes escenarios se encontró que el interceptor IFT dominó la hidráulica de la estructura de conexión debido al mayor momentum, influenciando el sumergimiento del flujo de llegada del interceptor dos en algunos escenarios. Resulta bastante interesante que cuando el conducto se hace claramente dominante, empleando el criterio del mayor momentum, la correlación entre el flujo relativo y las pérdidas de energía en la estructura de conexión se incrementa notablemente, como se muestra en la Figura 8.

La presencia de caídas de flujo en los interceptores de llegada con respecto al fondo de la cámara, en algunos escenarios actúa como un control hidráulico, generando el cambio de régimen subcrítico a régimen supercrítico. Para otros escenarios la hidráulica en la estructura de unión es gobernada por la profundidad normal en el interceptor de salida, induciendo que para los interceptores de llegada exista un flujo de entrada sumergida a la cámara, sin llegar a la presurización.

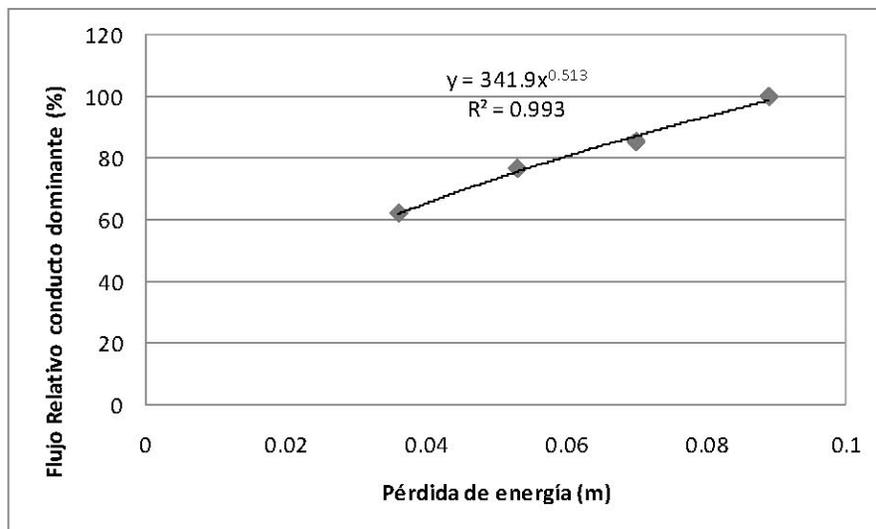


Figura 8.- Relación entre Pérdidas de Energía en el modelo y Flujo Relativo del Conducto Dominante.

## DISCUSIÓN

En la configuración 1, el no tener cañuela hace que la profundidad del agua ascienda de manera casi uniforme en toda la superficie del pozo, actuando como una piscina o fuente de disipación de energía; esto evita la formación de resaltos hidráulicos y de ondas de choque en la estructura de confluencia y además, lo que podría considerarse una clara ventaja, es que se encuentra una continuidad del flujo en condiciones subcríticas en cualquier escenario. Sin embargo, las zonas de estanqueidad y flujo tipo vórtice favorece la acumulación de sedimentos y otros contaminantes, lo cual podría implicar mayores costos de mantenimiento y tratamiento de las aguas residuales.

Las otras configuraciones (con cañuela) contribuyen a la autolimpieza de los contaminantes y sedimentos en la estructura de conexión; sin embargo, debe tenerse en cuenta el potencial de daño para la estructura y el aumento de la abrasión que implicaría la presencia de resaltos hidráulicos y de las ondas de choque, teniendo en cuenta además la gran diversidad de objetos que pueden estar mezclados en el agua drenada. También, la propagación de ondas aguas abajo puede ser perjudicial para el sistema y sus estructuras y dependiendo de las características del agua estos fenómenos aumentarían la liberación de malos olores y gases corrosivos.

Los transientes del flujo definen la localización de controles hidráulicos y por ende el comportamiento hidráulico de la estructura de confluencia. Estos controles son responsables de la ocurrencia de alguno o varios de los fenómenos discutidos, para una configuración de fondo dada.

En todos los casos probados las pérdidas de energía teóricas subestiman las pérdidas de energía calculadas experimentalmente. La metodología del HEC-22 fue la que arrojó mejores resultados, manteniendo también diferencias considerables como se mostró en la Figura 6 y en la Figura 7; se alcanzaron errores en la pérdida de hasta 0.12 m y mínimo de 0.02 m en el modelo físico, que en la escala del prototipo serían de 1.92 m y 0.32 m respectivamente.

## CONCLUSIONES

El comportamiento hidráulico de estructuras de conexión es función de la variabilidad y combinación de los caudales de confluencia, de las condiciones topológicas de las tuberías de llegada y de la configuración del fondo de la estructura; además, debe considerarse la posible influencia de las condiciones hidráulicas aguas abajo de la estructura.

El coeficiente de pérdidas de energía en la cámara no es constante; similarmente depende de las características de los flujos de aproximación y condiciones geométricas del pozo. Se debe tener especial cuidado en su cálculo, como se mostró; aunque se tuvieran condiciones de flujo permanente la pérdida de energía no pudo determinarse adecuadamente con metodologías convencionales, en este caso con tendencia a la subestimación.

Cuando se tiene valores altos del momentum, con valores de flujo relativos altos en el conducto hidráulicamente dominante, la relación entre las pérdidas de energía y el flujo relativo en el conducto dominante se hace mayor, existiendo una alta correlación entre estos parámetros.

Cuando existan caídas en las cámaras, implicando cambio de régimen y formación de ondas de choque y resaltos hidráulicos, incluso localizados dentro del interceptor de salida, sería preferible la opción de fondo plano si el efecto de estos resaltos no es evaluado para grandes interceptores ( $> 610$  mm), como lo recomienda por ejemplo ASCE, 2007.

Estos resultados pueden ser extendidos o aplicados al caso de cámaras de inspección de tamaños convencionales, pues, la escala seleccionada para el modelo físico, hace que este se ajuste perfectamente a las dimensiones de cámaras y colectores comúnmente encontrados en sistemas de alcantarillado reales.

Los resultados obtenidos muestran la necesidad de implementación de modelos físicos para una mejor comprensión de la hidráulica del flujo en estructuras o cámaras de confluencia de flujo, lo cual, en muchas ocasiones no puede representarse adecuadamente mediante modelos matemáticos, principalmente en estructuras que implican grandes inversiones de capital.

El planteamiento de una ecuación genérica para el cálculo de las pérdidas de energía debe considerar la no permanencia del flujo y por lo tanto la variabilidad en la localización de controles hidráulicos, ya que no necesariamente el caudal de diseño produce la condición hidráulica más desfavorable en la cámara.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Consorcio ITB por financiar esta investigación, en especial a los ingenieros Miguel Ignacio Forero y Santiago Villanueva. Igualmente se agradece a la Empresa de Acueductos y Alcantarillados de Bogotá, promotora del Proyecto y al Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes – CIACUA por su colaboración.

### REFERENCIAS

- ASCE.** (2007). “*Gravity Sanitary Sewer – Design and Construction*” (Second edition ed.). (P. Bizier, Ed.) United States: ASCE Manuals and Reports on engineering Practice No. 60. WEF Manual of Practice No. FD-5.
- Bo Pedersen, F., & Mark, O.** (1990). Head Losses in Storm Sewer Manholes: Submerged Jet Theory. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 11* , 1317-1328.
- Chamani, M. R., & Beirami, M. K.** (2002). Flow Characteristics at Drops. *Journal of Hydraulic Engineering* , 788-791.
- Chamani, M. R., Rajaratnam, N., & Beirami, M. K.** (2008). Turbulent Jet Energy Dissipation at Vertical Drops. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* , 1532-1535.
- Chanson, H.** (1996). Energy Loss at Drops - Discussion. *Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 34, No. 2* , 273-278.
- Marsalek, J.** (1984). Head Losses at Sewer Junction Manholes. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol 110, No. 8* , 1150-1154.
- O'Loughlin, G., & Stack, B.** (2002). Algorithms for Pit Pressure Changes and Head Losses in Stormwater Drainage Systems. *Global Solutions for Urban Drainage*. Portland, Oregon.
- Pagliara, S., & Dazzini, D.** (2002). Energy Dissipation on Stepped Fall Manholes. *Global Solutions for Urban Drainage*. Portland, Oregon.
- Rajaratnam, N., & Chamani, M.** (1995). Energy loss at drops. *Journal of Hydraulic Research, Vol. 33, No. 3* , 373-384.