

**HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISIS Y
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE ALIVIADEROS DE
ALCANTARILLADOS COMBINADOS (CASO ESTUDIO, BOGOTÁ)**

SERGIO ALONSO FONSECA PÉREZ



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.**

2008

**HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISIS Y
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE ALIVIADEROS DE
ALCANTARILLADOS COMBINADOS (CASO ESTUDIO, BOGOTÁ)**

SERGIO ALONSO FONSECA PÉREZ

Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil

Asesor

MARIO DÍAZ-GRANADOS



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2008**

**Con mucho amor a mis padres,
hermanos y a Sandy.**

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el apoyo de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá E.S.P. De igual forma agradece el apoyo brindado por: Sandy Romero, Jorge Valero, Carlos Rueda, Luís A. Camacho y el Ingeniero Mario Díaz-Granados por su asesoría en el desarrollo de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	3
1.1	Objetivos.....	6
2	GENERALIDADES DE LAS ESTRUCTURAS DE ALIVIO	7
2.1	Tipos de Estructuras de Alivio	7
2.2	Parámetros de Desempeño (Consideraciones para su Proyección)	8
2.3	Sistema de Drenaje de la Ciudad de Bogotá D.C.....	9
2.4	Estructuras de Alivio en la Ciudad de Bogotá D.C.	11
3	PROBLEMÁTICA Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	12
3.1	Problemática.....	12
3.2	Alcance de la Herramienta	13
4	DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA.....	15
4.1	CityDrain.....	15
4.2	Lógica Difusa.....	18
4.3	Ambiente y Funcionamiento	22
4.4	Casos de Evaluación:	24
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	26
5.1	Descripción de la Subcuenca El Virrey (Caso Estudio)	26
5.2	Modelo Integrado de la Subcuenca El Virrey.....	27
5.3	Resultados de la Simulación	28
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	36
	BIBLIOGRAFÍA	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de funcionamiento de una estructura de alivio	7
Figura 2. Esquema de drenaje de la ciudad de Bogotá.....	10
Figura 3. Subcuencas sistema de alcantarillado combinado (Bogotá D.C.).....	10
Figura 4. Esquema del ambiente de simulación.....	15
Figura 5. Librería CityDrain	16
Figura 6. Esquema Típico de la modelación de una subcuenca en CityDrain	16
Figura 7. Dilución carga contaminante.....	17
Figura 8. Funcionamiento de la lógica difusa en la herramienta de evaluación. ...	18
Figura 9. Funciones de pertenencia. (Factor de Dilución).....	19
Figura 10. Funciones de pertenencia. (Porcentaje de tiempo de alivio en tiempo seco)	19
Figura 11. Funciones de pertenencia. (Concentraciones de carga contaminante en el cauce para aguas arriba y aguas abajo de la descarga del alivio).....	19
Figura 12. Esquema de interacción de la herramienta con CityDrain.....	22
Figura 13. Display de la herramienta.....	23
Figura 14. Esquema de programación de la herramienta en Simulink	25
Figura 15. Sistema de alcantarillado combinado, subcuenca El Virrey	26
Figura 16. Modelo integrado sistema de alcantarillado combinado, Subcuenca El Virrey	27
Figura 17. Hidrogramas y polutogramas estructura de alivio 1	29
Figura 18. Calificación estructura de alivio 1	30
Figura 19. Hidrogramas y polutogramas estructura de alivio 5	32
Figura 20. Calificación estructura de alivio 5	33
Figura 21. Hidrogramas y polutogramas estructura de alivio 7	34
Figura 22. Calificación estructura de alivio 7	34

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estructuras de alivio sistema de alcantarillado combinado (Bogotá).....	11
Tabla 2. Objetivos de calidad para el río Salitre.....	13
Tabla 3. Parámetros de diseño de aliviaderos.	13
Tabla 4. Reglas Difusas de la Herramienta.....	21
Tabla 5. Dimensiones estructuras de alivio subcuenca El Virrey	27

1 INTRODUCCIÓN

La necesidad apremiante del saneamiento y conservación del recurso hídrico y del manejo de vertimientos ha llevado a institucionalizar estándares de calidad ambientales para los cuerpos de agua naturales, los cuales surgen a partir de las necesidades, usos y objetivos de cada sistema hídrico en particular.

Los aliviaderos de alcantarillados combinados son estructuras que permiten la evacuación de flujos de exceso hacia un cuerpo de agua receptor (canales o quebradas naturales que atraviesan las zonas urbanas) o hacia almacenamientos temporales establecidos para tal fin. Los objetivos originales de estas estructuras fueron la prevención de inundaciones en las áreas urbanas y la limitación de volúmenes para la reducción de costos en infraestructura de transporte y tratamiento.

El objetivo ideal a la hora de aliviar caudal compuesto de aguas residuales y pluviales es que éste no afecte de manera circunstancial al cuerpo de agua receptor, permitiéndole a este último su auto depuración aguas abajo del alivio en su transcurso natural.

Las ventajas más representativas de los sistemas combinados son aquellas en las cuales, en condiciones de tiempo seco y para eventos de lluvia leves, si el flujo combinado no excede el límite en el cual empieza a aliviarse por medio de las estructuras de alivio, todo el flujo de agua (el cual puede estar muy contaminado) es tratado en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), y la de poseer un solo sistema de recolección y transporte, eliminándose así la presencia de conexiones erradas y los problemas que éstas generan, en el caso de sistemas separados.

En algunas ciudades europeas que poseen y mantienen sistemas de alcantarillado combinados, aplican estándares precisos de diseño, manuales de gestión de

contaminación urbana (Butler & Davies, 2000), regulaciones claras para el control y diagnóstico de este tipo de estructuras (Northern Ireland, 1995), sistemas de control en tiempo real (Weyand, 2002), y se realizan investigaciones enfocadas a la evaluación del impacto de este tipo de descargas sobre los cuerpos de agua receptores (Lau, Butler & Schutze, 2002). Por otro lado, las técnicas de Inteligencia Artificial como la Lógica Difusa, se han implementado para la operación de algunos elementos de infraestructura de sistemas de drenaje como son las estaciones de bombeo (Hapurne, 2002).

La aplicación de modelos numéricos para la simulación de sistemas de drenaje urbano ha facilitado el conocimiento del funcionamiento de dichos sistemas y la toma de decisiones para la formulación de estrategias de operación y mantenimiento, obras de rehabilitación y de reforzamiento hidráulico y acciones de mitigación de impactos ambientales negativos (EAAB & I.E.H., 1999). No obstante existen deficiencias remarcadas en cuanto a la incertidumbre y subjetividad agregada que se presenta para la toma acertada de decisiones.

Por lo anterior, es preciso implementar por parte de las empresas prestadoras de servicios públicos un sistema de control, diagnóstico, y evaluación de los sistemas de alcantarillado combinados a nivel global y de manera continua, en especial de las estructuras de alivio, para entender su comportamiento, la interacción con su entorno, la búsqueda de una mejor eficiencia del sistema y el cumplimiento de estándares de calidad ambientales.

En este trabajo se describe la aplicación de una herramienta de evaluación del comportamiento de aliviaderos de alcantarillados combinados a nivel individual y grupal, que opera bajo plataforma “Matlab/Simulink”, haciendo uso de las herramientas de simulación de sistemas de drenaje urbano “CityDrain” y la “Lógica Difusa” para la obtención de indicadores de desempeño. Se muestran resultados de la evaluación continua de diferentes estructuras de alivio en una subcuenca de la ciudad de Bogotá D.C., para varios escenarios de análisis.

El objetivo es mostrar que una evaluación robusta de una estructura de alivio depende no sólo del análisis de alguna variable en particular, sino de la interacción de parámetros operativos del sistema de drenaje, de estándares de diseño, regulaciones de calidad y estado del cauce receptor, del conocimiento de expertos y la aplicación de reglas para su interacción en un tiempo representativo de análisis, con lo cual se puede reducir la subjetividad e incertidumbre de la evaluación.

1.1 Objetivos

El proyecto de investigación que se expone tiene como objetivo principal elaborar una herramienta computacional de gestión que arroje parámetros y/o indicadores de desempeño del comportamiento de Aliviaderos de Alcantarillados Combinados a nivel individual, grupal, y de su influencia sobre los sistemas a los cuales estas estructuras afectan con su operación.

Objetivos específicos:

- ✓ Realizar un análisis de la literatura pertinente
- ✓ Elaborar un diagnóstico de la problemática, inventario, estudios y regulaciones referentes a las estructuras de alivio en la ciudad de Bogotá
- ✓ Elaborar la herramienta de evaluación en plataforma Matlab/Simulink con la aplicación del software CityDrain y la Lógica Difusa como instrumento de calificación de las estructuras
- ✓ Definir y establecer los parámetros de desempeño más relevantes que definen el comportamiento las estructuras de alivio, así como las reglas para la evaluación de las estructuras
- ✓ Aplicar la herramienta de manera conceptual en un caso estudio.

2 GENERALIDADES DE LAS ESTRUCTURAS DE ALIVIO

Los aliviaderos de alcantarillados combinados son estructuras que permiten la evacuación de flujos que exceden la capacidad del sistema. La función básica de una estructura de alivio se ilustra en la Figura 1; en este caso, la estructura recibe flujo, el cual durante una precipitación consiste de aguas lluvias mezcladas con aguas servidas, parte de este flujo es retenido en el sistema de alcantarillado y continua hacia la PTAR y el flujo de exceso es aliviado o vertido hacia un cuerpo de agua receptor (canales o quebradas naturales que atraviesan las zonas urbanas) o hacia almacenamientos temporales establecidos para tal fin.

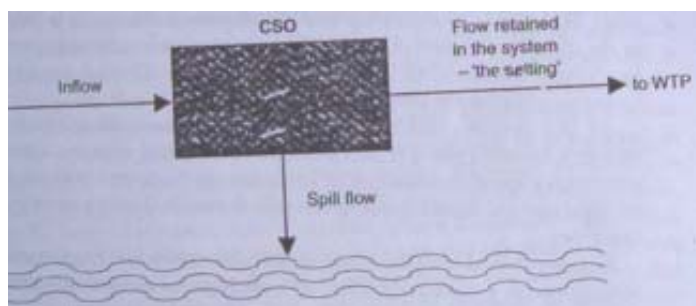


Figura 1. Esquema de funcionamiento de una estructura de alivio
Fuente: Butler & Davies, 2000

2.1 Tipos de Estructuras de Alivio

Los tipos de Aliviaderos de alcantarillados combinados que se referencian en la literatura, los cuales se caracterizan por sus propiedades hidráulicas y de retención de contaminantes, son los que se mencionan a continuación (Garavito L. 1988; Butler & Davies, 2000).

- ✓ Aliviaderos tipo Diagonal
- ✓ Aliviaderos de Salto o con Descarga de Fondo
- ✓ Aliviaderos de Vertedero Frontal
- ✓ Aliviaderos tipo Pozo de Aquietamiento (Stilling Pond CSO)
- ✓ Aliviaderos tipo Vertedero Lateral Alto (High Side Weir CSO)

- ✓ Aliviaderos Tipo Vórtice
- ✓ Aliviaderos con Almacenamiento Temporal

2.2 Parámetros de Desempeño (Consideraciones para su Proyección)

A partir de una revisión y análisis de la literatura pertinente, se determinaron los parámetros de desempeño que se enuncian a continuación, los cuales son importantes para la evaluación de estructuras de alivio desde el punto de vista de diseño, operación y de impacto sobre los cauces receptores.

- ✓ **Factor de Dilución Operativo:** Es la relación entre el caudal total que entra al aliviadero y el caudal de aguas residuales.
- ✓ **CSO Setting o Factor de Dilución de Diseño:** Es el parámetro de diseño de los aliviaderos, el cual determina la capacidad de la tubería de salida de la estructura (caudal retenido en el sistema). Generalmente está dado en términos del caudal medio diario sanitario.

$$CSO\ Setting = No.\ de\ veces\ el\ Q\ medio\ sanitario$$

- ✓ **Frecuencia de Alivios:** Establece el número de veces que opera el alivio a lo largo de un año, por ejemplo.
- ✓ **Volumen de Alivio:** Es el volumen total de descarga de todos los eventos de alivio durante el período de tiempo considerado.
- ✓ **Almacenamiento Temporal:** Es la capacidad que posee la estructura para retener volúmenes de alivio iniciales y/o totales (para eventos de lluvia leves) y cargas contaminantes esperadas del primer lavado (Uniandes & EAAB, 2000).

- ✓ **Alivios en condiciones de tiempo seco:** Son alivios de flujos sanitarios sin diluir.
- ✓ **Impacto estético o visual:** Impacto significativo sobre los cauces receptores debido a los sólidos, basuras, etc.
- ✓ **Grado de deterioro** de la calidad del cauce o el incumplimiento de estándares ambientales.
- ✓ **Factor de Tratamiento:** Establece una relación entre el porcentaje de carga contaminante y el porcentaje de volumen de agua, retenidos en el sistema.

$$\text{Factor de Tratamiento} = \frac{\text{Eficiencia Total}}{\text{División de Flujo}}$$

Donde:

$$\text{Eficiencia Total} = \frac{\text{Carga Contaminante Retenida en el Sistema}}{\text{Carga Contaminante Total que entra al Sistema}}$$

$$\text{División de Flujo} = \frac{\text{Volúmen de Lluvia retenido en el Sistema}}{\text{Volúmen de Lluvia total que entra al Sistema}}$$

Fuentes: (RAS 2000; Butler & Davies, 2000; Northern Ireland, 1995; Lau, Butler & Schütze, 2002; Blanksby J., 2002)

2.3 Sistema de Drenaje de la Ciudad de Bogotá D.C.

La ciudad de Bogotá D.C. esta dividida en ocho cuencas, Borde Norte, Torca, Conejera, Jaboque, Salitre, Fucha, Tintal y Tunjuelo, las cuales drenan sus aguas lluvias y sanitarias hacia el río Bogotá al occidente de la ciudad. El área correspondiente al sistema de alcantarillado combinado corresponde a la zona antigua de la ciudad, la cual pertenece a las cuencas Salitre y Fucha (Figs. 2-3), esta a su vez está dividida en subcuencas denominadas con el nombre de los cauces que la atraviesan.

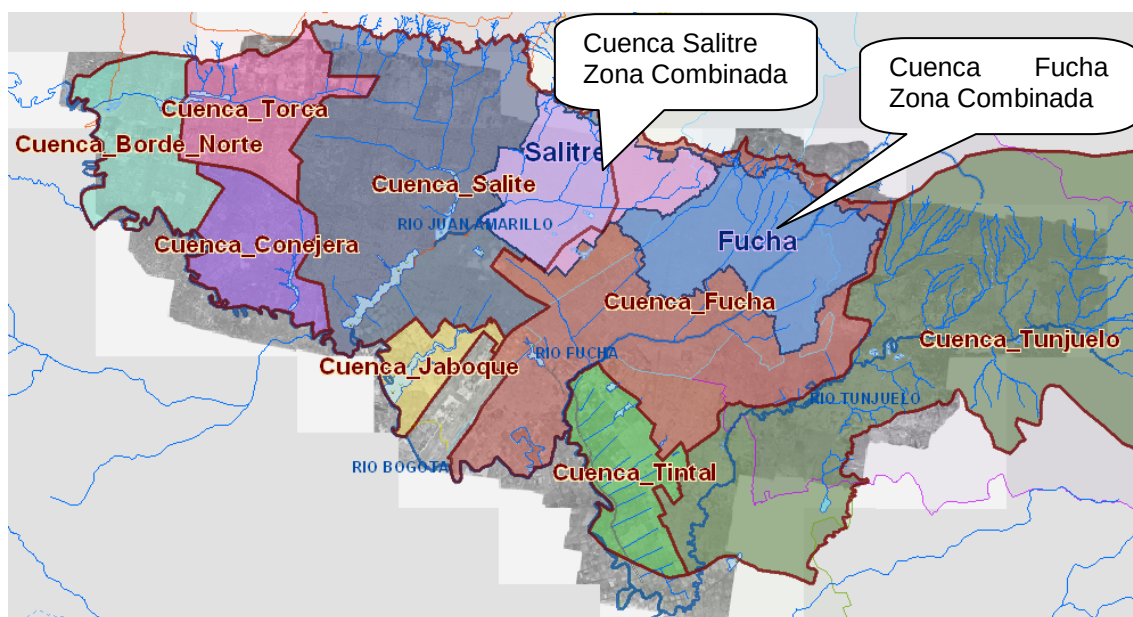


Figura 2. Esquema de drenaje de la ciudad de Bogotá.
Fuente: Adaptado de la EAAB.

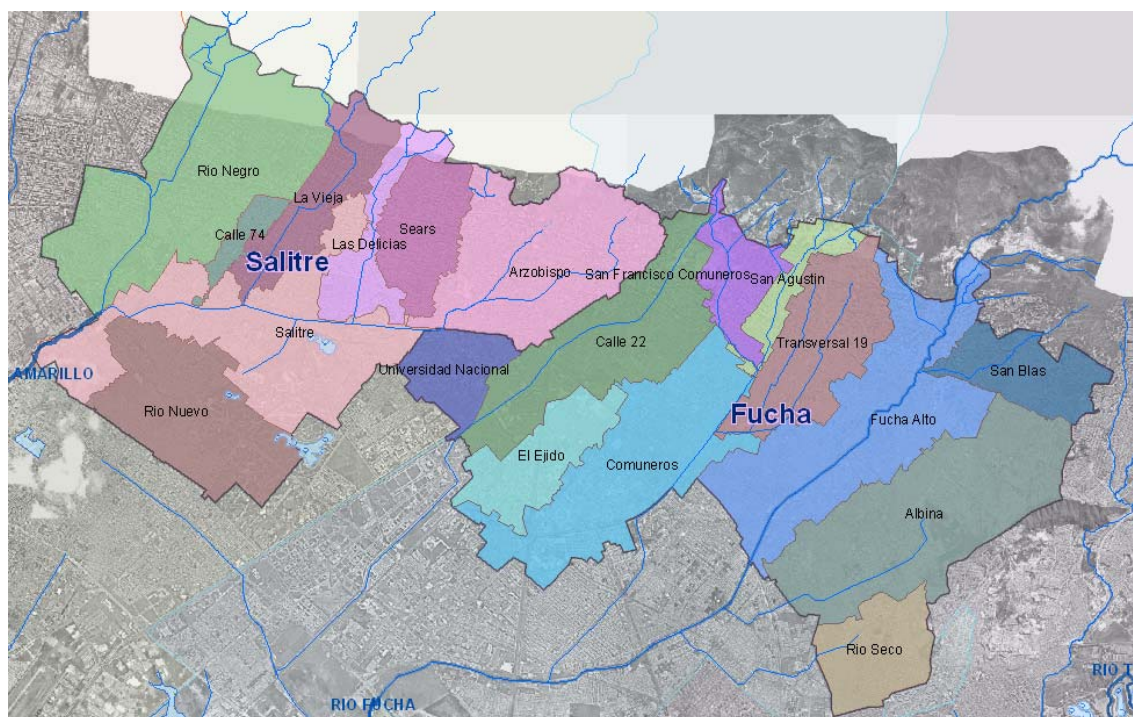


Figura 3. Subcuencas sistema de alcantarillado combinado (Bogotá D.C.).
Fuente: Adaptado de la EAAB.

2.4 Estructuras de Alivio en la Ciudad de Bogotá D.C.

A continuación se describen los tipos, cantidad y ubicación de las estructuras de alivio presentes en la ciudad de Bogotá D.C. (Tabla 1):

SUBCUENCA	Tipo Aliviadero				Cantidad TOTAL
	Frontal	Diagonal	Salto o con Descarga de Fondo	Pozo de Aquietamiento Extendido (Extended Stilling Pond)	
Interceptores izq. y derecho canal Arzobispo	1	4	2		7
Colector de Sears		2			2
Colector las Delicias		1			1
Interceptores izq. y derecho canal Salitre		(Antes, este tipo de CSO)		14 (Diseños recientes)	14
Colector Río Nuevo		1			1
Colector la Vieja		1			1
Interceptores izq. y derecho canal Río Negro	2	11			13
Interceptor izquierdo canal Córdoba		1			1
Interceptor canal Callejas		1			1
Interceptor izq. y derecho canal Fucha	11	3			14
Interceptor izq. y derecho canal Albina	1	8			9
Interceptor izq. y derecho Río Seco		4	2		6
Comuneros		4	1		5
San Francisco	1	3			4
San Blas	1				1
Total	17	44	5	14	80

Tabla 1. Estructuras de alivio sistema de alcantarillado combinado (Bogotá).
Fuente: Adaptado de EAAB., IEH, Grucon & Soprin, 1998.

3 PROBLEMÁTICA Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Problemática

Partiendo de las políticas de saneamiento y manejo de vertimientos actuales y la búsqueda de la conservación de las características naturales de los cauces que ingresan y atraviesan el perímetro urbano, se ha creado la necesidad de eliminar las descargas directas de flujos de aguas residuales que afectan la estética y calidad del recurso.

No obstante, es bien sabido, la operación de las estructuras de alivio (cuando la estructura está aliviando), produce en algunos casos, impactos ambientales negativos sobre los cuerpos de agua receptores. Tales situaciones no se consideraban importantes, partiendo de la premisa de que eran flujos combinados los que se vertían (sanitarios mas pluviales) que el cauce podía asimilar. La preocupación comenzaba a generarse cuando estas estructuras operaban en tiempo seco, es decir, cuando se vertían flujos sanitarios sin diluir.

Actualmente, las descargas intermitentes producidas por las estructuras de alivio se están convirtiendo en foco de interés por parte de las autoridades ambientales y empresas prestadoras de servicios públicos, en cuanto al análisis de la operación del sistema y el grado de afectación para el cumplimiento de objetivos ambientales. En Bogotá D.C., no existen políticas o regulaciones claras para este tipo de vertimientos, y la proyección de las estructuras de alivio se basan en las directrices establecidas en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000) y en las resoluciones del Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA), tales como los que se muestran en las Tablas 2 y 3, observándose criterios pobres o poco precisos de diseño y estándares u objetivos de calidad ambientales muy flexibles en cuanto a la calidad del agua de los cauces naturales y canales que drenan la ciudad se refiere.

Parámetro	Tramo			
	1	2	3	4
OD (mg/L)	≥ 2	≥ 0	≥ 0	≥ 0
DBO ₅ (mg/L)	≤ 5	≤ 150	≤ 200	≤ 150
SST (mg/L)	≤ 50	≤ 150	≤ 300	≤ 100
PH (Unidades)	$5 \leq \text{PH} \leq 9$	$5 \leq \text{PH} \leq 9$	$5 \leq \text{PH} \leq 9$	$5 \leq \text{PH} \leq 9$
Sólidos Flotantes	Ausentes	Ausentes	Ausentes	Ausentes
Temperatura	$< 15^{\circ}\text{C}$	$< 20^{\circ}\text{C}$	$< 20^{\circ}\text{C}$	$< 20^{\circ}\text{C}$
Olores Agresivos	Ausentes	Mínimos	Mínimos	Mínimos

Tabla 2. Objetivos de calidad para el río Salitre.
Fuente: DAMA (Resolución 1813 de 2.006)

Parámetro	Criterio
Factor de Dilución de Diseño	> 1
Frecuencia de Alivios	No se especifica
Volúmen de Alivio	No es preciso
Almacenamiento Temporal	No es preciso
Alivio en Tiempo Seco	No se permite
Impacto Estético Visual	No se especifica
Grado de Deterioro en el Cauce	No es preciso (depende de los usos del cauce)
Factor de Tratamiento	No se especifica

Tabla 3. Parámetros de diseño de aliviaderos.
Fuente: (RAS 2000)

3.2 Alcance de la Herramienta

La herramienta desarrollada en esta investigación para la evaluación de estructuras de alivio, calcula el valor de los parámetros de desempeño descritos en el numeral 2.2 (excepto el de impacto estético visual) y obtiene una calificación o indicador de desempeño entre cero (0) y diez (10) para cada tiempo o intervalo de simulación, y para cada estructura en estudio; con lo cual se puede determinar de manera integral y en todo el período de análisis, si estas estructuras poseen o no un comportamiento satisfactorio. Los parámetros de desempeño involucrados en el desarrollo del instrumento de calificación de las estructuras de alivio, se limitaron a las directrices y regulaciones disponibles (Tablas 2 y 3), a los aspectos operativos y tipos de estructuras presentes en la ciudad de Bogotá D.C., como caso estudio.

Los parámetros establecidos para la calificación, fueron:

- ✓ ***Factor de Dilución Operativo***
- ✓ ***CSO Setting o Factor de Dilución de Diseño***
- ✓ ***Alivio en condiciones de tiempo seco***
- ✓ ***Grado de deterioro de la calidad del cauce o el incumplimiento de estándares ambientales.***

No se incluye en el alcance de la investigación, para la calificación de la estructura de alivio, el almacenamiento temporal ni el factor de tratamiento de la estructura, debido a que estos parámetros son típicos de alivios con tanque de almacenamiento (no presentes en la ciudad). Por otro lado, no existe una reglamentación clara de qué volúmenes y cargas contaminantes acumuladas máximas se pueden aliviar y con qué frecuencia, al igual que para el impacto estético visual; sin embargo, la herramienta arroja el análisis de estas variables.

4 DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA

Teniendo en cuenta los objetivos planteados para la evaluación, se optó por la implementación de la herramienta en MATLAB/SIMULINK (paquete para la modelación y análisis de sistemas dinámicos). Esta plataforma envuelve de manera integral la simulación del sistema de drenaje por medio del software CITYDRAIN, y el cálculo de parámetros de desempeño y la inclusión de la LÓGICA DIFUSA para la obtención de los indicadores de desempeño o calificación del alivio (Fig. 4). Además de lo anterior, la plataforma es lo suficientemente robusta para la expansión o modificación del modelo, de acuerdo con las necesidades propias de la investigación. A continuación se hace una breve descripción de los modelos utilizados en la investigación.

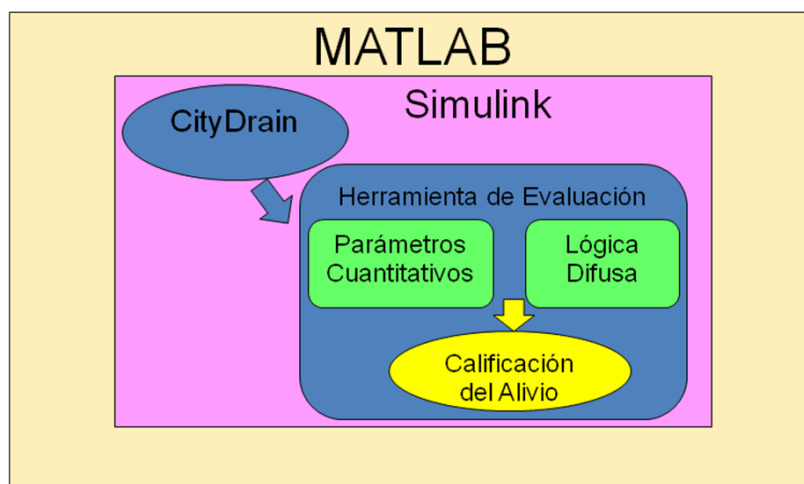


Figura 4. Esquema del ambiente de simulación

4.1 CityDrain

CityDrain es un software de libre distribución, utilizado para la simulación integrada de sistemas de drenaje urbano. Fue desarrollado en la Unidad de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Innsbruck (Austria). Es una librería desarrollada en MATLAB/SIMULINK, de fuente abierta con posibilidad de expansión, (Figs. 5-6). Esta librería posee modelos conceptuales para la hidráulica y el transporte de

contaminantes (Muskingum, Dilución), usa tiempos discretos en la simulación y no posee modelos de calidad del agua.

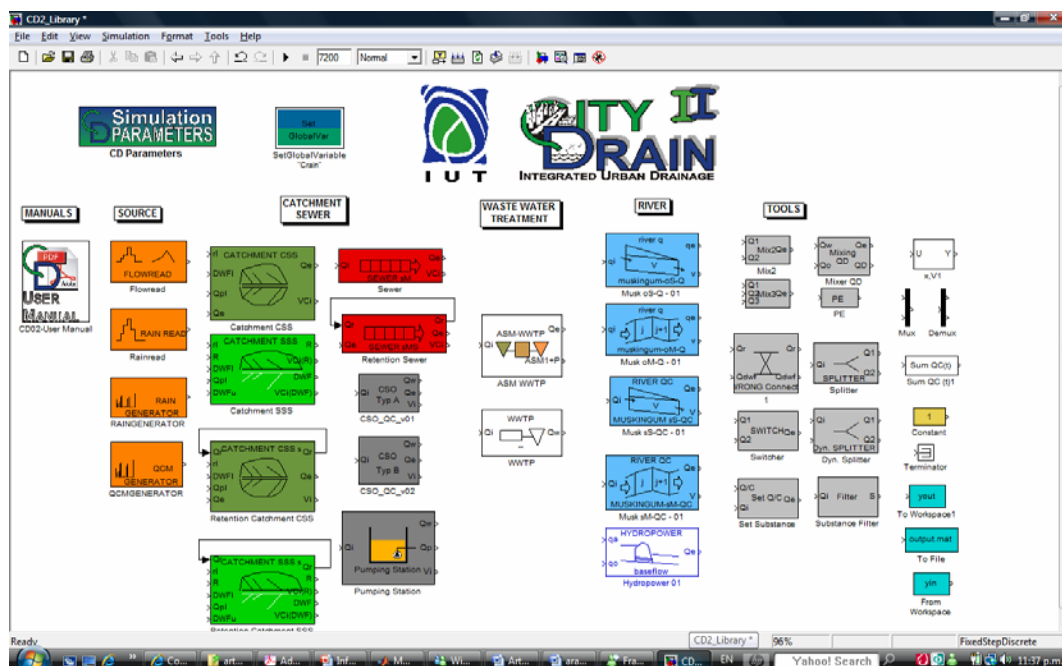


Figura 5. Librería CityDrain

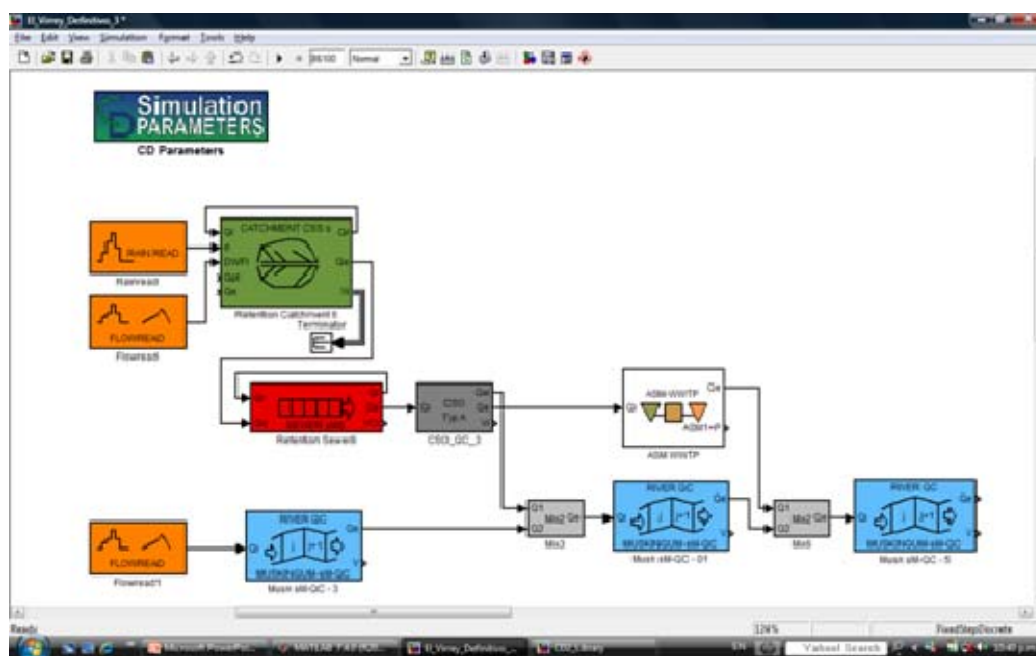


Figura 6. Esquema Típico de la modelación de una subcuenca en CityDrain

La aproximación de la hidráulica que simula la operación de las estructuras de alivio, se basa en la ecuación de continuidad:

$$Q_{\text{aliviado}} = Q_{\text{entrada}} - (Q_{\text{salida}} + Q_{\text{almacenamiento}})$$

Donde:

Q_{aliviado} : Fracción de caudal que excede la capacidad del sistema y va al cauce receptor.

Q_{entrada} : Caudal que entra a la estructura de alivio

Q_{salida} : Caudal que sigue en el sistema por la tubería efluente del alivio.

$Q_{\text{almacenamiento}}$: Caudal que ingresa al tanque de almacenamiento temporal (si la estructura lo posee).

La mezcla de caudal aliviado y el caudal del cauce que viene aguas arriba de las descargas del alivio se representa en la Figura 7, donde C_T es la concentración resultante aguas abajo del alivio y el caudal resultante Q_T es la suma de los caudales de alivio y del cauce aguas arriba de la descarga.

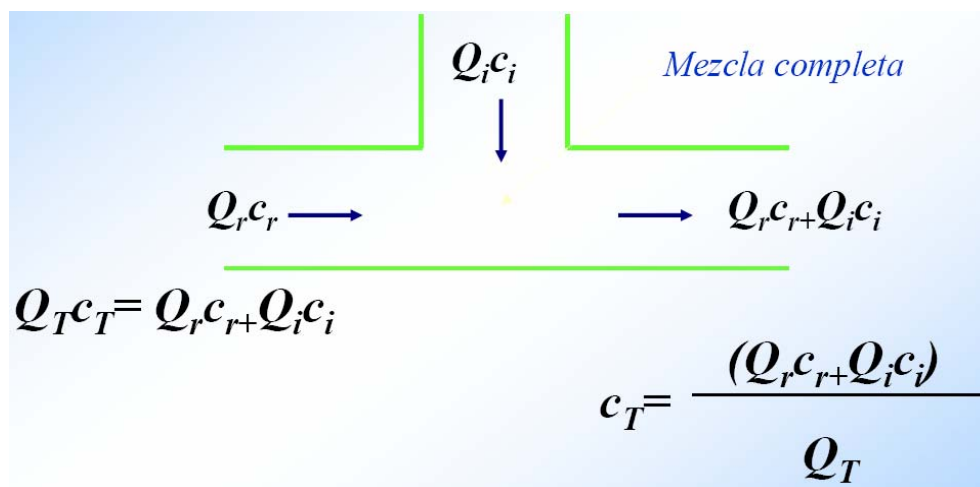


Figura 7. Dilución carga contaminante.
Fuente: de Camacho L., 2005

4.2 Lógica Difusa

La lógica difusa difiere de la lógica clásica (en la cual, una proposición sólo admite dos valores: verdadero o falso), cuando existen zonas grises o inferencia entre valores de una proposición (un valor puede ser verdadero y falso en cierto grado de pertenencia). Se basa en reglas heurísticas “SI (antecedentes o conjuntos difusos de entradas) ENTONCES (consecuente o conjuntos difusos de salidas)”.

La lógica difusa está enmarcada por el pensamiento humano y cuantificadores de nuestro lenguaje natural (alto, mucho, muy). Ejemplo: Si hace mucho calor y SI la humedad es baja ENTONCES suba la potencia del aire acondicionado (aplicación típica de esta herramienta).

Este tipo de lógica aplica cuando se envuelven definiciones y conocimientos NO estrictamente definidos (imprecisos), la experiencia de expertos (subjetiva), cuando la complejidad del proceso en cuestión es muy alta y no existen modelos matemáticos precisos, para procesos altamente NO lineales, o la combinación de estos.

La aplicación de la lógica difusa en la herramienta de evaluación se utilizó para encontrar una salida (calificación de la estructura de alivio) a partir de la interacción de varias entradas (parámetros de desempeño establecidos en el alcance de la herramienta), por medio de reglas difusas definidas, con la aplicación de las reglas heurísticas (Fig. 8).

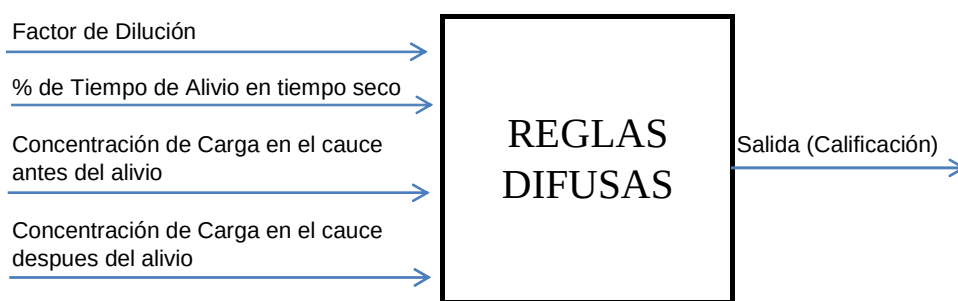


Figura 8. Funcionamiento de la lógica difusa en la herramienta de evaluación.

De esta forma, la herramienta calcula para cada intervalo de tiempo de simulación, una calificación que depende de los cuatro parámetros de desempeño calculados en dicho intervalo. Para la creación de las reglas difusas se establecieron en las variables de entrada y salida funciones de pertenencia para intervalos determinados de valores, asociadas a cuantificadores lingüísticos (Figs. 9-11).

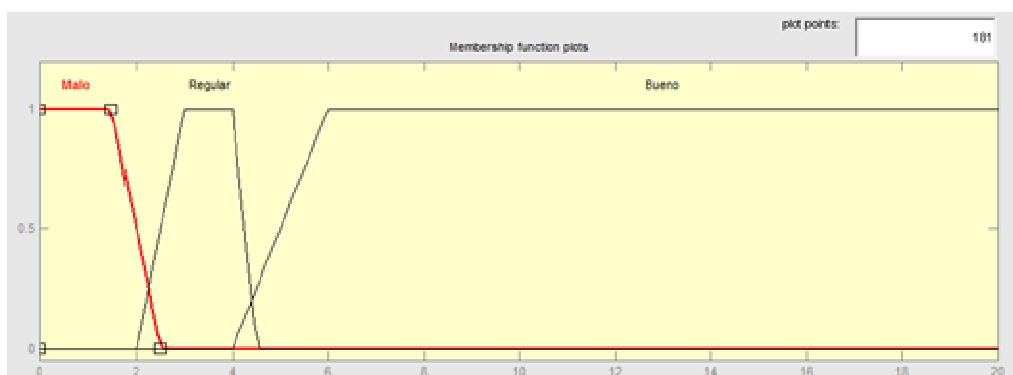


Figura 9. Funciones de pertenencia. (Factor de Dilución)

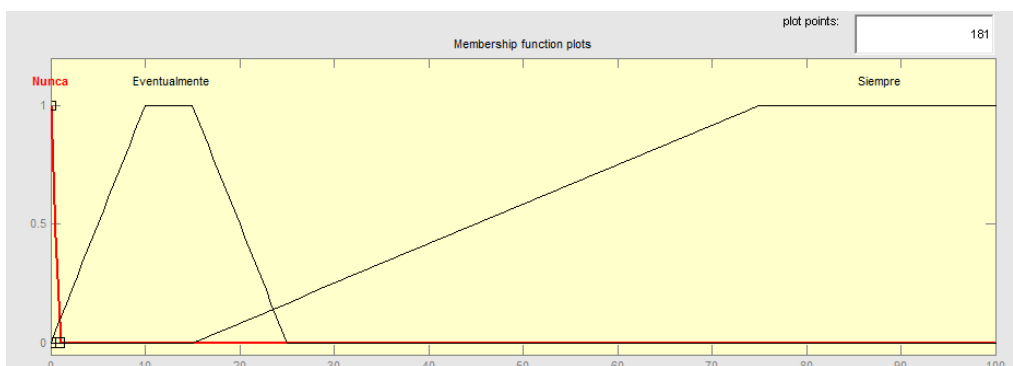


Figura 10. Funciones de pertenencia. (Porcentaje de tiempo de alivio en tiempo seco)

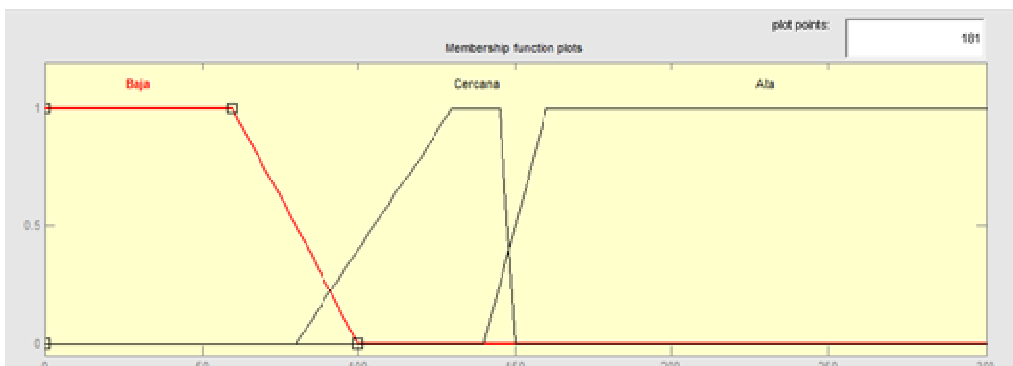


Figura 11. Funciones de pertenencia. (Concentraciones de carga contaminante en el cauce para aguas arriba y aguas abajo de la descarga del alivio).

La determinación de las connotaciones lingüísticas se basó en la definición de cuantificadores de nuestro lenguaje natural (bueno, alto, nunca), que representan de la manera más aproximada un rango de valores de una variable.

La forma de las funciones está definida por el grado de pertenencia que cada valor puede tener con respecto al cuantificador lingüístico asignado. Ejemplo: Un grado de pertenencia de 1 significa que con un 100% de certeza, el valor de una variable pertenece a ese cuantificador lingüístico.

El rango (valores mínimos y máximos), los intervalos (asociados a un cuantificador lingüístico) y el grado de pertenencia de los valores que puede adquirir una variable y la inferencia entre funciones de pertenencia (zonas grises), se definieron a partir del conocimiento de expertos, de directrices y normas investigadas, la subjetividad y el sentido común.

Con el número de variables de entrada y el número de funciones de pertenencia definidos, se calculó el número y se definieron las reglas difusas de la herramienta (Tabla 4), cifra que está determinada por el número de posibles combinaciones entre todas las funciones de pertenencia de todas las variables de entrada.

Los beneficios de definir funciones de pertenencia con un cuantificador lingüístico asociado son:

- ✓ Facilidad en la definición y análisis de las reglas para determinar su operación (qué salida debe tener a partir de la combinación de entradas), en la Tabla 4 se muestran algunas de las reglas.
- ✓ La herramienta computacional que evalúa las entradas, resuelve rápidamente el proceso para encontrar la salida.

REGLA	FACTOR DE DILUCIÓN			ALIVIA EN TIEMPO SECO?			CONCEN. RELATIVA AGUAS ARRIBA RESPECTO AL LIMITE PERMITIDO			CONCEN. RELATIVA AGUAS ABAJO RESPECTO AL LIMITE PERMITIDO			CALIFICACIÓN DEL ALIVIO				
	MALO	REGULAR	BUENO	NUNCA	EVENTUALME NTE	SIEMPRE	BAJA	CERCANA	ALTA	BAJA	CERCANA	ALTA	MUY BUENO	BUENO	REGULAR	MALO	MUY MALO
1	X			X			X			X					X		
2	X			X			X				X					X	
3	X			X			X					X					X
4	X			X				X		X				X			
5	X			X				X			X				X		
6	X			X				X				X					X
7	X			X					X	X							
8	X			X					X		X						
9	X			X					X			X					
10	X				X		X			X						X	
11	X				X		X				X					X	
12	X				X		X					X					X
13	X				X			X		X					X		
14	X				X			X			X					X	
15	X				X			X									X
16	X				X				X	X					X		
17	X				X				X		X				X		
18	X				X				X						X		
19	X					X	X			X							X
20	X					X	X				X						X
21	X					X	X					X					X
22	X					X		X		X							X
23	X					X		X			X						X
24	X					X		X									X
25	X					X			X	X							X
26	X					X				X		X					X
27	X					X			X								X
28		X		X			X			X				X			
29		X		X			X				X				X		
30		X		X			X					X				X	
31		X		X				X		X				X			
32		X		X				X			X						
33		X		X				X							X		
34		X		X					X	X							
35		X		X					X		X						
36		X		X					X								X
37		X			X		X			X					X		
38		X			X		X				X					X	
39		X			X		X					X					X
40		X			X			X		X					X		
41		X			X			X			X						X
42		X			X			X									X
43		X			X				X	X					X		
44		X			X					X		X					
45		X			X				X						X		
46		X				X	X			X							X
47		X				X	X				X						X
48		X				X	X					X					X
49		X				X		X		X							X
50		X				X		X			X						X
51		X				X		X									X
52		X				X			X	X							X
53		X				X			X		X						X
54		X				X			X								X
55			X	X			X			X				X			
56			X	X			X				X						
57			X	X			X					X					
58			X	X				X		X							
59			X	X				X			X						
60			X	X				X							X		
61			X	X					X	X							
62			X	X					X			X					
63			X	X					X								X
64			X		X		X			X							
65			X		X		X				X						
66			X		X		X					X					
67			X		X			X		X						X	
68			X		X			X			X						
69			X		X			X								X	
70			X		X				X	X							
71			X		X				X		X						
72			X		X				X					X			
73			X			X	X			X							X
74			X			X	X				X						X
75			X			X	X										X
76			X			X		X		X							X
77			X			X		X			X						X
78			X			X		X									X
79			X			X			X	X							X
80			X			X			X		X						X
81			X			X			X								X

Tabla 4. Reglas difusas de la herramienta

4.3 Ambiente y Funcionamiento

La herramienta de evaluación (Fig. 12) es un bloque de Simulink que requiere de siete datos continuos de entrada, seis de los cuales deben conectarse a las fuentes correspondientes del modelo en CityDrain, los cuales se muestran a continuación:

- ✓ Caudal de entrada al alivio
- ✓ Caudal de alivio
- ✓ Caudal efluente del alivio (que sigue en el sistema)
- ✓ Caudal de almacenamiento
- ✓ Caudal en el cauce antes de la descarga del alivio
- ✓ Caudal en el cauce después de la descarga del alivio

El séptimo dato corresponde al parámetro fisicoquímico que se desea analizar (debe ingresarse previo a la simulación). La herramienta corre simultáneamente con la simulación del sistema de drenaje.

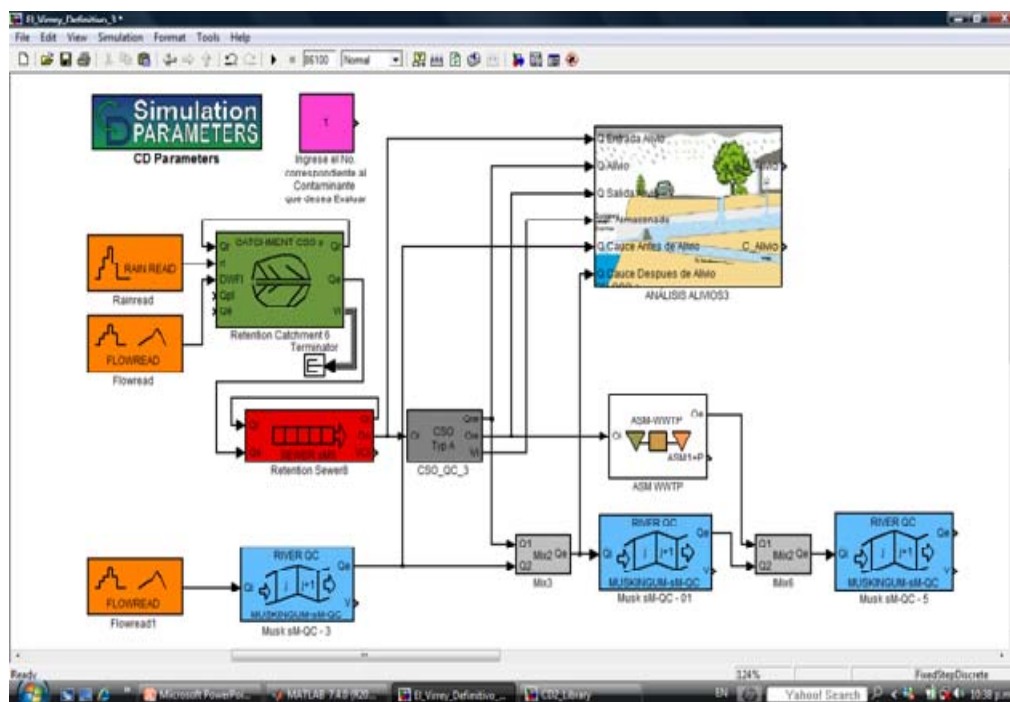


Figura 12. Esquema de interacción de la herramienta con CityDrain

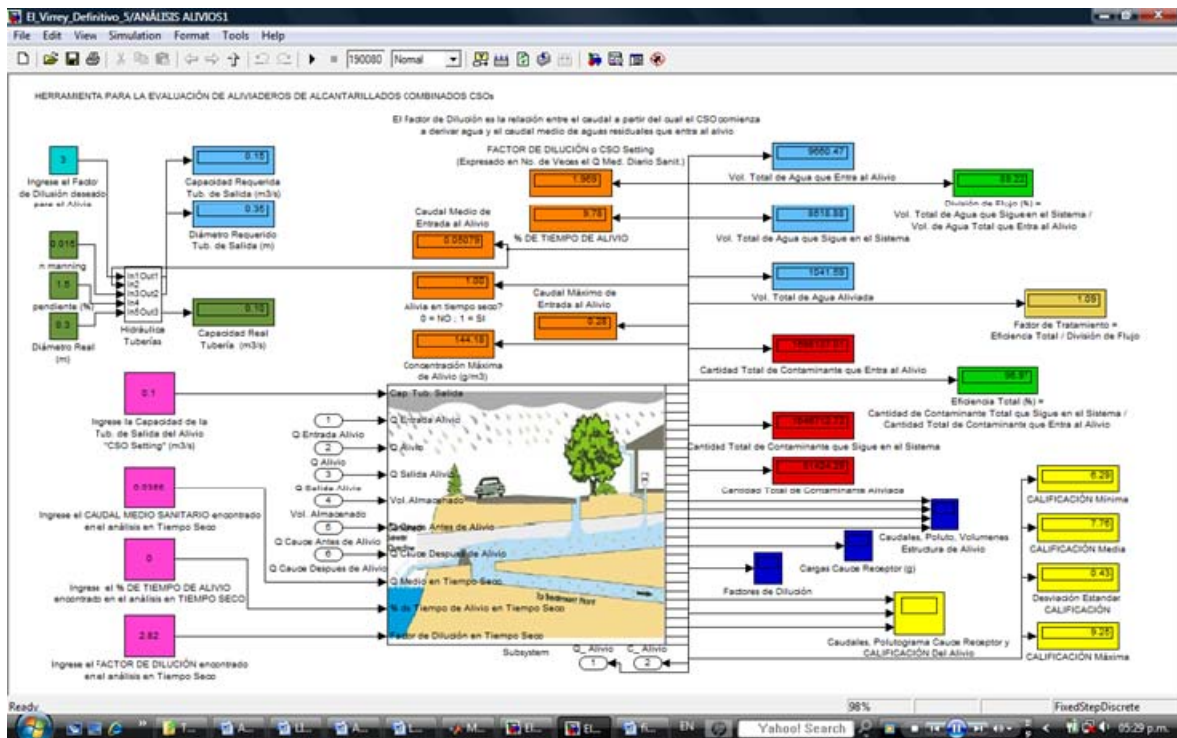


Figura 13. Display de la herramienta

El Display de la herramienta de evaluación (Fig. 13) muestra los datos y gráficas que se mencionan a continuación:

- ✓ CSO Setting o factor de dilución de diseño
- ✓ Factor de dilución operativo
- ✓ Porcentaje de tiempo de alivio (total y en tiempo seco)
- ✓ Caudal medio de entrada al alivio
- ✓ Caudal máximo de entrada al alivio
- ✓ Concentración máxima de alivio
- ✓ Volumen total de agua que entra al alivio
- ✓ Volumen total de agua que sigue en el sistema
- ✓ Volumen total de agua aliviada
- ✓ División de flujo (numeral 2.2)
- ✓ Cantidad total de carga contaminante que entra al alivio
- ✓ Cantidad total de carga contaminante que sigue en el sistema
- ✓ Cantidad total de carga contaminante aliviada

- ✓ Eficiencia total (numeral 2.2)
- ✓ Factor de tratamiento (numeral 2.2)
- ✓ Hidrogramas en la estructura y en el cauce
- ✓ Histograma de volúmenes y cargas totales aliviadas para cada evento de alivio
- ✓ Curva de calificación del alivio (1-10) para cada intervalo del tiempo de simulación
- ✓ Estadísticas sumarias de la calificación (calificación mínima, calificación media, derivación estándar de la calificación y calificación máxima).

4.4 Casos de Evaluación:

La herramienta arroja un calificador de la estructura de alivio para dos casos particulares de operación:

- ✓ Cuando no hay eventos de alivio: Para este caso, la herramienta toma el factor de dilución de diseño encontrado, como parámetro de entrada para la calificación. Esta calificación genera una aproximación de la capacidad de la estructura con respecto a este estándar de diseño.
- ✓ Cuando hay eventos de alivio: Para este caso, la herramienta utiliza el factor de dilución operativo, ya que es el factor de dilución con que verdaderamente se está aliviando y es variable en la medida en que aumente o disminuya la cantidad de aguas lluvias y sanitarias que entran a la estructura. Genera una evaluación más robusta con respecto a la operación propia del aliviadero.

La herramienta está soportada por el procesamiento de los datos de entrada con programación típica en Simulink (Fig. 14), con la aplicación de funciones embebidas en el modelo y la evaluación de datos llamando o interactuando con una función de Matlab, como es el caso de la Lógica Difusa.

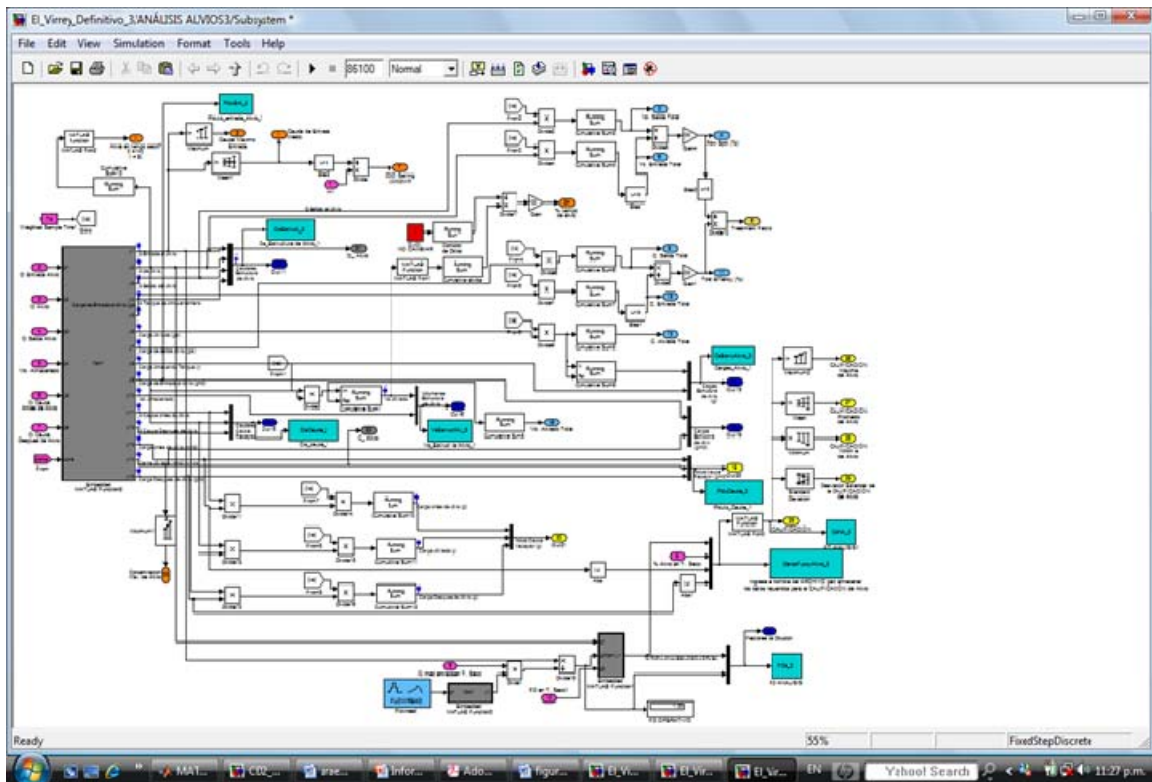


Figura 14. Esquema de programación de la herramienta en Simulink

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Descripción de la Subcuenca El Virrey (Caso Estudio)

Para la aplicación de la herramienta de análisis, se escogió la subcuenca “El Virrey” como caso estudio (Fig. 15); esta subcuenca pertenece a la subcuenca Río Negro que se encuentra ubicada en la parte norte de la zona combinada de la cuenca Salitre. La subcuenca El Virrey tiene un área aproximada de 93 ha, dividida en 10 subáreas de drenaje y 9 estructuras de alivio tipo “Diagonal” (Garavito L., 1988) que alivian al canal El Virrey. Las dimensiones más representativas de las estructuras de alivio desde el punto de vista de la aplicación en CityDrain, se muestran en la Tabla 5.

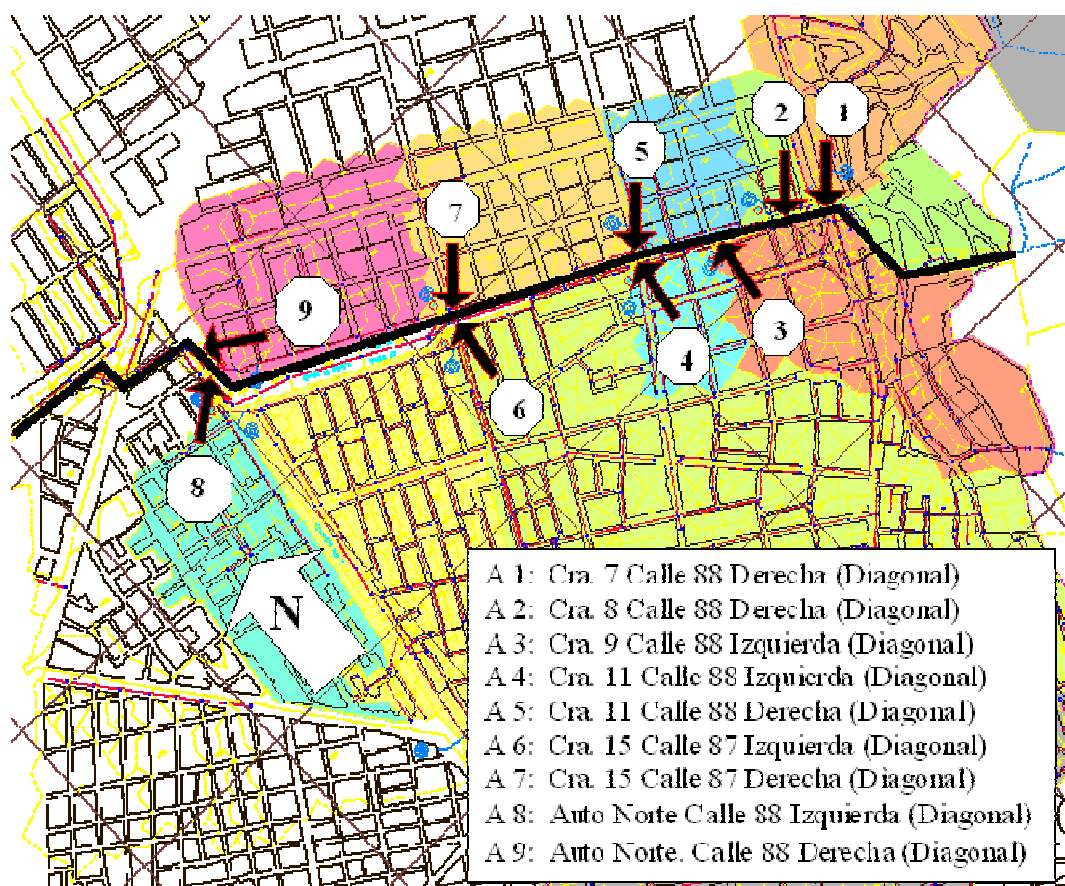


Figura 15. Sistema de alcantarillado combinado, subcuenca El Virrey
Fuente: Adaptado de la E.A.A.B.

Estructura	Díámetro de Entrada (m)	Díámetro de Salida (m)	Capacidad de Almacenamiento (m3)
1	1,1	0,3	0,0
2	0,6	0,3	0,0
3	0,93	0,3	0,0
4	0,8	0,3	0,0
5	0,93	0,3	0,0
6	2,7x1,6	0,6	0,0
7	1,3	0,35	0,0
8	2,95x1,65	0,8	0,0
9	0,7	0,3	0,0

Tabla 5. Dimensiones estructuras de alivio subcuenca El Virrey

5.2 Modelo Integrado de la Subcuenca El Virrey

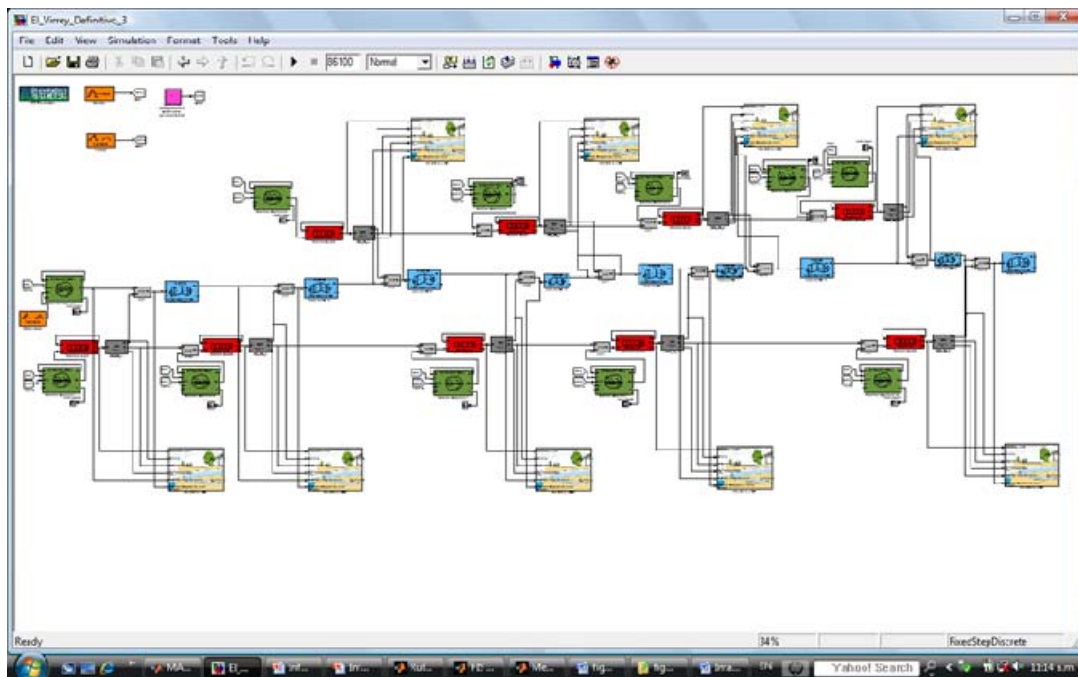


Figura 16. Modelo integrado sistema de alcantarillado combinado, Subcuenca El Virrey

La Figura 16 muestra la estructura del modelo integrado del sistema de drenaje en CityDrain, donde cada estructura de alivio está conectada a la herramienta de evaluación desarrollada. Se realizó una simulación conceptual para un tiempo aproximado de dos días, con el fin de analizar la robustez de la aplicabilidad de la herramienta. Se pudieron analizar los parámetros de evaluación tanto en tiempo

seco, como en dos eventos hipotéticos de lluvia, el primero de ellos a las 02: 00 pm del día 1 y el segundo a las 06: 00 pm del día 2. Se incluyó como parámetro fisicoquímico de evaluación la DBO, estableciendo como concentración máxima de carga contaminante sobre el cauce receptor (canal El Virrey) un valor de 150 mg/l. (Tabla 2).

5.3 Resultados de la Simulación

A continuación se analizan tres estructuras de alivio de la cuenca estudio (1, 5 y 7), las cuales muestran tres escenarios diferentes de comportamiento en la simulación. Para la estructura 1 en particular, se hace una descripción de los parámetros de desempeño, calificación y demás variables evaluadas que arroja la herramienta. Para la estructuras 5 y 7, se enfoca el análisis en la calificación meramente.

✓ Estructura de alivio 1

La primera gráfica de la Figura 17 muestra los hidrogramas en la estructura de alivio, donde se especifican para cada tiempo de simulación, los caudales de entrada, de alivio, salida y almacenamiento (cuando la estructura posee tanque de almacenamiento temporal).

En la segunda gráfica se puede analizar el histograma de los volúmenes totales de agua aliviados y almacenados para cada evento de alivio, así como también la frecuencia con qué se presentan.

La tercera gráfica muestra el polutograma de entrada y de alivio de la estructura para el parámetro fisicoquímico en análisis (DBO para el caso estudio).

En la cuarta gráfica se puede analizar el histograma de cantidades totales de carga contaminante aliviadas y almacenadas para cada evento de alivio, así como también la frecuencia con qué se presentan.

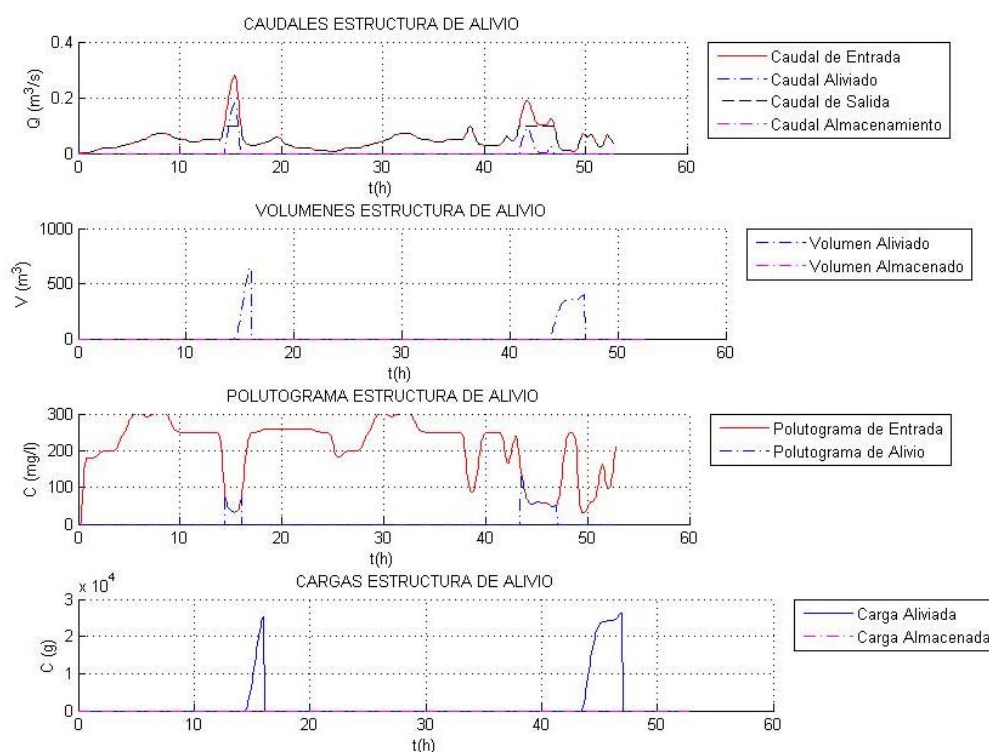


Figura 17. Hidrogramas y polutogramas estructura de alivio 1

La Figura 18 muestra 2 gráficas (1 y 2 en orden de aparición) que sirven para entender la calificación de la estructura (tercera gráfica). En la primera se muestran los hidrogramas en el cauce receptor, donde se especifica para cada tiempo de simulación, los caudales en el cauce, antes y después de la descarga y el caudal de alivio.

En la segunda gráfica se muestran los polutogramas en el cauce aguas arriba de la descarga, el de alivio, y el polutograma resultante aguas abajo luego de la mezcla.

Por último, en la tercera gráfica, se muestra la calificación de la estructura de alivio a lo largo de cada intervalo de tiempo de simulación y para cada caso particular de evaluación (cuando no hay eventos de alivio y cuando estos se presentan).

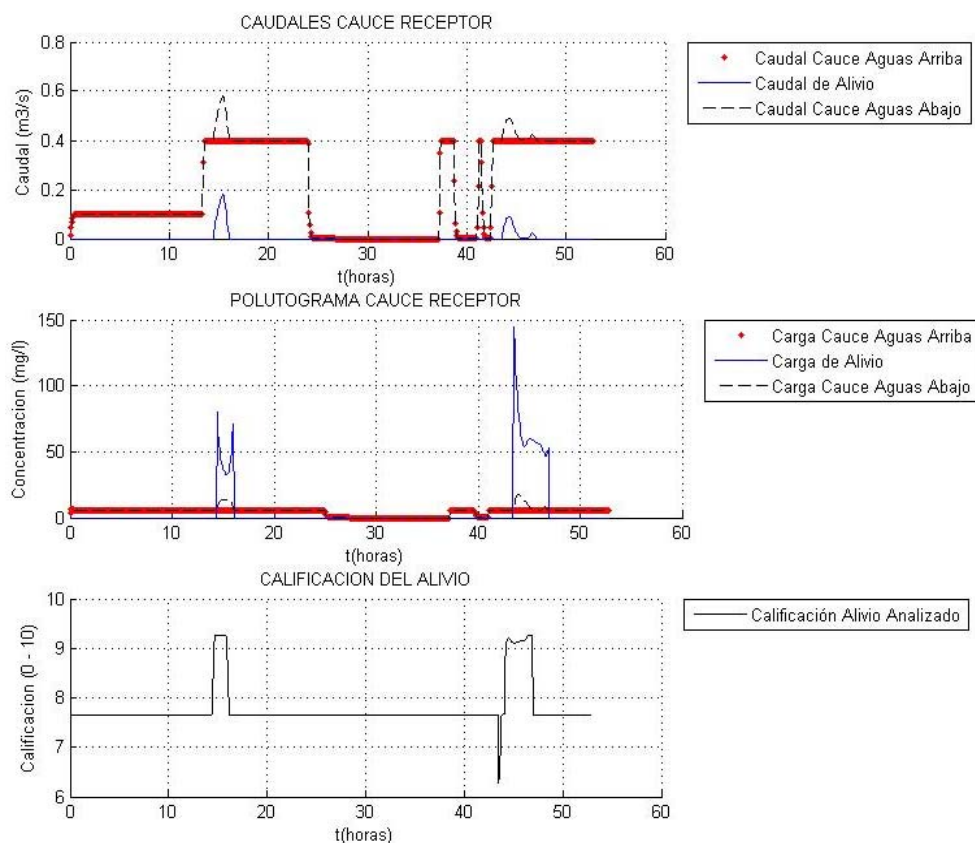


Figura 18. Calificación estructura de alivio 1

En el Display de la herramienta, se pueden observar los valores aproximados de los parámetros de evaluación resultantes del análisis:

- Factor de dilución o CSO setting: 2.82 veces el caudal medio sanitario
- Porcentaje de tiempo de alivio en tiempo seco: 0 %
- Porcentaje de tiempo de alivio total: 9.8 %
- Caudal medio sanitario de entrada al alivio: 0.035 m³/s
- Caudal máximo de entrada al alivio: 0.28 m³/s
- Concentración máxima de alivio: 144.8 mg/l
- Volumen total de agua que entra al alivio: 9660 m³
- Volumen de agua que sigue en el sistema: 8620 m³
- Volumen de agua aliviada: 1041 m³
- División de flujo: 89.2 %
- Cantidad total de carga contaminante que entra al alivio: 1.7 ton

- Cantidad total de carga contaminante que sigue en el sistema: 1.65 ton
- Cantidad total de carga contaminante aliviada: 0.05 ton.
- Eficiencia total: 97 %
- Factor de tratamiento: 1.1
- Calificación mínima: 6.29
- Calificación media: 7.76
- Derivación estándar de la calificación: 0.43
- Calificación máxima: 9.25.

Estos parámetros son importantes en la medida en que se desee analizar la eficiencia del sistema, el aumento de caudales que se pueden tratar o almacenar, alternativas de operación, rehabilitación, etc., o se cuente con otros estándares de calidad ambientales para el cauce receptor.

Análisis de la calificación: La estructura de alivio 1 posee un factor de dilución de diseño de 2.82 y un porcentaje de tiempo de alivio en tiempo seco de cero. Se observa en la Figura 18, que la estructura mantiene una calificación cercana a 7.8 (buena) cuando no está operando, ya que el factor de dilución de diseño es relativamente alto y además nunca alivia en tiempo seco, lo que hace pensar que la estructura posee un diseño aceptable.

En el primer evento de lluvia su calificación aumenta por efecto del ascenso del factor de dilución operativo y la no afectación del cauce receptor.

En el segundo evento de lluvia, en primera instancia su calificación desciende a 6.4 (regular) aproximadamente, e inmediatamente después aumenta, llegando a una calificación alta (por encima de 9, muy buena); esto sucede, porque en el momento en que comienza a aliviar, el caudal sanitario es alto y por ende el factor de dilución operativo es bajo; luego, con el aumento del caudal de aguas lluvias, este factor de dilución aumenta y no se presenta afectación en el cauce receptor.

Para cualquiera de los casos, la premisa de no aliviar en tiempo seco hace que las calificaciones sean buenas.

En la Figura 17 se observan volúmenes de alivio relativamente bajos, los cuales podrían ser retenidos en el sistema con la construcción de un tanque de almacenamiento temporal o el reforzamiento hidráulico de la tubería efluente de la estructura de alivio.

✓ Estructura de alivio 5

Análisis de la calificación: La estructura de alivio 5 posee un factor de dilución de diseño de 1 y un porcentaje de tiempo de alivio en tiempo seco de 56%. La Figura 20 muestra una calificación continua de la estructura de 1.3 (muy mala) ya que siempre alivia en tiempo seco, según las funciones de pertenencia y las reglas difusas establecidas, independientemente de las otras variables de entrada (factor de dilución y afectación en el cauce receptor). Por otro lado, se observan grandes cantidades de volúmenes de agua y cargas contaminantes aliviadas continuamente en el tiempo de simulación (Fig. 19).

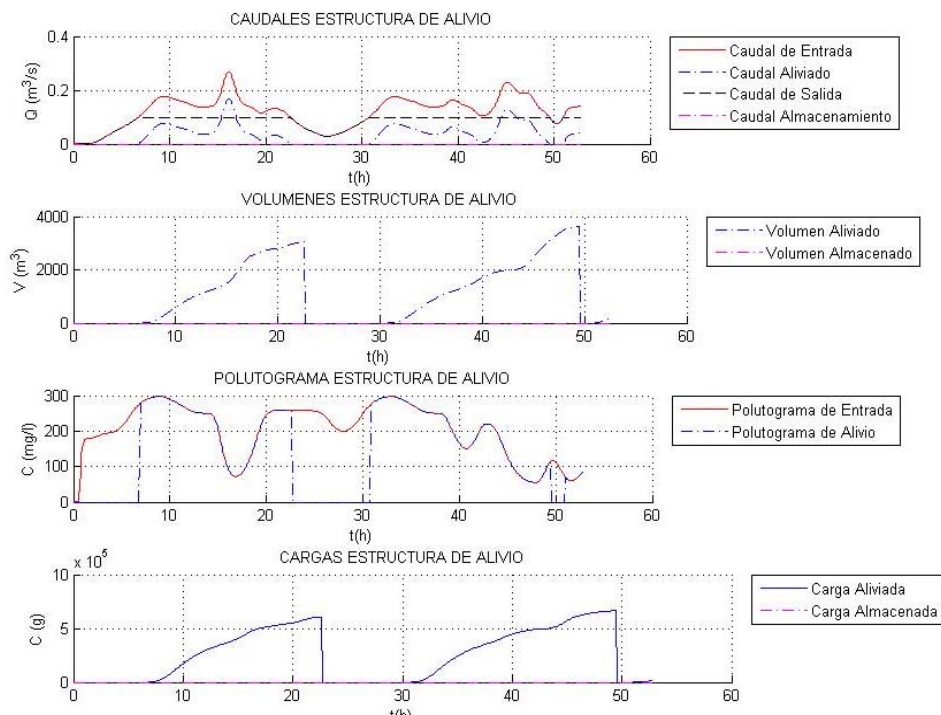


Figura 19. Hidrogramas y polutogramas estructura de alivio 5

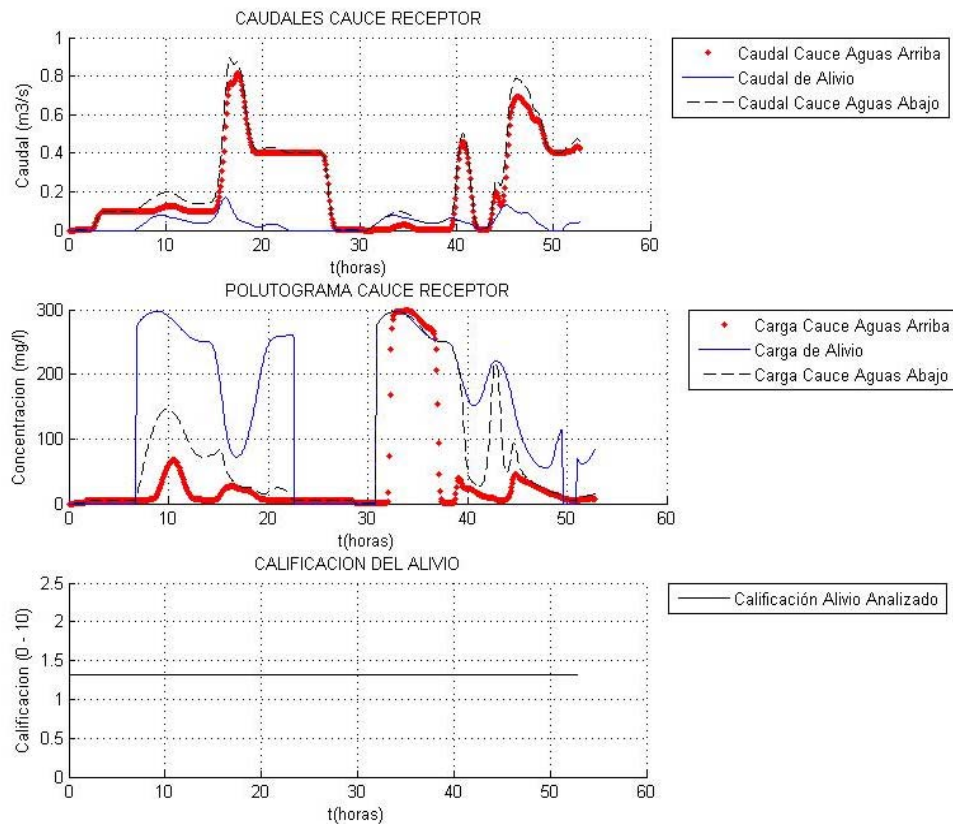


Figura 20. Calificación estructura de alivio 5

✓ Estructura de alivio 7

Análisis de la calificación: La estructura de alivio 7 posee un factor de dilución de 1.4 y un porcentaje de tiempo de alivio en tiempo seco de 12.85%. En primera instancia, se analiza que el factor de dilución de diseño es malo y se alivia eventualmente en tiempo seco; estas dos características, de entrada dan una calificación mala a la estructura de alivio cuando no está operando (cercana a 4). En los eventos de lluvia su calificación aumenta, debido a que el factor de dilución operativo aumenta y no se observa una afectación considerable en el cauce receptor (Fig. 22).

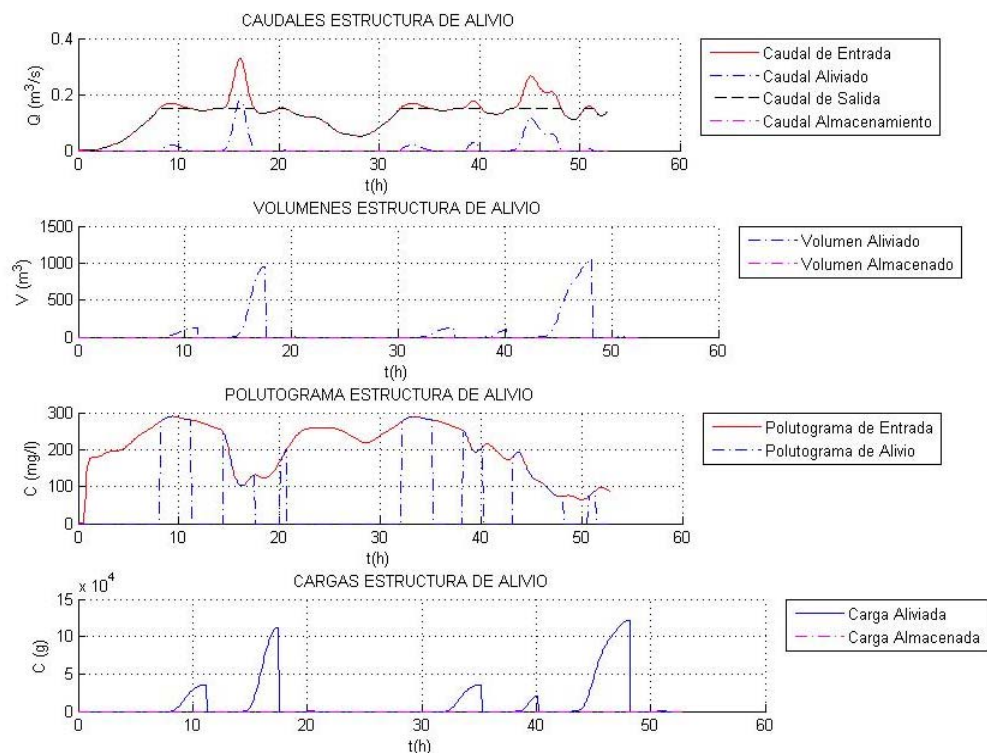


Figura 21. Hidrogramas y polutogramas estructura de alivio 7

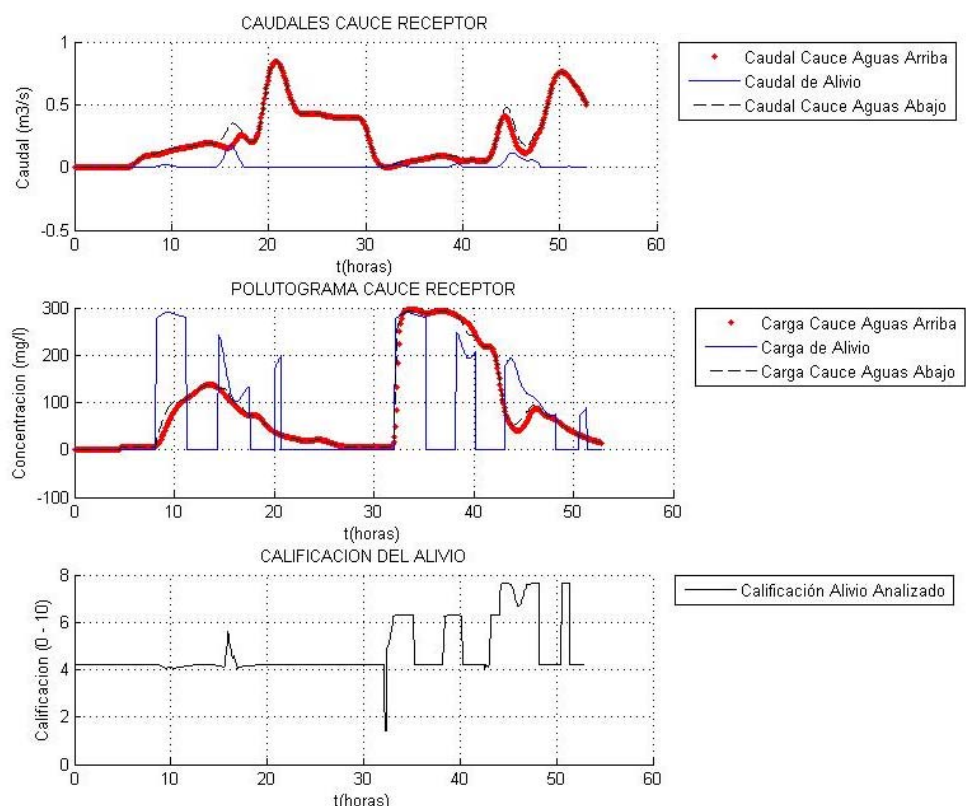


Figura 22. Calificación estructura de alivio 7

Se evaluaron otros escenarios de análisis, donde se realizaron modificaciones tipológicas de la red de alcantarillado, como por el ejemplo, el aumento de capacidad de la tubería efluente de estructuras en las cuales se presentaban alivios continuos en tiempo seco (estructura 5). La evaluación mostró que con estos cambios se aumentó la calificación de dichas estructuras, obteniendo comportamientos satisfactorios de operación y afectación sobre el cauce receptor. Por el contrario, estructuras aguas abajo (estructura 7) de la modificada, presentaron cambios operativos negativos, los cuales se reflejaron en el aumento de porcentaje de alivios en condiciones de tiempo seco, afectación negativa significativa sobre el cauce receptor y sobrecarga en la red; estos factores hicieron que la calificación de la estructura afectada bajara de mala a muy mala, convirtiéndose en una estructura con un comportamiento 100% insatisfactorio.

Los análisis también mostraron que aspectos operativos de las estructuras, tales como alivio de flujos con concentraciones altas de carga contaminante (factores de dilución operativos bajos) pero sin un cambio significativo en la calidad del cauce receptor, la calificación de la estructura no descendía significativamente debido a que la afectación del alivio sobre el cauce receptor era indiferente. Por el contrario, si el cauce traía unas condiciones de calidad relativamente buenas (concentraciones bajas de carga contaminante) antes de la descarga del alivio y las condiciones de operación de la estructura eran similares a las descritas anteriormente, se producía un cambio drástico en la calidad del cauce receptor y por lo tanto la calificación de la estructura descendía considerablemente.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La evaluación de una estructura de alivio depende no solo de sus características tipológicas, sino también de sus parámetros operativos, de la operación de otras estructuras aguas arriba, del estado cualitativo del cauce receptor y del grado de afectación sobre éste.

En la metodología desarrollada se logró involucrar la complejidad de la interacción de las estructuras de alivio con su entorno, así como el conocimiento de expertos, para realizar una evaluación más robusta de su comportamiento.

Se obtuvieron resultados consistentes en la calificación de las estructuras, respecto a los parámetros cuantitativos arrojados por la herramienta y las reglas establecidas para su obtención.

El desarrollo de la herramienta en Matlab/Simulink, con la interacción del software Citydrain y la Lógica Difusa, permitieron elaborar una metodología flexible en la medida de las necesidades, con opción de refinamiento y profundización.

Se encontró que la aplicación de la Lógica Difusa, ayuda a la resolución de sistemas que envuelven definiciones y conocimientos NO estrictamente definidos, la experiencia de expertos, la interacción de varias variables para definir una salida, así como también, a la reducción en la subjetividad y la incertidumbre en la evaluación y toma de decisiones.

Se encontró que la evaluación de aliviaderos de alcantarillados combinados debe realizarse de manera global en el sistema y en tiempos representativos de simulación (por ejemplo en invierno y verano) para que ésta sea más robusta y confiable.

Los parámetros preponderantes, definidos en la calificación del comportamiento las estructuras de alivio fueron las condiciones operativas en tiempo seco y el grado de afectación sobre el cauce receptor.

Los tanques de almacenamiento temporal pueden reducir volúmenes y cargas contaminantes de alivio para eventos leves de lluvia, hasta el punto de eliminar alivios eventuales en tiempo seco, mejorando considerablemente el comportamiento de la estructura.

En la medida en que se establezcan nuevos estándares de calidad ambientales y restricciones en el cauce receptor, se pueden incluir nuevas variables de entrada para la evaluación de la estructura de alivio. La herramienta arroja además de los parámetros establecidos para la calificación, variables tales como volúmenes y cargas totales de alivios para cada evento y su frecuencia de ocurrencia, el factor de tratamiento de la estructura, entre otros, los cuales pueden ser utilizados en investigaciones futuras para efectuar una calificación más robusta de estas estructuras.

Se hace necesario el refinamiento de las funciones de pertenencia de cada variable de entrada y salida, la inclusión de un modelo de calidad en las redes y en el cauce, la evaluación y desarrollo de bloques para cada tipo de estructuras de alivio en Simulink.

Se recomienda la investigación de herramientas como Simulink, CityDrain, Inteligencia Artificial (Lógica Difusa, Algoritmos Genéticos, etc.), para la implementación de modelos de gestión para el análisis, evaluación, calibración, operación en tiempo real de sistemas de drenaje urbano.

BIBLIOGRAFÍA

BLANKSBY, J., (2002). A review of the UK approach to measuring the performance of combined sewer overflows. *Urban Water 4*: 191-198.

BUTLER, D. & DAVIES, J. W. (2000). Urban Drainage. London: E&FN Spon.

CAMACHO, L.A., (2005). Universidad Nacional de Colombia. *Clases de hidrología aplicada y drenaje urbano*. Bogotá.

DEPARTAMENTO TÉCNICO ADMINISTRATIVO DEL MEDIO AMBIENTE DAMA. (2006). Resolución 1813. Colombia.

DEPARTAMENTO TÉCNICO ADMINISTRATIVO DEL MEDIO AMBIENTE DAMA. (1994). Resolución 1074. Colombia.

EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ & I.E.H. GRUCON. (1999). Saneamiento en tiempo seco de los canales Virrey y Arzobispo, control de inundaciones sectores antiguo Country y Héroes. Bogotá.

EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ. I.E.H., GRUCON & SOPRIN (1998). Estudio para la rehabilitación del sistema de alcantarillado. Bogotá.

ERBE, V., RISHOLT, L. P., SCHILLING, W. & LONDONG, J. (2002). Integrated modelling for analysis and optimisation of wastewater systems – the Odenthal case. *Urban Water 4*: 63-71.

HAPURNE, T., (2002). Fuzzy control of urban drainage systems. *Ovidius university annals constructions, Volume 1, number 3, 4*,. Romania.

LAU J., BUTLER, D. & SCHÜTZE, M., (2002). Is combined sewer overflow spill frequency/volume a good indicator of receiving water quality impact?. *Urban Water 4*: 181-189.

MINISTERIO DE AGRICULTURA. (1984). Decreto 1594. Colombia.

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS - 2000. Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y pluviales. Sección II. Título D. Colombia.

NORTHERN IRELAND. Department of the environment. (1995). The urban waste water treatment regulations. Working document for dischargers and regulator. Northern Ireland.

SILVA, L., Diseño de acueductos y alcantarillados. 1ra edición. Bogotá.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. & EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ. (2000). Modelación hidrológica y ambiental de una subcuenca de la ciudad de Bogotá. Bogotá.

UNIVERSITY OF INNSBRUCK - Faculty of civil engineering. Unit of environmental engineering - institute of infrastructure. (2007). Citydrain II manual. Austria.
WATER RESEARCH CENTRE., (1994). Sewerage Rehabilitation Manual. 4th edition. United Kingdom.

WEYAND, M., (2002). Real-time control in combined sewer systems in Germany – some case studies. *Urban Water 4: 347-354.*