



HERRAMIENTAS PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA GESTIÓN DE ALCANTARILLADOS:
PROSPECTIVAS DE IMPLEMENTACIÓN EN LA EAAB

HERRAMIENTAS PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA GESTIÓN DE
ALCANTARILLADOS: PROSPECTIVAS DE IMPLEMENTACIÓN EN LA EAAB



Presentado por:

MARÍA ALEJANDRA PÉREZ PEÑARREDONDA

MARÍA CAMILA PERDOMO GAITÁN

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

JUNIO 2011

Facultad de Ingeniería Civil



Presentado por:

MARÍA ALEJANDRA PÉREZ PEÑARRREDONDA

C.C.: 1.032.395.264 de Bogotá D.C.

MARÍA CAMILA PERDOMO GAITÁN

C.C.: 1.136.880.845 de Bogotá D.C.

Director:

ANDRÉS TORRES

IC, MSc, PhD

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

JUNIO 2011



TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	8
2. GESTIÓN PATRIMONIAL DE ALCANTARILLADOS URBANOS	11
2.1. RECUENTO HISTÓRICO	11
2.1.1. SISTEMAS DE ALCANTARILLADO	11
2.1.2. GESTIÓN PATRIMONIAL.....	13
2.2. PROBLEMAS COMUNES EN TUBERÍAS DE ALCANTARILLADO	15
2.3. DEFINICIONES Y PRINCIPIOS BÁSICOS.....	20
2.4. RETOS Y FUTURO	23
3. HERRAMIENTAS PARA LA TOMA DE DECISIONES	26
3.1. HERRAMIENTAS DE INSPECCIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO	26
3.2. HERRAMIENTAS PROBABILÍSTICAS	31
3.2.1. DISTRIBUCIÓN DE HERZ.....	31
3.2.2. PROGRAMACIÓN LINEAL	33
3.2.3. SERIES DE TIEMPO.....	35
3.2.4. SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA.....	38
3.2.4.1. <i>VARIABLES LINGÜÍSTICAS</i>	38
3.2.4.2. <i>REGLAS DIFUSAS</i>	39
3.2.4.3. <i>PROCESO DEL SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA</i>	39
3.2.4.3.1. Método de Máximos y Mínimos.....	41
3.2.4.3.2. Método de adición difusa	41
3.2.5. SIMULACIÓN DE MONTE CARLO	41
3.2.6. CADENAS DE MARKOV	43

3.3.	HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS	46
3.3.1.	SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).....	46
3.4.	HERRAMIENTAS DE MODELACIÓN	47
4.	MODELOS DE GESTIÓN	49
4.1.	GRUPO 1: MODELOS DE ANÁLISIS DE DESEMPEÑO	49
4.1.1.	MODELO BAIK	49
4.1.1.1.	DESCRIPCIÓN	49
4.1.1.1.1.	Procesos de Cadenas de Markov.....	50
4.1.1.1.2.	Estimación de Probabilidades de Transición.....	50
4.1.1.1.3.	Modelo Probit Ordenado	50
4.1.1.2.	VARIABLES DE ENTRADA.....	53
4.1.1.3.	CASO DE ESTUDIO.....	53
4.1.1.3.1.	Datos Utilizados.....	54
4.1.1.4.	CONCLUSIONES	55
4.1.2.	MODELO BENGASSEM & BENNIS.....	55
4.1.2.1.	DESCRIPCIÓN	55
4.1.2.1.1.	Rendimiento Hidráulico	56
4.1.2.1.2.	Rendimiento Estructural.....	57
4.1.2.2.	VARIABLES DE ENTRADA.....	59
4.1.2.3.	CASO DE ESTUDIO.....	60
4.1.2.4.	CONCLUSIONES	62
4.1.3.	MODELO HASEWAGA	62
4.1.3.1.	DESCRIPCIÓN	63
4.2.	GRUPO 2: HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE DECISIÓN	64
4.3.1.	MODELO AQUA-WERTMIN	64
4.3.1.1.	DESCRIPCIÓN	64



4.3.1.1.1.	Estimación de las Probabilidades de Transición.....	65
4.3.1.1.2.	Función de Transición	65
4.3.1.1.3.	Modelo de Supervivencia	66
4.3.1.2.	VARIABLES DE ENTRADA.....	67
4.3.1.3.	CASO DE ESTUDIO.....	67
4.3.1.4.	CONCLUSIONES	70
4.3.2.	MODELO EDMONTON	71
4.3.2.1.	DESCRIPCIÓN	71
4.3.2.1.1.	MODELO 1: Predecir la clasificación del estado (CE) tuberías del alcantarillado.....	72
4.3.2.1.2.	MODELO 2: predicción de la clasificación de estado futura de la red de alcantarillado basada en las condiciones actuales de valoración.	74
4.3.2.1.3.	MODELO 3: predicción de costos.....	75
4.3.2.2.	VARIABLES DE ENTRADA.....	77
4.3.2.3.	CASO DE ESTUDIO.....	77
4.3.2.4.	CONCLUSIONES	78
4.3.3.	MODELO PRISM	78
4.3.3.1.	DESCRIPCIÓN	78
4.3.3.1.1.	Datos de Entrada.....	78
4.3.3.1.2.	Clasificación de las Tuberías de Alcantarillado	79
4.3.3.1.3.	Determinación de los Factores de Importancia de las Tuberías	80
4.3.3.1.4.	Modelo Lineal para el Sistema Local de Alcantarillado	81
4.3.3.1.5.	Modelo Financiero para Gastos (PRISM)	83
4.3.3.2.	VARIABLES DE ENTRADA.....	85
4.3.3.3.	CASO DE ESTUDIO.....	85

4.3.3.4.	CONCLUSIONES	87
4.3.4.	MODELO KURE-CAD	87
4.3.4.1.	DESCRIPCIÓN	88
4.3.5.	MODELO APOGEE.....	89
4.3.5.1.	DESCRIPCIÓN	89
4.3.	GRUPO 3: HERRAMIENTAS PARA LA GESTIÓN INTEGRAL.....	90
4.3.1.	MODELO CARE-S	90
4.3.1.1.	DESCRIPCIÓN	91
4.3.1.1.1.	Herramientas.....	91
4.3.1.1.2.	Herramienta para indicadores de desempeño	91
4.3.1.1.3.	Condiciones Estructurales	92
4.3.1.1.4.	Rendimiento Hidráulico	93
4.3.1.1.5.	Herramientas Socio-Económicas	93
4.3.1.1.6.	MCD (Soporte de Decisión Multi-Criterio)	94
4.3.1.2.	VARIABLES DE ENTRADA.....	96
4.3.1.3.	CONCLUSIONES	96
4.3.2.	MODELO HYDROPLAN	96
4.3.2.1.	DESCRIPCIÓN	96
4.3.2.1.1.	Procedimiento de Hydroplan	97
4.3.2.2.	VARIABLES DE ENTRADA.....	99
4.3.2.3.	CASO DE ESTUDIO.....	99
4.3.2.4.	CONCLUSIONES	102
4.4.	REQUERIMIENTOS DE APLICACIÓN.....	102
5.	APLICABILIDAD EN LA EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ	105
5.1.	PROCESOS DE GESTIÓN ACTUAL EN LA EAAB	105



5.2.	DESCRIPCIÓN DE DATOS DISPONIBLES DE LA RED DE ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ	
	108	
5.2.1.	DATOS FÍSICOS	108
5.2.2.	DATOS INSPECCIÓN CCTV	110
5.2.3.	DATOS ECONÓMICOS	111
5.3.	PROSPECTIVA DE USO DE HERRAMIENTAS Y MÉTODOS PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA EAAB	112
5.3.1.	APLICABILIDAD DE HERRAMIENTAS BÁSICAS	112
5.3.1.1.	DISTRIBUCIÓN DE HERZ	112
5.3.1.2.	PROGRAMACIÓN LINEAL.....	113
5.3.1.3.	SERIES DE TIEMPO	113
5.3.1.4.	SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA	113
5.3.1.5.	SIMULACIÓN DE MONTE CARLO.....	113
5.3.1.6.	CADENAS DE MARKOV	113
5.3.2.	APLICABILIDAD DE MÉTODOS.....	114
5.3.2.1.	MODELO BAIK.....	114
5.3.2.2.	MODELO BENGASSEN & BENNIS.....	116
5.3.2.3.	MODELO AQUA-WERTMIN	117
5.3.2.4.	MODELO PRISM.....	119
5.3.2.5.	MODELO EDMONTON	120
5.3.2.6.	MODELO CARE-S.....	122
5.3.2.7.	MODELO HYDROPLAN	124
6.	CONCLUSIONES	128
7.	RECOMENDACIONES	131
8.	GLOSARIO.....	133
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	134

1. INTRODUCCIÓN

Las redes de alcantarillado han cumplido históricamente con la función de evacuar las aguas de las ciudades, ya sean provenientes de las precipitaciones atmosféricas, o las residuales generadas por las actividades humanas. Desde la civilización romana, hasta tiempos actuales, se han venido construyendo sistemas de alcantarillado con la misión de garantizar la salud humana con el adecuado transporte de las aguas y la prevención de inundaciones (Read & Vickidge, 1997; Otero, 2006).

La mayoría de ciudades en los países desarrollados poseen redes de alcantarillado cada vez más deterioradas. Esto se puede deber a que el proceso de urbanización (población concentrada en centros urbanos) crece a nivel mundial provocando un efecto negativo en la infraestructura de los sistemas, de manera que en ocasiones las redes son deficientes en el manejo adecuado de las aguas (ONU, 2008). Debido a los altos costos que implica reemplazar dicha infraestructura, se deben tomar acciones enfocadas a la restauración y/o mejoras de éstas para prolongar su vida útil o tiempo de servicio (Ana & Bauwens, 2007).

En tiempos pasados, los trabajos que se realizaban en los sistemas de alcantarillado sólo respondían a situaciones de emergencia, por lo tanto no se aplicaban modelos ni técnicas avanzadas en el proceso de toma de decisiones. Por otra parte, el capital de inversión en rehabilitación y/o mantenimiento de la infraestructura sólo se basaba en experiencias personales, recursos disponibles, prácticas tradicionales, intuición y/o políticas vigentes (Kathula *et al.*, 1999).

En busca de una administración adecuada de las inversiones para el manejo de las aguas residuales y pluviales, se han desarrollado técnicas de gestión patrimonial de alcantarillados urbanos, las cuales garantizan el mantenimiento, evolución y adecuado funcionamiento de las redes (U.S. Department of Transportation, 1999). La toma de buenas decisiones es la clave de una gestión eficiente, que a menudo tienen consecuencias económicas importantes a largo plazo.



Por esta razón existen instrumentos de apoyo que permiten mejorar la precisión de las decisiones (Shegad-Eldeen & Moselhi, 2000; Vanier, 2001; NSW Asset Management Committee, 2003).

Para el desarrollo de una adecuada gestión patrimonial de redes de alcantarillado es necesario conocer el estado actual de los bienes a gestionar. Hoy en día se reconoce que es necesario desarrollar e implementar métodos para la gestión de dichos hidrosistemas, debido a que la infraestructura del alcantarillado se deteriora a medida que envejece, por causa de la corrosión, abrasión, fatiga, demanda excesiva, mal uso, gestión inadecuada y otros factores producidos en el tiempo (Ariatman & MacLeod, 1998; Stapelberg, 2006; Ana & Bauwens, 2007; Le Gauffre *et al.*, 2007).

Desde las últimas décadas del siglo pasado se han venido desarrollando en países de Norte América, Europa y Asia herramientas para el soporte en la toma de decisiones, o lo que en inglés se conoce como *decision-support tools* (DST) para la gestión patrimonial de alcantarillados urbanos. Estas herramientas se agrupan de la siguiente forma de acuerdo a sus funciones en la gestión de alcantarillados (Ana & Bauwens, 2007): (i) De análisis de desempeño: tratan de evaluar o modelar las condiciones estructurales e hidráulicas de la red, y predecir dichas condiciones de tal forma que se puedan programar actividades de inspección, rehabilitación y/o renovación; (ii) De análisis de decisión: integra las fases de recopilación de información, modelación de desempeño y estrategias de gestión; (iii) Para la gestión integral: involucra todas las fases de la gestión, teniendo en cuenta tecnologías apropiadas, implementación y monitoreo.

En Colombia, las redes de alcantarillado son relativamente recientes: el actual sistema de alcantarillado de Bogotá corresponde a la implementación del “Plan maestro” de 1960 (EAAB, 2007). Durante muchos años, los esfuerzos de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) no estuvieron enfocados en la gestión patrimonial de la infraestructura existente sino en la ampliación de ésta (Jiménez & Valderrama, 2002; EAAB, 2007).

La EAAB inició hace aproximadamente 20 años la inspección de las redes de alcantarillado, más con la intención de encontrar problemas puntuales urgentes ya existentes como obstrucciones, conexiones erradas y otras alteraciones en las redes o estructuras, que para recopilar información como soporte en la toma de decisiones para su gestión (EAAB, 2007).

En nuestro medio, la toma de decisiones en la gestión patrimonial de alcantarillados no se basa principalmente en métodos derivados de las DST. Es probable que lo anterior se deba al

desconocimiento de estos métodos, a la poca aplicabilidad de parte de éstos y/o a la falta de desarrollo de métodos DST propios.

A manera de contribución a la solución de la problemática anteriormente expuesta, este trabajo busca revisar y describir los diferentes métodos y herramientas que sirven como soporte para la toma de decisiones en la gestión patrimonial de alcantarillados urbanos, y analizar su aplicabilidad en la EAAB, de acuerdo con los datos disponibles y los requeridos por cada modelo de gestión.

Este documento contiene ocho capítulos. En el Capítulo 2, denominado Gestión Patrimonial, se hace un breve recorrido por la historia de los sistemas de alcantarillado y la gestión patrimonial a lo largo de las diferentes ciudades del mundo, seguida por los daños típicos que sufren las redes de alcantarillado, que deben ser atendidas y previstas por la gestión patrimonial. Luego, se explican los conceptos básicos utilizados en gestión de alcantarillados, para finalmente mostrar los retos y el enfoque que esta actividad tendrá en un futuro a nivel internacional. En el Capítulo 3, llamado herramientas para la toma de decisiones, se presentan diferentes tipos de herramientas que son utilizadas por los modelos del Capítulo 0 como apoyo en la toma de decisiones en la gestión de alcantarillados. Estas herramientas pueden ser: de inspección, probabilísticas, estadísticas, informáticas, hidráulicas, hidrológicas, de transporte de sedimentos y contaminación urbana. En el Capítulo 4, se revisan los modelos de cada grupo de gestión en la toma de decisiones, haciendo una descripción básica del funcionamiento de éstos, teniendo en cuenta las variables de entrada que requiere cada uno para su funcionamiento y los casos de aplicación. En el Capítulo 5, se describe el proceso en la toma de decisiones en la EAAB; además, se analiza la viabilidad de aplicación de cada uno de los modelos en la Empresa, de acuerdo con los datos disponibles y los requeridos por cada uno de éstos. Finalmente, en los Capítulos 6 y 7 respectivamente se proponen las conclusiones y recomendaciones producto del presente trabajo sobre las herramientas para la toma de decisiones en la gestión patrimonial de alcantarillados urbanos. En el Capítulo 8 se encuentran la bibliografía utilizada a lo largo del trabajo.



2. GESTIÓN PATRIMONIAL DE ALCANTARILLADOS URBANOS

Debido a los altos costos que implica reemplazar infraestructura que se encuentra en un estado de falla, se deben tomar acciones enfocadas a la rehabilitación preventiva y/o mejoras de dicha infraestructura para prolongar su vida útil. Este proceder es conocido como gestión patrimonial (Ana & Bauwens, 2007).

2.1. RECUENTO HISTÓRICO

2.1.1. SISTEMAS DE ALCANTARILLADO

En el año 312 A.C los romanos fueron pioneros en la creación de Cloacas Máximas las cuales se consideraban redes de alcantarillado, utilizadas para la evacuación de las aguas lluvias y de desperdicios (Read & Vickidge, 1997; Otero, 2006), esta práctica se extendió a Estados Unidos y a ciudades en diferentes países del mundo con la misma intención (Metcalf & Eddy, 1981). Pero no fue sino hasta el siglo XIX que las ciudades retomaron con mayor importancia el uso de redes de alcantarillado, debido a la propagación de la epidemia del cólera en Europa y Asia como consecuencia de la contaminación del agua y los residuos sólidos en las ciudades (Conlima, 2000). Y fue así como en 1815, 1833 y 1880 en Londres, Boston y París respectivamente empezaron a arrojar las excreciones humanas a las alcantarillas para su adecuada evacuación y así prevenir la transmisión de enfermedades (Metcalf & Eddy, 1981; Ellis & Bertrand-Krajewski, 2010).

Estos sistemas de alcantarillado no mostraron ningún tipo de avance en sus proyectos de construcción hasta que en el año de 1842 en Hamburgo (Alemania) ocurrió un gran incendio que destruyó el 40 % de la ciudad, por lo cual se inició un completo plan de reconstrucción que incluía el diseño de un nuevo y completo sistema de alcantarillado. Éste se elaboró de acuerdo a las condiciones topográficas, las necesidades de los ciudadanos y a las teorías sobre el diseño del

mismo las cuales se manejan aún en la actualidad (Metcalf & Eddy, 1981; Ellis & Bertrand-Krajewski, 2010).

En Londres, hasta 1845 no se contaba con información suficiente para aplicar los conceptos desarrollados en Alemania, ya que las redes de alcantarillado en funcionamiento en esa época no habían sido planificadas adecuadamente, el empalme de las redes era complicado debido a la diferencia de cotas y a que las tuberías de gran tamaño desembocaban en unas de menores diámetro. Pocos años después, en 1848, el cólera volvió a aparecer, lo que llevó a los londinenses a crear un adecuado sistema de recolección de aguas residuales (Metcalf & Eddy, 1981).

A principios del siglo XIX en Estados Unidos los trabajos de recolección de aguas residuales se hacían individualmente por los habitantes de cada ciudad, asumiendo los costos y sin tener ningún tipo de intervención pública. Las alcantarillas más antiguas tenían grandes diámetros en toda su longitud, pendientes con dirección opuesta a la que deberían tener y se encontraban acumulaciones de sólidos que luego se descomponían y ocasionaban enfermedades en la comunidad por el flujo de aguas contaminadas (Metcalf & Eddy, 1981).

En Colombia, al igual que en los demás países, el uso de redes de alcantarillado se remonta al siglo XIX, donde crecientes ciudades como Bogotá, Barranquilla y Medellín conducían el agua por medio de canales rudimentarios, con revestimientos o cubiertas de lajas de piedra, lo que se mantuvo hasta las primeras décadas del siglo XX, época en la cual el país empezó a tener un crecimiento económico considerable en diferentes sectores industriales como por ejemplo, el mercado agrícola con el comercio y transporte de los productos. Esto hizo que la demanda demográfica aumentara y con ello la necesidad de tener mejores sistemas de saneamiento (CRA, 2001). Sin embargo, no se realizaron inmediatamente mayores desarrollos en este campo, pese a que empresas extranjeras tenían estudios para su construcción, por lo que se mantuvo el sistema de evacuación de aguas residuales por medio de caños abiertos por el centro de las calles como en el tiempo de la colonia. Fue en Medellín en donde se tomó la decisión en 1888 de separar las aguas lluvias de las residuales, y en 1913 se empezó a instalar tuberías (CRA, 2001). Sin embargo, las ciudades no contaron con un adecuado sistema de alcantarillado sino hasta la década de 1950.



2.1.2. GESTIÓN PATRIMONIAL

La construcción de diferentes tipos de infraestructura ha sido, durante años, la manera de mejorar la calidad de vida del hombre. La vida útil de estas estructuras depende de variables propias de cada una como: tipo de material, uso, naturaleza del entorno, condiciones físicas y sobretodo la cantidad y calidad del mantenimiento que se le realice (Read & Vickidge, 1997).

La palabra “activo” se deriva del latín “ad satis”, que significa suficiencia. El término “gestión de activos” o “gestión patrimonial” fue utilizado por primera vez en el sector bancario, para describir una práctica de inversión que genera los mayores beneficios a los inversionistas por medio de los movimientos adecuados del capital (Gross, 2004; CDM, 2006). En ingeniería, la palabra “Gestión de Activos” fue adoptada durante la privatización de los servicios públicos de agua en Gran Bretaña en la década de 1980, debido a la creciente preocupación causada por los grandes colapsos ocurridos en las redes de alcantarillado desde finales de la década de 1950, ver por ejemplo Figura 2.1 (Read & Vickidge, Sewer Rehabilitation a new Construction Repair and Renovation, 1997; CDM, 2006; Too & Tay, 2008).



Figura 2.1: Colapso de sistema de alcantarillado, calle Fylde, Fernworth, Lancashire, Gran Bretaña (Bolton History Centre, 1957).

Sin embargo, en sus comienzos, el Departamento de Medio Ambiente del Reino Unido se centró en el diseño y construcción de nuevos sistemas de alcantarillado y no en la posible rehabilitación de los existentes, debido a la creciente demanda de suministro y recolección de agua en las ciudades (Read & Vickidge, 1997). En 1997, se realizó una evaluación del estado de las redes de

alcantarillado a nivel nacional, con la cual se determinó que existían serios problemas de negligencia en el cumplimiento del servicio, además de arrojar altas cifras en cuanto a los fondos utilizados en la renovación de las tuberías deterioradas. Por esta razón, la industria se vio obligada a desarrollar estrategias para ampliar de manera significativa la vida útil del sistema existente con la eficaz y oportuna inversión del dinero disponible (Read & Vickidge, 1997; IPWEA, 2006).

En el pasado, los trabajos realizados en los sistemas de alcantarillado eran respuesta a situaciones de emergencia, por lo que los gastos no eran previstos ni manejados con eficiencia. Entonces, la ingeniería tenía claro que para hacer un adecuado uso de los recursos, necesitaba de la planificación dirigida hacia un enfoque preventivo, dando lugar a actividades de reparación, renovación y reemplazo de tuberías en los sistemas (Read & Vickidge, 1997). El comienzo de esta planificación estratégica en rehabilitación para el Reino Unido se marcó con la primera edición del *SRM-Sewer Rehabilitation Manual* (Manual de rehabilitación de alcantarillado) en 1984 (CDM, 2006).

La aparición de problemas similares a lo largo del mundo en países como Australia y Estados Unidos dio lugar a una mayor conciencia de la necesidad de un control de gestión eficaz para los sistemas de alcantarillado y por ende a estrategias de mantenimiento y rehabilitación apropiadas para cada lugar en particular, según sus características (Read & Vickidge, 1997). De esta manera, se emitieron normas y manuales de gestión para cada país de acuerdo a sus condiciones específicas.

En Australia la “gestión de activos” en obras públicas tuvo su aparición en 1993, con la publicación de la Norma Internacional de Contabilidad, *Australian Accounting Standard 27* (AAS27) (IPWEA, 2006; CDM, 2006), en la que se define la gestión patrimonial como “un proceso sistemático y estructurado que abarca toda la vida de un activo” (ANAO, 1996). Esta iniciativa logró que la gestión de activos de infraestructura, IAM por sus siglas en inglés, se convirtiera en un sector independiente y reconocido del sistema gubernamental australiano.

En Estados Unidos, el interés en la gestión de activos se desarrolló de manera importante desde comienzos de la década de 1990, después de reconocer que las acciones presentes en una estructura, pueden afectar la vida útil y el costo de esta en el futuro (CDM, 2006). En 1990, dicho interés alcanzó tal importancia que se creó la Oficina de Gestión Activos, que patrocinaba la



gestión de infraestructuras. Finalmente, en 1999 la Junta de Normas de Contabilidad Gubernamental emitió la Declaración 34 (GASB34), norma similar en muchos aspectos a la norma australiana, AAS27 (CDM, 2006). Luego, a comienzos del año 2001, la Agencia de Protección Ambiental publicó un proyecto de normas conocido como CMOM (capacidad, gestión, operación y mantenimiento), las cuales regulaban el funcionamiento de los sistemas de aguas residuales y agua potable, además de ser las primeras normas que sugerían la implementación de programas de gestión de activos dentro de los departamentos de obras públicas (CDM, 2006). Sin embargo, este proyecto no ha sido oficialmente implementado, debido a diferentes demoras en su aprobación por la EPA (San Francisco Bay Regional Water Quality Control Board, Bay Area Clean Water Agencies, 2005; CDM, 2006). Por esta razón, varios estados de Estados Unidos han decidido implementar programas propios de gestión patrimonial de acueductos y alcantarillados urbanos.

2.2. PROBLEMAS COMUNES EN TUBERÍAS DE ALCANTARILLADO

Los problemas en la gestión patrimonial de las redes de alcantarillado se ven directamente relacionados con el crecimiento poblacional, el mantenimiento inapropiado y recientemente por el cambio climático (Ellis & Bertrand-Krajewski, 2010). Debido a esto, se ve la necesidad de un trabajo continuo de prevención, especialmente en las estructuras de regulación, para evacuar las aguas residuales y los residuos sólidos, y de esta manera evitar que se vea afectada la salud de la comunidad y garantizar el buen funcionamiento de la red (Metcalf & Eddy, 1995; Ellis & Bertrand-Krajewski, 2010).

Los problemas que se pueden presentar en una red de alcantarillado podrían ser (UNATSABAR, 2005):

- **Obstrucciones:** éstas se pueden formar por: (i) Grasas: las cuales cuando llegan a la red se endurecen y forman trabas; (ii) Trapos, plásticos y vidrios: estos materiales son arrojados a las cámaras de inspección ocasionando atascos en la tubería; (iii) Raíces: el crecimiento de éstas penetran la tubería y causan el daño total (Figura 2.2) y (iv) Arenas y piedras: éstas se encuentran en las calles y son arrastradas a las redes provocando dificultades en la tubería.

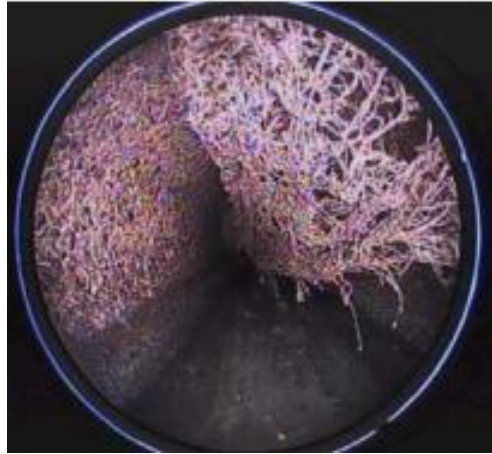


Figura 2.2: Obstrucciones por crecimiento de raíces (Bäckman *et al.*, 2005).

- Pérdida de capacidad: se debe a la acumulación de sedimentos los cuales forman una capa en la red (ver Figura 2.3) y se da generalmente en los tramos de poca pendiente o bajo caudal.



Figura 2.3: Pérdida de capacidad (Bäckman *et al.*, 2005).

- Roturas: también se le llaman fallas (ver Figura 2.4) y se pueden dar por: (i) soporte inapropiado del tubo: esto se presenta cuando el apoyo de la tubería se hace sobre un material no homogéneo como por ejemplo en un fondo rocoso, (ii) fallas debidas a las cargas vivas: se da por el recubrimiento inapropiado o insuficiente que se le hace a la tubería, (iii) movimiento del suelo: ocurre por fenómenos naturales como por ejemplo un sismo o asentamientos, (iv) daños causados por otro tipo de infraestructura urbana: se presenta cuando empresas que prestan otros servicios intervienen para colocar sus líneas causando con ello daño en la red de alcantarillado y (v) raíces: cuando éstas crecen considerablemente llegan a romper la tubería.



Figura 2.4: Rotura (Bäckman *et al.*, 2005).

- Vandalismo: esto se presenta por los problemas sociales de la comunidad y se reconocen porque las tapas de las alcantarillas son retiradas (Figura 2.5) ocasionando con frecuencia la obstrucción en las tuberías.



Figura 2.5: Vandalismo (Fundición Industrial Potosina, 2010).

- Conexiones cruzadas con pluviales: se hacen de manera escondida (Figura 2.6) y lo que provoca es que al momento de que empiezan las lluvias las alcantarillas se rebosan ocasionando problemas de salud, seguridad e inundaciones.



Figura 2.6: Conexiones cruzadas con pluviales (Bäckman *et al.*, 2005).

- **Infiltración:** es el agua que entra a la red de alcantarillado por tuberías dañadas entre los elementos de la red y las paredes de los pozos de inspección como se puede ver en la Figura 2.7. Esta infiltración depende de las características geotécnicas, la cantidad de aguas lluvias y la permeabilidad (Metcalf & Eddy, 1995).

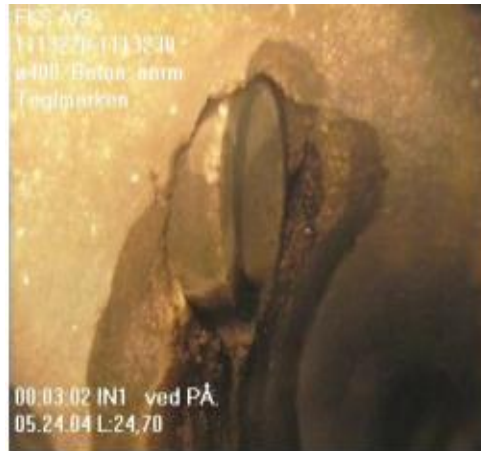


Figura 2.7: Infiltración (Bäckman *et al.*, 2005).

- **Aportaciones incontroladas:** es el agua que viene del drenaje de los sótanos, cimentaciones, circuitos de refrigeración y de zonas pantanosas o manantiales (Figura 2.8) (Metcalf & Eddy, 1995).

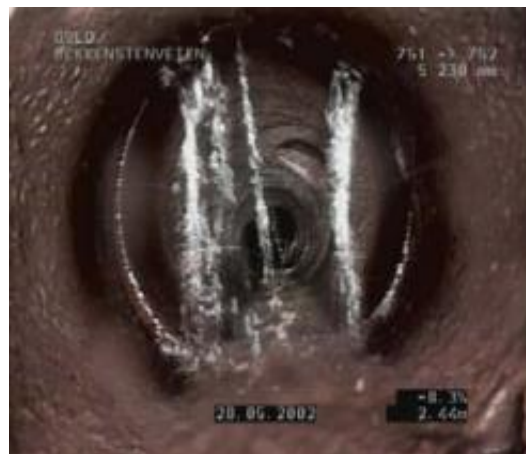


Figura 2.8: Aportaciones incontroladas (Bäckman *et al.*, 2005).

- **Corrosión:** se produce por la degradación de la materia orgánica y es relevante en tuberías de concreto, asbesto-cemento, hierro o acero, solubles en ácido ya que pueden llegar a la falla (Figura 2.9). Este proceso es peor en condiciones donde la pendiente es baja ya que se dan velocidades bajas, largos tiempos de retención, poca ventilación y temperaturas altas (López Cualla, 2003).



Figura 2.9: Corrosión (Bäckman *et al.*, 2005)

- Deformaciones: se presenta cuando hay un cambio en la forma de la tubería en relación con una condición inicial de la misma, como se puede ver en la Figura 2.10. Tiene las siguientes características. (i) vertical: cuando la altura de la tubería se ha reducido, (ii) Horizontal: el ancho de la tubería se reduce, (iii) Punto de deformación: cuando se presenta en un punto en específico de la tubería (Bäckman *et al.*, 2005).

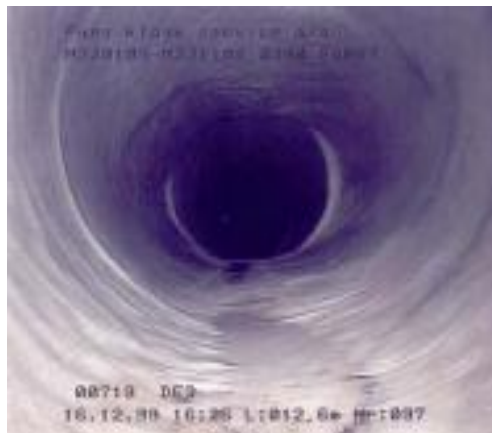


Figura 2.10: Deformaciones (Bäckman *et al.*, 2005).

La principal dificultad para atender los anteriores problemas es cubrir todos los costos que esto representa para una ciudad, ya que los recursos disponibles para el buen funcionamiento del sistema de abastecimiento y saneamiento son escasos. Pese a que la meta de todo gobierno es mejorar la prestación de dichos servicios, aún este sistema no cuenta con un adecuado proceso de gestión que garantice un buen funcionamiento (Organización Mundial de la Salud, 1995). Por esta razón, la gestión de las redes de alcantarillado debe estar enfocada a un rendimiento integral de los sistemas que comprenda todos los aspectos importantes, como: técnicos, comerciales y financieros.

2.3. DEFINICIONES Y PRINCIPIOS BÁSICOS

Los sistemas de infraestructura representan considerables cantidades de capital que se invierten cada día en pro del desarrollo de las ciudades (Ana & Bauwens, 2007). Durante años, se descuidó el mantenimiento de los sistemas actuales, debido a la creciente iniciativa de invertir en nuevas estructuras, lo que ha causado grandes colapsos en los sistemas antiguos de las ciudades (Ariaratnam & MacLeod, 2002). Por esta razón, las organizaciones, tanto públicas como privadas, se han visto en la obligación de considerar la maximización de la vida útil de las estructuras y por ende la eficiencia de las inversiones realizadas con ese fin (Too & Tay, 2008).

La gestión patrimonial es conocida como el proceso mediante el cual se garantiza el mantenimiento, evolución y funcionamiento de un bien de manera eficaz; combinando principios de ingeniería con buenas prácticas comerciales y teorías de economía (U.S. Department of Transportation, 1999), dando así un enfoque lógico al proceso de toma de decisiones en la planificación del manejo, a corto y largo plazo de una estructura (FHA, AASH, 1996). La gestión de activos debe analizar las ventajas y desventajas económicas entre diferentes alternativas y estrategias de inversión durante la vida útil de un bien, teniendo en cuenta el impacto producido (Too & Tay, 2008).

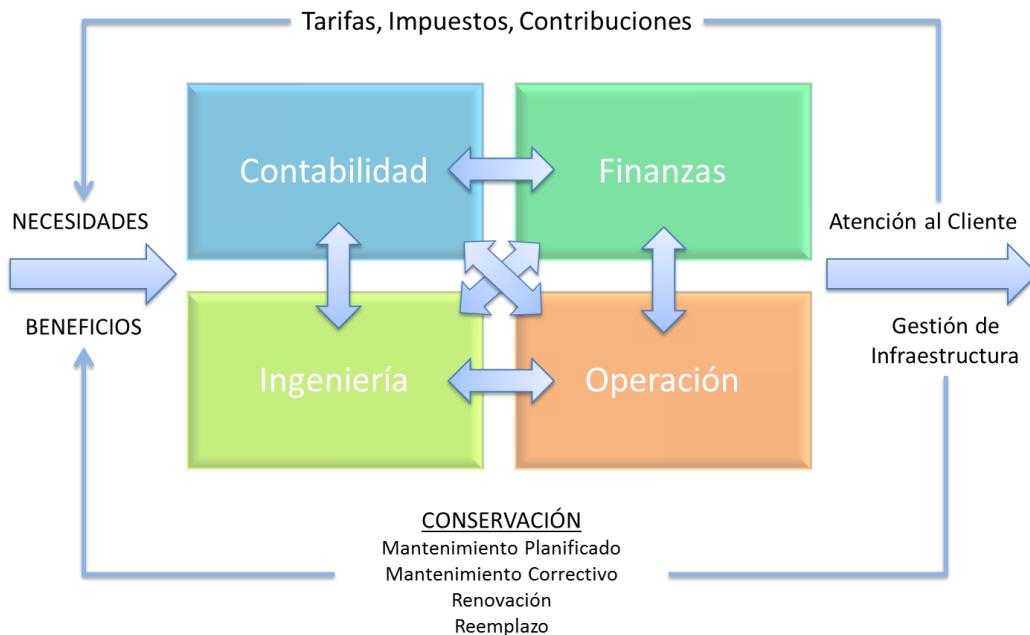


Figura 2.11: Configuración de un sistema de gestión patrimonial (modificado de CDM, 2006).



Para entender mejor el concepto de gestión patrimonial, la *Construction Design Management* (CDM) ha desarrollado un diagrama de la configuración de este proceso (ver Figura 2.11). El cliente o usuario tiene necesidades y paga dinero a organizaciones para satisfacerlas. Este dinero es visto como el presupuesto de las empresas para la administración de los bienes, puesto que los ingresos pagan el costo de la ingeniería, operación, y demás actividades sobre la infraestructura, necesarias para garantizar una adecuada prestación de los servicios al público (mantenimiento, renovación, reemplazo). Estos servicios dependen de la infraestructura, la cual tiene un valor de acuerdo a su condición y/o vida útil restante, por lo tanto la óptima preservación de estos bienes ofrece a los usuarios o clientes el máximo retorno sobre la inversión, lo que se convierte en el centro de los programas de gestión patrimonial de las organizaciones (CDM, 2006).

Con el fin de optimizar la eficiencia y productividad de los sistemas de manera continua, la gestión de activos debe tener características tales como (U.S. Department of Transportation, 1999): (i) Estar centrada en el cliente; (ii) Tener en cuenta un panorama a largo plazo; (iii) Ser accesible, fácil de usar y flexible.

En general, la infraestructura de alcantarillado se deteriora a medida que envejece, debido a la corrosión, abrasión, fatiga, demanda excesiva, mal uso, gestión inadecuada y otros factores producidos en el tiempo (Ariaratnam & MacLeod, 2002; Stapelberg, 2006). Algunas ciudades cuentan con sistemas de alcantarillado que han funcionado durante varias décadas, algunos de ellos por falta de mantenimiento, deben ser rehabilitados constantemente. Debido a que la mayor parte de las redes de alcantarillado se encuentran bajo tierra, con frecuencia, son tenidas en cuenta tan sólo en situaciones de falla o emergencia y no de manera preventiva, lo que representa sobrecostos en la rehabilitación, causados por la generación de costos indirectos, como las interrupciones del servicio, daños a propiedades vecinas y entorpecimientos en el tráfico de la ciudad (ANAO, 1996; Kathula *et al.*, 1999; Stone *et al.*, 2002). Por esta razón, se hace necesaria la planeación de actividades de inspección, limpieza y reemplazo de las tuberías de manera oportuna, es decir, antes de presentar un estado de emergencia (bloqueo total, rompimiento, etc.).

Puesto que el mantenimiento de estos sistemas de manera preventiva puede evitar una gran inversión en rehabilitación, en los últimos años, las entidades han desarrollado diferentes metodologías de planificación, en busca de optimizar los recursos utilizados, prolongando el tiempo de servicio de las estructuras, teniendo en cuenta las necesidades proyectadas para

asegurar su adecuada operación (Kathula *et al.*, 1999). Estas metodologías son basadas en sistemas de gestión patrimonial de alcantarillado, que mediante la oportuna información del estado de las redes, permiten una mejor toma de decisiones en la administración de los sistemas (Ana & Bauwens, 2007).

Los sistemas de gestión patrimonial están fundamentados en bases de datos, inventarios del estado de los bienes, modelos matemáticos y otros instrumentos de análisis (Too & Tay, 2008). El costo total de la administración de los sistemas durante su tiempo de servicio se está convirtiendo en el factor más importante a la hora de tomar decisiones de inversión (National Audit Office, 2005). Este costo incluye la planificación, diseño, adquisición, instalación, operación, mantenimiento y renovación de los bienes (AS/NZS 4536, 1999). Este enfoque estratégico es importante, puesto que tiene en cuenta una visión a largo plazo del rendimiento y costo de la infraestructura, además de analizar los impactos presentes y futuros a la comunidad. Lo que genera un mayor valor al sistema y la satisfacción general de los usuarios (U.S. Department of Transportation, 1999). Los sistemas de gestión proporcionan fácil acceso a los datos cuantitativos y cualitativos, permitiendo a los tomadores de decisiones la fácil identificación de los asuntos prioritarios.

Cada sistema de recolección de aguas residuales es diferente, las características de cada uno determinan la estructura de un plan de gestión y por ende de los sistemas de gestión (San Francisco Bay Regional Water Quality Control Board, Bay Area Clean Water Agencies, 2005). Factores como el estado de las tuberías, los materiales, la historia de las prácticas de gestión y otros aspectos, deben ser tenidos en cuenta.

En general, un sistema de gestión patrimonial de alcantarillados, requiere (San Francisco Bay Regional Water Quality Control Board, Bay Area Clean Water Agencies, 2005):

- Estándares mínimos para determinar los objetivos de gestión
- Organización de personal, cadena de mando y comunicaciones
- Plan de respuesta de emergencia
- Control de ejecución de diseños, instalación y normas de inspección de sistemas de alcantarillado
- Lineamientos de la capacidad de gestión
- Plan de seguimiento de las actividades de gestión



Para que la gestión de activos sea eficiente, debe desarrollar un papel estratégico, teniendo un enfoque proactivo (Best *et al.*, 2003), es decir, debe prever las necesidades futuras de los sistemas e intervenirlos antes del estado de falla. Por esta razón, se deben establecer políticas de gestión basadas en el nivel de servicio y operación que se ajuste a los necesidades futuras de las poblaciones servidas (IPWEA, 2006).

2.4. RETOS Y FUTURO

La mayoría de las economías industrializadas, en los últimos años, enfrentan grandes retos en lo que se refiere a la construcción y gestión de bienes de infraestructura (Too & Tay, 2008). Las exigencias de los consumidores se basan principalmente en la búsqueda de un mejor nivel de servicio. Por esta razón, el principal objetivo de los gestores debe ser identificar la forma más rentable de garantizar un servicio de alta calidad a los usuarios (Institute for Public Policy Research, 2001), de manera que se reduzcan los costos de operación y aumente la capacidad y fiabilidad de los sistemas.

Debe existir un cambio de filosofía en la concepción de gestión, que permita a los tomadores de decisiones analizar cada acción de operación y mantenimiento de las estructuras a corto, mediano y largo plazo (Norman H. & Lemer, 1998).

La gestión patrimonial representa en sí un gran reto para los directores de las empresas de servicios públicos, debido a que prestar los servicios adecuadamente ya es un desafío (CDM, 2006). Por lo tanto, lograr la aplicación de los programas de gestión involucra una percepción mucho más amplia de los objetivos de las empresas a corto, mediano y largo plazo.

Algunas de las dificultades que deben ser superadas por las empresas prestadoras del servicio, con el fin de ejecutar un adecuado plan de gestión, son (MIAM, 2003):

- Se requieren datos de estado y mantenimiento de los elementos que componen el sistema
- No existen normas de valoración y evaluación de las condiciones de los bienes
- Son necesarias herramientas rentables (no invasivas y no destructivas) de inspección y valoración del estado actual de los sistemas
- Algunos softwares existentes demandan gran cantidad de datos de entrada, que en ocasiones, no son de fácil acceso para las ciudades

- Un plan de gestión de activos, a corto plazo, puede aumentar los costos de operación de los sistemas; el ahorro tan sólo se puede observar a largo plazo.

En el proceso de gestión, las empresas se ven en la obligación de tomar decisiones que se tornan difíciles si no están bien argumentadas, debido a las consecuencias económicas importantes a largo plazo que implican. Por esta razón existen instrumentos de apoyo que permiten mejorar la precisión de las decisiones (Ana & Bauwens, 2007). En países de Norte América, Europa y Asia se han venido desarrollando herramientas para el soporte en la toma de decisiones, o lo que en inglés se conoce como *Decision-Support Tools* (DST), para la gestión patrimonial de alcantarillados urbanos. Estas herramientas se clasifican de acuerdo a las fases de gestión que involucran, como se puede ver en la Figura 2.12 (Ana & Bauwens, 2007):

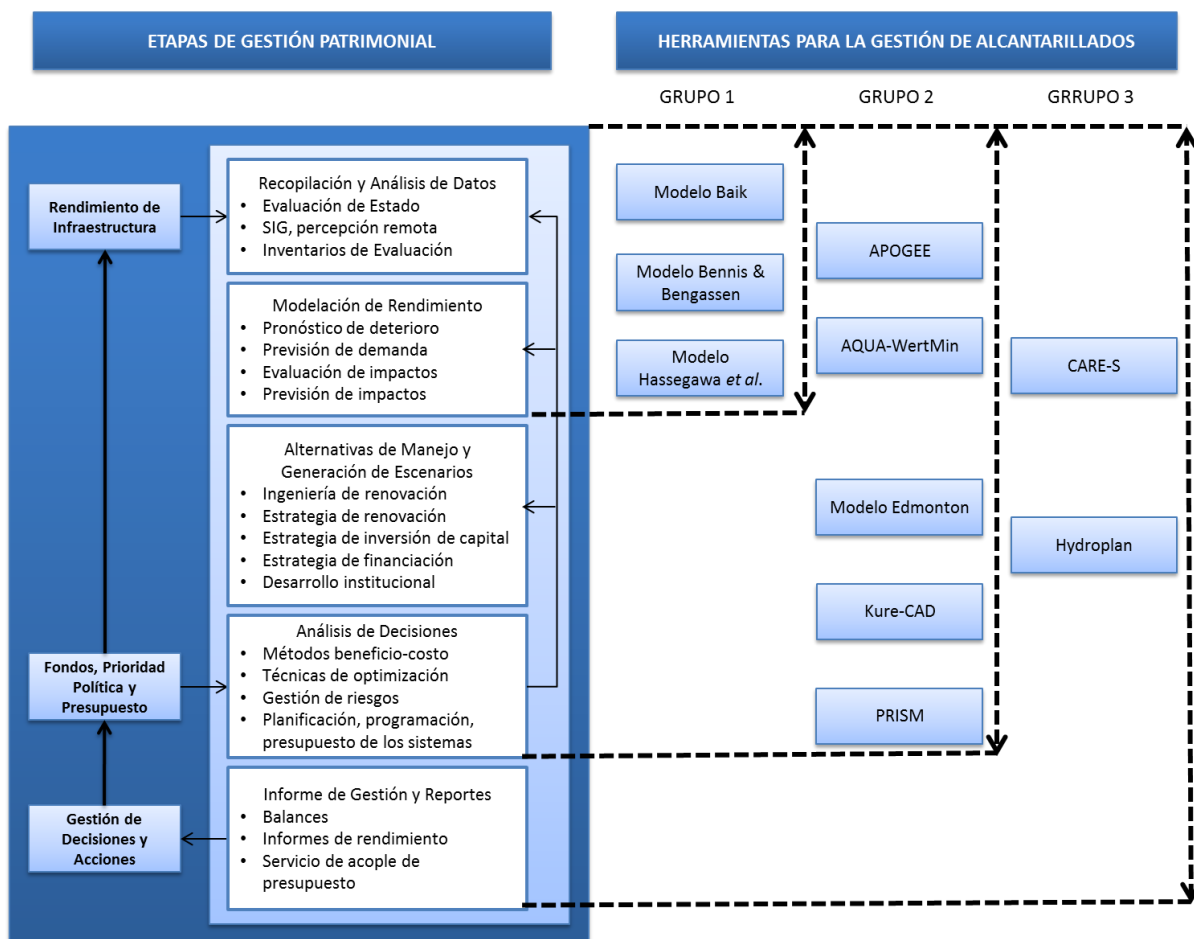


Figura 2.12: Etapas en la gestión patrimonial y herramientas (adaptado de Ana & Bauwens, 2007).



En la Figura 2.12 se muestran las herramientas clasificadas en tres grupos de acuerdo a las etapas de gestión a las que responden. A continuación se describe cada uno de estos:

- Grupo 1: Herramientas de análisis de desempeño, evalúan o modelan las condiciones estructurales e hidráulicas de la red, y predicen dichas condiciones de tal forma que se puedan programar actividades de inspección, rehabilitación y reemplazo.
- Grupo 2: Herramientas de análisis de decisión, integra las fases de recopilación de información, modelación de desempeño y estrategias de gestión.
- Grupo 3: Herramientas para la gestión integral, involucra todas las fases de la gestión, teniendo en cuenta tecnologías apropiadas, su implementación y monitoreo.

El uso de las DST cada vez se torna más importante entre los departamentos de gestión de alcantarillados urbanos, debido a la necesidad de una mayor transparencia en la toma de decisiones (Stone *et al.*, 2002). El uso de este tipo de herramientas, trae diferentes ventajas a los tomadores de decisiones y sus departamentos, tales como:

- Las decisiones tomadas y sus motivos pueden ser entendidas por las demás personas, involucradas o no en el proceso
- Equilibra las necesidades e intereses, proporcionando un marco coherente en la toma de decisiones
- Crea un registro con el cual se pueden tomar mejores decisiones para periodos de operación posteriores.

Por lo tanto, en miras hacia el futuro, un programa de gestión patrimonial deberá estar soportado en DST. Puesto que la toma de decisiones basadas en datos fiables y sólidos, principios de ingeniería y teniendo en cuenta los aspectos presupuestales de una ciudad, beneficia de manera considerable a los planes de gestión, debido a la optimización de los recursos y bienes (Vanier, 2001).

3. HERRAMIENTAS PARA LA TOMA DE DECISIONES

La toma de decisiones en gestión patrimonial de alcantarillados urbanos está soportada en diferentes tipos de herramientas como por ejemplo de tipo probabilísticas, estadísticas, informáticas, hidrológicas, hidráulicas, de contaminación urbana, impacto ambiental y transporte de sedimentos, las cuales será explicadas a continuación.

3.1. HERRAMIENTAS DE INSPECCIÓN DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO

La inspección de alcantarillados consiste en el reconocimiento de las condiciones físicas de la superficie interna y externa de las paredes de la tubería y el relleno sobre el que se encuentra la infraestructura (Makar, 1999) como las condiciones estructurales e hidráulicas del sistema.

Para lograr un adecuado proceso de evaluación de las redes de alcantarillado, los métodos de inspección deben cumplir con los siguientes criterios (Wirahidikusumah *et al.*, 1998):

- La información que proporciona cada herramienta debe ser precisa y confiable.
- La elección de la herramienta de inspección a utilizar debe tener en cuenta la eficiencia y economía en su implementación.
- La herramienta de inspección que se utilice no debe causar daño estructural a la red.
- Al momento de realizar la inspección, ésta no debe interrumpir el funcionamiento del sistema.
- Cada herramienta debería tener una amplia gama de aplicaciones. Para obtener mejores resultados, cada una de las herramientas debe ser de fácil manejo para los operadores.

En la actualidad existen diferentes métodos para la realización de este tipo de inspecciones. A continuación en la Tabla 3.1 se nombran los métodos más utilizados (Wirahidikusumah *et al.*, 1998):



Tabla 3.1: Herramientas de inspección de sistemas de alcantarillado (Los Autores).

MÉTODO		DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS	REFERENCIAS
Inspección Visual		Inspección directa por medio de registro fotográfico. Examina condición de las paredes de la tubería.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Realiza diagnóstico estructural de toda la tubería. 2. Evalúa toda la longitud del alcantarillado. 3. Menos costos que el sistema CCTV convencional. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Seguridad antes y durante la inspección de la persona encargada de hacer el reconocimiento visual. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (Wirahidikusumah <i>et al.</i> 1998) <p>Descripción completa.</p>
Sistema de Circuito cerrado de Televisión CCTV	Convencional	Inspección mediante cámara de televisión y monitor. Información grabada en archivos de video. Examina condición de las paredes de la tubería.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Evalúa toda la longitud del alcantarillado. 2. Relativamente más económico con relación a las demás herramientas de este grupo. 3. Técnica tipo usada en el mundo. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Depende de la interpretación del operador. 2. Pasa por alto los defectos que están detrás de obstáculos o debajo del agua. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (Sinha & Knight, 2004) ▪ (Fenner, 2000) <p>Descripción completa de la metodología.</p>
	Estacionario	Inspección mediante cámaras de video en la boca de los pozos de inspección. Examina la condición de las paredes de la tubería.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Puede complementar a otras técnicas de inspección. 2. Más económico que el sistema CCTV convencional 	<p>Mismas que el sistema CCTV convencional y además:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Alcance limitado en cuanto a la distancia de inspección. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (Makar, 1999) ▪ (Sinha & Knight, 2004) <p>Descripción completa de la metodología.</p>
	Asistido por computador	Utiliza sistemas informáticos en identificación y clasificación de defectos registrados por la cámara. Examina la condición de las paredes de la tubería.	<p>Mismas que el sistema CCTV convencional y además:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Reduce errores del operador. 5. Reduce tiempos de inspección. 6. Mayor precisión en detección de los defectos. 	<p>Mismas que el sistema CCTV convencional y además:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Aumento de tiempo en recopilación de datos. 4. Mayores costos que el sistema CCTV convencional. 5. Disponible para diámetros pequeños. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (Chae & Abraham, 2001) ▪ (Moselhi & Shehab-Eldeen, 1999) ▪ (Wirahidikusumah <i>et al.</i> 1998) ▪ (Makar, 1999) <p>Descripción completa de la metodología.</p>
Escaneo Láser		Evalúa forma y condiciones de las paredes de la tubería. Información de fácil registro y análisis por	<ol style="list-style-type: none"> 1. Registro automático de datos. 2. Análisis computarizado. 3. Evalúa toda la longitud de la tubería. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Disponible para diámetros pequeños. 2. Sólo detecta daños por encima de la línea de agua. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (Hibino <i>et al.</i> 1994) ▪ (Sinha & Knight, 2004) ▪ (Makar, 1999)

HERRAMIENTAS PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA GESTIÓN DE ALCANTARILLADOS: PROSPECTIVAS DE IMPLEMENTACIÓN EN LA EAAB

	computador.	4. Reduce tiempos de interpretación de datos.	3. Mayores costos que el sistema CCTV convencional.	Descripción completa de la metodología.
Ultrasonido (SONAR)	Se emite una onda de sonido y refleja si hay cambio en la densidad del material, por medio del tiempo en que tarda en regresar dicha onda. Examina condición de las paredes de la tubería y sus deformaciones.	1. Evalúa la totalidad del diámetro y longitud de la tubería. 2. Registra los datos automáticamente. 3. Elimina errores del operador. 4. Reduce tiempos de interpretación.	1. Dificultad para detectar áreas de agrietamiento que están en la dirección de la onda. 2. Limpieza de la tubería necesaria antes de la inspección para obtener mejores resultados. 3. Mayores costos que el sistema CCTV convencional.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (Birks & Green, 1991) ▪ (Sinha & Knight, 2004) ▪ (Bhardwaj, 2001) ▪ (Wirahidikusumah <i>et al.</i> 1998) Descripción completa de la metodología.
Micro-Desviaciones	Inspección mediante micro deflector colocado en la pared interior de la tubería, se aplica una presión y se mide el cambio de posición respecto a la presión aplicada. Reconoce principalmente el comportamiento de la tubería en general. No encuentra defectos puntuales en ella.	1. Evalúa toda la longitud de la tubería. 2. Da una medida directa de la condición estructural de la tubería. 3. Los resultados no se ven afectados por la condición del suelo circundante. 4. Disponible para diámetros de hasta 600 a 900 mm.	1. Disponible solo para tuberías en material rígido. 2. Mayores costos que el sistema CCTV convencional. 3. No detecta daños puntuales.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (Makar, 1999) Descripción completa de la metodología.
Frecuencia Natural de Vibración	Inspección realizada mediante la aplicación de vibraciones a diferentes frecuencias en la pared de la tubería. La desviación en la frecuencia indica algún problema en la red. Identifica problemas en la condición de las paredes de la tubería y del relleno sobre el que se encuentra.	1. Evalúa toda la longitud de la tubería. 2. Capaz de dar un diagnóstico de la tubería sin necesidad de viajar a través de ella. 3. Disponible para diámetros de hasta 600 a 900 mm.	1. Requiere limpieza previa de la tubería. 2. No detecta daños puntuales. 3. Mayores costos que el sistema CCTV convencional. 4. La cantidad de agua y las condiciones del suelo afectan los resultados	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (Makar, 1999) Descripción completa de la metodología, ventajas y desventajas.
Eco Impacto	Inspección realizada mediante un martillo neumático que produce ondas superficiales al golpear la pared de la tubería, las ondas son detectadas por un geófono, el cual evalúa la condición de la tubería. Identifica problemas en la condición de las paredes de la tubería y del relleno sobre el que se encuentra.	1. Detecta vacíos en el suelo alrededor de la tubería. 2. Evalúa toda la longitud de la tubería. 3. Realiza diagnóstico estructural de toda la tubería.	1. Se pueden mezclar los resultados de la estructura de la pared y el relleno. 2. Opera con un equipo manual. 3. Requiere limpieza previa de la tubería. 4. Disponible para grandes diámetros.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (Makar, 1999) Descripción completa de la metodología, ventajas y desventajas.



<p>Análisis Espectral</p>	<p>Tiene el mismo sistema que el de eco impacto, la diferencia radica en la cantidad de geófonos que tiene para hacer la evaluación de la condición de la tubería.</p> <p>Identifica problemas en la condición de las paredes de la tubería y del relleno sobre el que se encuentra.</p>	<p>Como las de Eco Impacto, además:</p> <p>4. Hace análisis a diferentes frecuencias lo que permite separar el diagnóstico estructural y el del relleno.</p>	<p>1. Sólo se puede operar con un equipo manual.</p> <p>2. Requiere limpieza de la tubería.</p> <p>3. Disponible para diámetros grandes.</p> <p>4. No localiza defectos puntuales.</p> <p>5. Mayores costos que el sistema CCTV convencional.</p>	<p>▪ (Makar, 1999) Descripción completa de la metodología, ventajas y desventajas.</p>
<p>Georradar</p>	<p>Consiste en la transmisión de ondas electromagnéticas, devueltas a una antena receptora colocada dentro de la tubería, que transfiere la información a un computador.</p> <p>Identifica problemas en la condición de las paredes de la tubería, el drenaje del suelo y el relleno alrededor de la misma.</p>	<p>1. No requiere entrar a la red de alcantarillado.</p> <p>2. Detecta vacíos, rocas y otros objetos alrededor de la tubería.</p> <p>3. Detecta exfiltración</p> <p>4. Detecta daños en la pared de la tubería.</p> <p>5. Evalúa toda la longitud de la tubería.</p>	<p>1. Su adecuado funcionamiento depende de las condiciones del suelo.</p> <p>2. Poca experiencia en su uso.</p> <p>3. Mayores costos que el sistema CCTV convencional.</p> <p>4. Depende de la interpretación del operador.</p> <p>5. La información no muestra la condición completa de la red.</p>	<p>▪ (Wirahidikusumah <i>et al.</i> 1998) ▪ (Makar, 1999) Descripción completa de la metodología, ventajas y desventajas.</p>
<p>Sistema KARO</p>	<p>Inspección realizada mediante un sistema robótico integrado por 3 sensores inteligentes: óptico 3D, ultrasónico y de microondas.</p> <p>El robot es controlado por un móvil de alta maniobrabilidad manejado y supervisado por un operador.</p> <p>Identifica problemas en la condición de las paredes de la tubería y del relleno sobre el que se encuentra.</p>	<p>1. Evalúa toda la longitud de la tubería.</p> <p>2. Reduce errores del operador.</p> <p>3. Registro automático de datos.</p> <p>4. Reduce tiempos de interpretación de datos.</p>	<p>1. Poca experiencia en su uso.</p> <p>2. Mayores costos que el sistema CCTV convencional.</p>	<p>▪ (Wirahidikusumah <i>et al.</i> 1998) ▪ (Guro <i>et al.</i>, 2009) Descripción completa de la metodología y comparación con otros métodos.</p>
<p>Sistema PIRAT</p>	<p>Inspección realizada mediante un vehículo con circuitos de comunicación, sensores, escáneres electrónicos y escáner láser, colocado dentro de la red de alcantarillado.</p> <p>Sistemas independientes de recolección e interpretación de información. Examina la condición</p>	<p>1. Evalúa toda la longitud de la tubería.</p> <p>2. Reduce errores del operador.</p> <p>3. Registro automático de datos.</p> <p>4. Reduce tiempos de interpretación de datos.</p>	<p>1. Poca experiencia en su uso.</p> <p>2. Mayores costos que el sistema CCTV convencional.</p>	<p>▪ (Wirahidikusumah <i>et al.</i> 1998) ▪ (Guro <i>et al.</i>, 2009) Descripción completa de la metodología y comparación con otros métodos.</p>

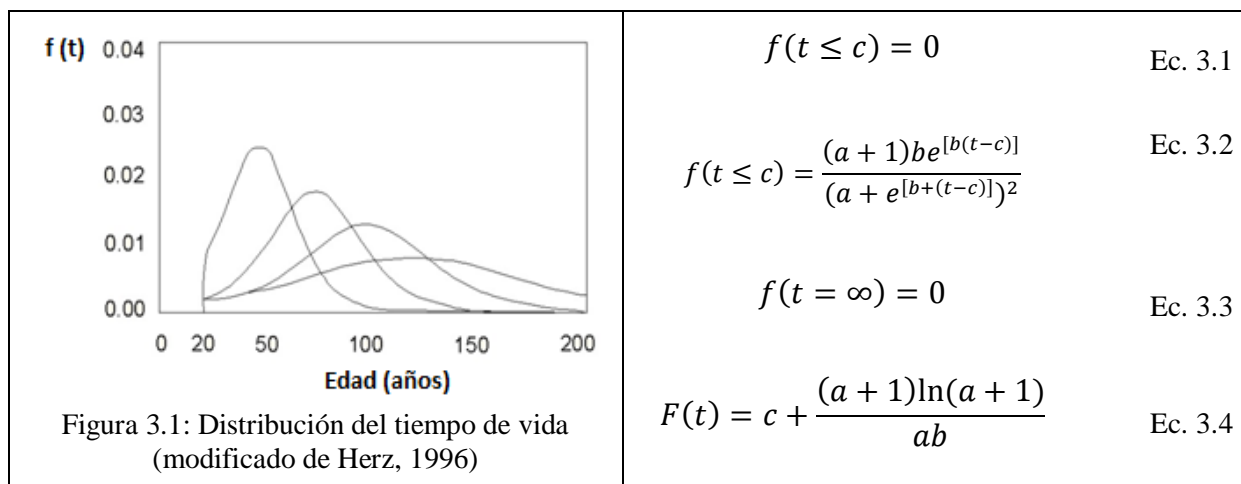
	de las paredes de la tubería.			
Sistema SSTE	<p>Tiene el mismo mecanismo del CCTV, adicionalmente cuenta con un escáner y un giroscopio, que permite grabar imágenes para luego ser digitalizadas.</p> <p>Cuenta con una base de datos.</p> <p>Examina la condición de las paredes de la tubería.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Evalúa toda la longitud de la tubería. 2. Resultados de gran calidad y cantidad. 3. No debe detenerse en el recorrido para poder detectar los daños. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mayores costos que el sistema CCTV convencional. 2. La información debe ser digitalizada. Mayores tiempos de inspección 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (Wirahidikusumah <i>et al.</i> 1998) ▪ (Sinha & Knight, 2004) <p>Descripción completa de la metodología, usos, ventajas y desventajas.</p>

3.2. HERRAMIENTAS PROBABILÍSTICAS

Las herramientas de este tipo son ampliamente utilizadas en la predicción de la condición futura del estado de las tuberías de un sistema de alcantarillado, elementos clave en la toma de decisiones.

3.2.1. DISTRIBUCIÓN DE HERZ

La distribución de Herz fue concebida especialmente para modelar el envejecimiento de una red de alcantarillado con base en la edad de la misma, ver Figura 3.1 (Davis *et al.*, 2008; Herz, 1996). Una función de distribución acumulada $F(t)$ está relacionada con una función de densidad de probabilidad $f(t)$ durante toda la vida útil de la red de alcantarillado, determinada por un tiempo t . Esta metodología utiliza la distribución exponencial para describir el comportamiento de la tasa de falla y la esperanza del tiempo de vida residual (Herz, 1996).



donde: a es el factor de envejecimiento; el envejecimiento no tiene lugar cuando $a = 0$, b es el factor de falla, c es el tiempo de resistencia, hasta cuando no hay un trabajo de rehabilitación importante llevándose a cabo.

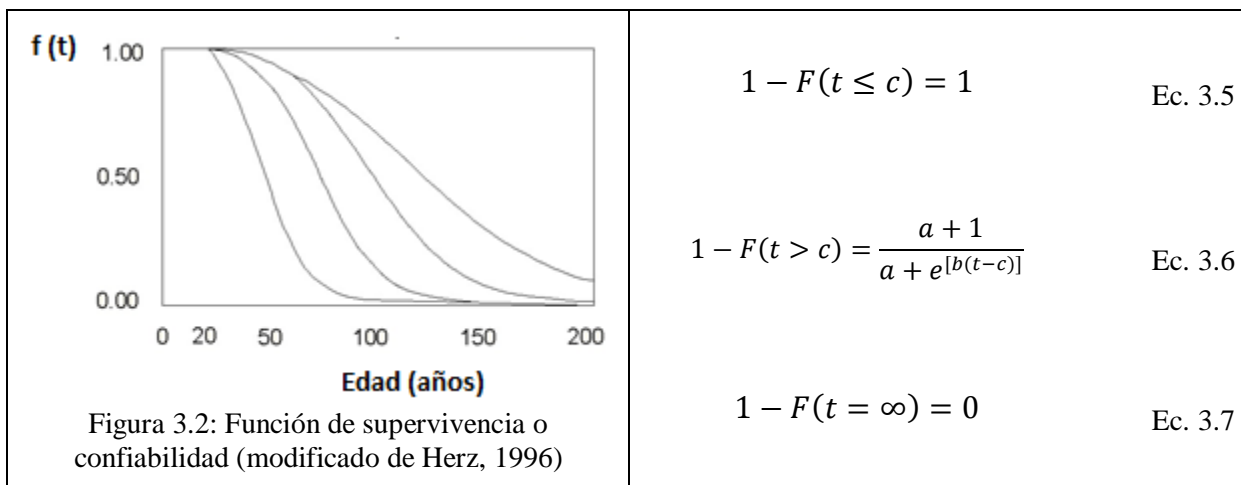
Los parámetros a , b y c de la distribución de Herz son determinados por el método de mínimos cuadrados ponderados no lineales (Dennis, 1977; Davis *et al.*, 2008; Ana *et al.*, 2008).

Herz además desarrolló conceptos que pueden describir el comportamiento de la red de alcantarillado en un tiempo específico, tales como: la función de supervivencia o de confiabilidad $1 - F(t)$ ver (Figura 3.2), la probabilidad de falla o tasa de fracaso $z(t)$ (función de riesgo) que

es deducida al dividir $f(t)$ y $1 - F(t)$ (ver Figura 3.3), en donde cabe destacar que si la tubería no se renueva la tasa de fracaso será la misma tasa de renovación, y por último la esperanza de vida residual ver (Figura 3.4) que es el valor medio de la probabilidad de densidad condicional calculada por la función de supervivencia para cada elemento que ha alcanzado una edad específica (Herz, 1996).

Varias distribuciones matemáticas pueden ser consideradas como funciones de envejecimiento, pero por lo general su comportamiento no describe con exactitud la conducta de deterioro de una red de alcantarillado (Herz, 1996). Por ejemplo la distribución normal, al ser muy simétrica la hace poco realista, ya que tiene un rango de aplicación de $-\infty$ a $+\infty$. También está la distribución normal logarítmica, que es sesgada hacia la izquierda en el rango de valores positivos, y al momento de analizar la esperanza de vida del alcantarillado, se muestra que ésta aumenta con los años, lo cual no sería correcto. Finalmente se llegó a la conclusión que la distribución de Herz es adecuada para describir el envejecimiento de un sistema de alcantarillado (Baur *et al.*, 2004).

La distribución de Herz tiene el aspecto positivo de que la tasa de fracaso aumenta con la edad, por lo que crece gradualmente hasta que se acerca asintóticamente al límite de falla, es decir, al valor de b . Por otra parte, el valor medio de la vida residual no se convierte en cero a una edad mayor, pero se mantiene en un valor pequeño de $1/b$ años, es decir, la tubería aumenta en años de instalación pero el tiempo de vida residual permanece constante (Herz, 1996).





<p>(t)</p> <p>Figura 3.3: Tasa de fallo o renovación descrita (modificado de Herz, 1996)</p>	$z(t \leq c) = 0 \quad \text{Ec. 3.8}$ $z(t > c) = \frac{be^{[b(t-c)]}}{a + e^{[b(t-c)]}} \quad \text{Ec. 3.9}$ $z(t = \infty) = b \quad \text{Ec. 3.10}$
<p>(t)</p> <p>Figura 3.4: Esperanza de tiempo de vida residual descrita (modificado de Herz, 1996)</p>	$E(\tau/t \leq c) = c - t + \frac{(a + 1)\ln(a + 1)}{ab} \quad \text{Ec. 3.11}$ $E(\tau/t > c) = X \frac{\ln X}{ab} - \left(\frac{t - c}{a}\right) \quad \text{Ec. 3.12}$ <p>con $X = a + e^{[b(t-c)]}$</p> $E(\tau/t = \infty) = b^{-1} \quad \text{Ec. 3.13}$

3.2.2. PROGRAMACIÓN LINEAL

La programación lineal consiste en la optimización (minimización o maximización) de una función lineal, denominada función objetivo, que satisfaga un conjunto de restricciones que se expresan por medio de ecuaciones y/o inecuaciones lineales (Bazaraa *et al.*, 2005; Hillier & Lieberman, 2006).

Un problema de programación lineal tiene la siguiente formulación estándar, presentada en la Ec. 3.14:

Función objetivo:

$$\text{Maximizar o Minimizar } Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad \text{Ec. 3.14}$$

donde:

c_1, c_2, \dots, c_n son coeficientes conocidos

x_1, x_2, \dots, x_n son las variables de decisión

Sujeta a una serie de restricciones dadas mediante un sistema de inecuaciones lineales del tipo:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \quad \text{Ec. 3.15}$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2 \quad \text{Ec. 3.16}$$

⋮

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m \quad \text{Ec. 3.17}$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0 \quad \text{Ec. 3.18}$$

donde:

c_i, b_i y a_{ij} representan los parámetros del modelo.

La última inecuación busca una solución de optimización positiva, sin embargo en algunos modelos no se restringe este valor. Las restricciones funcionales también pueden encontrarse en el sentido mayor o igual (\geq), al igual que en forma de ecuación (=) (Hillier & Lieberman, 2006).

El sistema de desigualdades forma una región, donde todos los puntos dentro de ella cumplen con las restricciones del sistema. Se trata de buscar, entre todos esos puntos, aquel o aquellos que hagan el valor de Z máximo o mínimo, según sea el problema (Bazaraa *et al.*, 2005; Hillier & Lieberman, 2006).



Los puntos x_1, x_2, \dots, x_n que se encuentran en la región factible se denominan soluciones factibles. De todas esas soluciones factibles, aquellas que hacen óptima (máxima o mínima) la función objetivo se llaman soluciones óptimas. Un problema puede tener una, infinitas o ninguna solución (Barsov, 1982; Hillier & Lieberman, 2006).

La modelación y análisis de un problema en particular está determinado por varias etapas (Bazaraa *et al.*, 2005). La formulación del problema es la primera e implica un estudio detallado del sistema, la recolección de datos, y la identificación del problema específico que debe ser analizado, junto con las restricciones o limitaciones del sistema, y la función objetivo. La siguiente etapa es la concepción del problema a través de un modelo matemático.

El tercer paso es encontrar el sistema o herramienta apta para solucionar el problema matemático; éste puede existir o ser determinado para cada caso específico. Luego de encontrar la o las soluciones del problema, éstas deben ser analizadas para determinar si el sistema está planteado de manera precisa.

La etapa final es la implementación. El modelo está configurado para la ayuda interactiva en el proceso de toma de decisiones. Se debe tener en cuenta que el modelo no sustituye a cabalidad al tomador de decisiones, pues la experiencia y juicio debe ser aplicada en el análisis de las soluciones.

3.2.3. SERIES DE TIEMPO

Las series de tiempo se utilizan cuando se quiere expresar una secuencia de datos en un intervalo de tiempo, los intervalos de tiempo pueden ser: semanal, mensual, trimestral, anual, etc. (Montengro García, 2004; Weiers, 2006).

Las series de tiempo son necesarias por lo siguiente: (i) para comprender el pasado, y (ii) para predecir el futuro (Weiers, 2006). En el estudio de las series de tiempo, se pueden encontrar dos tipos de acuerdo a la definición anterior; las que tienen algún elemento de aleatoriedad, es decir, que son impredecibles total o parcialmente (de naturaleza estocástica); y las que son perfectamente predecibles (de naturaleza determinística) (Montengro García, 2004).

Al analizar una serie de tiempo, encontramos pautas y tendencias que explican el cambio de las variables de interés, lo que ayuda a comprender el comportamiento que tendrán dichas variables

en un futuro (Weiers, 2006). Esto se hace mediante la representación gráfica de las variables de interés (eje vertical y) contra el tiempo (eje horizontal x) (Montengro García, 2004; Weiers, 2006). Los componentes que hacen parte de las series de tiempo son los descritos a continuación (Montengro García, 2004; Weiers, 2006):

De tendencia (T): son formas de los tipos de tendencias ascendente, descendente o estacionaria, las que se muestran en la Figura 3.5. De acuerdo al intervalo de tiempo en que se analice el componente de tendencia, los puntos de la gráfica se podrán ajustar de acuerdo con un tipo de regresión, la cual podrá pendiente negativa o positiva según sea el caso.

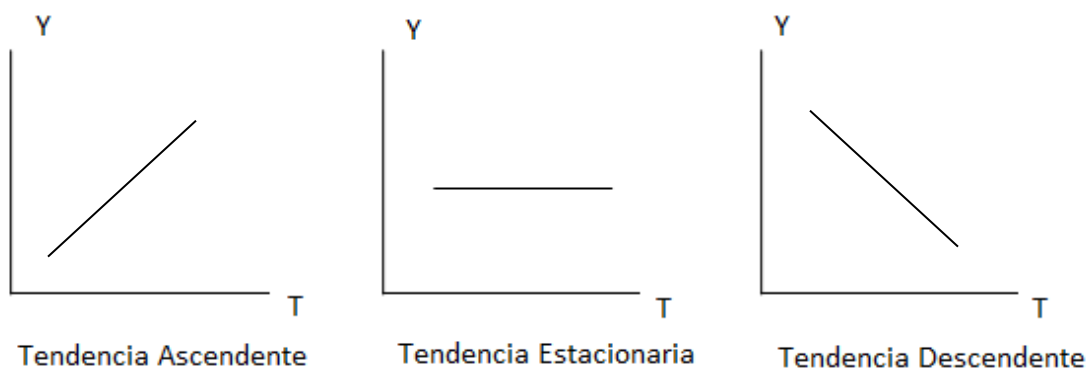


Figura 3.5: Series de tiempo con tendencias ascendente, estacionaria y descendente (modificado de Montenegro García, 2004)

Cíclicas (C): Son oscilaciones repetitivas con el tiempo en donde el intervalo de tiempo dura más de un año. Son ejemplos de este tipo de oscilaciones las manchas solares y los ciclos de los negocios. En algunos casos, los ciclos pueden ocurrir incluso durante miles de años (ver Figura 3.6).

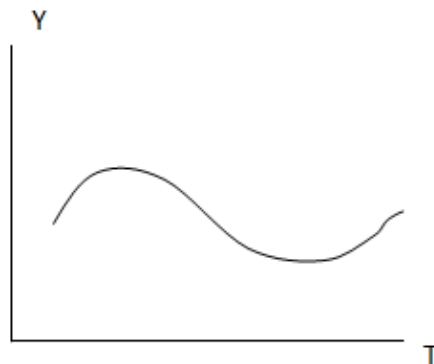


Figura 3.6: Series de tiempo cíclicas (modificado de Montenegro García, 2004).

Estacionalidad (S): también son oscilaciones periódicas, a diferencia de las cíclicas éstas se repiten en un período menor a un año (ver Figura 3.7).

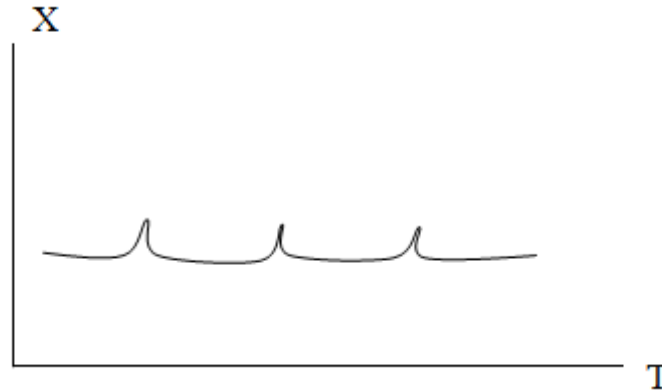


Figura 3.7: Series de tiempo estacional (modificado de Montenegro García, 2004)

Irregular (I): este componente representa oscilaciones aleatorias, también llamadas “ruido” provocado por hechos imprevistos y/o repentinos. De tal manera que las observaciones pasadas en una serie no suministran ninguna información acerca del comportamiento de las observaciones futuras.

De acuerdo a la manera de la toma de datos, las series se pueden clasificar en continuas, que expresaremos como $x(t)$, y serán aquellos datos obtenidos para todo instante de tiempo, o en discretas x_t , cuando los datos sean para ciertos momentos de tiempo, habitualmente en intervalos de tiempo regulares (Montenegro García, 2004).

Como se mencionó anteriormente las series pueden producirse por procesos estocásticos o determinísticos, es decir, el probabilístico y el no probabilístico, siendo el proceso estocástico, el que ocupa el lugar más importante en el análisis teórico y práctico de las series de tiempo. De igual manera, se pueden encontrar series mixtas, que incluyan componentes tanto estocásticos (un término de error) como determinísticos (tendencia, oscilación, etc.) (Montenegro García, 2004).

El proceso estocástico $x(t)$ es una serie de variables aleatorias que se encuentran ordenadas con un índice t que comúnmente indica el tiempo y se denota como:

$$\{x_t\} = \{\dots, x_1, x_2, x_3, \dots\} \quad \text{Ec. 3.19}$$

Los datos en el proceso estocástico no son conocidos en el tiempo, sino como variables aleatorias, una para cada instante de tiempo. No se podrán pronosticar con total certeza, sino sólo

se hablará de probabilidades y aproximaciones mediante las distribuciones probabilísticas (Montengro García, 2004).

En el proceso determinístico, por el contrario al estocástico, todas las repeticiones que se presenten en el tiempo siempre serán idénticas, esto se puede dar por la cantidad de datos con la que se cuente (Montengro García, 2004).

3.2.4. SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA

A diario los seres humanos interpretan, toman decisiones y obtienen resultados con importante información lingüística que es imprecisa e incompleta. La teoría de los conjuntos difusos proporciona una metodología sistemática relacionada con esta información. La selección de normas o reglas de la forma SI – ENTONCES es la parte clave de un sistema de inferencia difusa que puede imitar el razonamiento humano en un campo específico (Llano *et al.*, 2007; Masulli *et al.*, 2007).

Un conjunto difuso expresa el grado en que un elemento pertenece o no a un grupo definido por expertos en el área de aplicación (Castillo *et al.*, 2007). Los conjuntos difusos no tienen límites definidos, la transición de pertenecer o no a un conjunto es gradual y depende de una función de pertenencia, que da flexibilidad al conjunto difuso en el modelo usado con expresiones lingüísticas (Llano *et al.*, 2007).

Un sistema de inferencia difusa estima las variables de entrada y salida de forma aproximada (bajo, débil, alto, ahora y cerca). Un sistema experto convencional es cuando las reglas o normas se hacen en cadena; pero un sistema experto difuso trabaja en forma paralela, es decir, todas las reglas funcionan simultáneamente, lo que proporciona mejores resultados que un sistema experto convencional (Paek & Adeli, 1990; Adeli & Hawkins, 1991; Waheed & Adeli, 2000).

3.2.4.1. VARIABLES LINGÜÍSTICAS

Se utilizan para cuantificar el lenguaje corriente. A las expresiones, palabras, frases u oraciones en un lenguaje natural o artificial se les asigna valores como etiquetas lingüísticas. Por lo general las variables lingüísticas se usan en reglas difusas, por ejemplo: SI la temperatura es baja y la humedad es alta ENTONCES la precipitación es alta (Llano *et al.*, 2007).



3.2.4.2. *REGLAS DIFUSAS*

Son las utilizadas en el razonamiento difuso, y es la forma en que el sistema guarda las variables lingüística, las cuales ayudan a resolver el problema para el cual fue hecho. Las reglas son siempre del tipo SI – ENTONCES y consta de dos partes: el “antecedente” que sería SI y la “conclusión” que sería ENTONCES, lo que es dado por el consecuente (Llano *et al.*, 2007).

Las reglas difusas simples tienen la siguiente forma: “SI x es A ENTONCES y es B”, donde A y B son conjuntos difusos establecidos en los rangos “ x ” y “ y ” respectivamente. Lo que la regla indica es la relación que existe entre los conjuntos A y B donde cuya función característica sería $\mu_A \rightarrow B(x, y)$, lo que se conoce como implicación lógica. Por ende cada regla SI – ENTONCES es un conjunto difuso con una función particular que indica el grado de veracidad entre la relación implícita de “ x ” y “ y ” (Llano *et al.*, 2007).

El sistema de inferencia difusa está compuesto por varias reglas heurísticas o difusas con diferentes consecuentes. Para adquirir un conjunto completo de reglas que modelan un problema, se consideran todas las combinaciones posibles, sin embargo en este proceso se pueden encontrar reglas que físicamente no tengan sentido y otras que no se ajusten al problema, por lo que al final las reglas que se deben tener en cuenta son aquellas que se adecúen a la solución del problema en consideración (Llano *et al.*, 2007).

3.2.4.3. *PROCESO DEL SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA*

El proceso difuso trabaja en tres pasos, mostrados a continuación (ver Figura 3.8) (Tagherouit *et al.*, 2011):

- Fuzzyficación: el proceso de codificación es el mecanismo de conversión de la representación numérica de las variables lingüísticas de 1 a n valores establecidos en el sistema difuso (funciones de pertenencia de los parámetros de rendimiento).
- Inferencia: esta es una etapa de procesamiento de las reglas de lógica de la forma SI – ENTONCES. Los valores verdaderos obtenidos de la salida difusa son almacenados. Durante la evaluación de todas las reglas algunas de ellas pueden ser eliminadas ya que no ayudan a que el sistema de inferencia difusa proporcione altos niveles de veracidad. Existen dos métodos de sistemas de inferencia difusa (Cox, 1994): el método de máximos y mínimos y el método de adición difusa, los cuales serán explicados más adelante.

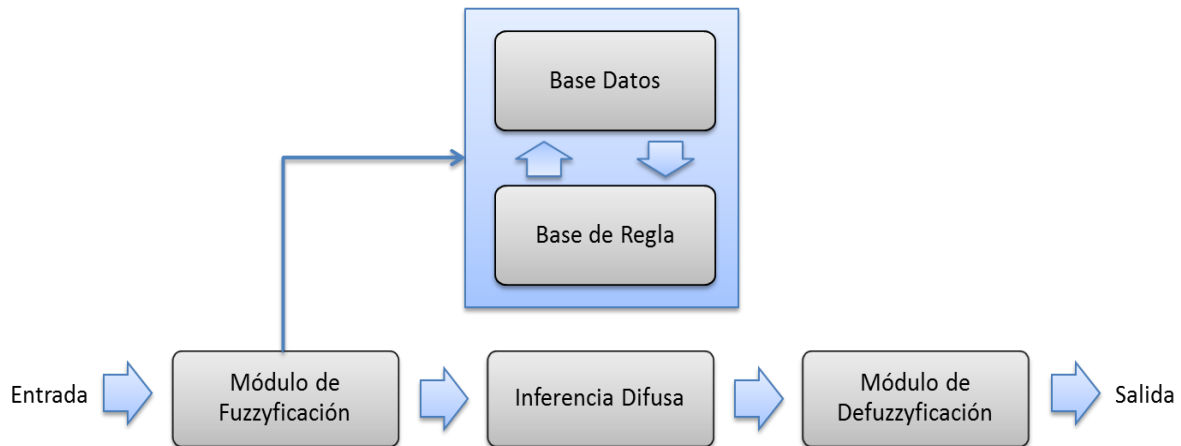


Figura 3.8: esquema típico del funcionamiento del sistema de inferencia difusa (modificado de Juárez *et al.*, 2007)

- Defuzzyficación (decodificación): en este paso la función característica global es transformada en un valor real, que debe tener en cuenta todas las reglas validadas en función de su nivel de veracidad. Tres tipos de reglas son adicionadas con uso frecuente: el máximo, la media ponderada y las técnicas de centro de gravedad (Cox, 1994). El modelo más usado en la elaboración del cronograma de rehabilitación es la técnica de centro de gravedad ya que es de alto rendimiento. Éste consiste en encontrar el centro de gravedad o de masa de los conjuntos de solución difusa. El valor real de salida se calcula directamente como una combinación normalizada de valores al que pertenece. Para un conjunto difuso de un sistema difuso, A se calcula así:

$$\omega = \frac{\sum_{i=0}^n d_i \cdot \mu_A(d_i)}{\sum_{i=0}^n \mu_A(d_i)} \quad \text{Ec. 3.20}$$

donde:

$\mu_A(d_i)$ es el nivel de pertenencia al *i*-ésimo elemento del sistema difuso A

ω es el centro de gravedad en el sistema difuso A

d_i elemento que pertenece al sistema difuso A

n es el número de elementos que están en conjunto del sistema difuso A.



3.2.4.3.1. Método de Máximos y Mínimos

Este método trabaja sobre el siguiente principio de discriminación: las reglas que aquí se tienen en cuenta son aquellas que tienen un alto nivel de veracidad y que pueden contribuir a la salida difusa.

Para cada regla, la región difusa de los resultados se limita por su nivel de veracidad (Cox, 1994):

$$\mu_c(x) \leftarrow \min\{\mu_p, \mu_c(x_i)\} \quad \text{Ec. 3.21}$$

La salida difusa se actualiza con el máximo de la minimización del sistema difuso:

$$\mu_s(x) \leftarrow \max\{\mu_s(x_i), \mu_c(x_i)\} \quad \text{Ec. 3.22}$$

Donde μ_p es el nivel de veracidad de una regla, μ_c es el x_i que pertenece al nivel correspondiente del sistema difuso (c), μ_s es el x_i que pertenece al nivel correspondiente del sistema de soluciones s (Cox, 1994).

3.2.4.3.2. Método de adición difusa

Este método es muy utilizado en los modelos de toma de decisiones en donde todas las reglas deben aportar a la solución final. En comparación con el método anterior, las salidas en éste se calculan en dos pasos (Tagherouit *et al.*, 2011; Cox, 1994):

$$\mu_c(x) \leftarrow \min\{\mu_p, \mu_c(x_i)\} \quad \text{Ec. 3.23}$$

La salida difusa se actualiza para cada regla con la aplicación de la suma limitada:

$$\mu_s(x) \leftarrow \min\{1, \mu_s(x_i) + \mu_c(x_i)\} \quad \text{Ec. 3.24}$$

3.2.5. SIMULACIÓN DE MONTE CARLO

La simulación de Monte Carlo es una herramienta que permite considerar posibles combinaciones, interrelaciones y escenarios que tenga un proyecto o situación específica que se requiera analizar (Bravo, 2006).

Esta técnica envuelve muestreo aleatorio de una distribución de probabilidad dentro del modelo que produce cientos o incluso miles de escenarios (también llamados iteraciones o ensayos).

Cada distribución de probabilidad se muestra de una manera que reproduce su forma. La distribución de los valores calculados para el resultado del modelo refleja por lo tanto la probabilidad de que los valores puedan ocurrir. La simulación de Monte Carlo ofrece muchas ventajas sobre otras técnicas, como las siguientes (Vose, 1996):

- La distribución de las variables del modelo no tienen que ser aproximadas de ninguna manera.
- Las correlaciones y otras inter-dependencias pueden ser modeladas.
- El nivel de matemáticas requerido para el rendimiento de la simulación de Monte Carlo es muy básico.
- El computador hace todo el trabajo requerido para la determinación de los resultados de la distribución.
- Se encuentra comercialmente disponible para automatizar las tareas involucradas en la simulación.
- Los mayores niveles de precisión pueden ser logrados con un simple incremento del número de iteraciones que son calculadas.
- Las matemáticas complejas pueden ser incluidas sin dificultad.
- La simulación de Monte Carlo es ampliamente reconocida como una técnica válida.
- Los cambios en el modelo pueden hacerse rápidamente y los resultados podrán ser comparados con modelos previos.

El método de Monte Carlo es una técnica numérica para calcular probabilidades y otras cantidades relacionadas, utilizando secuencias de números aleatorios (Gómez, 2005).

El procedimiento a seguir para la simulación de Monte Carlo es el siguiente:

- Establecer una distribución de probabilidad. Una forma adecuada de escoger una distribución de probabilidad es por medio de los resultados de una evaluación. La frecuencia relativa para cada resultado de una variable se encuentra al dividir la frecuencia de la observación entre el número total de observaciones (Nájera, 2010).
- Construir una distribución de probabilidad acumulada para cada variable. En esta parte del proceso se debe convertir una distribución de probabilidad regular a una distribución de probabilidad acumulada (Nájera, 2010).



- Generar una serie de números aleatorios r_1, r_2, \dots, r_m , uniformemente distribuidos en el intervalo de $[0,1]$ (Gómez, 2005). El computador está en capacidad de generar números aleatorios a partir de una serie de reglas asignadas por el usuario y así poder evaluar condiciones futuras (Bravo, 2006).
- Usar esta secuencia para producir otro tipo de secuencia x_1, x_2, \dots, x_m , distribuida de acuerdo a la distribución de probabilidad que hayamos establecido (Gómez, 2005).
- Usar la secuencia de valores x para estimar alguna propiedad de $f(x)$. Los valores de x pueden tratarse con medidas simuladas y a partir de ellos pueden estimarse la probabilidad de que los x tomen valores en una cierta región (Gómez, 2005).
- Repetir el experimento, es decir, colocar en práctica nuevamente la simulación de Monte Carlo mediante varias pruebas, para poder concluir correctamente, ya que al hacer pocos ensayos se pueden cometer errores que perjudicarían el experimento (Nájera, 2010).

3.2.6. CADENAS DE MARKOV

Una cadena de Markov es una herramienta para analizar el comportamiento de determinados tipos de variables aleatorias que reciben el nombre de procesos estocásticos, en la cual la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inmediatamente anterior (Winston, 1991; Muñoz & Blanco, 2002);

Para determinar una cadena de Markov se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- Conjunto de estados del sistema
- Definición de transición
- Ley de probabilidad condicional, que defina la probabilidad del nuevo estado en función de los anteriores.

Los *estados* representan la situación del sistema en un instante dado. Esta caracterización puede hacerse de manera cuantitativa y cualitativa. Por lo tanto, un estado es representado mediante una variable que cambia de valor en el tiempo; este cambio se llama *transición*. En ocasiones, en una transición, el nuevo estado puede ser el mismo que el anterior (Winston, 1991).

Dicho de otra manera, una cadena de Markov se refiere a una colección ordenada de variables X_n , donde n denota intervalos temporales significativos para el evento estudiado. Los posibles valores de X_n se toman de los estados del sistema. Por ser un sistema estocástico, tan sólo se

conocerá la probabilidad asociada a cada uno de los estados (Haigh, 2002). Este hecho puede expresarse en términos de probabilidad condicional, Ec. 3.25:

$$P(X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_1 = i_1, X_0 = i_0) \quad \text{Ec. 3.25}$$

Donde i pertenece al conjunto de posibles estados del sistema.

En una cadena de Markov de primer orden, el estado j del sistema en el futuro sólo depende del estado presente i (Haigh, 2002). Por lo cual se tiene, Ec. 3.26.

$$p_{ij} = P(X_{n+1} = j | X_n = i) \quad \text{Ec. 3.26}$$

donde p_{ij} recibe el nombre de probabilidad de transición del estado i al estado j .

Las probabilidades de transición se representan mediante una matriz de probabilidades de transición o matriz de transición P de dimensión $m \times m$. La probabilidad de transición de la matriz P y sus características se dan de la siguiente manera (Ec. 3.27):

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mm} \end{bmatrix}$$

donde:

$$\sum_{j=1}^m p_{ij} = 1 \quad \text{Ec. 3.27}$$

Para $i = 1, 2, \dots, m$

Las ecuaciones de Chapman-Kolmogorov proporcionan el método para el cálculo de las probabilidades de transición de n pasos. Estas ecuaciones proponen que al ir de un estado i al estado j en n pasos, el proceso estará en algún estado k después de m (menor que n) pasos (Muñoz & Blanco, 2002).

Las probabilidades de transición después de n pasos vienen dadas por la matriz $P^{(n)}$ (Muñoz & Blanco, 2002):



$$\forall i, j \in S, P(X_{n+1} = j | X_n = i) = p_{ij}^{(n)} \quad \text{Ec. 3.28}$$

La probabilidad de transición en el paso $(n + 1)$, para $i, j \in S$:

$$P(X_{n+1} = j | X_n = i) = \sum_{k \in S} P\{(X_m = k) \cap (X_{n+1} = j) | X_n = i\} \quad \text{Ec. 3.29}$$

$$= \sum_{k \in S} P(X_m = k | X_n = i) * P(X_{n+1} = j | X_m = k) \quad \text{Ec. 3.30}$$

$$= \sum_{k \in S} p_{ik}^{(n)} * P(X_{n+1} = j | X_m = k) = \sum_{k \in S} p_{ik}^{(n)} * p_{kj} = p_{ij}^{(n+1)} \quad \text{Ec. 3.31}$$

Por lo anterior sabemos que la probabilidad de que el sistema pase del estado i al j después de n períodos, $P^{(n)}$, se puede obtener multiplicando la matriz P por sí misma n veces (Ross, 2003).

Por lo tanto:

$$P^{(n)} = P^n \quad \text{Ec. 3.32}$$

El vector de estado inicial, $u^{(0)}$, representa la probabilidad de que la cadena de Markov esté en el estado i en el tiempo 0. Entonces el vector $u^{(n)}$, que representa la probabilidad que se encuentre en el estado j después de n transiciones, se puede expresar de la siguiente manera (Grinstead & Snell, 2002):

$$u^{(n)} = u^{(0)} P^{(n)} \quad \text{Ec. 3.33}$$

donde $u^{(0)} = [q_1, q_2, \dots, q_m]$; y q_i es la probabilidad de que X se encuentre en el estado i en el tiempo 0.

Si se requiere determinar el comportamiento de la cadena de Markov bajo el supuesto de que inicia en un estado X_i , entonces se elige un vector de probabilidad u , donde el término q_i es igual a 1 y todos los demás igual a 0.

Una descripción completa de este tipo de herramienta probabilística se puede encontrar en la literatura especializada (Haigh, 2002; Muñoz & Blanco, 2002).

3.3. HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS

El uso de este tipo de herramienta permite al usuario utilizar grandes cantidades de datos, para su visualización, modelación y evaluación. Estas herramientas pueden ser agrupadas en: base de datos, Sistema de Información Geográfica (SIG), modelos y paquetes integrados. Sin embargo, sólo nos centraremos en el SIG ya que es la herramienta utilizada en los modelos de toma de decisiones en la gestión de sistemas de alcantarillado.

3.3.1. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

El sistema de información geográfica (SIG) es una herramienta computarizada que recoge, almacena, recupera, transforma y visualiza datos del mundo real para un propósito en particular (Johnson, 2009; Ketil *et al.*, 2010) el cual se ha desarrollado y utilizado en varios campos y disciplinas (Ketil *et al.*, 2010). (Ketil, Larsen, & Nilsen, 2010)

Los resultados obtenidos pueden mostrarse en forma de mapas temáticos los cuales son de fácil entendimiento. La Figura 3.9 muestra un ejemplo del tipo de información manejada por el sistema.

Sistemáticamente el SIG está compuesto por (Johnson, 2009; Stone *et al.*, 2002): un hardware que incluye estaciones de trabajo, impresiones, software SIG y servidores de redes informáticas con un amplio espacio para almacenar datos. El software consta de un sistema de diseño de cómputo, una aplicación de base de datos y un programa de interconexión SIG.

Desde el punto de gestión el SIG está formado por: (i) Datos de entrada, los cuales son gráficos e información del lugar que en la mayoría de los casos se deben introducir manualmente, (ii) Manipulación de datos en donde se da el proceso de evaluación y modelación de los datos de entrada y (iii) Datos de salida donde se muestra gráficamente los resultados finales de la operación ya sean como mapas, tablas o archivos digitales (Stone *et al.*, 2002).

Lo que hace diferente al sistema de información geográfica de otras herramientas es que éste integra datos para varios temas, ofrece herramientas para el análisis de esos temas y puede integrar diferentes tipos de análisis para obtener un modelo y un sistema de apoyo en la toma de decisiones (Johnson, 2009).

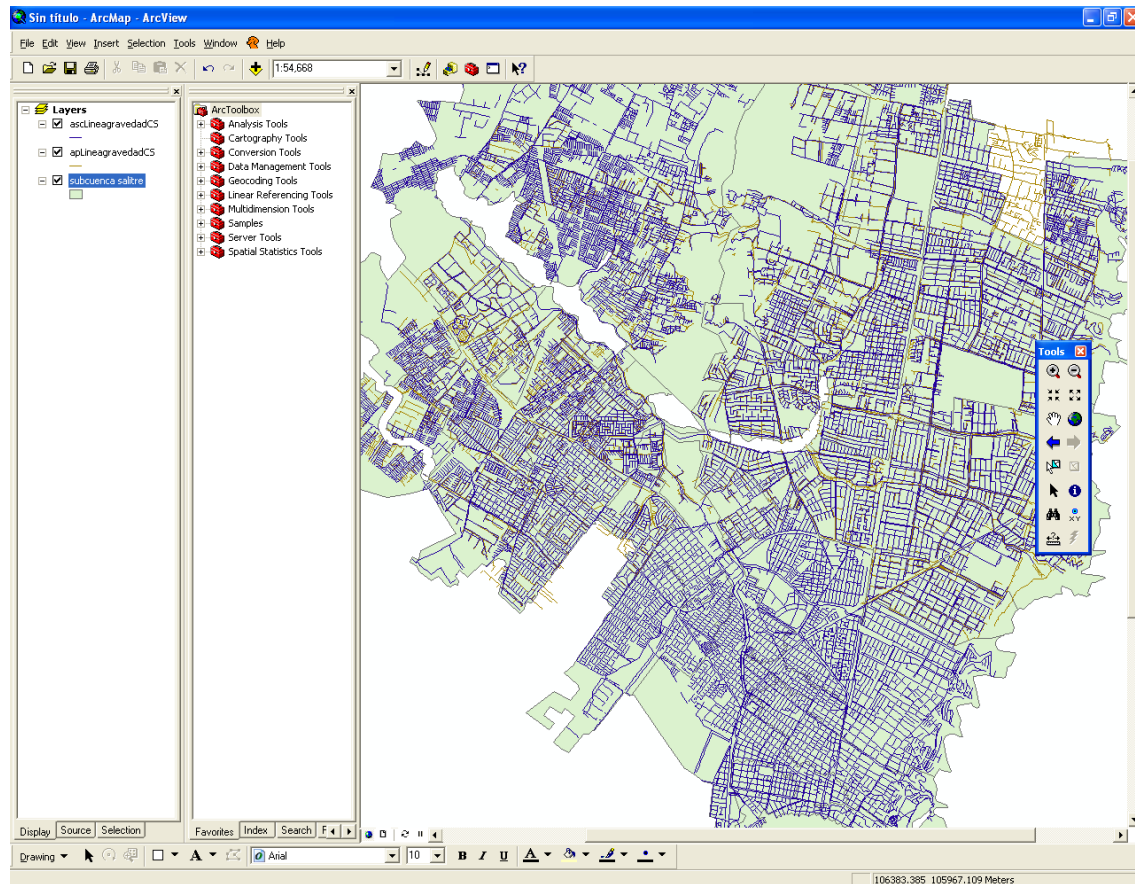


Figura 3.9: Líneas de alcantarillado en Sistema de Información Geográfica (Los Autores).

Esta aplicación reduce el desarrollo de modelación y el tiempo de análisis, es decir, reúne simultáneamente costo-efectividad y fiabilidad de los resultados obtenidos (Shamsi, 2005).

Es importante mencionar que esta herramienta cuenta con muchos recursos a considerar, por una parte es un sistema costoso y por otro lado, para que funcione adecuadamente necesita tener una base de datos amplia y de gran calidad (Stone *et al.*, 2002).

En la literatura se puede encontrar una descripción completa de esta herramienta (Shamsi, 2005; Johnson, 2009).

3.4. HERRAMIENTAS DE MODELACIÓN

Son software de modelación de redes de alcantarillado, que entrega a los administradores que ofrecen este servicio una herramienta eficiente y única para la modelación hidrológica del ciclo urbano completo. Es utilizado para identificar y argumentar el costo de las inversiones e infraestructura. Por otra parte, proporcionan una herramienta para el control operacional y

manejo del tiempo real de la red de aguas residuales. Otras de las aplicaciones consisten en la predicción de inundaciones y contaminación urbana (IIASA, 2000; Gouda *et al.*, 2003).

Estas herramientas ofrecen además la modelación de calidad de agua y el comportamiento hidrodinámico de los sistemas de alcantarillado. Representa la calidad del agua por medio de un modelo determinista que muestra la escorrentía superficial, el transporte de sedimentos y la contaminación dentro de las tuberías de la red. El modelo se basa en los principios de predicción de la acumulación de los sedimentos superficiales, la erosión, el transporte de sedimentos en la red y los parámetros de calidad que están asociados al flujo (Gouda *et al.*, 2003).

Estas herramientas combinan bases de datos con análisis geográfico para hacer un sólo entorno que pueda integrar la gestión de activos con el modelado preciso y detallado y permiten a los planificadores e ingenieros predecir el impacto ambiental después que ha pasado un evento de lluvia (Gouda *et al.*, 2007).

Los software incorporan soluciones completas de modulación de flujo inverso, efectos del agua estancada, canales abiertos, alcantarillas, tuberías y conexiones estructurales complejas y auxiliares (Gouda *et al.*, 2007).

La simulación numérica de *series de tiempo* ofrece soluciones automáticas paso a paso e implícita para optimizar el tiempo de ejecución y garantizar la estabilidad matemática. Los mismos software calculan errores de diagnóstico y alerta, al igual que tienen acceso a toda la documentación en línea que se integra con el sistema de ayuda (Gouda *et al.*, 2007).

Algunos de los software que tienen este tipo de características son: InfoWorks, WaterCAD, WaterGEMS, SewerCAD, MOUSE, MOUSE GIS, SWMM, entre otros.



4. MODELOS DE GESTIÓN

Como se pudo observar en el Capítulo 2, en el proceso de gestión se deben tomar decisiones que pueden tener grandes consecuencias económicas para las empresas administradoras de los servicios. Por esta razón existen instrumentos de apoyo que permiten mejorar la precisión de las decisiones (Ana & Bauwens, 2007). Ana & Bauwens (2007) denomina estos instrumentos como herramientas para el soporte en la toma de decisiones (DST) en la gestión de alcantarillados, sin embargo en la literatura existente han sido nombrados Modelos o Métodos, con el fin de diferenciarlos de las herramientas básicas que los componen. Estos modelos o métodos se clasifican de acuerdo a las fases de gestión que involucran (Ana & Bauwens, 2007):

4.1. GRUPO 1: MODELOS DE ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

Evalúan o modelan las condiciones estructurales e hidráulicas de la red, y predicen dichas condiciones de tal forma que se puedan programar actividades de inspección, rehabilitación y reemplazo. En este grupo de modelos o métodos se encuentran:

4.1.1. MODELO BAIK

El Modelo Baik predice el estado futuro de las redes de alcantarillado, partiendo de su estado inicial de tal manera que los gestores puedan programar y ejecutar actividades de inspección, rehabilitación y sustitución de manera oportuna y rentable (Ana & Bauwens, 2007).

4.1.1.1. DESCRIPCIÓN

Este método se basa en un modelo Probit Ordenado (explicado más adelante) para estimar las probabilidades de transición en un modelo de deterioro de Cadenas de Markov para un sistema de alcantarillado de aguas residuales (Baik *et al.*, 2006).

4.1.1.1.1. *Procesos de Cadenas de Markov*

Con la aplicación de Cadenas de Markov (Capítulo 3) en el desarrollo de un modelo de deterioro para sistemas de aguas residuales, una vez se determina la matriz de probabilidades de transición, puede ser fácilmente obtenida la condición futura del sistema. Estos valores son útiles para programar actividades de mantenimiento y rehabilitación de manera óptima, garantizando una adecuada gestión en los sistema de alcantarillado (Baik *et al.*, 2006).

4.1.1.1.2. *Estimación de Probabilidades de Transición*

Para la implementación del modelo de Markov, es necesario conocer las condiciones actuales de los sistemas existentes. En la evaluación del estado actual de los alcantarillados, se deben analizar las condiciones estructurales e hidráulicas del sistema a través de inspecciones internas y modelación hidráulica. Esto permite determinar la gravedad de los daños y sus posibles causas. Utilizando los datos obtenidos de la evaluación del estado estructural de las tuberías, se procede a estimar las probabilidades de transición en el modelo de deterioro (Baik *et al.*, 2006).

4.1.1.1.3. *Modelo Probit Ordenado*

Este modelo propone el cálculo de los cambios en los indicadores de estado de una tubería durante un período de transición, para utilizar estos resultados como variables discretas¹ en un modelo Probit Ordenado. La probabilidad estimada para que ocurra un incremento, representa la probabilidad de transición en el modelo de Markov (Baik *et al.*, 2006).

Si el indicador de un segmento de alcantarillado cambia del estado i al j durante un periodo de transición, el incremento para esa transición es $(j - i)$. Al estimar la probabilidad del incremento correspondiente a cada estado, se obtienen los valores para la matriz de transición (Baik *et al.*, 2006).

En el modelo Probit Ordenado, la variable latente², Z_{ik} , representa el deterioro real de un sistema de aguas residuales, que se supone continuo y varía entre 0 y $+\infty$, donde un segmento específico

¹ Es una variable cuantitativa que puede tomar valores determinados, es decir no admite valores intermedios entre dos valores específicos. Son el resultado de un conteo (Walpole *et al.*, 2007; Lopes, 2000).

² Es una variable que no es incluida entre las variables estudiadas, sin embargo tiene un importante efecto sobre la relación que existe entre ellas (Moore, 2000).



de alcantarillado y su estado son representados por k e i , respectivamente. Entonces, Z_{ik} se puede determinar como una función lineal, mostrada en la Ec. 4.1 (Washington *et al.*, 2003; Baik *et al.*, 2006).

$$Z_{ik} = \beta_i \cdot X_k + \varepsilon_{ik} \quad \text{Ec. 4.1}$$

donde:

β_i = vector de parámetros apreciables del estado i .

X_k = vector de variables que representan el estado del segmento k .

ε_{ik} = término de error aleatorio.

La relación entre la variable Z_{ik} y la variable de indicadores de estado y_{ik} se puede definir como (Washington *et al.*, 2003):

$$y_{ik} = j - i \quad \text{Ec. 4.2}$$

si $\mu_{i(j-i)} \leq Z_{ik} \leq \mu_{i(j-i+1)}$

para $(j - i) = 0, \dots, I - 1$

donde:

$(j - i)$ = cambio en el estado de un segmento k después de una transición.

μ = límites de deterioro: $\mu_{i0} = 0$; $\mu_{i(j-i+1)} = +\infty$

I = número más alto para la calificación del estado.

Si el grado de deterioro calculado Z_{ik} cae entre los límites μ el cambio de la calificación del estado se convierte en y_{ik} , como lo indica la Ec. 4.3.

Al sustituir la Ec. 4.1 en la Ec. 4.2, el modelo Probit Ordenado se puede expresar como:

$$y_{ik} = j - i \quad \text{Ec. 4.3}$$

si $\mu_{i(j-i)} - \beta_i \cdot X_k \leq \varepsilon_{ik} \leq \mu_{i(j-i+1)} - \beta_i \cdot X_k$

para $(j - i) = 0, \dots, I - 1$

Se espera que el término de error aleatorio ε_{ik} siga una distribución normal con media 0 y varianza igual a 1, puesto que los errores en las mediciones científicas se pueden aproximar bastante a este tipo de distribución (Ángel *et al.*, 2001; Walpole *et al.*, 2007). Por lo tanto, la probabilidad de los cambios de estado y_{ik} , iguales a $(j - i)$, se puede expresar utilizando la distribución normal acumulativa $\Phi(\cdot)$. Entonces, la probabilidad de que el indicador pase del estado i al j , se muestra en la Ec. 4.4 (Baik *et al.*, 2006):

$$P(y_{ik} = j - i) = \Phi(\mu_{i(j-i+1)} - \beta_i \cdot X_k) - \Phi(\mu_{i(j-i)} - \beta_i \cdot X_k) \quad \text{Ec. 4.4}$$

para $(j - i) = 0, \dots, I - 1$

Para realizar la calibración de los parámetros β y μ , en la función de probabilidad, Baik *et al.* (2006) utiliza la función Logaritmo de Máxima Verosimilitud³, que es un procedimiento que permite estimar los parámetros de un modelo probabilístico, de tal manera que sean los más probables a partir de los datos obtenidos. Por lo tanto, permite comparar los modelos, incluyendo o no las variables estimadas (DeGroot & Schervish, 2002). De este modo, las probabilidades de transición para cada segmento del sistema de recolección pueden ser calculadas de la siguiente manera (Baik *et al.*, 2006):

$$\hat{P}(y_{ik} = 0 | X_k, i) = \Phi(\hat{\mu}_{i1} - \hat{\beta}_i X_k) \quad \text{Ec. 4.5}$$

$$\hat{P}(y_{ik} = 1 | X_k, i) = \Phi(\hat{\mu}_{i2} - \hat{\beta}_i X_k) - \Phi(\hat{\mu}_{i1} - \hat{\beta}_i X_k) \quad \text{Ec. 4.6}$$

$$\hat{P}(y_{ik} = 2 | X_k, i) = \Phi(\hat{\mu}_{i3} - \hat{\beta}_i X_k) - \Phi(\hat{\mu}_{i2} - \hat{\beta}_i X_k) \quad \text{Ec. 4.7}$$

...

$$\hat{P}(y_{ik} = I - 1 | X_k, i) = 1 - \Phi(\hat{\mu}_{i(I-1)} - \hat{\beta}_i X_k) \quad \text{Ec. 4.8}$$

³ Una descripción completa de esta función se puede encontrar en la literatura (Gould *et al.*, 2006).



donde $\hat{P}(y_{ik}|X_k, i)$ es igual a la probabilidad de transición del estado i al j para un segmento con vector de parámetros X_k .

El ajuste del modelo Probit Ordenado se puede medir mediante el estadístico ρ^2 (una medida similar al R^2 en modelos de regresión simple). Es denominado como el índice de cociente de verosimilitud y es una medida que permite ver la relevancia de los coeficientes estimados en la función de probabilidad, como se muestra en la Ec. 4.9. Cuanto más cerca esté ρ^2 a 1, el modelo estimado se ajustará mejor a los datos de observación (Mendenhall *et al.*, 2008):

$$\rho^2 = 1 - \frac{LL(\beta)}{LL(0)} \quad \text{Ec. 4.9}$$

donde $LL(\beta)$ es igual a la función logarítmica de verosimilitud en convergencia con el vector de parámetros β y $LL(0)$ igual a la probabilidad inicial de registro con todos los parámetros establecidos en 0.

Para el desarrollo de las matrices de transición en las cadenas de Markov, el primer paso es estimar la probabilidad de incrementos en los indicadores para cada estado. Para los indicadores de estado, que en este modelo van de 1 (mejor) a 5 (peor), el número de posibles incrementos en los indicadores de estado es cuatro. Por ejemplo, un segmento en el estado 2, tiene la posibilidad de sufrir cuatro incrementos ($2 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 3$, $2 \rightarrow 4$, y $2 \rightarrow 5$), suponiendo que no hay actividades de conservación o mejora en la tubería. Por esta razón, son necesarios cuatro modelos de deterioro. La última fila de la matriz de transición es considerada como un estado absorbente, es decir, la probabilidad de que el indicador de estado 5 sea 5 en el tiempo n es siempre 1 (100%) (Baik *et al.*, 2006).

4.1.1.2. VARIABLES DE ENTRADA

Las variables de entrada utilizadas por Baik para su funcionamiento, se muestran en la Tabla 4.1.

4.1.1.3. CASO DE ESTUDIO

El modelo Probit Ordenado fue aplicado y evaluado utilizando los datos proporcionados por el Departamento Metropolitano de Aguas Residuales (MWW) de la ciudad de San Diego, Estados Unidos.

4.1.1.3.1. Datos Utilizados

Se utilizaron en total un conjunto de 545 puntos de datos (Dubin & Rivers, 1987). Como periodo de transición se utilizó un año y un total de cinco variables en el proceso de modelado (Longitud, Diámetro, Tipo de Material, Edad, Pendiente) (Baik *et al.*, 2006).

Tabla 4.1: Variables de entrada Baik (Los Autores)

DATOS	UNIDADES O REGISTRO
DATOS DE TUBERÍA	
Material	Gres, PVC
Edad	Fecha Instalación (AAAA)
Longitud	ft
Diámetro	in
Profundidad	N.A
Tipo	Sanitario, Pluvial, Combinado
Pendiente	m/m
Estado	5 Estados: (1) mejor estado, (5) estado crítico
Flujo	Caudal (m ³ /s)
Tasas de Infiltración/ Exfiltración	N.A
DATOS DE ENTORNO	
Tipo de Suelo	Materiales del Suelo
Nivel de Aguas Subterráneas	Distancia entre nivel freático y Cota Rasante (m)

N.A: esta información no se especifica en la literatura existente

- *Longitud y tamaño*

Luego de aplicar el modelo para esta base de datos, las investigaciones revelan que un tramo de alcantarillado más largo tiene menos probabilidad de deteriorarse que uno más corto (Baik *et al.*, 2006).

Este estudio revela que las tuberías de mayor tamaño son propensas a tener mayores tasas de deterioro (Baik *et al.*, 2006). Sin embargo, estudios anteriores (Ariaratnam *et al.*, 2001; Micevski



et al., 2002) basados en análisis estadísticos, determinaron que entre mayor es el diámetro de la tubería, menor será la probabilidad de deterioro en las mismas.

- *Edad y Pendiente*

La edad de la tubería es determinante en la tasa de deterioro, es decir, el deterioro es menor durante los primeros años de vida útil y más alto durante los últimos años (Baik *et al.*, 2006). Sin embargo, para tramos en estado de condición 4, la edad no es una variable significativa para las transiciones de la tubería.

Una pendiente pronunciada para cualquier estado de condición, representa una mayor probabilidad de que los tramos de tubería se deterioren (Baik *et al.*, 2006).

4.1.1.4. CONCLUSIONES

Para el desarrollo de modelos precisos utilizando el modelo Probit Ordenado es necesario contar con datos que se extiendan durante periodos de tiempo múltiples. Factores como la profundidad de la instalación, el estado de los suelos, el nivel de las aguas subterráneas, la frecuencia de desbordamientos de aguas residuales, etc., deben ser evaluados y analizados con el fin de predecir los patrones de degradación de los sistemas de manera más precisa y detallada (Baik *et al.*, 2006).

Es necesario contar con un sistema estandarizado preciso de calificación del estado de los sistemas de alcantarillado, pues esto permite generar un modelo más sólido en la evaluación de los procesos de deterioro. Además, si entre municipios la información es estandarizada, se puede realizar intercambio de información sobre la evaluación del estado y de esta manera hacer análisis objetivos del método (Baik *et al.*, 2006).

4.1.2. MODELO BENGASSEM & BENNIS

El modelo Bengassem & Bennis ayuda en la toma de decisiones en la gestión de sistemas de alcantarillado mediante, la elaboración de un cronograma de rehabilitación de acuerdo a la condición física y comportamiento hidráulico de las tuberías de la red.

4.1.2.1. DESCRIPCIÓN

Este modelo consiste en una metodología sistemática que evalúa condiciones estructurales e hidráulicas de un sistema de alcantarillado (Ana & Bauwens, 2007). Desarrolla un programa de

clasificación de prioridades en la rehabilitación de una red de alcantarillado utilizando un sistema de inferencia difusa el cual aporta una evaluación completa del funcionamiento hidráulico y estructural (Tagherouit *et al.*, 2011; Bengassem & Bennis, 2000). (Tagherouit, Bennis, & Bengassem, 2011; Bengassem & Bennis, 2000)

Comprende el reconocimiento estructural hecho por las herramientas de inspección vistas en el Capítulo 4 y los resultados de la simulación hidráulica, proporcionando al final una clasificación global del estado actual de la tubería (Iyer & Sinha, 2006). A continuación la teoría difusa se aplica a nivel de cada sección de tubería para así integrar todos los factores de evaluación y llegar al resultado final (Ana & Bauwens, 2007).

De acuerdo con el desempeño estructural de la tubería el sistema experto difuso considera tres aspectos como entradas: condición interna: son los defectos observados en la tubería, condiciones externas: las características de la red y aspectos ambientales que afecten la degradación de la tubería y por último la vulnerabilidad del sitio: naturaleza o densidad del suelo (Ana & Bauwens, 2007; Tagherouit *et al.*, 2011).

Por otra parte el desempeño hidráulico del sistema difuso se puede definir por la capacidad de transporte de la red sin causar daños en la misma o en el medio ambiente. Se basa en un modelo hidráulico calibrado y verificado (Tagherouit *et al.*, 2011).

Para determinar el nivel de rendimiento final de la red de alcantarillado se construyen tres sistemas de inferencia difusa: un sistema estructural difuso (SED), un sistema hidráulico difuso (SHD) y un sistema global difuso (SGD). El SED y el SHD calculan el índice de rendimiento estructural y el índice de rendimiento hidráulico respectivamente con sus variables de entrada. Luego SGD combina todos los factores para finalizar calculando el índice de rendimiento global para cada sección de la tubería (Ana & Bauwens, 2007).

4.1.2.1.1. *Rendimiento Hidráulico*

Evaluación del índice de rendimiento hidráulico (IRH)

La falla hidráulica de una tubería “*i*” está directamente relacionada con la altura máxima de recargo aguas arriba H_i^{SU} necesarios para transmitir la tasa de escurrimiento del caudal de diseño (Bennis *et al.*, 2003). El índice de rendimiento hidráulico (IRH) se expresa como un porcentaje



de la relación de la altura máxima con la profundidad a la que se encuentra la tubería G_i de la siguiente forma:

$$IRH_i = 100\% \frac{H_i^{US}}{G_i} \quad \text{Ec. 4.10}$$

De acuerdo al enfoque hecho por Bennis *et al.* (2003) un modelo no lineal se creó para generar hidrogramas de escorrentía en cada uno de los puntos de la cuenca (Bennis *et al.* 2003). El modelo fue modificado para así crear uno global que pudiera ser aplicado a todas las cuencas aguas arriba de la red de alcantarillado, y poder calcular el índice de rendimiento hidráulico. El modelo no lineal se utiliza para calcular la escorrentía en la salida de las cuencas aguas arriba como si fuera un sólo nodo (Tagherouit *et al.*, 2011).

a. Evaluación del impacto en el índice de rendimiento hidráulico (IIRH)

El impacto en el índice de rendimiento hidráulico (IIRH) expresa el recargo aguas arriba de la red situada en la misma rama. En una red de alcantarillado, el recargo de una sección de una tubería es suficiente para elevar la línea piezométrica (LP) por encima de una serie de tubos aguas arriba. Para poder aplicar la Ec. 4.11 en donde se evalúa el rendimiento hidráulico de la tubería “*i*”, el recargo aguas abajo se debe tener en cuenta, de la siguiente manera (Bennis *et al.*, 2003):

$$IIRH_i = 100\% \frac{H_i^{DS}}{G_i} \quad \text{Ec. 4.11}$$

donde $IIRH_i$ es el efecto de sobrecarga en la tubería “*i*” proveniente de aguas abajo.

4.1.2.1.2. *Rendimiento Estructural*

El rendimiento estructural de un sistema se mide de acuerdo al estado interno y externo de las tuberías, además de evaluar los factores externos que pueden afectar esta condición.

a. Evaluación de la condición interna (CI)

La condición interna (CI) evalúa el estado estructural en el que se encuentre la alcantarilla, teniendo en cuenta los defectos notorios proporcionados por las técnicas de inspección. Una metodología establecida por el centro de investigación del agua (Water Research Center, 1995) es utilizada para establecer a cada tubería una clasificación de cinco grados, tal como se muestra en

la Tabla 4.2 donde el grado 1 es una tubería sin defectos y el grado 5 es la peor condición de la misma. Para aplicar el sistema de inferencia difusa se establecieron porcentajes para cada grado de 1 a 5, que va de 0 a 100 % de acuerdo con los resultados obtenidos de la inspección. El índice CI varía linealmente entre los límites inferior y superior de cada clase tal como se muestra en la Tabla 4.2 (Tagherouit *et al.*, 2011).

Tabla 4.2: Clasificación de la condición interna según WRC (modificado de Tagherouit *et al.*, 2011)

CI	Descripción	Escala numérica
Grado 5	Colapso; o deformación > 10% con otros defectos serios (grietas, juntas abiertas, etc)	[95,100]
Grado 4	Deformación 5-10% y grietas o degradación seria de la tubería	[60,95]
Grado 3	Deformación 0-5%, grietas y muchos defectos o degradación menor de la tubería	[30,60]
Grado 2	Grietas circulares; o juntas abiertas mínimas	[5,30]
Grado 1	No hay defectos estructurales	[0,5]

b. Evaluación de la condición externa (CE)

Esta evaluación determina los factores externos de la tubería que aumentan la tasa de degradación o que tienen un efecto negativo en ella, ya sea en el medio ambiente o en su funcionamiento. Al igual que CI la clasificación se hace en cinco grados que describen los factores externos, también se utiliza la escala de 0 a 100 % para indicar la severidad de cada factor y además los índices de condición externa (CE) también varían entre los límites inferior y superior en cada clase como se muestra en la Figura 4.1 (Tagherouit *et al.*, 2011).

c. Evaluación de la vulnerabilidad del sitio (VS)

El índice de vulnerabilidad del sitio (VS) caracteriza los aspectos geoestratégicos de la red de alcantarillado, lo cual es muy útil para aquellas alcantarillas donde la falla es más probable y notablemente más costosa. Considera la localización de la alcantarilla en la red, el uso de la tierra en el sitio y la vulnerabilidad (naturaleza, densidad de población, etc.). Dependiendo de las



condiciones de localización y los factores externos, VS se clasifica en tres niveles de vulnerabilidad alta, moderada y baja. Al igual que CI y CE los índices de VS se utilizan en una escala de 0 a 100% que varía linealmente entre los límites inferior y superior en cada clase (Tagherouit *et al.*, 2011).

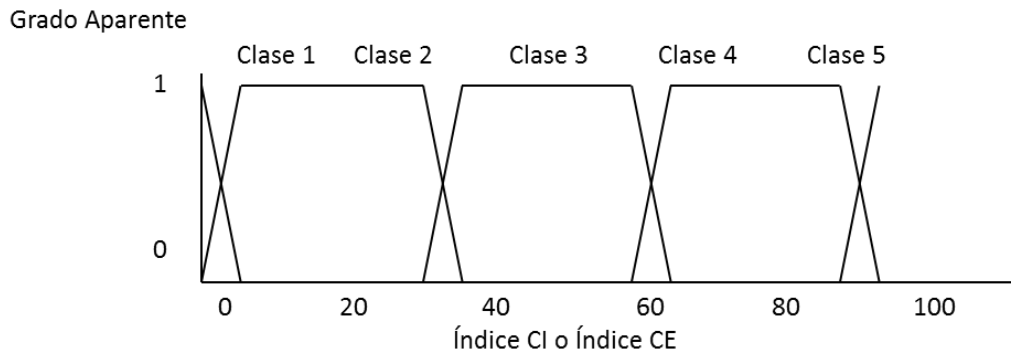


Figura 4.1: Clase de pertenencia de los parámetros CI y CE (Modificado de Tagherouit *et al.*, 2011).

4.1.2.2. VARIABLES DE ENTRADA

Las variables de entrada utilizadas por Bengassem & Bennis para su funcionamiento, se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Variables de entrada BEngassem & Bennis (Los Autores)

DATOS	UNIDADES o REGISTRO
DATOS DE TUBERÍA	
Longitud	m
Diámetro	mm
Profundidad	m
Pendiente	m/m
Localización	N.A
Estado	5 Estados: (1) Sin defectos, (2) Grietas o juntas abiertas (mín.), (3) Deformación, (4) Deformación o degradación seria (5) Colapso
Historial de falla	Tipificación de Daños
Flujo	Caudal (m ³ /s)
DATOS DE ENTORNO	
Tipo de Suelo	Materiales del Suelo
Información Geotécnica	N.A

N.A: esta información no se especifica en la literatura existente

4.1.2.3. CASO DE ESTUDIO

Esta metodología fue aplicada en una pequeña red de alcantarillado combinado seleccionado de la cuenca de drenaje Pont-Viau en la Isla de Laval en Canadá. Los resultados mostraron cómo el sistema de información difusa ofrece una programación en las prioridades de rehabilitación para cada sección de tubería del sistema de alcantarillado.

La Tabla 4.4 se resumen los parámetros de entrada IRH, IIRH, VS, CI y CE de cada sección de tubería y las salidas correspondientes SID, SHD, SED, IRG.

Tabla 4.4: Resultados de los sistemas difusos hidráulico, estructural y global (modificado de Tagherouit *et al.*, 2011).

<i>Tubería</i>	<i>IRH</i>	<i>IIRH</i>	<i>VS</i>	<i>IDH</i>	<i>CI</i>	<i>CE</i>	<i>IDE</i>	<i>IRG</i>
48	0	0	70	4	94	94	96	97
106	59	22	80	85	0	85	6	87
42	0	0	50	3	85	10	85	76
102	9	32	80	55	36	70	63	74
105	15	23	80	63	15	70	30	71
47	0	0	30	2	62	65	69	70
790	4	45	80	47	22	95	52	68
37	5	100	50	41	10	45	26	56
59	0	0	50	3	50	15	62	55
44	0	0	10	2	65	20	63	51
103	5	31	80	47	0	70	6	49
104	0	30	80	13	20	60	47	46
38	1	92	50	14	30	40	57	38
45	0	0	10	2	18	20	33	34
43	0	0	10	2	25	5	19	26
39	0	13	50	13	5	35	21	22
40	0	12	50	9	5	40	21	22
36	0	72	50	14	0	75	6	5
41	0	0	50	3	0	5	4	5
46	0	0	10	2	0	20	2	5



La Tabla 4.5 muestra los resultados obtenidos por medio del sistema experto difuso, para las diferentes tuberías de la red de alcantarillado, y además compara resultados obtenidos con tres métodos diferentes, para concluir que el sistema experto difuso aporta resultados más razonables que los métodos intuitivos que utilizan el desempeño estructural e hidráulico (Tagherouit *et al.*, 2011).

Tabla 4.5: Resultados del sistema difuso global versus los métodos de media y máx (modificado de Tagherouit *et al.*, 2011).

<i>Tuberías</i>	<i>IRG</i>	<i>Media</i>			<i>Max</i>
		<i>Media</i>	<i>(CI, IRH)</i>	<i>Max</i>	<i>(CI, IRH)</i>
		<i>(CI, IRH)</i>	<i>Prioridad</i>	<i>(CI, IRH)</i>	<i>Prioridad</i>
48	97	47	1	94	1
106	87	30	5	59	5
42	76	43	2	85	2
102	74	23	7	36	7
105	71	15	9	15	9
47	70	31	4	62	4
790	68	13	10	22	10
37	56	8	14	10	14
59	55	25	6	50	6
44	51	33	3	65	3
45	34	9	13	18	13
43	26	13	11	25	11
39	22	3	16	5	16
40	22	3	17	5	17
36	5	0	18	0	18
41	5	0	19	0	19
46	5	0	20	0	20

4.1.2.4. CONCLUSIONES

Los resultados de SHD indican claramente que el índice de rendimiento hidráulico está directamente relacionado con el factor de recarga. El índice de rendimiento hidráulico (IRH) depende de IIRH y VS, los cuales actúan juntos para modificarlo de acuerdo con el impacto que tengan en la degradación de la tubería. Las tuberías que no intervienen en el recargo ni tienen un efecto extra se dice que tienen un buen rendimiento (Tagherouit *et al.*, 2011).

Los resultados del SED ratifican que las tuberías con baja CI tienen un índice que tiende a cero, por lo tanto el rendimiento también. Los resultados revelan que cuando una tubería está relativamente deteriorada, los parámetros CE y VS pueden aumentar el índice de rendimiento estructural (Tagherouit *et al.*, 2011), al igual que una tubería con un ligero deterioro pero ubicada en un sitio vulnerable puede ser más importante que una tubería muy deteriorada localizada en un entorno con baja vulnerabilidad. Por último cabe resaltar que lo que interfiere en los resultados de la inferencia difusa para establecer los índices de rendimiento es el grado de pertenencia a una clase específica para cada parámetro (Tagherouit *et al.*, 2011).

Los resultados del sistema de inferencia difusa se comparan con los conseguidos intuitivamente con los enfoques del máximo y la media de los índices de rendimiento hidráulico y estructural, en donde se concluye que la tubería que está más deteriorada es responsable del recargo hidráulico, obtiene la primera prioridad para la rehabilitación por medio del sistema de inferencia difusa, así como también por los métodos MAX y MEDIA. Las tuberías que están en buenas condiciones estructurales no son responsables del recargo hidráulico y además no tienen un efecto extra. Por lo tanto, obtienen la misma prioridad por medio de los tres métodos (Tagherouit *et al.*, 2011).

4.1.3. MODELO HASEWAGA

En la literatura existente se han descrito brevemente algunos modelos (por ejemplo Ana & Bauwens, 2007) pero su descripción detallada no ha sido objeto de publicaciones. Por esta razón, a continuación se describe de manera general uno de éstos perteneciente al Grupo 1 de clasificación:



El Modelo Hasewaga ofrece un pronóstico de la necesidad de reparación o rehabilitación de un sistema de alcantarillado, para que los que ofrecen este servicio hagan una buena gestión y contrarresten inversiones por problemas de funcionamiento o rendimiento en un futuro.

4.1.3.1. DESCRIPCIÓN

Este modelo, hecho en Japón, deduce la necesidad de reparación de una tubería de la red de alcantarillado existente, basándose en cuatro puntos de vista (Ana & Bauwens, 2007; Hasegawa *et al.*, 1999): (i) La disminución de la capacidad de flujo, (ii) Riesgo de falla en vías, (iii) Desbordamiento de alcantarillas e inundaciones y (iv) Aumento en el costo debido a la infiltración o entradas al sistema.

Haciendo uso de los resultados obtenidos por medio de la inspección por circuito cerrado de televisión, se calcula la reducción de la capacidad de flujo, de acuerdo a lo observado y al tipo de tubería, es decir, combinada, sanitaria o pluvial, se clasifican las tuberías en tres rangos (Ana & Bauwens, 2007):

1. Rango 1: poca capacidad de flujo.
2. Rango 2: la capacidad de flujo es la mitad de la original.
3. Rango 3: la capacidad de flujo es más de la mitad de la original.

La posibilidad del riesgo de falla en vías se evalúa por medio del índice de probabilidad de colapso en vías, el cual se obtiene mediante los defectos observados (tuberías rotas, defectos laterales, problemas en las juntas, etc.). Por lo tanto, un índice es asignado a cada tubería de acuerdo a los daños observados en la inspección CCTV, y se clasifican en tres categorías (Ana & Bauwens, 2007):

1. Rango 1: alta probabilidad de colapso.
2. Rango 2: probabilidad de colapso (superior a cero) si no se toman medidas preventivas.
3. Rango 3: baja probabilidad de colapso.

El entorno de las tuberías del sistema de alcantarillado es de gran importancia al momento de asignar un índice de probabilidad de falla vial. Los factores que se pueden tener en cuenta son: edad, material, profundidad, nivel freático, tipo de vía, tráfico, tipo de suelo y presencia de otras estructuras alrededor de la tubería (Ana & Bauwens, 2007).

El desbordamiento de las alcantarillas e inundaciones se determinan por medio de un modelo de simulación hidráulica. La posibilidad de desbordamiento o inundación tiene en cuenta la relación entre el flujo máximo (Q), y el caudal de diseño y/o (Q_d) o capacidad de flujo máximo en la tubería (Q_{max}) y se clasifica en tres categorías (Ana & Bauwens, 2007):

1. Rango 1: $Q \geq Q_{max}$
2. Rango 2: $Q_d \leq Q \leq Q_{max}$
3. Rango 3: $Q \leq Q_d$

Entonces, el modelo calcula el incremento asociado con el costo del tratamiento de la infiltración excesiva, para finalmente combinar todos los rangos de los cuatro aspectos evaluados anteriormente, entonces la tubería con el rango más alto obtendrá prioridad en la rehabilitación (Ana & Bauwens, 2007).

4.2. GRUPO 2: HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE DECISIÓN

Las herramientas pertenecientes a este grupo integran las fases de recopilación de información, modelación de desempeño y estrategias de gestión.

4.3.1. MODELO AQUA-WERTMIN

El Modelo AQUA-WertMin ofrece una técnica computarizada en la gestión de alcantarillados para realizar la programación de la inspección de la red y entregar a los gestores estrategias de planificación.

4.3.1.1. DESCRIPCIÓN

Este software fue desarrollado en Alemania para ayudar en la gestión, planificación y elaboración de estrategias de rehabilitación de los sistemas de alcantarillado (Stone *et al.*, 2002). Está basado en un *modelo de supervivencia* para estimar las probabilidades de transición en un sistema de aguas residuales, el cual será explicado más adelante (Stone *et al.*, 2002; Ana & Bauwens, 2010).

Para el correcto funcionamiento del modelo es necesario hacer una clasificación de la condición actual de la red de alcantarillado, por lo que se recurre a las herramientas de inspección para



hacer esta evaluación. Las condiciones se pueden dar en las siguientes clases (Stone *et al.*, 2002; Baur & Herz, 2001; Ana & Bauwens, 2007).

- Clase 6: Se considera una excelente condición del alcantarillado.
- Clase 5: Se observan defectos que en ocasiones necesitarán reparaciones importantes. Se considera una buena condición del alcantarillado.
- Clase 4: Se observan defectos que necesitan ser reparados en un plan a largo plazo. Se considera una condición al límite del alcantarillado.
- Clase 3: Se observan defectos que necesitan mayores reparaciones en un plan a mediano plazo. Se considera una mala condición del alcantarillado.
- Clase 2: Se observan defectos que necesitan reparaciones en un plan a corto plazo. Se considera una condición muy mala del alcantarillado.
- Clase 1: en esta clase la red ya ha fallado y necesita ser reemplazada inmediatamente.

4.3.1.1.1. *Estimación de las Probabilidades de Transición*

La probabilidad de transición se conoce como el cambio que tiene un tramo o un conjunto de tramos de una red de alcantarillado para pasar de una condición buena a una mala durante su vida de servicio. Los sistemas de alcantarillado sobreviven en una condición específica durante varios años, y su probabilidad de transición se calcula por medio de curvas conocidas como funciones de transición (Baur *et al.*, 2003; Ana & Bauwens, 2010).

4.3.1.1.2. *Función de Transición*

La función de transición para pasar de la condición i a la $i + 1$ está dada por la función de distribución de Herz Ec. 4.12 (Baur & Herz, 2001; Davis *et al.*, 2008):

$$S(t)_{i \rightarrow i+1} = \frac{a_{i \rightarrow i+1} + 1}{a_{i \rightarrow i+1} + e^{b_{i \rightarrow i+1}(t - c_{i \rightarrow i+1})}} \quad \text{Ec. 4.12}$$

donde $S(t)_{i \rightarrow i+1}$: Es la cantidad de tuberías expresada en porcentaje que no han cambiado a una clase más baja en una edad t en particular (indica la velocidad de envejecimiento).

La Ec. 4.12 debe ser calibrada para que los datos obtenidos a partir de ella sean consistentes, y así realizar el pronóstico de la condición de las tuberías y las futuras necesidades de rehabilitación

(Ana & Bauwens, 2010). La calibración consiste en dejar los grupos de tuberías con la que se cuente información suficiente para su análisis. El modelo realiza una adecuada calibración cuando tiene por lo menos los datos de un año de instalación del sistema. Además es necesario conocer el último año de inspección, diámetro, longitud entre pozos y condición actual de todas las tuberías evaluadas (Stone *et al.*, 2002). Si se cuenta con datos adicionales, podrían ser útiles para agrupar las tuberías con características de deterioro similares (Ana & Bauwens, 2010). Estos datos podrían ser: factores físicos (edad, forma, tamaño, profundidad, etc.), ambientales (nivel freático, tráfico, etc.) y operacionales o de construcción (método de instalación, mano de obra, etc.) (Ana & Bauwens, 2010).

Un ejemplo de las curvas de transición formadas a partir de la función de transición se muestran en la Figura 4.2, siendo CC_i la condición de la clase de 1 a 6 en la que se encuentren el grupo de tuberías consideradas en este ejemplo y la indicación porcentual muestra la cantidad de tuberías (expresada en porcentaje) que aún mantiene su condición:

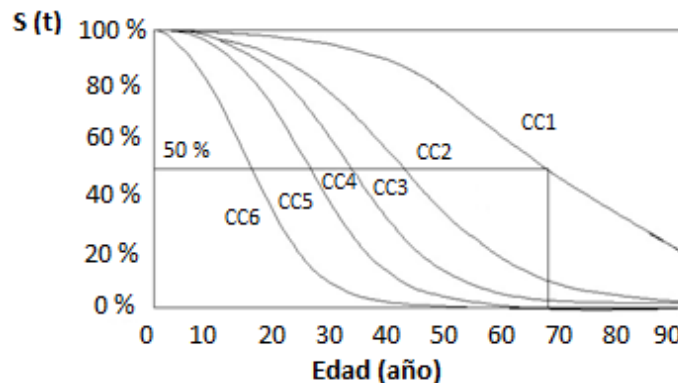


Figura 4.2: curvas de transición utilizadas en AQUA-WertMin (Modificado de (Helfawy, 1998))

4.3.1.1.3. Modelo de Supervivencia

El modelo de supervivencia es un modelo para el deterioro de un sistema de alcantarillado desarrollado en la Universidad de Karlsruhe, Alemania. Se aplica en alcantarillas que se hayan construido en el mismo año, además el análisis incluye otras características como (Stone *et al.*, 2002): material, diámetro y condición del suelo, aspectos que se supone van a influir en la vida útil del alcantarillado. Requiere de las condiciones iniciales de la red, obtenidas mediante las técnicas de inspección, ya que de acuerdo a los indicadores de estado del alcantarillado el



programa explora estrategias de gestión, especialmente en los cálculos financieros (Baur & Herz, 2001).

Para que el software genere resultados satisfactorios, el usuario debe introducir los indicadores del estado en que se encuentre la red, en este caso, de acuerdo a las seis clases posibles. AQUA-WertMin procede a calcular las probabilidades de transición agrupando las tuberías que comparten características similares de deterioro para aplicar el *modelo de supervivencia* (Stone *et al.*, 2002). El modelo calcula y entrega al usuario los datos de transición para cada clase, el tiempo de vida útil de los sistemas de aguas residuales y las necesidades futuras de rehabilitación basándose en un análisis económico de costos y tiempos de reparación (Helfawy, 1998; Stone *et al.*, 2002; Davis *et al.*, 2008).

4.3.1.2. VARIABLES DE ENTRADA

Las variables de entrada utilizadas por AQUA-Wertmin para su funcionamiento, se muestran en la Tabla 4.6.

4.3.1.3. CASO DE ESTUDIO

Este modelo fue aplicado en Dresden, Alemania en donde hay alrededor de 1400 km de redes de alcantarillado. Aproximadamente un cuarto de la red fue construida antes de 1900, donde el 85 % del alcantarillado tiene más de 60 años. Sin embargo, no siempre el alcantarillado más antiguo causa los mayores problemas: en varias ocasiones el alcantarillado más reciente requiere mejores técnicas de rehabilitación (Baur & Herz, 2001).

Al momento de empezar el estudio, el 85 % de la red había sido inspeccionada mediante CCTV, pero sólo el 15 % de los datos fueron formalmente clasificados y evaluados. La razón de esto fue por la escasez de recursos, ya que los fondos disponibles son utilizados para resolver los problemas presentados de urgencia. Dresden ha estado inspeccionando y evaluando parcialmente las redes de alcantarillado por lo menos una vez cada diez años para así tener datos suficientes al momento de aplicar un método de rehabilitación (Baur & Herz, 1999).

Tabla 4.6: Variables de entrada AQUA-Wertmin (Los Autores)

DATOS	UNIDADES o REGISTRO
DATOS DE TUBERÍA	
Material	Concreto, PVC, Gres
Edad	Fecha Instalación (AAAA)
Longitud	m
Diámetro	mm
Tipo Sección Transv.	Circular, Ovalada
Tipo	Sanitario, Pluvial, Combinado
Pendiente	%
Localización	N.A
Estado	6 Estados: (6) Excelente Condición, (5) Buena Condición, (4) Condición Límite, (3) Mala Condición, (2) Mala Condición (Reparación corto plazo), (1) Condición de Falla
Historial de falla	Tipificación de Daños
Tasas de Infiltración/ Exfiltración	N.A
Tipo de Conexiones	N.A
DATOS DE ENTORNO	
Tipo de Suelo	Materiales del Suelo
Trafico/Tipo de Vía	N.A
DATOS DE ENTORNO	
Presupuesto	\$/Año
Costos Técnicas de Rehabilitación	\$/m

N.A: esta información no se especifica en la literatura existente

En este estudio se tomaron 5 categorías de condiciones de la tubería (CC), de la mejor (clase 6) a la peor (clase 1). El modelo tiene en cuenta: la importancia de los daños individuales y el comportamiento en conjunto de la red. El subconjunto de tuberías que fueron evaluadas e inspeccionadas se tuvieron en cuenta para el modelo. Sin embargo, no todas las tuberías fueron consideradas en el análisis, porque no se contaba con información suficiente, por lo que el estudio sólo contó con un 4,6 % de toda la red. El interés principal de este caso de estudio fue encontrar la velocidad de envejecimiento de diferentes tipos de alcantarillado y su uso para la programación de futuras inspecciones (Baur & Herz, 2001).



Del 4,6 % del total de la red en Dresden, se escogieron los datos de inspección y evaluación que aportaran en porcentaje a la clasificación de materiales y períodos de construcción en el total de la red, como se muestra en la Tabla 4.7 (Baur & Herz, 2001):

Tabla 4.7: materiales y periodos de construcción de las alcantarillas investigadas en Dresden (Modificado de Baur & Herz, 2001).

Tipo de Material	Periodo de Construcción	Porcentaje (%)
PVC	>1940	3
Concreto	<1900	26
Concreto	1900-1940	30
Concreto	>1940	5
Gres	<1900	2
Gres	1900-1940	27
Gres	>1940	7

Para la muestra de 37,8 km de red de alcantarillado en Dresden, cuatro funciones de transición fueron calibradas, donde se obtuvo que cuando el sistema de alcantarillado tenga 60 años de construido aproximadamente el 50 % se encontrará en la categoría 4. Si la inspección revela que una alcantarilla de más de 60 años aún se encuentra en clase 4 o mejor, es porque tiene velocidad de envejecimiento lenta. Por otra parte, si una alcantarilla reciente se encuentra en la categoría 3 obviamente es porque tiene una velocidad de envejecimiento rápida (Baur & Herz, 2001).

Tabla 4.8: ejemplo de la velocidad de envejecimiento y los años de transición de una clase a otra (Modificado de Baur & Herz, 2001).

No Alcantarillado	Años de Inspección	Clase (cc)	Velocidad de Envejecimiento (%)	Año de Construcción	Años de transición entre clases				Tiempo de vida estimado	Tiempo de vida residual (2000)
					5 a 4	4 a 3	3 a 2	2 a 1		
01A14	1997	3	35	1899	1940	1973	2023	2059	160	58
01R84	1994	3	40	1903	1950	1985	2038	2077	174	76
05O10	1995	5	23	1960	2011	2048	2104	2145	185	145

El deterioro individual de una alcantarilla permite generar una mejor estimación de la fecha de la próxima inspección. La velocidad de envejecimiento de una alcantarilla es determinada por la clase en la que quede luego de ser inspeccionada a una edad en particular. La Tabla 4.8 muestra

un ejemplo de los datos de salida del programa AQUA-WertMin tomando como muestra tres tuberías de los datos de Dresden (Baur & Herz, 2001).

4.3.1.4. CONCLUSIONES

Diferencias significativas fueron encontradas en la conducta de envejecimiento en diferentes tipos de alcantarillado, por ejemplo los que compartían aspectos específicos se deterioraban más rápido que otros, por lo tanto este grupo se tenía que inspeccionar en intervalos de tiempo más cortos. La programación de las inspecciones futuras de prevención debe realizarse antes de que un conjunto de tuberías pase a una condición más crítica (Baur & Herz, 2001).

Se obtienen ventajas del modelo como por su fácil manejo, al igual que las curvas de transición son adecuadas para mostrar un proceso de cambio de estado. Además, como el modelo puede agrupar y predecir el cambio de estado de las tuberías que comparten características similares de deterioro, éste ayuda a programar actividades de mantenimiento y rehabilitación permitiendo desarrollar estrategias de control (Ana & Bauwens, 2010).

Por otro lado, este modelo también tiene limitaciones en el desarrollo, y es la cantidad y calidad de los datos necesarios para el análisis (Fenner, 2000) debido a que son primordiales para agrupar las tuberías de acuerdo con sus características de deterioro y poder realizar el cálculo de las probabilidades de transición (Ana & Bauwens, 2010).

El hecho de crear un grupo de tuberías con características similares de deterioro se torna un problema, ya que este grupo debe ser lo suficientemente pequeño para ser considerado homogéneo, pero suficientemente grande para poder obtener resultados estadísticamente significativos (Kleiner *et al.*, 2007; Ana & Bauwens, 2010).

El usuario siempre tendrá la posibilidad de escoger entre varias opciones de estrategias generadas por el programa, teniendo en cuenta aspectos económicos, viabilidad técnica y requerimientos futuros. Por lo tanto la vida de un sistema de alcantarillado no sólo depende del uso de los conocimientos de ingeniería sino también de los costos en los trabajos de reparación y rehabilitación y las especificaciones técnicas establecidas en la normatividad de cada lugar (Baur & Herz, 2001).



De igual manera, el monitoreo del alcantarillado es necesario para tomar las decisiones adecuadas en el momento correcto, ya que no hay manera de predecir la vida útil de una infraestructura sin información de calidad (Baur & Herz, 2001).

4.3.2. MODELO EDMONTON

El Modelo Edmonton fue hecho para ayudar a la Ciudad de Edmonton, Canadá, en la planificación de los gastos de mantenimiento en los sistemas de alcantarillado, por lo que la idea principal es predecir los costos en rehabilitación y/o reparación de los bienes existentes basándose en la condición actual de las tuberías (Ana & Bauwens, 2007).

4.3.2.1. DESCRIPCIÓN

Este método ayuda a pronosticar la condición de las tuberías y el costo relacionado con la reparación y/o rehabilitación de las tuberías que hacen parte de la red de alcantarillado. Se basa en tres modelos que se desarrollaron y se convirtieron en una herramienta valiosa de gestión para así lograr una adecuada planificación de los gastos de mantenimiento del sistema (Ruwanpura *et al.*, 2004). (Ruwanpura, Ariaratnam, & El-Assaly, 2004)

El modelo 1 prevé la clasificación estructural del estado (CE) de una alcantarilla teniendo en cuenta la edad, el material y la longitud de la tubería (Ruwanpura *et al.*, 2004). CE es evaluada según una escala establecida en la Ciudad de Edmonton en 1996 que va de 1 a 5, siendo 5 la peor condición de la tubería (City of Edmonton, 1996). El modelo 2 predice la probabilidad de transición de quedarse en un estado o pasar a otro peor, cuando la edad aumenta 5 años. El modelo 3 utiliza los resultados obtenidos en los modelos 1 y 2 para hacer una previsión de costos con un intervalo de confianza adecuado para el buen manejo del presupuesto. La descripción de este modelo se observa de manera detallada en la Figura 4.3 (Ruwanpura *et al.*, 2004).

Cada modelo utiliza una combinación de simulaciones que se basa en reglas y en análisis de probabilidad para ayudar a la planificación de los gastos futuros en mantenimiento y/o rehabilitación del sistema de alcantarillado (Ruwanpura *et al.*, 2004).

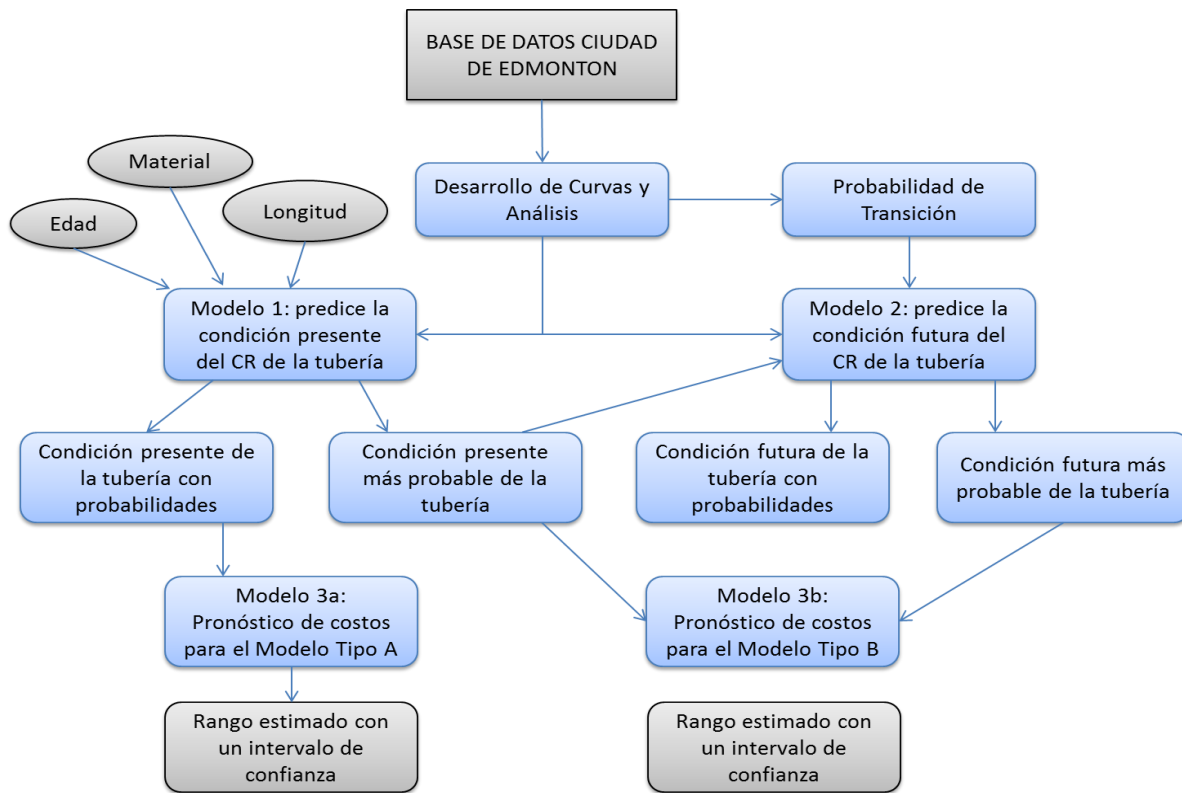


Figura 4.3: Estructura de la simulación basada en análisis de probabilidad (modificado de Ruwanpura *et al.*, 2004)

4.3.2.1.1. *MODELO 1: Predecir la clasificación del estado (CE) tuberías del alcantarillado*

Este modelo predice la condición de la red de alcantarillado teniendo en cuenta los siguientes factores: i) material, ii) clase de edad, iii) longitud y iv) el valor de PRE (Probabilidad Real de Existencia). Para obtener resultados satisfactorios es necesario recopilar toda la información disponible y complementaria. Por lo general, la información que está disponible es la edad y el material de la tubería, la CE de los datos observados es información complementaria y el valor de PRE se hace sobre ellos. Se realiza una clasificación por rango de edades (es decir, 0-5, 6-10, 11-15, 16-20 y así sucesivamente) para hacer la predicción más lógica y precisa (Ruwanpura *et al.*, 2004).

El método utilizado en este modelo es la simulación de Monte Carlo, el cual entrega al usuario dos salidas: la clasificación del estado (CE) para las 5 categorías (CE1-CE5) y las probabilidades asociadas a cada una, basándose en la edad, material longitud y la PRE. El valor de PRE es



obtenido a partir de las curvas de distribución de la probabilidad acumulada construida por la clasificación del alcantarillado, la cual fue hecha por lo observado en el circuito cerrado de televisión con respecto a la edad (CCTV) (Ana & Bauwens, 2007).

El proceso de este modelo se muestra de la siguiente manera (Ruwanpura *et al.*, 2004):

- a. Se introduce el tipo de material, la longitud y la edad de la tubería.
- b. Se determina la clase de la edad (por ejemplo 31-35).
- c. Se obtienen los valores de PRE para cada categoría CE1-CE5.
- d. Se inicia la simulación de Monte Carlo escogiendo un número aleatorio entre 0 y 1.
- e. Se adopta un algoritmo de probabilidades basado en reglas, como se muestra en la Figura 4.4 y se escoge la CE al que pertenece el número aleatorio.
- f. Repetir los literales (d) y (e) un número considerable de veces (por ejemplo 1000 iteraciones).
- g. Calcular la probabilidad simulada de existencia (PSE), con base en los resultados obtenidos por la simulación.
- h. Si el valor de PSE de un CE es mayor o igual al valor de PRE, ese CE es considerado como una opción dentro del número de simulaciones hechas.
- i. Repetir los literales (f), (g) y (h) para un número considerable de veces y determinar la incertidumbre de los resultados, basándose en un intervalo de confianza alto.

$$0 < \text{Rdn} \# < \text{PRE}_{\text{CE1}} \rightarrow \text{CR1}$$

$$\text{PRE}_{\text{CE1}} < \text{Rdn} \# < \text{PRE}_{\text{CE1}} + \text{PRE}_{\text{CE2}} \rightarrow \text{CR2}$$

$$(\text{PRE}_{\text{CE1}} + \text{PRE}_{\text{CE2}}) < \text{Rdn} \# < (\text{PRE}_{\text{CE1}} + \text{PRE}_{\text{CE2}} + \text{PRE}_{\text{CE3}}) \rightarrow \text{CR3}$$

$$(\text{PRE}_{\text{CE1}} + \text{PRE}_{\text{CE2}} + \text{PRE}_{\text{CE3}}) < \text{Rdn} \# < (\text{PRE}_{\text{CE1}} + \text{PRE}_{\text{CE2}} + \text{PRE}_{\text{CE3}} + \text{PRE}_{\text{CE4}}) \rightarrow \text{CR4}$$

$$(\text{PRE}_{\text{CE1}} + \text{PRE}_{\text{CE2}} + \text{PRE}_{\text{CE3}} + \text{PRE}_{\text{CE4}}) < \text{Rdn} \# \leq 1 \rightarrow \text{CR5}$$

Figura 4.4: Algoritmo de probabilidades para el modelo 1 (modificado de Ruwanpura *et al.*, 2004).

4.3.2.1.2. *MODELO 2: predicción de la clasificación de estado futura de la red de alcantarillado basada en las condiciones actuales de valoración.*

Este modelo se encarga de predecir la CE futura basándose en la condición actual de la red, de acuerdo a la edad, material, longitud, las probabilidades de transición y los valores de PRE obtenidos (Ana & Bauwens, 2007).

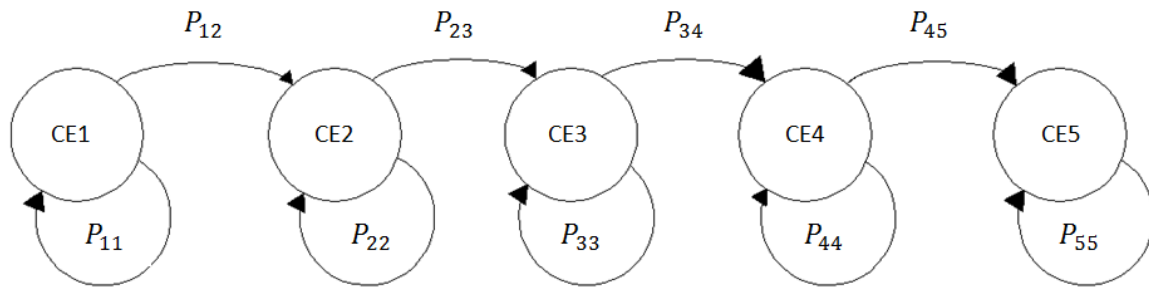


Figura 4.5: Cadenas de Markov para Ces (modificado de Ruwanpura *et al.*, 2004).

El método utilizado para predecir la condición futura de la red de alcantarillado se hace por medio de la Teoría de Markov, teniendo en cuenta el estado actual del sistema. La Figura 4.5 muestra el concepto de usar las probabilidades de transición de Markov en relación con la clasificación del estado CE de la red (Ruwanpura *et al.*, 2004).

Uno de dos estados simples (CE_A, CE_B) de la cadena de Markov puede ser usado para establecer la ocurrencia de cada uno de ellos. Estos estados se definen por las probabilidades de transición de permanecer en el mismo CE o de pasar a otro peor cuando la edad aumenta en 5 años. Las probabilidades de transición se calculan usando los valores obtenidos de PRE y se mantiene que la suma de las probabilidades de transición generadas por un CE es siempre igual a 1, como se muestra en la Ec. 4.13 (Ruwanpura *et al.*, 2004).

$$P_{11} + P_{12} = 1; P_{22} + P_{23} = 1; P_{33} + P_{34} = 1; P_{44} + P_{45} = 1; P_{55} = 1 \quad \text{Ec. 4.13}$$

El proceso de este modelo se muestra de la siguiente manera (Ruwanpura *et al.*, 2004):

- Se introduce el tipo de material, la longitud y la edad de la tubería.
- Se determina la clase de la edad (por ejemplo 31-35).
- Se obtienen los valores de PRE y los de las probabilidades reales de transición (PRT), sobre las entradas de las condiciones presentes y futuras.



- d. Se inicia la simulación de Monte Carlo escogiendo un número aleatorio entre 0 y 1.
- e. Se adopta el siguiente algoritmo de probabilidades basado en reglas y se escoge la CE al que pertenece el número aleatorio, para el estado actual i y el peor estado inmediatamente siguiente j .

if $0 < \text{Rnd} \# < \text{PRT}_{ij}$, entonces condición i .

if $\text{PRT}_{ij} < \text{Rnd} \# \leq 1$, entonces condición j .

- f. Repetir los literales (d) y (e) un número considerable de veces, por ejemplo 1000 iteraciones.
- g. Calcular la probabilidad de existencia simulada (PES), con base en los resultados obtenidos por la simulación.
- h. Si el valor de PSE de un CE es mayor o igual al valor de PRT, el mismo CR es considerado como la única opción entre las dos opciones.

4.3.2.1.3. *MODELO 3: predicción de costos.*

De acuerdo a las políticas de la ciudad de Edmonton, las tuberías que pertenezcan a CR4 o CR5 son las que necesitan ser reparadas y lo pueden hacer de las siguientes cinco formas: (1) reparación completa; (2) reparación parcial; (3) a cielo abierto; (4) terreno a cielo abierto y (5) túnel. El propósito de este modelo es predecir los costos de reparación y/o reemplazo de las tuberías del alcantarillado que necesitan atención urgente, lo cual se puede hacer de dos maneras (Modelo 3A y 3B). El resultado final es un rango de estimación que tiene un límite inferior y superior con un intervalo de confianza entre 0 y 100. Entonces, el usuario puede escoger el método con la confianza preferida (Ruwanpura *et al.*, 2004).

- a. Modelo 3A: predice los costos de acuerdo a los resultados del Modelo 1, es decir, con los resultados obtenidos de este modelo se tiene un porcentaje de probabilidad para cada CE, las tuberías con porcentaje más alto serán las que se reparen. El método utilizado para el cálculo de los costos usará el mismo algoritmo adoptado en los pasos (d) y (e) del Modelo 1. Luego, se calcula el costo de reparación de la tubería multiplicando el porcentaje total del peor CE, la longitud de la tubería y el costo por metro.

$$\text{Costo} = \%CR * L * \$/m$$

Ec. 4.14

El número de iteraciones se repite una gran cantidad de veces (por ejemplo 1000 veces) y se calcula el costo para cada iteración, esto se hace para cada tubería que necesita ser rehabilitada (Ruwanpura *et al.*, 2004).

- b. Modelo 3B: predice los costos de acuerdo a los resultados de los Modelos 1 y 2. Se obtiene el CR más probable donde se pueda encontrar la tubería, y se aplica el método de cálculo de los costos de acuerdo al mismo algoritmo adoptado en los pasos (d) y (e) del Modelo 1. Luego, se calcula el costo de reparación de la tubería multiplicando la longitud de la tubería y el costo por metro.

$$\text{Costo} = L * \$/m$$

Ec. 4.15

El número de iteraciones se repite una gran cantidad de veces (por ejemplo 1000 veces) y se calcula el costo para cada iteración, esto se hace para cada tubería que necesita ser rehabilitada y finalmente sumar todos los costos de reparación para obtener un costo total (Ruwanpura *et al.*, 2004).

Tabla 4.9: Variables de entrada utilizadas por Edmonton (Los Autores)

DATOS	UNIDADES o REGISTRO
DATOS DE TUBERÍA	
Material	Concreto sin Refuerzo, Concreto Reforzado, Mampostería
Edad	Año de Instalación (AAAA)
Longitud	m
Diámetro	mm
Profundidad	m
Estado	5 Estados: (1) mejor estado, (5) estado crítico
DATOS DE ENTORNO	
Tipo de Suelo	Materiales del Suelo
Información Geotécnica	N.A
Costos Técnicas de Rehabilitación	\$/m

N.A: esta información no se especifica en la literatura existente



4.3.2.2. VARIABLES DE ENTRADA

Las variables de entrada utilizadas por Edmonton para su funcionamiento, se muestran en la Tabla 4.9.

4.3.2.3. CASO DE ESTUDIO

Este estudio se llevó a cabo en la ciudad de Edmonton, Canadá, que tiene aproximadamente 4600 km de longitud de red de alcantarillado en sistema combinado, pluvial y sanitario, el cual se encuentran en diferentes fases de deterioro. Esto ha llevado a la ciudad a implementar un enfoque de gestión, ya que es más rentable reparar una tubería antes de que se produzca su colapso (Ruwanpura *et al.*, 2004).

En el sistema de alcantarillado en la ciudad de Edmonton se presentan tres tipos de tubería: mampostería, concreto reforzado y concreto no reforzado. La base de datos suministró 1269 segmentos en mampostería, 548 en concreto no reforzado y 196 en concreto reforzado. La condición estructural (CE) de cada segmento se obtuvo de CCTV. La edad se consideró de acuerdo al año de construcción y el de inspección, luego se clasificaron en rangos de clase de edades (0-5, 6-10, 11-15, 16-20 años, y así sucesivamente), por otro lado la longitud fue en metros y varió de 0.44 a 273.10 m (Ruwanpura *et al.*, 2004).

Se agruparon las tuberías según el material para calcular la probabilidad real existente (PRE) de cada clase de edad. Luego se analizó que la longitud era un aspecto importante para predecir CE, por lo que se establecieron las siguientes categorías para los diferentes materiales existentes (Ruwanpura *et al.*, 2004).

- a. Sin tener en cuenta la longitud.
- b. Longitud inferior a 50 m.
- c. Longitud entre 50 y 100 m.
- d. Longitud entre 100 y 150 m.
- e. Longitud mayor a 150 m.

Para predecir PRE se utilizaron curvas de distribución de datos. Sin embargo, en algunas clases de edades no existían datos suficientes para su elaboración y comparación con las otras curvas con las que si se contaban datos, por lo que decidieron suavizar las curvas de manera hipotética, por lo tanto PRE de una clase de edad futura no sería mayor a la actual y así pudieron construir

las curvas de distribución. Teniendo esto procedieron a aplicar los Modelos 1, 2 y 3 explicados anteriormente (Ruwanpura *et al.*, 2004).

4.3.2.4. CONCLUSIONES

La simulación se considera una herramienta rentable y eficaz para la toma de decisiones y el análisis de sistemas reales. A pesar de que esta es una herramienta nueva utilizada en la planificación de proyectos, se cree que es un enfoque innovador para fines de predicción cuando los datos disponibles son limitados, debido a que este método utiliza el pronóstico de la condición futura de las tuberías y a su vez pronostica los costos asociados a cada reparación y/o renovación (Ruwanpura *et al.*, 2004; Fernando *et al.*, 2003).

La obtención de resultados depende de la adecuada aplicación y validación de los datos, por lo que es necesario que la recolección de datos de las tuberías del alcantarillado sea con el fin de elaborar una base de datos fiable. Sin embargo, en la recolección de datos existen factores que pueden generar incertidumbre como la profundidad, la condición del suelo y la erosión lo que consigue afectar la calificación estructural (CE) (Ruwanpura *et al.*, 2004).

4.3.3. MODELO PRISM

PRISM (*Proactive Rehabilitative Infrastructure Sewer Management*) es un modelo de gestión que ayuda a los tomadores de decisiones a planificar actividades de mantenimiento y rehabilitación correctiva apropiadamente, dando prioridad a determinados tramos de tubería según su clasificación y factores de importancia derivados de informes de inspección y datos de costos de rehabilitación histórica. El objetivo del modelo es minimizar los gastos de capital en la planificación de ejecución presupuestal.

4.3.3.1. DESCRIPCIÓN

El modelo PRISM se basa en una herramienta computarizada que, por medio de un modelo de programación lineal, determina la probabilidad de que una alcantarilla se encuentre en un estado deficiente de acuerdo a sus datos históricos.

4.3.3.1.1. Datos de Entrada

El modelo requiere diferentes datos de entrada, que se estiman a partir del estado actual de las tuberías, como se puede ver a continuación:



a. Datos del estado actual

El estado actual de las tuberías de alcantarillado, por lo general es determinado por las ciudades por medio de inspecciones con circuito cerrado de televisión (CCTV). Sin embargo, los indicadores de rendimiento o la calificación de estado pueden ser determinados mediante el análisis de los registros de diferentes sistemas de inspección, como los nombrados en el Capítulo 3.

b. Análisis de costos de rehabilitación

Los costos de los diferentes métodos de rehabilitación de tuberías de un sistema de alcantarillado son analizados por metro lineal de construcción. El análisis de los costos de rehabilitación se torna difícil, cuando el plan de gestión es realizado a largo plazo, por ejemplo a 20 años. Es difícil evaluar cómo las tecnologías de construcción pueden cambiar, además del aumento y disminución de la competencia entre contratistas que ofrecen estos servicios. Estas variables pueden influir en el costo unitario asociado a la rehabilitación de las tuberías de alcantarillado en el futuro (Ariaratnam & MacLeod, 2002). Por esta razón, después de la selección de los métodos de rehabilitación típicos usados en la zona, los costos unitarios de cada uno son promediados para determinar un costo unitario general por metro lineal. Éste es usado para todos los posibles escenarios de reparación. El análisis de costo unitario incluye además de costos de construcción, costos de diseño, ingeniería e imprevistos.

4.3.3.1.2. *Clasificación de las Tuberías de Alcantarillado*

Los modelos matemáticos de regresión lineal, como se menciona anteriormente, están diseñados para determinar asociaciones entre variables categóricas. Por esta razón, las tuberías de alcantarillado de la ciudad deben ser clasificadas de acuerdo a las características que pueden influir en su estado futuro, como edad, diámetro, material, tipo de residuos y la profundidad promedio de la cubierta (Ariaratnam & MacLeod, 2002).

El modelo calcula la probabilidad de falla de una tubería de alcantarillado de acuerdo a sus características. De esta manera, las tuberías que se encuentren en un estado verdaderamente deficiente puedan ser identificadas y rehabilitadas de forma planificada (Ariaratnam & MacLeod, 2002).

4.3.3.1.3. *Determinación de los Factores de Importancia de las Tuberías*

La importancia de falla de unas tuberías sobre otras debe ser determinada para priorizar las actividades de inspección y rehabilitación dadas las limitaciones presupuestales de las ciudades. Es por esta razón que se genera un factor de importancia para las tuberías dada la clasificación de las mismas (Ariaratnam & MacLeod, 2002).

Las características tenidas en cuenta para el cálculo de los factores de importancia son: el tipo de agua residual que transporta y el diámetro de la tubería, debido a que son los parámetros que tienen mayores implicaciones en cuanto a la prestación del servicio y afectación a terceros (Ariaratnam & MacLeod, 2002). Esto se debe a que por ejemplo, si una tubería de alcantarillado sanitario tiene una probabilidad de deficiencia similar a una tubería pluvial, la tubería sanitaria tendría mayor prioridad de rehabilitación, debido a que su colapso tendría un mayor impacto ambiental.

Por otra parte, las tuberías con mayor diámetro tienen mayor importancia de rehabilitación sobre las pequeñas. Esto se debe a que las tuberías de menor diámetro alimentan las tuberías de mayor diámetro y por esta razón, los daños en una tubería de gran diámetro tendrían un efecto más significativo en el sistema (Ariaratnam & MacLeod, 2002; City of Edmonton, 1996).

Estos pesos son añadidos a cada probabilidad de deficiencia para producir el factor de importancia de la tubería (PIF) como se presenta a continuación, Ec. 4.16 (Ariaratnam & MacLeod, 2002):

$$PIF_c = \text{Factor de Residuos}_\omega + \text{Factor de Tamaño}_\alpha + DP_c \quad \text{Ec. 4.16}$$

donde

DP = probabilidad de deficiencia

Factor de Residuo ω = factor según el tipo de alcantarillado

Factor de Tamaño α = factor según el tamaño de la tubería

c = cada clase de tubería

Esto se convierte en un factor compuesto de importancia de la tubería (CPIF) dentro del año de planificación (Ariaratnam & MacLeod, 2002):



$$CPIF_c = \left(1 + \frac{PIF_{cy}}{100}\right)^y \quad \text{Ec. 4.17}$$

donde y = año dentro del período de planificación

4.3.3.1.4. *Modelo Lineal para el Sistema Local de Alcantarillado*

El enfoque dado al modelo matemático de regresión lineal en este método pretende minimizar los gastos de capital durante un período de planeación en una ciudad, priorizando las actividades de rehabilitación e inspección de acuerdo a los factores de importancia de las clases de tuberías. El modelo también garantiza que el total del presupuesto sea ejecutado en el período de planeación (Ariaratnam & MacLeod, 2002).

Parte de la función objetivo del modelo es minimizar el efecto del crecimiento de la inflación sobre los gastos de capital. El costo anual de los gastos (AE) es el producto del costo unitario de rehabilitación por metro de tubería, la longitud efectiva, y el efecto de interés anual (Ec. 4.18).

$$AE_y = (U * Eff_1 * \delta_{1y} + \dots + U * Eff_{cy} * \delta_{cy}) \quad \text{Ec. 4.18}$$

donde:

U = unidad de rehabilitación (*costo/m*)

δ_{cy} = fracción de rehabilitación o inspección a realizar en la tubería clase, c , y en el presupuesto del año, y .

Siendo la longitud efectiva Eff el producto de la longitud total de tubería por clase y su probabilidad de deficiencia, como se puede ver en la Ec. 4.19.

$$Eff_c = (Longitud Total_c) * (DP_c) \quad \text{Ec. 4.19}$$

De esta manera, el costo de rehabilitación, la longitud efectiva y el factor de importancia de la tubería es determinado para las clases de tubería en cada año, con el efecto de la inflación para el total de los gastos anuales. Esta suma de gastos es conocida como la “Influencia anual del sistema” (ASI) (Ec. 4.20).

$$ASI_y = (U * Eff_1 * CPIF_{1y} * \delta_{1y} + \dots + U * Eff_c * CPIF_{cy} * \delta_{cy}) * (1 + r)^{(y-1)}$$

Ec. 4.20

donde:

r = tasa de interés determinada

Por lo tanto, la función objetivo del sistema se convierte en la suma de la *ASI* del período de planificación.

$$Z_{(mínimo)} = ASI_1 + ASI_2 + \dots + ASI_n$$

Ec. 4.21

donde n = total de años del período de planeación

El modelo está sujeto a restricciones, tales como (Ariaratnam & MacLeod, 2002): la suma de fracciones por clase de tubería rehabilitadas o inspeccionadas durante el período de planificación debe ser menor a 1, que representa la totalidad de la longitud por clase de tubería (Ec. 4.22); la fracción rehabilitada en un año puede ser mayor o igual a cero e inferior o igual a uno (Ec. 4.23); y el costo anual de los gastos de rehabilitación no debe exceder el límite del presupuesto anual (Ec. 4.24). Por lo tanto la función objetivo está sujeta a:

$$\delta_{11} + \delta_{12} + \dots + \delta_{1n} \leq 1$$

$$\delta_{21} + \delta_{12} + \dots + \delta_{2n} \leq 1$$

⋮

$$\delta_{c1} + \delta_{12} + \dots + \delta_{cn} \leq 1$$

Ec. 4.22

$$\delta_{11} + \delta_{22} + \dots + \delta_{cn} \geq 0$$

Ec. 4.23

$$AE_y \leq AB_y$$

Ec. 4.24

donde AB_y = presupuesto anual de un año específico en el período de planeación.

La programación de rehabilitación de las tuberías está determinada por las variables de decisión del modelo mayores a cero, aunque es la empresa encargada de la gestión quien decide las secciones específicas de cada clase que van a recibir los fondos de rehabilitación.

4.3.3.1.5. Modelo Financiero para Gastos (PRISM)

De acuerdo al modelo descrito anteriormente, la estructura de relación de PRISM se ilustra en la Figura 4.6.

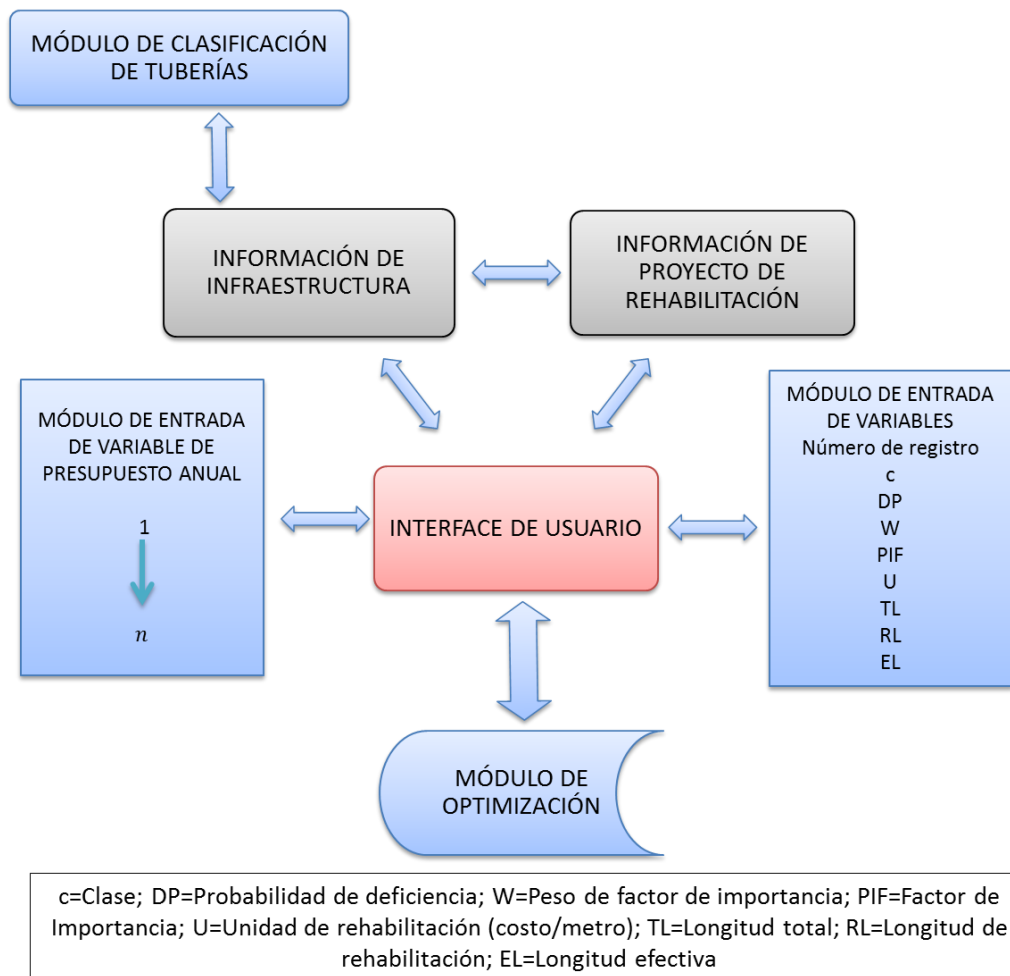


Figura 4.6: Estructura de relación PRISM (modificado de Ariaratman & McLeod, 2002).

El módulo de clasificación de tuberías permite ingresar los registros de cada sección e introducir el número adecuado de clasificación de tubería basado en sus características (Ariaratnam & MacLeod, 2002). El usuario también puede modificar o actualizar la probabilidad de deficiencia, los factores de importancia y el costo de la rehabilitación por metro lineal. Entonces, el programa calcula la longitud de cada clase de tubería que se encuentra probablemente en estado deficiente.

Después de la inspección y debida rehabilitación, el usuario puede ingresar la nueva longitud de tubería que se encuentra en estado deficiente. La nueva longitud se calcula restando a la longitud original deficiente la longitud rehabilitada de cada clase. Es importante tener en cuenta que la cantidad de tubería en estado deficiente, determinada en la inspección, toma prioridad como la nueva longitud efectiva.

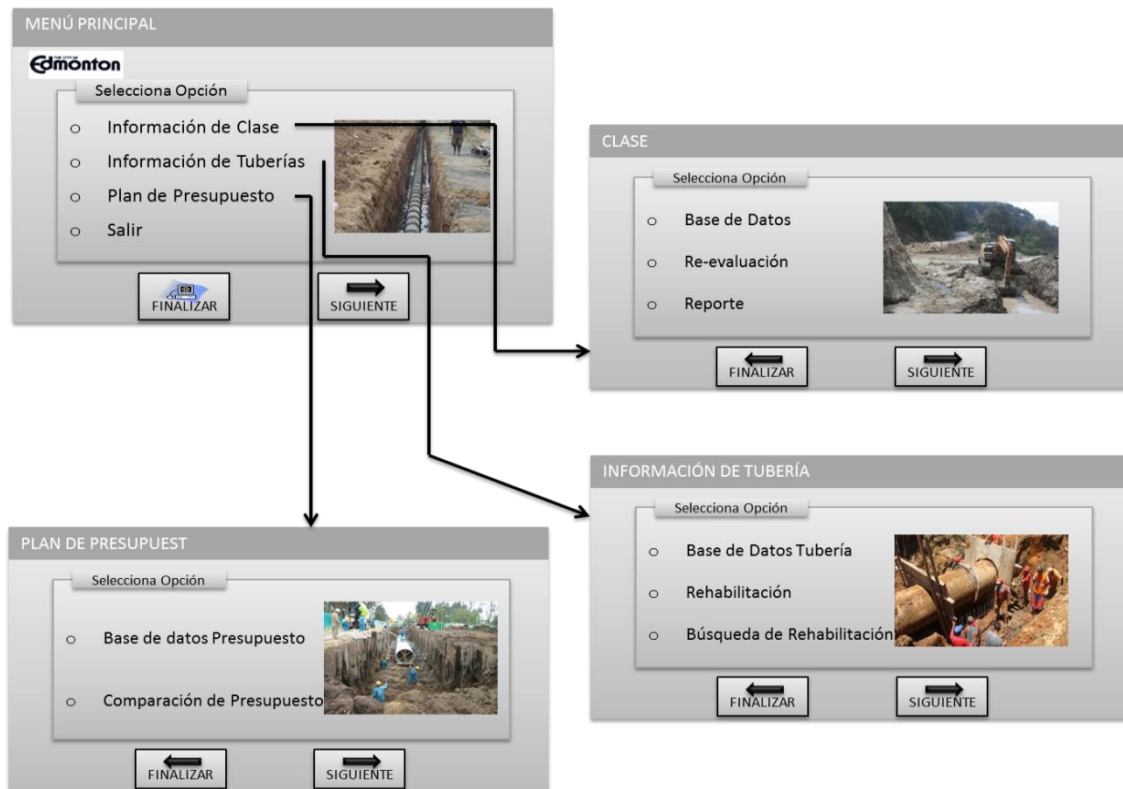


Figura 4.7: Esquema de navegación PRISM traducido al español del menú original en inglés (modificado de Ariaratman & McLeod, 2002).

El módulo de la variable de presupuesto anual permite el ajuste de cualquier presupuesto anual en el período de planificación, cuando se sabe con exactitud el valor del presupuesto (Ariaratnam & MacLeod, 2002). De esta manera, cada vez que el usuario requiera un nuevo plan de rehabilitación óptimo de acuerdo a los ajustes realizados, simplemente debe activar el módulo de optimización. El esquema de navegación de PRISM se puede observar en la Figura 4.7.

Para garantizar un adecuado control de calidad por parte del usuario, PRISM cuenta con notas de ayuda de fácil uso, que permite el acceso a toda la información necesaria en el proceso.



4.3.3.2. VARIABLES DE ENTRADA

Las variables de entrada utilizadas por PRISM para su funcionamiento, se muestran en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10: Variables de entrada PRISM (Los Autores)

DATOS	UNIDADES
DATOS DE TUBERÍA	
Material	Tipo de Material de la Tubería
Edad	Año de Instalación (AAAA)
Longitud	m
Diámetro	mm
Profundidad	m
Tipo	Sanitario, Pluvial, Combinado
Estado	3 Estados: (1) mejor estado, (3) estado crítico
DATOS SOCIO-ECONÓMICOS	
Costos Técnicas de Rehabilitación	\$/m

N.A: esta información no se especifica en la literatura existente

4.3.3.3. CASO DE ESTUDIO

El modelo PRISM desarrollado para optimizar la asignación de fondos para la red de alcantarillado de la ciudad de Edmonton, Canadá.

a. Datos Utilizados

Los datos utilizados para la evaluación de este sistema se encuentran en una base de datos que contiene información detallada, obtenida de los planos de construcción del sistema de alcantarillado. Adicionalmente, posee información de los costos de los proyectos de rehabilitación realizados desde 1991 hasta 1998.

Los datos originales son clasificados y tabulados para la realización de los análisis, como se muestra en la Figura 4.8.

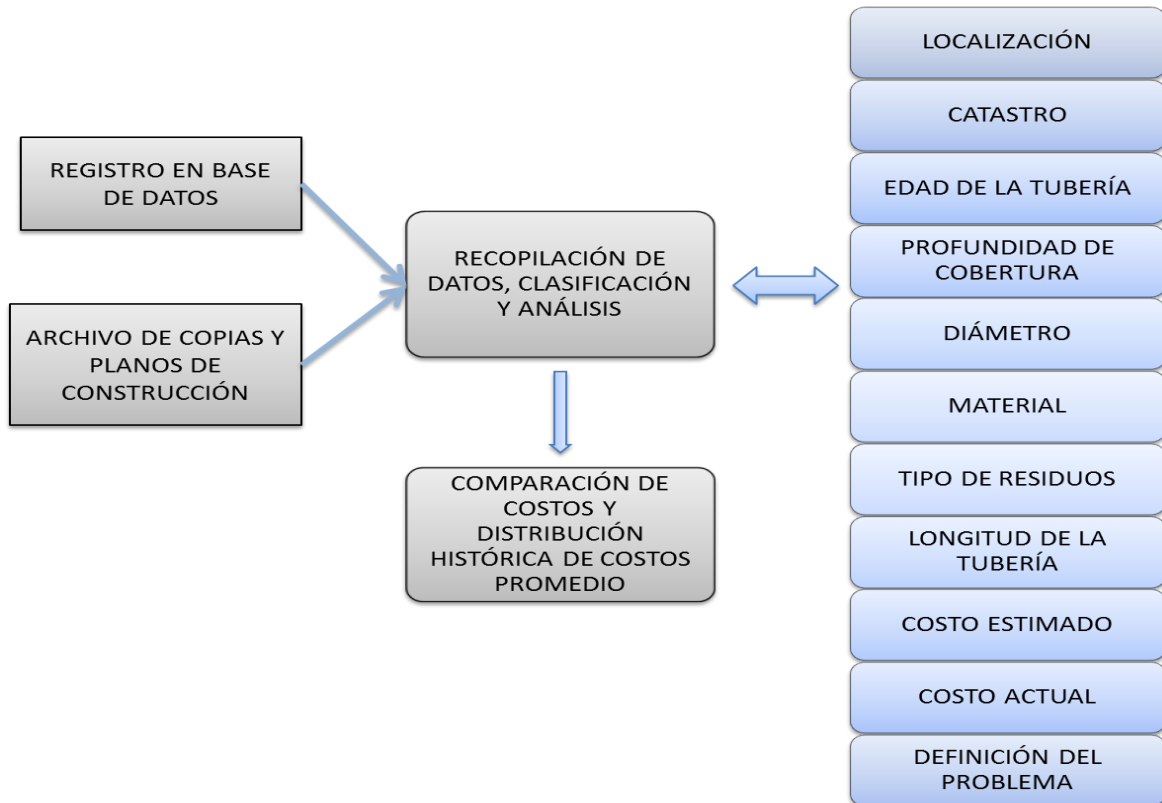


Figura 4.8: Recolección de costos históricos y análisis de información general (modificado de Ariaratman & McLeod, 2002).

b. Factores de importancia de las tuberías

Los factores de importancia o de peso para el estudio de este modelo, fueron realizados utilizando la apreciación subjetiva de ciertas personas del grupo de planeación estratégica de Edmonton. La Tabla 4.11 muestra una lista de los factores utilizados y la Tabla 4.12 los factores usados según el tamaño de la tubería (Ariaratnam & MacLeod, 2002).

c. Análisis de sensibilidad

Debido a la subjetividad de los factores de peso de las tuberías, éstos pueden ser cambiados en el modelo. Por esta razón, fue realizado un análisis de sensibilidad cambiando el valor de los factores con diferentes combinaciones, calculando así el error promedio de los factores seleccionados por los expertos en Edmonton. Esto reveló que los factores seleccionados no alteraban la clasificación general de las tuberías (Ariaratnam & MacLeod, 2002).



Tabla 4.11: Factores según el tipo de aguas residuales transportadas (modificado de Ariaratman y McLeod, 2002).

TIPO DE RESIDUOS	CATEGORÍA	FACTOR
Combinado	1	1
Sanitario	2	0,9
Pluvial	3	0,5

Tabla 4.12: Factores según el tamaño de las tuberías (modificado de Ariaratman y McLeod, 2002).

TAMAÑO (mm)	CATEGORÍA	FACTOR
550-600	1	1,0
450-525	2	0,7
150-375	3	0,5

4.3.3.4. CONCLUSIONES

PRISM podría incluir otros factores a tener en cuenta para priorizar el plan de gestión, de acuerdo a la población servida por los diferentes tramos. Al igual, podría clasificar la prioridad de rehabilitación de alta a baja, por ejemplo, de acuerdo a la clase de vía donde se encuentra la tubería.

En la literatura existente se han descrito brevemente algunos modelos (por ejemplo Ana & Bauwens, 2007) pero su descripción detallada no ha sido objeto de publicaciones. A continuación se describen brevemente uno de ellos perteneciente al Grupo 2 de clasificación:

4.3.4. MODELO KURE-CAD

El Modelo Kure-CAD se basa en el Sistema de Información Geográfica para la gestión de alcantarillados urbanos en la planificación y la toma de decisiones en mantenimiento, rehabilitación, renovación y/o reemplazo de las redes (Stone *et al.*, 2002; Sinha, 2001). (Stone,

Dzuray, Meisegeier, & Dahlog, 2002; Sinha, Development of an Intelligent System for underground Pipeline Assessment, rehabilitation and Management, 2001)

4.3.4.1. DESCRIPCIÓN

Esta herramienta se desarrolló en Finlandia para determinar el rendimiento y los análisis en la toma de decisiones de un sistema de alcantarillado. Kure-CAD utiliza principalmente el Sistema de Información Geográfica (SIG), ya que SIG puede mezclar información geográfica en red como por ejemplo localización; con bases de datos que incluyen características de la tubería como por ejemplo diámetro, material, edad, longitud, etc. y por último con herramientas de modelación, es decir, aquellas herramientas probabilísticas descritas en el Capítulo 4. Además, da importancia a los tramos más críticos proporcionando lo necesario para realizar una adecuada gestión (Stone *et al.*, 2002).

La herramienta SIG comprende: (i) planeación y diseño, (ii) operación y mantenimiento y (iii) finanzas y administración (Shamsi, 2005; Johnson, 2009).

SIG permite el desarrollo de modelos hidráulicos para determinar el tamaño de la tubería y mejorar el sistema en la ampliación y rehabilitación de la red, ya que existe una relación directa entre la base de datos del SIG y el modelo, debido a que éste permite la actualización constante del mismo (Shamsi, 2005).

SIG tiene cuatro tareas fundamentales en la modelación de sistemas de alcantarillado:

1. Sincroniza la red del modelo con la red del SIG.
2. Transfiere los datos de entrada del SIG al modelo.
3. Establece las condiciones de ejecución y corre el modelo.
4. Transfiere las salidas del modelo al SIG.

El usuario de Kure-CAD se basa en el o los mapas de la red de alcantarillado, los cuales pueden estar desde un inicio digitalizados; si por el contrario no lo están, se pueden escanear o digitalizar manualmente, según sea el caso por medio del SIG el usuario puede conocer gran variedad de datos e información sobre los componentes de la red considerada, como se mencionó anteriormente (Stone *et al.*, 2002).



Una vez el modelo Kure-CAD tenga todos los datos necesarios de cada tramo (Tabla 5.15) los cuales permiten hacer una evaluación y priorización de la condición del sistema, el modelo le da al usuario la opción de grabar tres datos básicos, los cuales son (Stone *et al.*, 2002):

1. Condición estructural
2. Condición funcional
3. Tasas de infiltración

Para cada tramo, el usuario utiliza los datos obtenidos por las técnicas de inspección de los sistemas de alcantarillado, para así poder dar una calificación de 1 (buena, no hay necesidad de reparación) a 4 (muy mala, es necesario la reparación inmediata) de cada tramo. Luego de esto KureCAD combina todas las puntuaciones dadas para indicar la situación de cada tramo y lo muestra en una pantalla del SIG con un indicador de condición (de 1 a 4) (Stone *et al.*, 2002).

Dados los resultados el usuario tiene la información necesaria para evaluar cada tubería y darle prioridad a las que muestran peores condiciones, además muestra costos de cada alternativa de rehabilitación (Stone *et al.*, 2002).

Por último, KureCAD genera y almacena la documentación y planificación de diseño requeridas para prestar un adecuado servicio; esto incluye mapas y especificaciones de construcción (Stone *et al.*, 2002).

4.3.5. MODELO APOGEE

El Modelo APOGEE proporciona a los tomadores de decisiones en la gestión de sistemas de alcantarillado un apoyo en la planificación anual de las inspecciones de las redes. Además, mejora las estrategias de rehabilitación en el sistema (Rommel *et al.*, 1989). (Rommel, Bouyssou, & MacGilchrist, 1989)

4.3.5.1. DESCRIPCIÓN

Consiste en un sistema de apoyo en la toma de decisiones para garantizar el buen funcionamiento de la red de alcantarillado, por medio de la programación de futuras inspecciones de la tubería y la generación de técnicas de rehabilitación. Consta de tres componentes básicos para su adecuado funcionamiento, los cuales son (Ana & Bauwens, 2007):

1. Base de datos: se almacena información obtenida mediante las técnicas de inspección del alcantarillado (estado actual de las tuberías), lo cual realiza en las diferentes secciones de la red.
2. Un sistema experto: por medio de este sistema se realiza un análisis sobre el estado de la red de alcantarillado, de acuerdo con la información almacenada en la base de datos. Funciona con la modelación de los aspectos que pueden generar falla y se utilizan cinco categorías: la hidrología y la hidrogeología, el exceso de carga en la red, la abrasión y la agresividad del caudal de los efluentes, la presión, y la historia del proceso de construcción. El sistema de inferencia se lleva a cabo en Prolog, que es un lenguaje de programación, capaz de realizar un razonamiento basado en una lógica y hacer predicciones del estado futuro de la red de alcantarillado.
3. Un módulo de planeación: en este componente se hace la programación de las intervenciones en la red de acuerdo a los resultados obtenidos del Prolog, y se establece la técnica de rehabilitación teniendo en cuenta aspectos ambientales y técnicos.

4.3. GRUPO 3: HERRAMIENTAS PARA LA GESTIÓN INTEGRAL

Estas herramientas son las más completas como soporte para la toma de decisiones, pues involucran todas las fases de gestión, teniendo en cuenta tecnologías apropiadas, su implementación y monitoreo.

4.3.1. MODELO CARE-S

CARE-S es una herramienta de soporte para la toma de decisiones en la gestión patrimonial de alcantarillados, ayuda al ingeniero a elaborar planes estratégicos de rehabilitación, basado en un análisis integral multi-criterio (Saegrov, 2006). Sin embargo, la decisión final es trabajo del usuario o administrador, depende de la interpretación de los datos de salida y presupuesto de gestión.

En el proceso de rehabilitación, CARE-S proporciona un resultado cuádruple: el estado de la red, la necesidad de inversión a largo plazo, la selección de los proyectos y la elección de las tecnologías de rehabilitación (Saegrov, 2006). Por esta razón, el método consta de cuatro etapas:



1. Planeación Inicial: en esta etapa se identifican los indicadores de desempeño pertinentes y da prioridad a las áreas de rehabilitación.
2. Análisis de Diagnóstico: se calcula el estado estructural y el rendimiento hidráulico del sistema, según un orden de importancia, de acuerdo a los posibles impactos ambientales y los resultados del paso 1, incluyendo su cambio en el tiempo.
3. Desarrollo de Soluciones: esta etapa implica la elaboración de soluciones integrales, tomando decisiones basadas en análisis multi-criterios (Saegrov, 2006). En esta etapa se tiene en cuenta la priorización de tuberías a rehabilitar, de acuerdo a criterios asociados con el rendimiento estructural e hidráulico, impactos ambientales y socio-económicos, entre otros. Además, se realiza la selección de técnicas apropiadas de rehabilitación ayudado por una extensa base de datos de tecnologías de rehabilitación y reparación.
4. Ejecución y Seguimiento: consiste en la realización de obras de rehabilitación, la aplicación del plan operacional. En esta etapa, también se hace seguimiento al éxito o fracaso del plan y se realizan las modificaciones necesarias (Ana & Bauwens, 2007).

4.3.1.1. DESCRIPCIÓN

CARE-S (Computer-Aided Rehabilitation of Sewer Networks) es un sistema informático desarrollado para soportar la toma de decisiones, que determina un plan de gestión de las redes de alcantarillado, apoyado en diferentes herramientas que determinan el estado actual y las previsiones futuras de un sistema de alcantarillado (Saegrov, 2006).

4.3.1.1.1. *Herramientas*

El software maneja diferentes herramientas de análisis, que se relacionan entre sí, para ser utilizadas en la formulación de estrategias de rehabilitación (Saegrov *et al.*, 2006). Las cuales, se nombran a continuación:

4.3.1.1.2. *Herramienta para indicadores de desempeño*

Los indicadores de desempeño (PIs) son considerados como la información clave para definir la eficiencia y la eficacia en la prestación del servicio (Matos *et al.*, 2003). La selección de los PIs se realiza de acuerdo a un conjunto de parámetros contemplados dentro de normas europeas (Saegrov, 2006).

Para escoger adecuadamente los indicadores de rendimiento en la rehabilitación de los sistemas de alcantarillado, es necesario tener unos criterios generales, como lo son (Matos *et al.*, 2003; Cardoso & Matos, 2005):

- Deben representar características importantes que permitan la reducción de los indicadores de rendimiento, de acuerdo a los requerimientos de rehabilitación de las empresas de aguas residuales.
- Cada indicador debe ser claro en lo que representa y tener interpretación única dentro de todo el conjunto.
- Cada indicador debe ser auditable, es decir, que brinde la información para la que fue hecho. Esto es importante si en algún caso deben ser utilizados por organismos reguladores que necesiten corroborar los resultados obtenidos.

4.3.1.1.3. *Condiciones Estructurales*

El estado estructural de una alcantarilla depende del material, proceso constructivo, cargas externas y características de las aguas residuales. Para realizar una clasificación y análisis de la condición de la red, se recurre a la técnica de inspección con circuito cerrado de televisión, ya que por medio de él se hacen sistemas de codificación de acuerdo a los daños que se presenten y genera estrategias de rehabilitación teniendo en cuenta la exigencia y el costo de la misma. Además, se detallan modelos estructurales de bloqueo, infiltración, exfiltración, corrosión y carga, los cuales han sido analizados y probados por CARE-S con datos de CCTV. Los modelos permiten pronosticar en qué tiempo la alcantarilla se encuentra en una condición peor a la actual, por lo tanto indica la fecha de la próxima inspección y medidas de rehabilitación (Saegrov, 2006).

El método o los métodos utilizados para determinar la condición futura de la red de alcantarillado partirán siempre de los resultados obtenidos por medio de la inspección por CCTV. Cadenas de Markov ayudan al cálculo de probabilidades de transición de un estado a otro (herramienta descrita en el Capítulo 3). Otra de las herramientas utilizadas de acuerdo a la clasificación de los indicadores de rendimiento de la red es la distribución de Herz, utilizando funciones de supervivencia para cada estado (ver Capítulo 3). Para identificar algunos de los problemas en el futuro como las obstrucciones en la tubería, se utilizan las series de tiempo (ver Capítulo 4), de acuerdo a datos históricos de este tipo de problema, teniendo en cuenta material, longitud, diámetro, año de construcción, pendiente, tipo de tubería, entre otros (Saegrov, 2006).



Para encontrar detalladamente en qué consiste cada modelo que se implementa para el adecuado funcionamiento de CARE-S se recomienda consultar Knolmar & Szabo (2003), Hlavinek *et al.* (2006), Saegrov (2006).

4.3.1.1.4. *Rendimiento Hidráulico*

El rendimiento hidráulico se considera como la capacidad de transportar aguas lluvias y residuales sin sobrecargas, con el mínimo impacto ambiental y estructural. Sin embargo, si existen problemas estructurales como (Saegrov, 2006): obstáculos, raíces, desplazamientos de juntas, entre otros, (observados en CCTV) pueden afectar el funcionamiento hidráulico del sistema de alcantarillado. Por lo tanto se recurre a las herramientas hidráulicas mencionadas en el Capítulo 3 (InfoWorks, MOUSE, SWMM, etc.) y su incorporación a CARE-S, para así realizar una modelación del rendimiento hidráulico (Freni *et al.*, 2003; Milina & Ugarelli, 2004), logrando tener: caracterización hidráulica de fallas, coeficientes de pérdida de carga, coeficientes de Manning, entre otros aspectos hidráulicos (Saegrov, 2006).

Los resultados obtenidos de la simulación están relacionados con el análisis de desempeño estructural futuro, debido a que éste afecta la capacidad hidráulica y las consecuencias socio-económicas (las cuales serán explicadas a continuación). Esta integración permite predecir las zonas de inundación futuras y el funcionamiento hidráulico de la red (Saegrov *et al.*, 2006).

4.3.1.1.5. *Herramientas Socio-Económicas*

CARE-S proporciona una ayuda para afrontar los costos propios de las diferentes técnicas de rehabilitación de los sistemas de alcantarillado, los impactos de las obras en la comunidad y las fallas de la tubería. Compara precios entre las principales técnicas de rehabilitación, utilizando criterios relacionados con los costos socio-económicos y escoge la tecnología adecuada de acuerdo con la prioridad de rehabilitación de las tuberías más vulnerables de la red de alcantarillado (Saegrov, 2006). El objetivo de esta herramienta es guiar al usuario para la evaluación de las diferentes estrategias de planificación en la rehabilitación, ya que las condiciones de trabajo, proveedores y costos de construcción son diferentes según la región (Werey *et al.*, 2004; Saegrov *et al.*, 2006).

4.3.1.1.6. *MCD (Soporte de Decisión Multi-Criterio)*

El objetivo de las tecnologías multicriterio de CARE-S es dar un soporte en la toma de decisiones, tales como: (i) selección de la solución prioritaria: contiene un conjunto de técnicas de rehabilitación para las tuberías que se encuentren en estado crítico y el costo asociado a cada una de ellas, los cuales se incluyen en el presupuesto de operación del sistema; (ii) selección del proyecto prioritario: determina el grupo de tuberías que necesitan rehabilitación de acuerdo al estado actual y el impacto que podría provocar su falla, (iii) selección de la tecnología adecuada de rehabilitación: selecciona la tecnología óptima para la rehabilitación del proyecto prioritario (Hlavinek *et al.*, 2006; Baur *et al.*, 2003).

Por lo anterior, los criterios que ayudan a escoger las mejores decisiones son: los programas de rehabilitación a largo plazo, las estrategias de mantenimiento preventivo, los costos totales de los proyectos viables de rehabilitación y los impactos en términos económicos y técnicos (Saegrov *et al.*, 2006; Baur *et al.*, 2003).

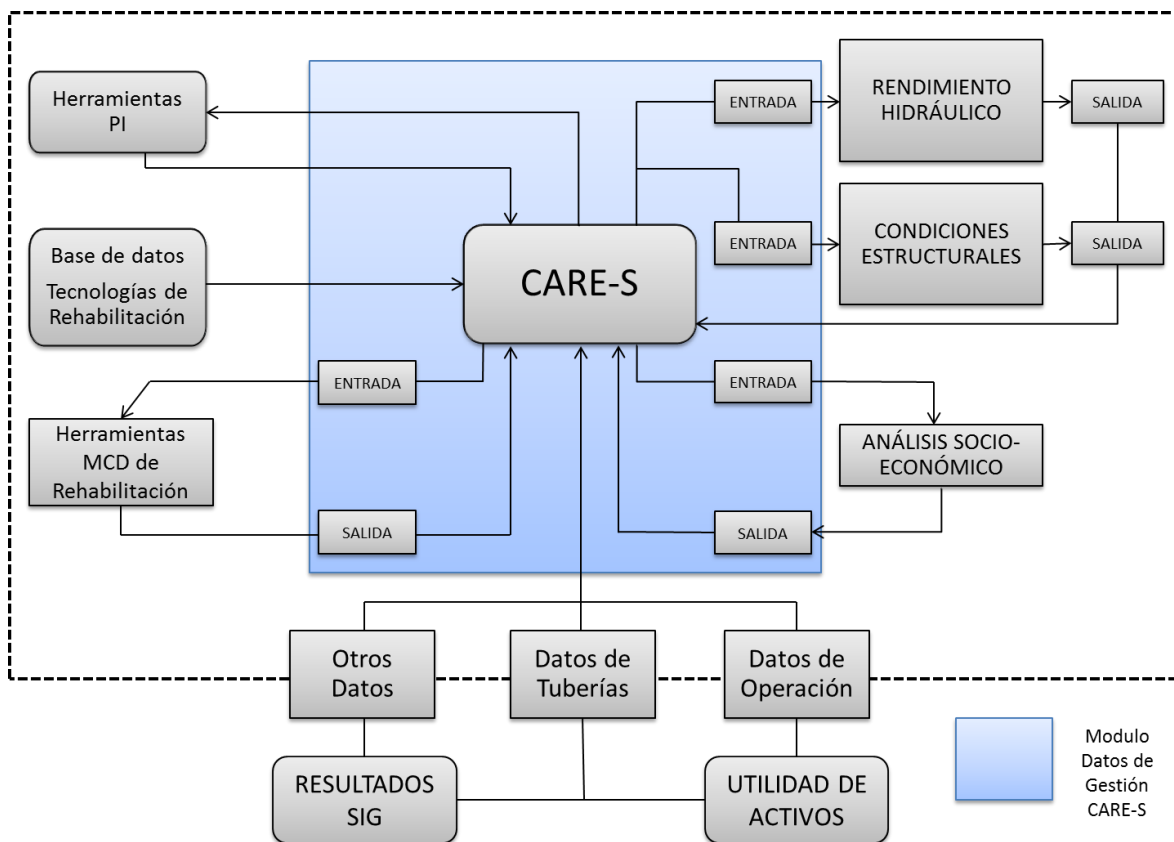


Figura 4.9: Esquema general de funcionamiento de CARE-S (modificado de Saegrov *et al.*, 2006).



La explicación y funcionamiento detallado de cada herramienta usada por el Modelo CARE-S se puede encontrar en la literatura (ver Saegrov, 2006).

De acuerdo a las herramientas explicadas anteriormente, el sistema CARE-S tiene una estructura de funcionamiento interactiva con el usuario, como se muestra en la Figura 4.9.

El módulo de Datos de Gestión es el que permite a los usuarios o administradores utilizar las herramientas anteriores, de acuerdo a las necesidades individuales y a los datos disponibles (Saegrov *et al.*, 2006).

Interactúa con el usuario mediante una interface que permite visualizar toda la información necesaria (archivos de entrada y salida, SIG, tablas, ventanas de diálogo, gráficos, impresión de resultados). La base de datos es administrada por un software en MS-Access 2000, escrito en Visual Basic 6.0 (Hulance *et al.*, 2003).

Tabla 4.13: Variables de entrada CARE-S (Los Autores)

DATOS	UNIDADES o REGISTRO
DATOS DE TUBERÍA	
Material	Tipo de Material de la Tubería
Edad	Año de Instalación (AAAA)
Longitud	m
Diámetro	mm
Espesor	cm
Tipo Sección Transv.	N.A
Profundidad	Cota Rasante (m)
Tipo	Sanitario, Pluvial, Combinado
Rugosidad	N.A
Pendiente	m/m
Localización	N.A
Estado	5 Estados: (1) mejor estado, (5) estado crítico
Historial de falla	Tipificación de Daños
Flujo	N.A
Tasas de Infiltración/ Exfiltración	N.A
Tipo de Conexiones	N.A
DATOS DE ENTORNO	
Tipo de Suelo	Materiales del Suelo
Usos del Suelo	N.A
Trafico/Tipo de Vía	Vehicular (Tipo de Vehículos), Peatonal
Localización de Arboles	N.A
Nivel de Aguas Subterráneas	Distancia de la Cota Rasante con Nivel Freático (m)

DATOS SOCIO-ECONÓMICOS	
Población Servida	N.A
Presupuesto	\$/Año
Costos Técnicas de Rehabilitación	\$/m

N.A: esta información no se especifica en la literatura existente

4.3.1.2. VARIABLES DE ENTRADA

Las variables de entrada utilizadas por CARE-S para su funcionamiento, se muestran en la Tabla 4.13.

4.3.1.3. CONCLUSIONES

Entre las principales ventajas del modelo CARE-S se pueden apreciar (Hlavinek *et al.*, 2006): (i) la información del sistema de alcantarillado se encuentra almacenada en una base de datos (ii) el catálogo de tecnologías de rehabilitación permiten la realizar la mejor elección (iii) el análisis multi-criterio permite a los administradores de gestión la evaluación de diferentes aspectos (hidráulicos, condiciones socioeconómicas, estado de las tuberías, impactos ambientales, etc.) y (iv) permite la visualización de resultados de evaluación en SIG. Todas estas características facilitan al usuario la elaboración y ejecución de un plan de gestión global y bien argumentado (Saegrov, 2006).

4.3.2. MODELO HYDROPLAN

El Modelo Hydroplan reúne características estructurales, hidráulicas y ambientales para entregar al usuario elementos estratégicos para una adecuada gestión de los sistemas de alcantarillado.

4.3.2.1. DESCRIPCIÓN

Hydroplan es una herramienta desarrollada en Bélgica con un enfoque integrado para la gestión de alcantarillados (Ana & Bauwens, 2007). Ayuda a los administradores de sistemas de aguas residuales en la toma de decisiones con respecto al riesgo estructural, hidráulico y ambiental (Van Herzeele *et al.*, 2006). (Van Herzeele, Boonen, Van Assel, De Gueldre, & Thoeye, 2006)

Los objetivos principales de Hydroplan son (Vojinovic *et al.*, 2005; De Gueldre *et al.*, 2007):



- Crear una plataforma basada en internet (con un software como soporte) que pueda ayudar a los servicios de agua involucrados en el proyecto, en su mantenimiento y en la colaboración e intercambio de conocimientos.
- Desarrollar una metodología para evaluar la situación de los activos de Hydroplan en las empresas que prestan este servicio, su evaluación comparativa y mejoras en el monitoreo.
- Ampliar el conocimiento de los procesos de gestión de activos y metodologías.
- Demostrar y validar la utilidad de las metodologías desarrolladas en el proyecto.
- Aumentar la necesidad y la conciencia de desarrollar nuevas formas de gestión de activos.
- Difundir nuevos conocimientos a los participantes del proyecto y crear un ambiente de divulgación.

4.3.2.1.1. Procedimiento de Hydroplan

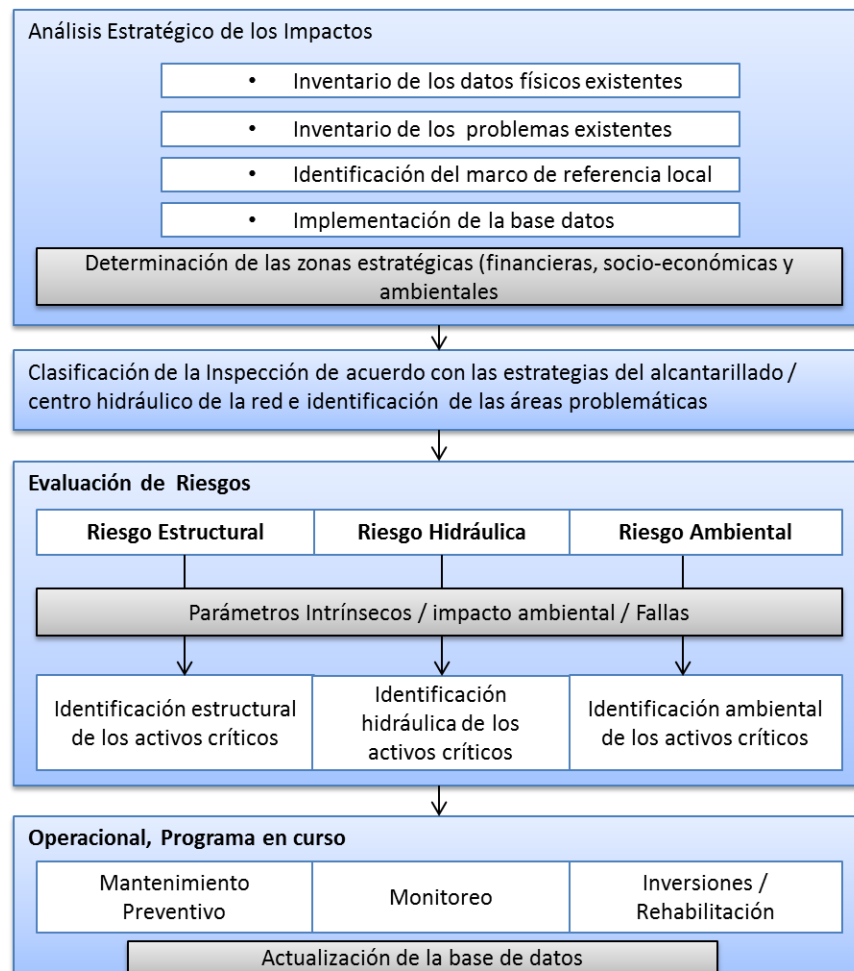


Figura 4.10: Procedimiento Hydroplan (modificado de Vojinovic *et al.*, 2005).

Hydroplan aprovecha el conocimiento, la información y experiencia de la comunidad de profesionales con la que cuente; además, se basa en el punto de vista de la Norma Europea sobre los requisitos funcionales de los sistemas de alcantarillado Parte 5 (EN 752-5:1997) (De Gueldre *et al.*, 2007). El procedimiento de Hydroplan se describe en la

Figura 4.10, donde se muestra un marco de tareas y sub-tareas en serie y paralelo (Vojinovic *et al.*, 2005). El procedimiento tiende a encontrar un equilibrio entre los clientes, el medio ambiente y los operadores de los servicios públicos (De Gueldre *et al.*, 2007). (Vojinovic, Price, & Broek, 2005; De Gueldre, Van Herzeele, Boonen, Thoeve, & Van de Steene, 2007)

a. Análisis estratégico de los impactos

Las redes de alcantarillado pueden ser gestionadas si se conoce su ubicación y estado actual, por lo tanto el primer paso es crear y/o actualizar un inventario de la red con datos históricos y actuales (De Gueldre *et al.*, 2007). En esta parte no sólo los datos físicos son recogidos, ya que al mismo tiempo que se reúnen se realiza un análisis estratégico para estimar el impacto de un posible colapso de la red de alcantarillado. El análisis estratégico consiste en dar calificaciones a los diferentes aspectos que puedan causar una posible falla, los cuales pueden ser financieros, socio-económicos, ambientales, estructurales y/o hidráulicos (Ana & Bauwens, 2007; De Gueldre *et al.*, 2007).

b. Evaluación

Este paso consiste en estimar las probabilidades de falla. A nivel estructural (condición de la tubería) se hace por medio de modelos de deterioro (por ejemplo la distribución de Herz). A nivel hidráulico (inundaciones o bloqueos) y ambiental (desbordamientos) se realiza mediante una herramienta hidrodinámica calibrada las cuales se explicaron en el capítulo 4 (por ejemplo InfoWorks). Las inspecciones del alcantarillado se hacen en áreas estratégicas para determinar la condición actual de la red, lo que permite ajustar el tiempo de vida residual y el modelo de envejecimiento o de deterioro (Ana & Bauwens, 2007; De Gueldre *et al.*, 2007).

c. Definición de costos óptimos e inversión eficiente



El tercer paso consiste en la unión del análisis estratégico y las probabilidades de falla para obtener una calificación de los tres riesgos posibles (Ana & Bauwens, 2007). Las tuberías más importantes se destacan de cada uno de los tres modos de falla (estructural, hidráulica y/o ambiental), y se proponen soluciones para disminuir los riesgos. Los resultados finales de este procedimiento son: planes a corto y mediano plazo que llevan a la red a garantizar un mejor nivel de rendimiento que cumpla con un marco regulatorio dentro del sistema con respecto al aspecto ambiental e hidráulico, por otra parte se necesitan planes a largo plazo y estrategias de mantenimiento que los administradores necesitan para conservar el buen funcionamiento estructural del sistema. Las medidas preventivas como limpieza, inspección, renovación o sustitución son costosas, pero pueden disminuir significativamente los gastos imprevistos, el riesgo para los administradores de la red y el impacto ambiental (De Gueldre *et al.*, 2007).

Para lograr una inversión a largo plazo se necesita encontrar un equilibrio entre la inversión y el riesgo. Esto se logra mediante un modelo de ciclo de vida total, utilizando simulaciones de Monte Carlo (ver capítulo 4), que integra todos los costos de los riesgos y las inversiones disponibles para la gestión preventiva (Ana & Bauwens, 2007). Como todos los costos son explícitos y descontados a un valor presente neto, es posible comparar varias estrategias y elegir la óptima para cada tubería. Por ejemplo el software muestra que puede ser más económico dejar a un lado las redes que no tengan importancia e invertir el dinero en un programa de inspección frecuente en redes de alcantarillado estratégicas, en lugar de ejecutar el presupuesto establecido para gestión en toda la red (De Gueldre *et al.*, 2007).

4.3.2.2. VARIABLES DE ENTRADA

Las variables de entrada utilizadas por Hydroplan para su funcionamiento, se muestran en la Tabla 4.14.

4.3.2.3. CASO DE ESTUDIO

El sistema de aguas residuales en Atenas cubre alrededor de 1300 hectáreas con alcantarillado combinado. Esta área es muy grande para la demostración de esta propuesta (especialmente desde el punto de vista de la cantidad de recursos y el presupuesto disponible para aplicarla), por lo que se decidió utilizar sólo la zona 1 (Z1) y la zona 2 (Z2) como sitios pilotos para la aplicación de

Hydroplan (De Gueldre *et al.*, 2007). El sitio piloto cubre aproximadamente 240 hectáreas, es decir el 20 % de toda la red.

Tabla 4.14: Variables de entrada Hydroplan (Los Autores)

DATOS	UNIDADES o REGISTRO
DATOS DE TUBERÍA	
Material	N.A
Edad	Año de Instalación (AAAA)
Longitud	N.A
Diámetro	N.A
Tipo Sección Transv.	N.A
Profundidad	N.A
Tipo	N.A
Pendiente	N.A
Localización	N.A
Estado	N.A
Tasas de Infiltración/ Exfiltración	N.A
DATOS DE ENTORNO	
Tipo de Suelo	N.A
Usos del Suelo	N.A
Trafico/Tipo de Vía	N.A
Localización de Arboles	N.A
DATOS SOCIO-ECONÓMICOS	
Población Servida	N.A
Costos Técnicas de Rehabilitación	\$/m

N.A: esta información no se especifica en la literatura existente

Los principales problemas en la red de Atenas fueron (De Gueldre *et al.*, 2007):

- ✓ Las inundaciones cerca a los colectores principales.
- ✓ Problemas estructurales (derrumbes).
- ✓ Enfoques equivocados, lo que causó altos costos en reparaciones.

a. Análisis estratégico de los impactos

Con la ayuda de los asesores C&A de Grecia, se adaptó el procedimiento estratégico mencionado en el modelo a la ciudad. Los cambios que se dieron fue la adición de sitios arqueológicos y las estaciones del metro consideradas como puntos trascendentales (De Gueldre *et al.*, 2007).



b. Riesgos Estructurales

La implementación de la metodología propuesta por el modelo proporcionó los siguientes resultados (De Gueldre *et al.*, 2007):

Análisis de riesgo estructural: el 95,77 % de la red de alcantarillado del sitio piloto en Atenas se encuentra en buena condición estructural. Se considera que no era una red antigua, puesto que tenía una edad media de 40 años.

Análisis crítico estructural: en este análisis se tuvo en cuenta el impacto de los daños en caso de una falla y la probabilidad de que ocurra una falla. Los resultados muestran 2.3 km de red de alcantarillado en condiciones críticas, además se considera una lista de acciones estructurales a realizar para reducir los riesgos del sistema.

c. Riesgos Hidráulicos

La implementación de la metodología propuesta por el modelo dio los siguientes resultados (De Gueldre *et al.*, 2007):

Análisis de riesgo hidráulico: el 94,98 % de la red de alcantarillado del sitio piloto en Atenas se encuentra con buen rendimiento hidráulico. El factor más determinante para que se produzca un riesgo hidráulico es la capacidad de transporte limitada del sistema.

Análisis crítico hidráulico: en este análisis se tuvo en cuenta el impacto de los daños en caso de una falla y la probabilidad de que ocurra un fracaso. Los resultados muestran 1.4 km de red de alcantarillado en condiciones críticas, esto es de hecho un alto riesgo hidráulico.

d. Riesgos Ambientales

En este estudio piloto no se pudo hacer un análisis ambiental, ya que éste sólo es útil cuando hay una interacción completa entre la red y el medio ambiente. Además, el procedimiento de Hydroplan para evaluar riesgos ambientales no es posible de aplicar a pequeña escala (De Gueldre *et al.*, 2007).

e. Programa de gestión

De acuerdo al resultado obtenido de los análisis de riesgos en la red de alcantarillado (estructurales e hidráulicos), se han definido medidas para disminuir los fracasos de cada caso crítico, lo que conduce a un proactivo programa de gestión operativo (De Gueldre *et al.*, 2007).

Todas las acciones a realizar se clasifican por categorías (CCTV, construcción de estructuras, simulación hidráulica). El costo global se calculó dando como resultado que para un período de 30 años de gestión, utilizando este modelo, se debería invertir alrededor de 27,2 millones de euros para el área piloto de la ciudad de Atenas (De Gueldre *et al.*, 2007).

4.3.2.4. CONCLUSIONES

El modelo Hydroplan logra una gestión integral de las redes de alcantarillado, además administra el presupuesto de grandes ciudades de manera adecuada, invirtiéndolo en actividades de reparación y/o mantenimiento de las redes de manera óptima, aumentando su tiempo de servicio (De Gueldre *et al.*, 2007).

Con casos específicos Hydroplan ha demostrado que es capaz de tomar información de una red de alcantarillado, analizarla y entregar a los usuarios prioridades en las estrategias de rehabilitación y/o mantenimiento de la misma. Además, Hydroplan puede adaptarse según las condiciones del lugar donde vaya a ser implementado, obteniendo así, resultados de alta calidad (De Gueldre *et al.*, 2007).

La metodología de Hydroplan es flexible ya que está disponible para la gestión de redes de alcantarillado y en general para la toma de decisiones en ingeniería. Hace uso de herramientas informáticas e integra bases de datos existentes, por lo que se considera un modelo relativamente económico, ya que requiere de una mínima inversión inicial (De Gueldre *et al.*, 2007).

4.4. REQUERIMIENTOS DE APLICACIÓN

La aplicabilidad de las DST estudiadas en este capítulo, depende de los datos de entrada requeridos por cada una de ellas. Por esta razón, en la Tabla 4.15 se pueden observar los tipos de datos de las tuberías necesarios y en la Tabla 4.16 los tipos de datos del entorno de las tuberías y los factores socio-económicos solicitados por cada modelo.



Tabla 4.15: Datos de la tubería requeridos por cada Herramienta (modificado de Ana & Bauwens, 2007).

HERRAMIENTAS		DATOS DE ENTRADA															
		DATOS DE TUBERÍA															
		Material	Edad	Longitud	Diámetro	Espesor	Sección Transv.	Profundidad	Tipo	Rugosidad	Pendiente	Localización	Estado	Historial de falla	Flujo	Tasas de Infiltración/Exfiltración	Tipo de Conexiones
GRUPO 1	Baik	X	X	X	X			X	X		X		X		X	X	
	Bengassem & Bennis			X	X			X			X	X	X	X			
	Hasegawa <i>et al.</i>	X	X	X	X			X			X		X		X	X	
GRUPO 2	APOGEE	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X			X	
	AQUA-Wertmin	X	X	X	X		X		X		X	X	X			X	X
	Edmonton	X	X	X	X			X				X					
	KureCAD	X	X	X	X						X	X	X	X		X	X
	PRISM	X	X	X	X			X	X				X				
GRUPO 3	CARE-S	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Hydroplan	X	X	X	X		X	X	X		X	X	X		X		

Tabla 4.16: Datos del entorno y socio-económicos requeridos por cada herramienta (modificado de Ana & Bauwens, 2007).

HERRAMIENTAS		DATOS DE ENTRADA							
		DATOS DE ENTORNO					DATOS SOCIO-ECONÓMICOS		
		<i>Tipo de Suelo</i>	<i>Usos del Suelo</i>	<i>Tráfico/Tipo de Vía</i>	<i>Localización de Arboles</i>	<i>Nivel de Aguas Subterráneas</i>	<i>Información Geotécnica</i>	<i>Población Servida</i>	<i>Presupuesto</i>
GRUPO 1	Baik	X		X		X			
	Bengassem & Bennis	X					X		
	Hasegawa <i>et al.</i>	X		X		X		X	
GRUPO 2	APOGEE	X	X	X		X	X		X
	AQUA-Wertmin	X		X				X	X
	Edmonton	X					X		X
	KureCAD	X		X	X			X	X
	PRISM								X
GRUPO 3	CARE-S	X	X	X	X	X		X	X
	Hydroplan	X	X	X	X			X	X



5. APLICABILIDAD EN LA EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ

En el presente capítulo se estudia la aplicabilidad o viabilidad de implementación de las herramientas y modelos DST para gestión patrimonial de alcantarillados descritos en los Capítulos 3 y 4, teniendo en cuenta los datos disponibles por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) en lo que concierne a la red de alcantarillado y los sistemas de inspección, mantenimiento y gestión, de acuerdo a la información de bases de datos y formatos manejados por la Empresa, utilizados por Sandoval & Navarro (2010). Las características georreferenciadas de las tuberías como edad e información hidráulica, data de tuberías instaladas a partir de 1933. La información georeferenciada de reporte de falla responde al protocolo de atención de daños de la Figura 5.1, correspondiente al periodo de años comprendidos entre 2003 y 2009.

5.1. PROCESOS DE GESTIÓN ACTUAL EN LA EAAB

El actual sistema de alcantarillado de Bogotá corresponde a la implementación del “Plan maestro” propuesto en 1960 (EAAB, 2007). Este plan incluye actividades de recolección, transporte, tratamiento, aprovechamiento y disposición final de las aguas residuales domiciliarias y pluviales de la ciudad de Bogotá y el municipio de Soacha (EAAB, 2009).

En el año 2011, el proceso de gestión en la EAAB se basa en la realización de mantenimiento correctivo de los tramos de redes en estado de falla y no en actividades de mantenimiento preventivo. En la Figura 5.1 se puede observar el diagrama del proceso de atención a los daños reportados. El proceso de rehabilitación del sistema se lleva a cabo de la siguiente manera (Sandoval & Navarro, 2010):

- Reporte de queja por parte del usuario: el usuario realiza el reporte de daño a través un servicio de atención en línea o Call-Center de la EAAB llamado Acualía.

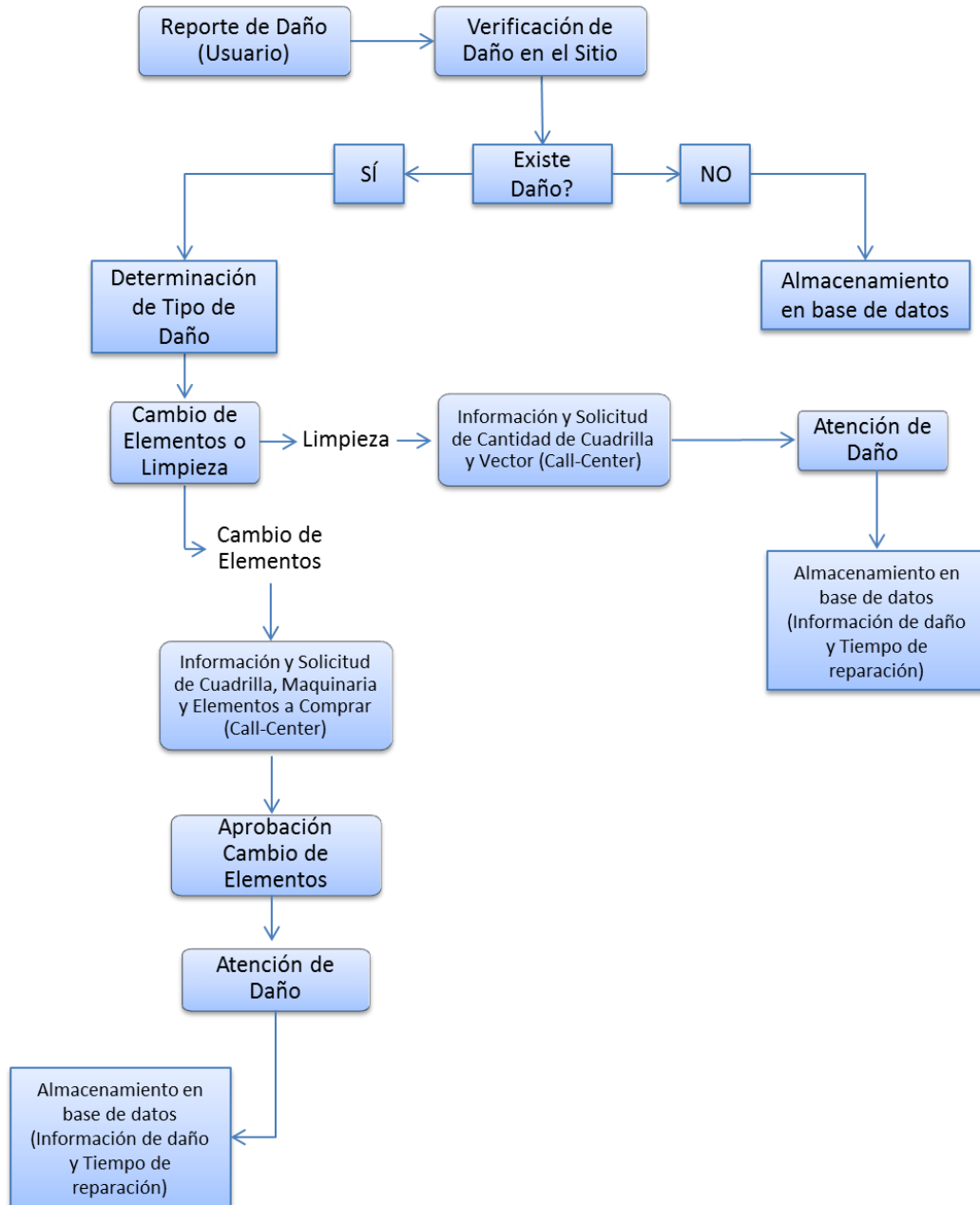


Figura 5.1: Diagrama de proceso y operación de atención y mantenimiento de daños en alcantarillados en la EAAB (modificado de Sandoval & Navarro, 2010).

- Verificación de daño: (i) El reporte es codificado en un sistema de información geográfica (ii) Un operador de radio de la zona es informado (iii) Un operario de la EAAB verifica cuál es el daño y determina el proceso de reparación.
- Selección de personal y equipo especializado: un inspector es informado sobre el estado del daño y según el proceso de reparación, solicita el personal y equipo necesario para el procedimiento.



- Registro en base de datos: todos los pasos que fueron necesarios para la reparación del daño, en caso de que exista o no, es guardado en una base de datos de registro de daños.

Tabla 5.1: Plan estratégico de Rehabilitación de la EAAB (modificado de EAAB, 2011).

Plan de Desarrollo		Estructura General de Inversiones EAAB	Meta de Impacto EAAB 2008-2012 Meta Corporativa	Plan Financiero		Plan Físico	
Objetivo	Programa	Nombre del Proyecto		Unidad	Plan	Unidad	Plan
2. DERECHO A LA CIUDAD	LOCAL - REHABILITACIÓN						
	17. Mejoremos el Barrio	Renovación, rehabilitación o reposición del Sistema Local de Alcantarillado Sanitario	Disminuir el índice de reclamos operativos en alcantarillado	MIL \$ (2008)	74.319	km	158,90
		Renovación, rehabilitación o reposición del Sistema Local de Alcantarillado Pluvial		MIL \$ (2008)	5.798	km	5,50
		Renovación, rehabilitación o reposición del Sistema Local de Alcantarillado Combinado		MIL \$ (2008)	899	km	0,61
	TRONCAL Y SECUNDARIO - REHABILITACIÓN						
	18. Transformación Urbana Positiva	Renovación, rehabilitación o reposición del Sistema Troncal y Secundario de Alcantarillado Sanitario	Disminuir el índice de reclamos operativos en alcantarillado	MIL \$ (2008)	18.189	km	8,24
		Renovación, rehabilitación o reposición del Sistema Troncal y Secundario de Alcantarillado Pluvial		MIL \$ (2008)	11.536	km	3,36
		Renovación, rehabilitación o reposición del Sistema Troncal y Secundario de Alcantarillado Combinado		MIL \$ (2008)	13.568	km	20,00

El Plan General Estratégico de la EAAB para los años comprendidos entre el 2008 y el 2012 incluye la implementación de un modelo de trabajo basado en Prevención – Ingeniería – Educación (P.I.E) (EAAB, 2008), donde: (i) La Prevención se refiere a la administración de riesgos, evitar o mitigar los impactos provocados por fallas inesperadas de los sistemas; (ii) La Ingeniería busca la optimización en la planeación de las actividades y proyectos de la Empresa; (iii) La Educación se enfoca en la actualización continua del personal de la Empresa. Sin embargo, a la fecha, un plan de mantenimiento preventivo de las redes de alcantarillado no se ha consolidado ni implementado oficialmente (Sandoval & Navarro, 2010).

En cuanto a los aspectos económicos de gestión, la EAAB maneja objetivos de mejora en la calidad del servicio, detallados en la Tabla 5.1 dentro de su Plan Estratégico de Gestión para el periodo 2008-2012 (EAAB, 2011). No obstante, este presupuesto involucra actividades de renovación, rehabilitación y reposición de tramos del sistema y no tiene en cuenta actividades de mantenimiento preventivo.

5.2. DESCRIPCIÓN DE DATOS DISPONIBLES DE LA RED DE ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ

Para determinar la aplicabilidad de los modelos y herramientas en la EAAB es necesario conocer la información manejada por la Empresa en relación con las características físicas de la tubería, su entorno y los factores socio-económicos involucrados en las actividades de rehabilitación de las redes de Alcantarillado.

5.2.1. DATOS FÍSICOS

A continuación se definen los tipos de datos que se manejan en la EAAB. La Tabla 5.2 muestra la información y tipificación de las características físicas de las tuberías.

- Material: Nombre del componente con el que se fabrica la tubería
- Edad: Fecha de instalación de la línea
- Longitud de la tubería expresado en metros y con precisión al centímetro
- Diámetro de la tubería expresado en metros y con precisión al centímetro
- Tipo de Sección Transversal típica del tramo de acuerdo a su geometría



- Cota Clave Inicial y Final: Es la cota s.n.m. del borde superior efectivo en el tramo aguas arriba y aguas abajo de la tubería
- Cota de batea Inicial y Final: Es la cota s.n.m. del borde inferior efectivo en el tramo aguas arriba y aguas debajo de la tubería
- Cota Rasante Inicial y Final: Es la cota s.n.m. del borde superior libre en el tramo aguas arriba o aguas debajo de la tubería
- Tipo: Sistema para el cual trabaja la línea

Tabla 5.2: Tipo de variables disponibles por la EAAB y su caracterización (Los Autores).

DATOS	UNIDADES o POSIBLE REGISTRO
Material	(0) Desconocido, (1) Concreto sin Refuerzo, (2) Concreto Reforzado, (3) Concreto Extra Reforzado, (4) Concreto Reforzado Revestido con Lámina de Polietileno, (5) PVC, (6) PVC Perfil Cerrado, (7) PVC Perfil Abierto, (8) Gres, (9) Poliéster reforzado con Fibra de Vidrio (GRP), (10) Polietileno, (11) Corpacero*, (99) Otros.
Edad	Fecha Instalación (AAAA/MM/DD)
Longitud	m
Diámetro	m
Tipo Sección Transv.	(0) Ovoide, (1) Herradura, (2) Bóveda, (3) Elipse Horizontal, (4) Elipse Vertical, (5) Circular, (6) Trapezoidal, (7) Rectangular, (8) Rectangular Triangular, (9) Rectangular Redondeado, (10) Triangular, (11) Natural Irregular, (12) Box Culvert.
Profundidad	Cota Clave Inicial (m)/ Cota Clave Final (m)/ Cota Batea Inicial (m)/ Cota Batea Final (m)/ Cota Rasante Inicial (m)/ Cota Rasante Final (m)
Tipo	(0) Sanitario, (1) Pluvial, (2) Combinado
Pendiente	% = m/m
Localización	Coordenadas (X (m), Y (m))
Estado	(0) Desconocido, (1) Fuera de Servicio, (2) Abandonado, (3) En Servicio.
Historial de falla	Tipificación de Daños
Flujo	Caudal (m ³ /s)
Tipo de Conexiones	Cámara de Caída ((0) No aplica, (1) Entrada, (2) Salida)

*Tubería de tipo metálica

- **Pendiente:** Inclinación de la línea expresada en porcentaje, positiva cuando el flujo se acelera, negativa en caso contrario.
- **Localización:** coordenadas georeferenciadas de la localización de los nodos de la tubería.
- **Estado:** Describe el estado de operatividad de la línea
- **Historial de Falla:** Se basa en la tipificación de daños reportados en la red, durante los años entre el 2003 y el 2009. Esta base de datos cuenta con información sobre: tipo de daño, tiempo de reparación, fecha de iniciación y finalización del reporte.
- **Tipo de Conexiones:** Se refiere a la existencia de cámaras de caída o pozos de inspección como estructura de unión entre tramos de tubería.

5.2.2. DATOS INSPECCIÓN CCTV

La EAAB inició hace aproximadamente 20 años la inspección de las redes de alcantarillado por medio de CCTV, con la intención de encontrar problemas puntuales ya existentes como obstrucciones, conexiones erradas y otras alteraciones en las redes o estructuras, producto de la respuesta a reporte de quejas por parte de los usuarios (EAAB, 2007).

Como producto de la inspección por medio de CCTV se tiene un informe del estado actual del tramo de tubería y su respectiva calificación de la condición en la que se encuentra, de inspecciones realizada desde el año 2003. El estado estructural de las tuberías o indicadores de desempeño, PI por sus siglas en inglés (*Performance Indicators*) varían de 1 a 4 de acuerdo al grado de urgencia de atención que requiere la tubería. Sin embargo, los datos del estado de la tubería, no son representativo en el caso de las redes de la EAAB, puesto que sólo se conoce para las tuberías que han sido inspeccionadas después de un reporte de falla. En la Tabla 5.3 se puede observar la información suministrada por el operador sobre la inspección de las tuberías.



Tabla 5.3: Informe de Inspección de Alcantarillado con CCTV (modificado de Informes de Inspecciones CCTV, 2009)

INFORME INSPECCION DE ALCANTARILLADO CON CCTV						
Informe	Cuenca	Lugar y Fecha			Hora	
161						
Climatología		Barrio	Operador			
Dirección:			Longitud del tramo:			
Localización tubería:			Desde el pozo:			
Tipo de vía:			Hasta el pozo:			
Capa de la vía:			Nombre archivo de video:			
Razón inspección:			Sección:			
Tipo de red:			Material:			
Observaciones:						
SENTIDO DEL FLUJO	No.	Distancia	Defecto observado		Cont. Video	Grado
	1					
	2					
	3					
	4					
Grado 1: Defecto de poca importancia, no representa peligro para la tubería.						
Grado 2: Defecto que puede representar un problema importante a largo plazo, requiere evaluación.						
Grado 3: Defecto que está ocasionando problemas en la tubería y/o en su alrededor, requiere una solución oportuna.						
Grado 4: Defecto que ha causado el colapso de la tubería, requiere reparación urgente.						

5.2.3. DATOS ECONÓMICOS

El presupuesto de rehabilitación de la EAAB se puede deducir como el costo de rehabilitación por kilómetro de tubería en un periodo de tiempo determinado por los planes de gestión de la Empresa. Esto se puede deducir de la Tabla 5.1, puesto que en la planeación se incluye el costo total de la inversión (al año 2008) de este tipo de actividades y los kilómetros que se van a rehabilitar con este capital en el periodo de tiempo comprendido entre el año 2008 y 2012.

En el proceso de rehabilitación, los costos y pagos son una dependencia de la administración de la EAAB. El pago de las actividades por tiempo o tarea depende del tipo de daño, por lo cual no se encuentra normalizado un sistema de pago para la rehabilitación de las redes de alcantarillado (Sandoval & Navarro, 2010). Por lo tanto, las variables económicas usadas por la EAAB se ven en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Variables económicas disponibles por la EAAB y sus unidades (Los Autores)

DATOS	UNIDADES o REGISTRO
Presupuesto	*Pesos colombianos (\$)/km/Periodo de tiempo (Años)
Costos Técnicas de Rehabilitación	*Pesos colombianos (\$)/Tarea, Pesos colombianos (\$)/Tiempo de trabajo

*Información no normalizada por la EAAB

5.3. PROSPECTIVA DE USO DE HERRAMIENTAS Y MÉTODOS PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA EAAB

La implementación de herramientas de soporte en la toma de decisiones en la planeación de operación, mantenimiento y rehabilitación de redes de alcantarillado depende de la información disponible sobre los sistemas existentes. Por esta razón, de acuerdo al requerimiento de información de cada herramienta o modelo y la disponible en la EAAB se analiza cuáles de las DST existentes podrían ser apropiadas para implementar en Bogotá.

5.3.1. APLICABILIDAD DE HERRAMIENTAS BÁSICAS

Teniendo en cuenta la disponibilidad de tipos de datos en la EAAB, se puede comenzar analizando la aplicabilidad de herramientas básicas para la toma de decisiones, que pueden ser utilizadas para predecir el estado futuro de las redes.

5.3.1.1. DISTRIBUCIÓN DE HERZ

La distribución de Herz es aplicada en tres de los diez modelos de gestión (Baik, CARE-S y Hydroplan) y se utiliza para calcular las probabilidades de transición de un sistema de aguas residuales. Para calcular el paso de una condición buena a una peor, requiere de las condiciones actuales de la red, obtenidas mediante las técnicas de inspección (Baur & Herz, 2001).



5.3.1.2. PROGRAMACIÓN LINEAL

La programación lineal es utilizada en dos de los diez modelos de gestión de sistemas de alcantarillado (Prism e Hydroplan). Calcula la probabilidad de que la red se encuentre en un estado deficiente teniendo en cuenta los datos históricos y minimiza los gastos de capital en la planificación de rehabilitación y/o mantenimiento (Ariaratman & McLeod, 2002; Ana & Bauwens, 2007). De acuerdo a lo anterior, esta herramienta necesita conocer el estado actual de la red de alcantarillado y los costos de las actividades ó técnicas de rehabilitación para cumplir su función en los modelos.

5.3.1.3. SERIES DE TIEMPO

El uso de las series de tiempo está implícito en las herramientas de modelación hidráulica, hidrológica, transporte de sedimentos y contaminación urbana, por lo tanto, cinco de los diez modelos las utilizan (Bengassem & Bennis, Hasegawa *et al*, KureCAD, CARE-S y Hydroplan). Esta herramienta se encarga de predecir el estado futuro de las tuberías, si se cuenta con los datos pasados.

5.3.1.4. SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA

El sistema de inferencia difusa es utilizado sólo por un método de gestión de alcantarillados (Bengassem & Bennis). Esta herramienta determina el conjunto de tuberías que tienen prioridad de intervención, dependiendo de la condición estructural e hidráulica actual del sistema.

5.3.1.5. SIMULACIÓN DE MONTE CARLO

Esta herramienta es usada por dos modelos de gestión (Edmonton e Hydroplan). Trata de combinar varios escenarios para poder escoger el más óptimo respecto a la variable que se quiera analizar, en los casos de los modelos que lo usan son necesarios los costos de cada método de rehabilitación y el estado actual del alcantarillado.

5.3.1.6. CADENAS DE MARKOV

Las cadenas de Markov junto con la distribución de Herz, son las herramientas probabilísticas y estadísticas más usadas en los modelos de gestión de alcantarillado (Baik, Edmonton, CARE-S).

Calcula las probabilidades de transición para pasar de un estado a otro peor. Los datos de entrada requeridos por la técnica de Markov son los estados actuales de la red.

Teniendo en cuenta lo anterior, la única herramienta que puede ser implementada por la EAAB sin necesidad de algún tipo de ajuste o modificación, son las series de tiempo, debido a que éstas sólo requieren de los datos históricos de falla de la red de alcantarillado. Información disponible en la Empresa.

Por otra parte, las demás herramientas, es decir, la distribución de Herz, Programación Lineal, Sistemas de Inferencia Difusa, Simulación de Monte Carlo y Cadenas de Markov necesitan de la condición o estado actual de las tuberías para su aplicación. Por lo tanto, la EAAB no podría hacer uso de ellas en los planes de soporte en la toma de decisiones en la gestión patrimonial de sistemas de aguas residuales. Sin embargo, considerando la información con la que cuenta la Empresa, se puede realizar un estudio que involucre el registro del historial de daños en la EAAB y de acuerdo a esto proponer un estimativo del estado actual de la red.

También hay que mencionar que para el uso de la Programación Lineal y la Simulación de Monte Carlo, en la evaluación y análisis de otras variables como precios, es necesario que la EAAB realice una estandarización de los costos de las técnicas de rehabilitación, debido a que ellos son necesarios para que cada herramienta pueda ser implementada en la Empresa. Se podría decir que esta recolección y almacenamiento de datos no involucraría mayores inversiones en capital y tiempo.

5.3.2. APLICABILIDAD DE MÉTODOS

En la Tabla 5.12 y la Tabla 5.13 se muestran los tipos de datos disponibles por la EAAB en contraste con los requeridos por cada modelo de gestión. De acuerdo a esto, a continuación se considera la viabilidad de aplicación de cada una de las DST en la EAAB.

5.3.2.1. MODELO BAIK

Este modelo funciona hasta con mínimo seis datos básicos como lo son: material, edad, longitud, diámetro, pendiente y estado de la tubería, de los cuales la EAAB cuenta con cinco de ellos (5/6). Si este fuera el caso, la precisión de los resultados no es muy exacta (Baik *et al.*, 2006). En esta condición, para la aplicación de este modelo en la EAAB, la información faltante es el Estado de condición actual de las tuberías, debido a que los indicadores de estado que maneja la empresa de



0 a 3 no son compatibles con los usados en el modelo, puesto que no definen el estado de desempeño de las tuberías. Los indicadores de desempeño que maneja la EAAB determinados mediante la inspección de CCTV no tienen la confiabilidad necesaria, puesto que han sido obtenidos a partir de una muestra no representativa de datos de inspección de un número de tuberías reducido, correspondiente a aquellas en posible estado de falla. Sin embargo, es importante tener en cuenta que aún con la obtención de los datos faltantes y los disponibles, el modelo podría implementarse solamente en las tuberías de PVC y gres con la debida conversión de unidades de su longitud y diámetro.

Tabla 5.5: Variables requeridas por el Modelo Baik en contraste con los disponibles por la EAAB (Los Autores).

DATOS	UNIDADES O REGISTRO	
	BAIK	EAAB
DATOS DE TUBERÍA		
Material	Gres, PVC	(0) Desconocido, (1) Concreto sin Refuerzo, (2) Concreto Reforzado, (3) Concreto Extra Reforzado, (4) Concreto Reforzado Revestido con Lámina de Polietileno, (5) PVC, (6) PVC Perfil Cerrado, (7) PVC Perfil Abierto, (8) Gres, (9) Poliéster reforzado con Fibra de Vidrio (GRP), (10) Polietileno, (11) Corpacero*, (99) Otros.
Edad	Fecha Instalación (AAAA)	Fecha Instalación (AAAA/MM/DD)
Longitud	ft	m
Diámetro	in	m
Profundidad	N.A	Cota Clave Inicial (m)/ Cota Clave Final (m)/ Cota Batea Inicial (m)/ Cota Batea Final (m)/ Cota Rasante Inicial (m)/ Cota Rasante Final (m)
Tipo	Sanitario, Pluvial, Combinado	(0) Sanitario, (1) Pluvial, (2) Combinado
Pendiente	m/m	%
Estado	5 Estados: (1) mejor estado, (5) estado crítico	(0) Desconocido, (1) Fuera Servicio, (2) Abandonado, (3) En Servicio.
Flujo	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)
Tasas de Infiltración/ Exfiltración	N.A	X

DATOS DE ENTORNO		
Tipo de Suelo	Materiales del Suelo	X
Tráfico/Tipo de Vía	N.A	X
Nivel de Aguas Subterráneas	Distancia entre nivel freático y Cota Rasante (m)	X

N.A: esta información no se especifica en la literatura existente.

* Tipo de tubería metálica.

En el caso que se desee aumentar la precisión del modelo, en cuanto al cálculo de las probabilidades de transición, se manejan trece variables de entrada de las cuales la EAAB maneja ocho, como se puede ver en la Tabla 5.5. Entonces, es necesario obtener información acerca de las características del suelo circundante a la tubería como el tipo y nivel de las aguas subterráneas, al igual que el tipo de vía que pasa sobre ellas. La obtención de estos datos no debe representar mayor inversión o esfuerzos por parte de la EAAB, puesto que éstos se encuentran disponibles como parte del estudio de suelos que se realiza para la instalación de las redes. El trabajo debería consistir en asociar la información a las tuberías en una base de datos.

5.3.2.2. MODELO BENGASSEN & BENNIS

Este modelo requiere diez datos para su implementación, la EAAB cuenta con siete (7/10) (ver Tabla 5.6), teniendo en cuenta que las variables que necesitan una conversión de unidades, como el diámetro de la tubería de m a mm y la pendiente de % a m/m, son contadas como datos disponibles por la Empresa.

Al igual que el modelo Baik, es necesario el acceso a los indicadores del Estado actual de las tuberías, puesto que los disponibles no son los requeridos por el modelo, los cuales se pueden obtener por medio de la implementación de cualquier tipo de los métodos de inspección nombrados anteriormente. Además, el modelo requiere datos acerca de los suelos adyacentes a las tuberías, los cuales deben ser de fácil acceso para la EAAB, debido a que los estudios para la determinación de éstos ya han sido realizados.



Tabla 5.6: Variables requeridos por el Modelo Bengassen & Bennis en contraste con los disponibles por la EAAB (Los Autores).

DATOS	UNIDADES o REGISTRO	
	BENGASSEN & BENNIS	EAAB
DATOS DE TUBERÍA		
Longitud	m	m
Diámetro	mm	m
Profundidad	m	Cota Clave Inicial (m)/ Cota Clave Final (m)/ Cota Batea Inicial (m)/ Cota Batea Final (m)/ Cota Rasante Inicial (m)/ Cota Rasante Final (m)
Pendiente	m/m	%
Localización	N.A	Coordenadas (X (m), Y (m))
Estado	5 Estados: (1) Sin defectos, (2) Grietas o juntas abiertas, (3) Deformación, (4) Deformación o degradación seria (5) Colapso	(0) Desconocido, (1) Fuera Servicio, (2) Abandonado, (3) En Servicio.
Historial de falla	Tipificación de Daños	Tipificación de Daños
Flujo	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)
DATOS DE ENTORNO		
Tipo de Suelo	Materiales del Suelo	X
Información Geotécnica	N.A	X

N.A: esta información no se especifica en la literatura existente.

5.3.2.3. MODELO AQUA-WERTMIN

El modelo AQUA-Wertmin requiere dieciséis variables para su implementación, de las cuales la EAAB cuenta posiblemente (debido a los datos N.A) con once (11/16) como se puede ver en la Tabla 5.7, teniendo en cuenta que las variables que necesitan una conversión de unidades, como el diámetro de la tubería de m a mm, son contadas como datos disponibles por la Empresa. En el caso de completar la información que solicita el modelo, éste sólo se podría implementar en tuberías de concreto, PVC y/o gres.

Tabla 5.7: Variables requeridos por el Modelo AQUA-WertMin en contraste con los disponibles por la EAAB (Los Autores).

DATOS	UNIDADES o REGISTRO	
	AQUA-WertMin	EAAB
DATOS DE TUBERÍA		
Material	Concreto, PVC, Gres	(0) Desconocido, (1) Concreto sin Refuerzo, (2) Concreto Reforzado, (3) Concreto Extra Reforzado, (4) Concreto Reforzado Revestido con Lámina de Polietileno, (5) PVC, (6) PVC Perfil Cerrado, (7) PVC Perfil Abierto, (8) Gres, (9) Poliéster reforzado con Fibra de Vidrio (GRP), (10) Polietileno, (11) Corpacero*, (99) Otros.
Edad	Fecha Instalación (AAAA)	Fecha Instalación (AAAA/MM/DD)
Longitud	m	m
Diámetro	mm	m
Tipo Sección Transv.	Circular, Ovalada	(0) Ovoide, (1) Herradura, (2) Bóveda, (3) Elipse Horizontal, (4) Elipse Vertical, (5) Circular, (6) Trapezoidal, (7) Rectangular, (8) Rectangular Triangular, (9) Rectangular Redondeado, (10) Triangular, (11) Natural Irregular, (12) Box Culvert.
Tipo	Sanitario, Pluvial, Combinado	(0) Sanitario, (1) Pluvial, (2) Combinado
Pendiente	%	%
Localización	N.A	Coordenadas (X (m), Y (m))
Estado	6 Estados: (6) Excelente Condición, (5) Buena Condición, (4) Condición Límite, (3) Mala Condición, (2) Mala Condición (Reparación corto plazo), (1) Condición de Falla	(0) Desconocido, (1) Fuera Servicio, (2) Abandonado, (3) En Servicio.
Historial de falla	Tipificación de Daños	Tipificación de Daños
Infiltración/ Exfiltración	N.A	X
Tipo de Conexiones	N.A	Cámara de Caída ((0) No aplica, (1) Entrada, (2) Salida)



DATOS DE ENTORNO		
Tipo de Suelo	Materiales del Suelo	X
Tráfico/Tipo de Vía	N.A	X
DATOS DE ENTORNO		
Presupuesto	\$/Año	Pesos colombianos (\$)/km/Periodo de tiempo (Años)
Costos Técnicas de Rehabilitación	\$/m	Pesos colombianos (\$)/Tarea, Pesos colombianos (\$)/Tiempo de trabajo

N.A: esta información no se especifica en la literatura existente.

* Tubería de tipo metálica.

Al igual que los modelos anteriores, éste requiere de los indicadores del Estado actual de las tuberías con los cuales no cuenta la EAAB. Además, se solicitan datos de tasas de infiltración y exfiltración de caudal en las tuberías, este tipo de datos no se encuentran disponibles por la Empresa, pues la medición de los caudales de entrada y de salida de las tuberías se realiza en casos muy específicos de daños.

Adicionalmente, la administración de la EAAB aún no tiene normalizados los costos de las diferentes técnicas de rehabilitación, lo que no permite la adecuada relación entre el costo por metro lineal de tubería rehabilitada que necesita el modelo para su funcionamiento.

5.3.2.4. MODELO PRISM

El modelo PRISM para su aplicación como DST necesita ocho variables de entrada de los cuales la EAAB cuenta con seis de éstos (6/8) (ver Tabla 5.8), teniendo en cuenta que las variables que necesitan una conversión de unidades, como el diámetro de la tubería, son contadas como datos disponibles por la Empresa.

Una de las variables de entrada faltante para la implementación del modelo es el costo de las técnicas de rehabilitación por metro lineal de tubería, debido a que la EAAB maneja costos no estandarizados. La obtención de esta información no requiere mayores costos de inversión y puede ser de fácil acceso para la Empresa. Sin embargo, al igual que los demás, este modelo requiere las calificaciones o indicadores del Estado actual de las tuberías.

Tabla 5.8: Variables requeridos por el Modelo PRISM en contraste con los disponibles (Los Autores).

DATOS	UNIDADES o REGISTRO	
	PRISM	EAAB
DATOS DE TUBERÍA		
Material	Tipo de Material de la Tubería	(0) Desconocido, (1) Concreto sin Refuerzo, (2) Concreto Reforzado, (3) Concreto Extra Reforzado, (4) Concreto Reforzado Revestido con Lámina de Polietileno, (5) PVC, (6) PVC Perfil Cerrado, (7) PVC Perfil Abierto, (8) Gres, (9) Poliéster reforzado con Fibra de Vidrio (GRP), (10) Polietileno, (11) Corpacero*, (99) Otros.
Edad	Año de Instalación (AAAA)	Fecha Instalación (AAAA/MM/DD)
Longitud	m	m
Diámetro	mm	m
Profundidad	m	Cota Clave Inicial (m)/ Cota Clave Final (m)/ Cota Batea Inicial (m)/ Cota Batea Final (m)/ Cota Rasante Inicial (m)/ Cota Rasante Final (m)
Tipo	Sanitario, Pluvial, Combinado	(0) Sanitario, (1) Pluvial, (2) Combinado
Estado	3 Estados: (1) mejor estado, (3) estado crítico	(0) Desconocido, (1) Fuera Servicio, (2) Abandonado, (3) En Servicio.
DATOS SOCIO-ECONÓMICOS		
Técnicas de Rehabilitación	\$/m	Pesos colombianos (\$)/Tarea, Pesos colombianos (\$)/Tiempo de trabajo

N.A: esta información no se especifica en la literatura existente.

* Tubería de tipo metálica.

5.3.2.5. MODELO EDMONTON

Este modelo requiere nueve variables de entrada, de los cuales la EAAB tiene seis disponibles (6/9) como se puede ver en la Tabla 5.9, teniendo en cuenta que las variables que necesitan una conversión de unidades, como el diámetro de la tubería, son contadas como datos disponibles por la Empresa. En el caso de completar la información requerida por el modelo, sería aplicable para tuberías de concreto no reforzado, concreto reforzado y mampostería.



Tabla 5.9: Variables requeridos por el Modelo Edmonton en contraste con los disponibles (Los Autores).

DATOS	UNIDADES o REGISTRO	
	EDMONTON	EAAB
DATOS DE TUBERÍA		
Material	Concreto sin Refuerzo, Concreto Reforzado, Mampostería	(0) Desconocido, (1) Concreto sin Refuerzo, (2) Concreto Reforzado, (3) Concreto Extra Reforzado, (4) Concreto Reforzado Revestido con Lámina de Polietileno, (5) PVC, (6) PVC Perfil Cerrado, (7) PVC Perfil Abierto, (8) Gres, (9) Poliéster reforzado con Fibra de Vidrio (GRP), (10) Polietileno, (11) Corpacero*, (99) Otros.
Edad	Año de Instalación (AAAA)	Fecha Instalación (AAAA/MM/DD)
Longitud	m	m
Diámetro	mm	m
Profundidad	m	Cota Clave Inicial (m)/ Cota Clave Final (m)/ Cota Batea Inicial (m)/ Cota Batea Final (m)/ Cota Rasante Inicial (m)/ Cota Rasante Final (m)
Estado	5 Estados: (1) mejor estado, (5) estado crítico	(0) Desconocido, (1) Fuera Servicio, (2) Abandonado, (3) En Servicio.
DATOS DE ENTORNO		
Tipo de Suelo	Materiales del Suelo	X
Información Geotécnica	N.A	X
Técnicas de Rehabilitación	\$/m	Pesos colombianos (\$)/Tarea, Pesos colombianos (\$)/Tiempo de trabajo

N.A: esta información no se especifica en la literatura existente.

* Tubería de tipo metálico.

De las variables de entrada requeridas por el modelo Edmonton, se encuentra la información acerca del tipo de los suelos adyacentes a las tuberías y su información geotécnica, la cual está disponible en la Empresa; el trabajo consistiría en asociarla a las tuberías en una base de datos. Además, al igual que el modelo AQUA-Wertmin, este modelo requiere para su funcionamiento, la tasa de infiltración y exfiltración.

5.3.2.6. MODELO CARE-S

Tabla 5.10: Variables requeridos por el Modelo CARE-S en contraste con los disponibles por la EAAB (Los Autores).

DATOS	UNIDADES o REGISTRO	
	CARE-S	EAAB
DATOS DE TUBERÍA		
Material	Tipo de Material de la Tubería	(0) Desconocido, (1) Concreto sin Refuerzo, (2) Concreto Reforzado, (3) Concreto Extra Reforzado, (4) Concreto Reforzado Revestido con Lámina de Polietileno, (5) PVC, (6) PVC Perfil Cerrado, (7) PVC Perfil Abierto, (8) Gres, (9) Poliéster reforzado con Fibra de Vidrio (GRP), (10) Polietileno, (11) Corpacero*, (99) Otros.
Edad	Año de Instalación (AAAA)	Fecha Instalación (AAAA/MM/DD)
Longitud	m	m
Diámetro	mm	m
Espesor	cm	X
Tipo Sección Transv.	N.A	(0) Ovoide, (1) Herradura, (2) Bóveda, (3) Elipse Horizontal, (4) Elipse Vertical, (5) Circular, (6) Trapezoidal, (7) Rectangular, (8) Rectangular Triangular, (9) Rectangular Redondeado, (10) Triangular, (11) Natural Irregular, (12) Box
Profundidad	Cota Rasante (m)	Cota Clave Inicial (m)/ Cota Clave Final (m)/ Cota Batea Inicial (m)/ Cota Batea Final (m)/ Cota Rasante Inicial (m)/ Cota Rasante Final (m)
Tipo	Sanitario, Pluvial, Combinado	(0) Sanitario, (1) Pluvial, (2) Combinado
Rugosidad	N.A	X
Pendiente	m/m	%
Localización	N.A	Coordenadas (X (m), Y (m))
Estado	5 Estados: (1) mejor estado, (5) estado crítico	(0) Desconocido, (1) Fuera Servicio, (2) Abandonado, (3) En Servicio.
Historial de falla	Tipificación de Daños	Tipificación de Daños



Flujo	N.A	Caudal (m ³ /s)
Tasas de Infiltración/ Exfiltración	N.A	X
Tipo de Conexiones	N.A	Cámara de Caída ((0) No aplica, (1) Entrada, (2) Salida)
DATOS DE ENTORNO		
Tipo de Suelo	Materiales del Suelo	X
Usos del Suelo	N.A	X
Trafico/Tipo de Vía	Vehicular (Tipo de Vehículos), Peatonal	X
Localización de Arboles	N.A	X
Nivel de Aguas Subterráneas	Distancia de la Cota Rasante con Nivel Freático (m)	X
DATOS SOCIO-ECONÓMICOS		
Población Servida	N.A	X
Presupuesto	\$/Año	Pesos colombianos (\$)/km/Periodo de tiempo (Años)
Costos Técnicas de Rehabilitación	\$/m	Pesos colombianos (\$)/Tarea, Pesos colombianos (\$)/Tiempo de trabajo

N.A: esta información no se especifica en la literatura existente.

*Tubería de tipo metálica.

CARE-S requiere veinticuatro variables de entrada, de los cuales la EAAB cuenta con catorce (14/24), como se puede ver en la Tabla 5.10. Sin embargo, este modelo tiene un administrador de rehabilitación que integra diferentes herramientas y modelos, con las cuales se pueden determinar factores tales como: indicadores de rendimiento y tasas de infiltración/exfiltración, partiendo de los registros de las características físicas de las tuberías y registros de inspección por medio de CCTV (Saegrov, 2006).

Entre la información faltante: (i) El espesor de la tubería puede ser calculada con la diferencia entre la cota batea y la cota clave, menos el diámetro de la tubería; (ii) La rugosidad puede ser

determinada de acuerdo a los diferentes materiales de las tuberías; (iii) Las características de los suelos adyacentes a las tuberías ya han sido determinadas por la EAAB, sólo deben ser relacionadas a cada tubería para su implementación en una base de datos; (iv) La localización de los árboles es un dato que no se encuentra descrito en la literatura, es decir que no se sabe qué registro específico requiere introducirse en CARE-S (distancia, tipo de árboles, longitud raíces, etc.).

5.3.2.7. MODELO HYDROPLAN

Hydroplan puede ser implementado con diecisiete clases de variables de entrada, sin embargo la falta de claridad en cuanto a los detalles de éstas (Tabla 5.11) no permite hacer un adecuado análisis de la información disponible por la EAAB en relación con la solicitada por el modelo.

Tabla 5.11: Variables requeridos por el Modelo HYDROPLAN en contraste con los disponibles por la EAAB (Los Autores).

DATOS	UNIDADES o REGISTRO	
	HYDROPLAN	EAAB
DATOS DE TUBERÍA		
Material	N.A	(0) Desconocido, (1) Concreto sin Refuerzo, (2) Concreto Reforzado, (3) Concreto Extra Reforzado, (4) Concreto Reforzado Revestido con Lámina de Polietileno, (5) PVC, (6) PVC Perfil Cerrado, (7) PVC Perfil Abierto, (8) Gres, (9) Poliéster reforzado con Fibra de Vidrio (GRP), (10) Polietileno, (11) Corpacero*, (99) Otros.
Edad	Año de Instalación (AAAA)	Fecha Instalación (AAAA/MM/DD)
Longitud	N.A	m
Diámetro	N.A	m
Tipo Sección Transv.	N.A	(0) Ovoide, (1) Herradura, (2) Bóveda, (3) Elipse Horizontal, (4) Elipse Vertical, (5) Circular, (6) Trapezoidal, (7) Rectangular, (8) Rectangular Triangular, (9) Rectangular Redondeado, (10) Triangular, (11) Natural Irregular, (12) Box Culvert.
Profundidad	N.A	Cota Clave Inicial (m)/ Cota Clave Final (m)/ Cota Batea Inicial (m)/ Cota Batea Final (m)/ Cota Rasante Inicial (m)/ Cota Rasante Final (m)



Tipo	N.A	(0) Sanitario, (1) Pluvial, (2) Combinado
Pendiente	N.A	%
Localización	N.A	Coordenadas (X (m), Y (m))
Estado	N.A	(0) Desconocido, (1) Fuera Servicio, (2) Abandonado, (3) En Servicio.
Tasas de Infiltración/ Exfiltración	N.A	X
DATOS DE ENTORNO		
Tipo de Suelo	N.A	X
Usos del Suelo	N.A	X
Trafico/Tipo de Vía	N.A	X
Localización de Arboles	N.A	X
DATOS SOCIO-ECONÓMICOS		
Población Servida	N.A	X
Costos Técnicas de Rehabilitación	\$/m	Pesos colombianos (\$)/Tarea, Pesos colombianos (\$)/Tiempo de trabajo

Según la disponibilidad de datos por parte de la EAAB para la aplicación de los modelos de gestión de alcantarillados urbanos. PRISM y Bengassem & Bennis son los más aptos para aplicar a mediano plazo en la Empresa. Por otro lado, el modelo CARE-S de acuerdo a las etapas de gestión a las cuales responde y a la factibilidad de acceso a los datos faltantes, sería el más apto para ser aplicado a largo plazo.

Tabla 5.12: Datos de la tubería requeridos por cada Herramienta (modificado de Ana & Bauwens, 2007).

MODELOS	DATOS DISPONIBLES	VARIABLES DE ENTRADA															
		DATOS DE TUBERÍA															
		<i>Material</i>	<i>Edad</i>	<i>Longitud</i>	<i>Diámetro</i>	<i>Espesor</i>	<i>Sección Transv.</i>	<i>Profundidad</i>	<i>Tipo</i>	<i>Rugosidad</i>	<i>Pendiente</i>	<i>Localización</i>	<i>Estado</i>	<i>Historial de falla</i>	<i>Flujo</i>	<i>Tasas de Infiltración/Exfiltración</i>	<i>Tipo de Conexiones</i>
PRISM	6/8	X	X	X	X			X	X				X				
Bengassem & Bennis	7/10			X	X			X			X	X	X	X	X		
Baik	8/13	X	X	X	X			X	X		X		X		X	X	
Aqua-Wertmin	11/16	X	X	X	X		X		X		X	X	X	X		X	X
Edmonton	6/9	X	X	X	X			X					X				
CARE-S	14/24	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Hydroplan	-	X	X	X	X		X	X	X		X	X	X		X		

 Datos Disponibles por la EAAB



Tabla 5.13: Datos del entorno y socio-económicos requeridos por cada herramienta (modificado de Ana & Bauwens, 2007).

MODELOS	VARIABLES DE ENTRADA								
	DATOS DE ENTORNO						DATOS SOCIO-ECONÓMICOS		
	<i>Tipo de Suelo</i>	<i>Usos del Suelo</i>	<i>Trafico/Tipo de Vía</i>	<i>Localización de Arboles</i>	<i>Nivel de Aguas Subterráneas</i>	<i>Información Geotécnica</i>	<i>Población Servida</i>	<i>Presupuesto</i>	<i>Costos Técnicas de Rehabilitación</i>
PRISM									X
Bengassem & Bennis	X					X			
Baik	X		X		X				
Aqua-Wertmin	X		X					X	X
Edmonton	X					X			X
CARE-S	X	X	X	X	X		X	X	X
Hydroplan	X	X	X	X			X		X

Datos Disponibles por la EAAB

6. CONCLUSIONES

Este trabajo de grado buscó describir y analizar los métodos y herramientas existentes para la toma de decisiones en la gestión patrimonial de alcantarillados urbanos, y así poder analizar su aplicabilidad en la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). Esto se realizó mediante la revisión del estado del arte de los métodos existentes y las herramientas mediante las cuales funciona cada uno de ellos. Estas herramientas son de diferente naturaleza, y pueden ser de inspección, probabilísticas, estadísticas, informáticas, de modelación hidráulica, hidrológica, de transporte de sedimentos y contaminación urbana.

Los métodos para la toma de decisiones en la gestión patrimonial de alcantarillados urbanos utilizan diferentes variables de entrada para su óptimo desempeño. Por esta razón, para analizar la viabilidad de la aplicación de estos métodos en la EAAB, fue necesario conocer la información manejada por ésta y de este modo determinar las herramientas más aptas para implementar a corto, mediano y largo plazo en la administración de la infraestructura de saneamiento urbano de la ciudad.

Al realizar una extensa revisión del estado del arte, se determinó que el desarrollo de métodos para la toma de decisiones en la gestión patrimonial de alcantarillados urbanos es relativamente reciente (últimas décadas del siglo pasado). Por esta razón, algunos de estos modelos no han sido difundidos ampliamente, lo que limita el acceso a la información para el análisis de los requerimientos para su aplicación en países como Colombia que no cuentan con modelos de gestión propios.

De acuerdo al análisis de las variables de entrada requeridas por los modelos, se estableció que la totalidad de éstos parten del estado actual de las tuberías para así poder determinar el estado futuro de manera apropiada. Sin embargo, la EAAB no cuenta directamente con esta información de sus redes, lo que implica que como primera medida para la implementación de estos modelos en la ciudad, se deben obtener los indicadores de desempeño del estado actual de las tuberías,



mediante las diferentes herramientas y métodos de inspección descritos en el Capítulo 4. Lo anterior implica que los diferentes métodos de gestión pueden ser implementados a mediano y largo plazo debido al tiempo y esfuerzo que requiere la realización de las actividades de inspección y la determinación de los indicadores de rendimiento para una ciudad del tamaño de Bogotá.

Hecho el análisis de los datos necesarios de entrada para cada uno de los modelos, se hizo un estudio igualmente de las variables requeridas por cada herramienta, para así poder determinar su implementación en la EAAB de forma individual, como una forma de soporte en la toma de decisiones en la gestión de los sistemas de alcantarillado. De igual manera que en los modelos, en la mayoría de las herramientas se necesita principalmente la condición actual de la red, información con la que no cuenta la Empresa. Por lo tanto, lo anterior implica que para la posible aplicación de estas herramientas será necesario que la EAAB evalúe o estudie el modo de adaptar los datos disponibles a los requerimientos de entrada de las herramientas, lo cual puede convertirse en la implementación de ellas en planes a corto y mediano plazo, dependiendo del tiempo que puede tardar la adaptación o conversión de las variables.

Después del estudio de la viabilidad de aplicación de los modelos para la EAAB, de acuerdo a las variables de entrada que requiere cada uno de éstos, se concluyó que el Modelo PRISM es el más apto para ser implementado en la ciudad de Bogotá, de acuerdo a la disponibilidad de datos, puesto que seis de los ocho tipos de datos requeridos para su adecuado funcionamiento se encuentran disponibles. Además de los indicadores de desempeño que sirven para caracterizar el estado de la red, entre las variables con las que no dispone la Empresa para la aplicación de este modelo, se encuentra el costo de rehabilitación por metro lineal, el cual puede ser determinado a corto plazo con la normalización de los costos que ya maneja el área administrativa de la Empresa.

El Modelo Bengassen & Bennis es un modelo que puede ser implementado puesto que: (i) Requiere diez variables de entrada de las cuales la EAAB cuenta con siete. Entre las tres faltantes, además de los indicadores de desempeño, se encuentra información acerca de los materiales que componen el suelo adyacente a las tuberías y sus variables geotécnicas, datos que se encuentran disponibles para la EAAB como resultado de los estudios de suelos realizados para la instalación de las redes, por lo cual su implementación requiere tan sólo de la asociación de

dichas variables a las tuberías por medio de una base de datos; (ii) Puede ser ejecutado para cualquier tipo de tubería, pues entre sus variables de entrada no se encuentra como restricción el material de las tuberías de las redes.

Hacia el futuro, el Modelo CARE-S representa una opción bastante apta para ser implementada por la EAAB. Aunque la descripción exacta de las variables de entrada para el uso de este modelo no se encuentra clara en la literatura, esta conclusión puede formularse con base en la información disponible por la Empresa, puesto que a lo que se refiere al tipo general de los datos requeridos por el modelo, la EAAB puede determinar la mayoría de los datos faltantes, partiendo de la que ya maneja.



7. RECOMENDACIONES

Como complemento de este trabajo de grado y aporte para la EAAB en cuanto a la información disponible para la implementación de los modelos estudiados, para próximos proyectos, se puede plantear y/o desarrollar métodos que faciliten la obtención de los indicadores de desempeño (IPs) para caracterizar las condiciones actuales de las tuberías, puesto que los métodos existentes para ciudades como Bogotá suponen la inversión de altas cantidades de capital y tiempos prolongados de inspección.

En el desarrollo de este trabajo de grado se encontró que la mayoría de herramientas con las cuales trabajan los métodos de gestión se basan en conceptos de probabilidad y estadística, los cuales implicaron un arduo trabajo por parte de los autores para su análisis. Por esta razón, se recomienda a la Carrera de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana reforzar temas concernientes a estas áreas, puesto que pueden ser útiles no sólo para la comprensión de este tipo de herramientas sino en general de modelos hidráulicos, hidrológicos, entre otros.

Como primera medida, a la EAAB se le recomienda establecer estándares mínimos para determinar los objetivos precisos y alcances de un plan de gestión, como lo indica San Francisco Bay Regional Water Quality Control Board (2005) como primer paso en la implementación de un sistema de gestión patrimonial.

De igual forma como proyecto de investigación, se recomienda conforme a las herramientas básicas útiles para su implementación en la EAAB, generar o adaptar un modelo de gestión propio, que facilite y apoye la toma de decisiones en la Empresa, de acuerdo a la información disponible y/o asequible con la que se cuente.

De acuerdo al análisis de aplicabilidad de los métodos existentes para la toma de decisiones en la gestión patrimonial de alcantarillados urbanos en la EAAB, se encontraron diferentes variables de entrada carentes y necesarias para la adecuada implementación de los modelos en la ciudad.

Por lo que se recomienda a la EAAB, en primera instancia realizar una estandarización de costos de rehabilitación por metro lineal, al igual que la asociación de la información de los estudios de suelo a las tuberías de la red de alcantarillado.

A lo largo de este estudio se ha expuesto que la toma de buenas decisiones es la clave para una gestión eficiente de los sistemas de alcantarillado. Por esta razón, es recomendable seguir un plan a corto, mediano y largo plazo para cumplir con los objetivos propuestos en la gestión. Se espera que gracias a este trabajo se empiecen a considerar modelos de gestión que se puedan implementar de acuerdo con las variables de entrada requeridas por cada uno de ellos. Por lo tanto, de acuerdo a la información disponible en la EAAB se recomienda que a mediano plazo la Empresa pueda obtener las variables faltantes de cada uno de los siguientes modelos para su implementación en la ciudad: Modelos PRISM y Bengassem & Bennis. Por otra parte, también se recomienda que a largo plazo se disponga de la información complementaria requerida por el Modelo CARE-S para su adecuada aplicación, puesto que según la clasificación de Ana & Bauwens (2007) esta herramienta comprende todos los pasos requeridos en gestión patrimonial. Cabe resaltar que no se consideran modelos aplicables a corto plazo, debido a que la EAAB no cuenta con los indicadores de desempeño necesario para estimar la condición actual de la red de alcantarillado.



8. GLOSARIO

Rehabilitación: son todos los trabajos hechos para mejorar la actividad de los sistemas de alcantarillado existentes. Este término comprende reparación, restauración y renovación de las tuberías de desagües o de los accesorios que hacen parte de la red (U.S. Environmental Protection Agency, 1991).

Renovación: es la construcción de una nueva alcantarilla para mejorar el rendimiento de una longitud del sistema de alcantarillado. Este trabajo se puede realizar dentro o fuera de la línea actual. Las características que tenía la alcantarilla anterior se mantienen con la reconstrucción de la nueva (U.S. Environmental Protection Agency, 1991).

Reparación: es el arreglo de los daños en las características estructurales de la red de alcantarillado y la reconstrucción de tramos cortos de tubería y no de la totalidad de la longitud de ella (U.S. Environmental Protection Agency, 1991).

Reemplazo: es la construcción de una nueva red de alcantarillado dentro o fuera de la línea ya existente. Las funciones del nuevo colector se unen con las del viejo, pero también pueden ser mejoradas durante su desarrollo (U.S. Environmental Protection Agency, 1991).

Mantenimiento: es el proceso que se centra en la conservación estructural y funcional de un sistema de alcantarillado. Para así, asegurar constantemente y por el mayor tiempo posible, que la red se encuentre en un estado óptimo de confianza (De Bona, 1999)

Gestión Patrimonial: es el proceso por el cual se garantiza el mantenimiento, evolución y funcionamiento de un bien de manera eficaz; se combinan procesos de ingeniería con buenas prácticas comerciales y teorías económicas. Dando un enfoque lógico al proceso de toma de decisiones en la planificación del manejo, a corto, mediano y largo plazo de una infraestructura (en este caso a un sistema de alcantarillado) (U.S. Department of Transportation, 1991; FHA, AASH, 1996).

9. BIBLIOGRAFÍA

- Bolton History Centre.* (1957). Recuperado el 11 de 05 de 2011, de <http://www.boltonmuseums.org.uk/collections/local-history/archivesimages03a>
- Adeli, H., & Hawkins, D. (1991). A Hierarchical Expert System for Design of Floors in Highrise Building. *Computers and Structures*, 41(4), 773-788.
- Ana, E., & Bauwens, W. (2007). Sewer Network Asset Management Decision-Support Tools: A Review. *International Symposium on New Directions in Urban Water Management* (págs. 1-8). París: UNESCO.
- Ana, E., & Bauwens, W. (Febrero de 2010). Modeling the Structural Deterioration of Urban Drainage Pipes: the state of the art in statical methods. *Water Journal*, 7(1), 47-59.
- Ana, E., Bauwens, W., Pesseimer, M., Thoeye, S., Smolders, S., Boonen, I., y otros. (2008). Investigating the Effects of Specific Sewer Attributes on Sewer Ageing - a Belgian Case Study. *11th International Conference on Urban Drainage*, 10 pp. Edinburgh.
- ANAO. (1996). *Asset Management Handbook*. Recuperado el 15 de Marzo de 2011, de www.anao.gov.au
- Ángel, J., Sedano, M., & Vila, A. (2001). *La Distribución Normal*. Barcelona: Universidad Oberta de Catalunya. 19 pp. Barcelona
- Ariaratnam, S., & MacLeod, C. (2002). Financial Outlay modeling for Local Rehabilitation Strategy. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(6), 486-496.
- Ariaratnam, S., El-Assaly, A., & Yang, Y. (2001). Assessment of Infrastructure Inspection Needs Using Logistic Models. *Infrastructure Systems*, 7(4), 160-165.
- AS/NZS 4536. (1999). *Life Cycle Costing: An application guide*. Australia: Standards Australia and Standards New Zealand. 8 pp.



- Bäckman, H., Bergman, L., Haugen, H., & Steinar, N. (2005). *Nordic Sewer System Inspection Manual*. Norway: Nordic Innovation Centre. 102 pp. Noruega.
- Baik, H., Jeong, H., & Abraham, D. (2006). Estimating Transition Probabilities in Markov Chain-Based Deterioration Models for Management of Wastewater Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(1), 15-24.
- Barsov, A. (1982). *¿Qué es Programación Lineal?* (1ª ed.). México: Limusa, S.A. 129 pp.
- Baur, R., & Herz, R. (1999). Service Life Management of Water Mains and Sewers. *Proceedings of the 13th European Junior Scientist Workshop*, 222 pp. Dresden.
- Baur, R., & Herz, R. (2001). Selective Inspection Planning with Aging Forecast for Sewer Types. *Efficient Water Management*, 8 pp.
- Baur, R., Hernz, R., & Kropp, I. (2003). *Procedure for Choosing the Right Rehabilitation Technology*. Estados Unidos: CARE-S Report D16. 88 pp. EU, Projects.
- Baur, R., Ziellichowski-Haber, W., & Kropp, I. (2004). Statical Analysis of Inspection Data for the Asset Management of Sewer Networks. *Proceedings 19th EJSW on Process Data and Integrated Urban Water Modeling*, (8 pp.). Lyon.
- Bazaraa, M., Jarvis, J. J., & Sherali, H. D. (2005). *Linear Programming and Network Flows* (3ª ed.). Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc. 574 pp.
- Bengassem, J., & Bennis, S. (2000). Fuzzy Expert System for Sewer Networks Diagnosis. *Proceedings International Conference on Decision Making in Urban and Civil Engineering*, 18 pp. Lyon.
- Bennis, S., Bengassem, J., & Lamarre, P. (2003). Hydraulic Performance Index of a Sewer Network. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(7), 504-510.
- Best, R., Langston, C., & Valence, G. D. (2003). *Workplace Strategies and Facilities Management*. Londres: Butterworth Heinemann. 410 pp.
- Bhardwaj, M. (2001). *Non-Contact Ultrasound: The Last Frontier in Non-Destructive Testing and Evaluation*. Nueva York: John Wiley & Sons. 43 pp.
- Birks, A., & Green, R. (1991). *Nondestructive Testing Handbook*. Ohio: American Society for Nondestructive Testing. 135 pp.

- Bravo, O. (2006). *Gestión Integral de Riesgos* (Vol. 1). Colombia: Bravo & Sánchez. 258 pp.
- Cardoso, M., & Matos, R. (2005). Predictable Performance Indicators. En S. Saegrov, *CARE-S* (págs. 1-17). Londres: IWA Publishing.
- Castillo, O., Melin, P., & Kacprzyk, J. y. (2007). Type-2 Fuzzy Logic: Theory and Applications. *IEEE International Conference on Granular Computing*, (págs. 145-150). Silicon Valley.
- CDM. (2006). *Infrastructure Asset Management. A practical Guide for Utility and Public Works Directors*. Guía , 13 pp. Australia.
- Chae, M., & Abraham, D. (2001). Neurofuzzy Approaches for Sanitary Sewer Pipeline Conditions Assessment. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 15(1), 4-14.
- City of Edmonton. (1996). *Standard Sewer Condition Rating System* . Edmonton: Rep. Technical Memorandum. Edmonton.
- Conlima. (2000). *Conlima S.A.* Recuperado el Febrero de 2011, de Conlima S.A.: http://conlima.org/pasado_alcantarillado.php
- Cox, E. (1994). *The Fuzzy Sstems Handbook: A Practitioner's Guide to Building, Using and Maintaining Fussy Systems* (1ª ed.). Londres: Academic Press Limited. 707 pp.
- CRA. (2001). *El estado del arte de la regulación en el sector de agua potable y saneamiento básico en Colombia. Ministerio de Desarrollo Económico, Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico*. 232 pp. Bogotá.
- CSI Computers and Structures, Inc. (2005). Basic Analysis Reference Manual. *SAP2000*, 35-48.
- Davis, P., Dhammika, S., Marlow, D., Mogolia, M., Gould, S., & Burn, S. (2008). *Failure Prediction and Optimal Scheduling of Replacements in Asbesto Cement Water Pipes*. Australia: IWA Publishing. 15 pp.
- De Bona, Jose María (1999). *Gestión del Mantenimiento* (1ª ed.). Fundación Confemental. 1999. 403 pp.
- De Gueldre, G., Van Herzeele, F., Boonen, I., Thoeye, C., & Van de Steene, B. (2007). *Hydroplan-EU An Integrated Approach for Sewer Asset Management*. Lyon. 8 pp.



- DeGroot, M. H., & Schervish, M. J. (2002). *Probability and Statistics* (3ª ed.). Londres: Addison-Wesley. 723 pp.
- Dennis, J. (1977). Nonlinear least-squares. States oh the Art in Numerical Analysis. En D. Jacobs (Ed.). Academic Press. 269-312.
- Dubin, J., & Rivers, R. (1987). Statistical Software tools; Version 1.1. 3(Julio-Septiembre), 235-239.
- EAAB (2007). *Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá: Aspectos Técnicos para Inspección de Redes y Estructuras de Alcantarillado*. Bogotá: EAAB-E.S.P.
- EAAB (2008). Plan General Estratégico con Prevención, Ingeniería y Educación Firme en la Gestión 2008-2012. 29 pp.. Bogotá.
- EAAB (2009). *Acuerdo 11. Código de Buen Gobierno de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - ESP*. Bogotá: Secretaría General de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. 67 pp. Bogotá.
- EAAB (2011). Informe de Gestión - Marzo de 2011. 44 pp. Bogotá.
- Ellis, B. J., & Bertrand-Krajewski, J.-L. (2010). *Assessing infiltration and exfiltration on the performance of urban sewer systems (APUSS)* (1ª ed.). Londres: IWA Publishing. 180 pp.
- Fenner, R. (2000). Approaches to Sewer Maintenance. *Urban Water, Vol. 2* (13 pp.).
- Fernando, S., Er, K., Mohamed, Y., AbouRizk, S., & Ruwanpura, J. (2003). A Review of Simulation Applications for Varying Demands in Tunneling. *Proceedings of the Construction Research Congress, ASCE*. 35 pp. Honolulu.
- FHA, AASH. (1996). *Asset Management: Advacing the State of the Art Into the 21st Century Through Public-Private Dialogue*. Estados Unidos: Federal highway Administration and the American Association of State Highway and Transportation Officials. Septiembre, 24 pp.
- Fundición Industrial Potosina, S. d. (Mayo de 2010). *Fundición Industrial Potosina, S.A de C.V.* Recuperado el Miércoles de Mayo de 2011, de <http://www.fipsa.com.mx>
- Gómez, J. (2005). El Método de Monte Carlo. *Curso de Estadística*, 15 pp.

- González, O. y. (1997). *Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado*. México D.F.: México Editorial LIMUSA, S.A. de C.V. 415 pp.
- Gouda, H., Ashley, R., Blanksby, J., & Adams, A. (2007). Sewer Sediment Management and Hydraulic Modeling. *Spring Conference ATKINS* , 11 pp. 2007.
- Gouda, H., ashley, R., Gilmour, D., & Smith, H. (2003). Life Cycle Analysis and Sewer Solids. *Water Science and Technology*, 47(4), 185-192.
- Gould, W., Pitblado, J., & Sribney, W. (2006). *Maximum Likelihood Estimation with Stata* (3^a ed.). Texas: Stata Press. 290 pp.
- Grinstead, C., & Snell, J. (2002). *Introduction to Probability* (2^a ed.). Estados Unidos: American Mathematical Society.
- Gross, T. (2004). *Der Anlage bei der Vermögensverwaltung*. Alemania .
- Guro, W., Soibelman, L., & Garrett, J. (2009). Automated Defect Detection for Sewer Pipeline Inspection and Condition Assessment. *Automation in Construction*, 18, 587-596.
- Haigh, J. (2002). *Probability Models*. Londres: Springer. 257 pp.
- Halfawy, M., Drindi, L., & Baker, S. (2007). *A GIS_Based Decision Support System for Optimal Renewal Planning of Sewers*. Quebec: INFRA. 10 pp.
- Hasegawa, K., Wada, Y., & Hiroyuki, M. (1999). New Assessment System for Premeditated Management and Maintenance of Sewer Pipe Network. *Proceedings 8th International Conference on Urban Storm Drainage*. Sidney. 586-593.
- Helfawy, S. (1998). Forecasting Rehabilitation needs: Evaluation os the AQUA WertMin software for service life and total cost estimation. *SINTEF*. Norway Technology and Society.
- Herz, R. (1996). Aging Processes and Rehabilitation Needs of Drinking Water Distribution Networks. *Journal of Water*, 45(5), 221-231.
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2006). *Introducción a la Investigación de Operaciones* (8^a ed.). McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. 1061 pp.



- Hlavinek, P., Kubik, J., Prax, P., Somcikova, P., & Sulvova, V. (2006). Application of Decision Support System for Sewer Network Rehabilitation. *Integrated urban Water Resources Management*, 159-170.
- Hulance, J., Orman, N., Hurley, R., & Kowlski, M. (2003). *The CARE-S procedure, CARE-S report D20*.
- IIASA. (Abril de 2000). *Ingeniería Integral del Agua SA y CV*. Recuperado el Marzo de 2011, de <http://www.iiasa.com.mx>
- Institute for Public Policy Research. (2001). *Commission on Public Private Partnership, Building Better Partnerships*. 45 pp. Londres.
- IPWEA. (2006). *International Infrastructure Management Manual*. Australia: Institute of Public Works Engineering of Australia. 353 pp.
- Iyer, S., & Sinha, S. (2006). Segmentation of Pipe Images for Crack Detection in Buried Sewer. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 21(6), 395-410.
- Jiménez, J., & Valderrama, A. (2002). *El Agua en Bogotá*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Johnson, L. (2009). *Geographic Information Systems in Water Resources Engineering*. Londres: IWA Publishing. 298 pp.
- Kathula, V. S., Pumphrey, N. D., Roberts, F. L., & Nassar, R. (1999). Integrating Sewer Condition with Sewer Management. *North American Society for Trenchless*. Orlando. 13 pp.
- Ketil, J., Larsen, W., & Nilsen, E. (2010). Learning Geography with GIS: Integrating GIS into Upper Secondary School Geography Curricula. *Norwegian Journal of Geography*, 64, 21-35.
- Kleiner, Y., Rajani, B., & Wang, S. (2007). Consideration of static and dynamic effects to plan water main renewal. In: Proceedings Middle East Water. *4th International Exhibition and Conference for Water Technology*. 14 pp. Manama, Bahrain.
- Knolmar, M., & Szabo, G. (2003). *Classification System Based on Visual Inspection, CARE-S report D3*.

- Le Gauffre, P., Joannis, C., Vasconcelos, E., Breysse, D., Gibello, C., & Desmulliez, J.-J. (2007). Performance Indicators and Multicriterial Decision Support for Sewer Asset Management. *Journal of Infrastructure Systems*. 13 (2), 105-114.
- Llano, L., Zapata, G., & Ovalle, D. (2007). Sistema de Inferencia Difusa para Identificar Eventos de Falla en Tiempo Real del STE usando Registros SOE. *Avances en Sistemas e Informática*, 4(2) 10 pp..
- López, P. (2000). *Probabilidad y Estadística, Conceptos, Modelos y Aplicaciones en Excel* (1ª ed.). Bogotá: pearson Educación de Colombia Ltda. 298 pp.
- Makar, J. (1999). Diagnostic Techniques for Sewer Systems. *Journal of Infrastructure System*, 5(2), 69-78.
- Masulli, F., & Mitra, S. y. (2007). Applications of Fuzzy Sets Theory. *7th International Workshop on Fuzzy Logic and Applications*, (pág. 693). Camogli.
- Matos, R., Cardoso, M., Pinheira, I., & Almeida, M. (2003). *Selection of a Listing of Rehabilitation Indicators for Rehabilitation*. Technical Publication. 172 pp.
- Mendenhall, W., Beaver, R., & Beaver, B. (2008). *Introducción a la Probabilidad y Estadística* (12ª ed.). México: Learning Editores. 743 pp.
- Metcalf & Eddy. (1981). *Tratamiento y depuración de aguas residuales* (2ª ed.). Barcelona: Grupo Editorial Labor S.A. 837 pp.
- Metcalf & Eddy. (1994). *Ingeniería Sanitaria. Redes de alcantarillado y bombeo de aguas residuales* (2ª ed.). Barcelona: Grupo Editorial Labor S.A. 461 pp.
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. (3ª ed., Vol. 2). Madrid: McGraw-Hill. 978 pp.
- MIAM. (2003). Municipal Infrastructure Asset Management: A Best Practice. En *National Guide to Sustainable Municipal Infrastructure*. 70 pp. Canadá.
- Micevski, T., Kuczera, G., & Coombes, P. (2002). Markov Model for Storm Water Pipe Deterioration. *Infrastructure Systems*, 8(2), 49-56.
- Montengro García, Á. (2004). *Series de Tiempo* (3a Ed ed.). (P. u. Javeriana, Ed.) Bogotá. 242 pp.



- Moore, D. (2000). *Estadística Aplicada y Básica* (2ª ed.). Barcelona: Antoni Bosch Editor S.A. 876 pp.
- Moselhi, O., & Shehab-Eldeen, T. (1999). Detection of Surface Defects in water and sewer. *Automatitation in Construction*, 8(5), 581-588.
- MTS Systems Corporation. (1999). Series 244 SilentFlo™ Hydraulic Actuators. Product Information. *Manual MTS Electronics.*, págs 1-9.
- MTS Systems Corporation. (2006). Hydraulic Service Manifold. *Manual MTS Electronics.* 293 pp.
- MTS Systems Corporation. (2006). Series 505 SilentFlo™ Hydraulic Power Unit, Product Information. *Manual MTS Electronics.*, págs 1-60.
- Muñoz, M., & Blanco, L. (2002). *Introducción a la teoría avanzada de la Probabilidad.* (U. N. Colombia, Ed.) Bogotá. 284 pp.
- Nájera, J. (2010). *Método de Monte Carlo.* Chihuahua: Instituto Tecnológico de CD Juárez. 15 pp.
- National Audit Office. (2005). *Improving Public Services through Better Construction.* Londres: National Audit Office. 19 pp.
- Nilson, A. (1999). *Diseño de Estructuras de Concreto.* Bogotá D.C, Colombia.: McGraw-Hill Interamericana, S.A. 722 pp.
- Norman H., D., & Lemer, A. (31 de Agosto de 1998). Asset Management for the Public Works Manager: Challenges and Strategies. 10 pp.
- NSW Asset Management Committee. (2003). *Total Asset Management Manual.* New South Wales. 392 pp.
- Organización Mundial de la Salud. (1995). Gestión financiera del abastecimiento de agua y el saneamiento. *Gestión financiera del abastecimiento de agua y el saneamiento*, 89 pp. Ginebra, Suiza.
- Paek, Y., & Adeli, H. (1990). Structural Design Language for Coupled Knowledge-Based Systems. *Advances in Engineering Software and Workstations*, 12(4), 154-166.

- Read, G. F., & Vickidge, I. G. (1997). *Sewer Rehabilitation a new Construction Repair and Renovation*. Londres: Elseiver. 414 pp.
- Rommel, Y., Bouyssou, D., & MacGilchrist, R. (1989). Planning Rehabilitation Works on a Sewer Network. *Computing in Civil Engineering: Computers in Engineering*, (págs. 108-115).
- Ross, S. (2003). *Introduction to Probability Models* (8ª ed.). San Diego: Academic. 755 pp.
- Ruwanpura, J., Ariaratnam, S., & El-Assaly, A. (2004). Prediction Models for Sewer Infrastructure Utilizing Rule-Based Simulation. *Civil Engineering and Environmental System*, 21(3), 169-185.
- Saegrov, S. (2006). *CARE-S: Computer Aided Rehabilitation of Sewer and Storm Water Networks*. Londres: IWA Publishing. 160 pp.
- Saegrov, S., Hafskjold, L., Köning, A., Rostum, J., Selseth, I., & Sjøvold, F. (2006). Wastewater Network Challenges and Solutions. *Integrated Urban Water Resources Management*, 147-158.
- San Francisco Bay Regional Water Quality Control Board, Bay Area Clean Water Agencies. (2005). *Sewer System Management Plan (SSMP)*. San Francisco. 28 pp.
- Sandoval, S., & Navarro, K. P. (2010). Trabajo de grado: Estrategias de Mantenimiento en Alcantarillados Pluviales Utilizando Estimaciones de Confiabilidad Operativa. 212 pp. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Shamsi, U. (2005). *GIS Applications for Water, Wastewater, and Stormwater Systems*. Florida: CRC Press. 413 pp.
- Shegad-Eldeen, T., & Moselhi, O. (2000). A Date-base System for Selecting of Rehabilitation Techniques of Sewer Pipes. *Proceedings of the 17th International Conference on Automation and Robotics in Construction*, (págs. 1085-1090). Taipei.
- Sinha, S. (2001). Development of an Intelligent System for underground Pipeline Assessment, rehabilitation and Management. *Proceedings of No-Dig Conference*, 13 pp. Tennessee.
- Sinha, S., & Knight, M. (2004). Intelligent System for Condition Monitoring of Underground Pipelines. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 19, 42-53.



- Stapelberg, R. (2006). *Infrastructure and Industry Assets Management Survey Research Report*. Brisbane: CRC for Integrated Engineering Asset Management.
- Stone, S., Dzuray, E., Meisegeier, D., & Dahlgren, A. (2002). Decision-Support Tools for Predicting the Performance of Water Distribution and Wastewater Collection Systems. *US EPA*, 97 pp.
- Tagherout, W., Bennis, S., & Bengassem, J. (2011). A Fuzzy Expert System for Prioritizing Rehabilitation of Sewer Networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 6 pp.
- Too, E., & Tay, L. (2008). Infrastructure Asset Management (IAM): Evolucion and Evaluation. *Proceeding CIB International Conference on Building Education and Research* (págs. 950-958). Heritance Kandalama, Sri Lanka.: University of Salford.
- U.S. Environmental Protection Agency (1991). *Sewer System Infrastructure Analysis and Rehabilitation*. Estados Unidos: EPA. 1991. 92 pp.
- U.S. Department of Transportation. (1999). *Asset Management Primer*. Estados Unidos.
- UNATSABAR. (2005). *Operación y mantenimiento de sistemas de alcantarillado sanitario en el medio rural*. Lima. 22 pp.
- Unidas, C. E. (2008). *Seguimiento de la Población mundial, con especial referencia a la distribución de la población, la urbanización, la migración interna y el desarrollo*. Recuperado el 12 de Junio de 2011, de <http://www.realinstitutoelcano.org/materiales/ONU-ECOSOC-SeguimientoPoblacionMundial.pdf>
- Van Herzeele, F., Boonen, I., Van Assel, J., De Gueldre, G., & Thoeye, C. (2006). Hydroplan-EU Knowledge Management Framework for Urban Water Asset Management. *Proceedings of 7th International Conference on Hydroinformatics HIC*. Nice. 7 pp.
- Vanier, D. (2001). Why Industry Needs Asset Management Tools. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 15 (1), 35-43.

- Vojinovic, Z., Price, K., & Broek, V. (2005). Hydroplan-EU Knowledge Management Framework for urban Water Asset Management. *10th International Conference on Urban Drainage*. Copenhagen. 7 pp.
- Vose, D. (1996). *Quantitative Risk Analysis a Guide to Monte Carlo Simulation Modelling*. Nueva York: Jhon Wiley & Sons. 340 pp.
- Waheed, A., & Adeli, H. (2000). A knowledge-based System for Evaluation of Superload Permit Applications. *Expert Systems with Applications*, 18 (págs. 51-58).
- Walpole, R., Myers, R., & Mayer, S. (2007). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias* (8ª ed.). México: Pearson Educación. 816 pp.
- Washington, S., Karlaftis, M., & Mannering. (2003). *Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis* (1ª ed.). Boca Raton: CRC. 440 pp.
- Water Research Center. (1995). *Manual of Sewer Classification*. Londres, Reino Unido. Editor WRC PIC. 78 pp.
- Weiers, R. (2006). *Introducción a la estadística para negocios* (5a Ed ed.). (I. T. Editores, Ed.) México. 1010 pp.
- Werey, C., Torterotot, J., Sousa, D., Kønig, A., Pereira, A., & Montginoul, M. (2004). *Rehabilitation Impacts on Socio-Economics Costs*.
- Winston, W. (1991). *Operations Research Applications and Algorithms* (Segunda Edición ed.). (D. Press, Ed.) Belmont.
- Wirahadikusumah, R., Abraham, D., & Prasanth, R. (1988). Assessment Technologies for Sewer System Rehabilitation. *Automation in Construction*, 7, 259-270.