
TESIS DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

Estado del Arte en la Determinación de la Condición de Redes de Alcantarillado y su Necesidad o no de ser Sometidas a Renovación o Rehabilitación

Leonardo Aníbal Robalino Cepeda

Director: Profesor Juan G. Saldarriaga Valderrama



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2015**

AGRADECIMIENTOS

“Si el Presente es de Lucha, el Futuro es Nuestro”

“Tomorrow Should be Ours”

A mi familia, tanto a mis hermanas Evelin Paulina y María Gloria, como a mis padres Gustavo y Gloria por apoyarme y motivarme para cumplir mis objetivos. Por permanecer juntos en los duros momentos que hemos vivido como familia.

A mi novia Andrea Fernanda Mendoza, por creer tanto en mí, más de lo que lo hago yo. Por convencerme de que puedo lograr mis metas. Por su amor incondicional en especial en estos dos últimos años que hemos vivido en distintas ciudades. Sin ti no estaría en este momento culminando mis estudios.

A mi director Juan Saldarriaga, por introducirme en este tema, con el cual he disfrutado realizando esta investigación y planeo continuar haciéndolo en el campo laboral. Gracias por sus valiosos consejos y direccionamiento no solo en este trabajo, también en las materias que he sido su alumno.

Al gobierno ecuatoriano, por la decisión política de invertir en educación permitiéndonos que miles de ecuatorianos podamos especializarnos fuera del país y al retornar podamos colaborar desde nuestra área.

Al Acueducto de Bogotá, en especial al Departamento de Ingeniería Especializada encabezado por el Ing. Daniel Rodríguez, por su disposición incondicional de colaborar con el presente trabajo y valiosos aportes para complementar el mismo.

TABLA DE CONTENIDOS

TABLA CONTENIDOS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Deterioro En Tuberías de Alcantarillado.....	3
2.1.1 Necesidad de Renovación / Rehabilitación.....	3
2.1.2 Problemas Comunes Causantes del Deterioro.....	4
3. MÉTODOS PARA DETERMINAR EL ESTADO EN REDES DE ALCANTARILLADO	8
3.1 Inspecciones en Sitio.....	10
3.1.1 CCTV y Tecnologías Similares.....	10
3.1.2 Nuevas Tecnologías.....	14
3.1.2.1 Clasificación.....	14
3.1.2.2 Ultrasónicas.....	15
3.2 Índices.....	17
3.2.1 Hidráulicos.....	17
3.2.2 Rendimiento.....	24
3.2.2.1 Índices con Modelos Difusos.....	24
3.2.2.2 Índice de Desempeño Robusto.....	28
3.3 Análisis de Daños y Riesgo.....	31
3.3.1 Evaluación Daños.....	31
3.3.2 Enfoque basado en Riesgo.....	34
3.4 Modelos Predictivos para determinar el estado futuro.....	39
3.4.1 Estadísticos con Fundamentos de Markov.....	39
3.4.1.1 Dirksen.....	39
3.4.1.2 Baik.....	42
3.4.1.3 Ugarelli.....	45
3.4.2 Estadísticos con Regresiones.....	49
3.4.3 Árboles de Decisión.....	53
3.4.3.1 Priorización para rehabilitación.....	53
3.4.3.2 Priorización para inspección.....	58
3.4.4 Supervivencia de Tuberías.....	62
3.5 Inteligencia Artificial.....	66
3.5.1 Vectores Soporte (Support Vector Machines).....	66

3.5.2	Redes Neuronales.....	71
3.5.2.1	Predictivas.....	71
3.5.2.2	Detección automática de defectos.....	75
3.6	Análisis de Toma Directa de Decisiones.....	83
3.6.1	Situación de Emergencia	83
3.6.2	Análisis Proactivo.....	85
3.6.3	Influencia de Decisiones Políticas.....	87
4.	CASO DE ESTUDIO: ACUEDUCTO DE BOGOTÁ.....	95
4.1	Sistema de Información para la Gestión del Alcantarillado (SIGA).....	95
4.1.1	Sistema de Información para el mantenimiento del alcantarillado (SIMA).....	96
4.1.2	Sistema de Información para la Rehabilitación del Alcantarillado (SIRA).....	97
4.1.3	Sistema de Información para la Planificación del Alcantarillado (SIPA).....	98
4.2	Metodologías factibles para el Acueducto de Bogotá.....	99
4.2.1	Metodología Para un Manejo Proactivo (SAM).....	99
4.2.2	Árboles de Decisión.....	100
4.2.3	Índices de Desempeño.....	101
4.2.3.1	Índice de Sobre-carga.....	101
4.2.3.2	Índice de desempeño Global.....	103
4.2.4	Inteligencia Artificial.....	103
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	105
5.1	Conclusiones.....	105
5.2	Trabajo Futuro.....	110
6.	REFERENCIAS.....	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1-1. Resultados de Electro-Scanning. Fuente: Ariamalar, Selvakumar (2012).....	12
Figura 3.1-2. Proceso de transformación de la imagen de inspección. Fuente: Ariamalar, Selvakumar (2012).....	15
Figura 3.1-3. Esquema del ensayo de laboratorio. Fuente: Iyer (2012).....	16
Figura 3.1-4. Representaciones del cambio de amplitud en una placa con orificio. Fuente: Iyer (2012).....	17
Figura 3.2-1. Esquema de una sección de tubería. Fuente: Bennis (2003).....	18
Figura 3.2-2. Cuenca seleccionada, Laval Canadá Fuente: Bennis (2003).....	21
Figura 3.2-3. (a) Estructural. (b) Hidráulico. (c) Total. Adaptación Bennis, Tagherouit (2011).....	25
Figura 3.2-4. Cuenca analizada en Laval. Fuente: Bennis, Tagherouit (2011).....	27
Figura 3.2-5. Esquema del funcionamiento del modelo. Fuente: Angkasuwansiri (2014).....	29
Figura 3.2-6. Índice de desempeño calculado por modelo difuso. Fuente: Angkasuwansiri (2014)...	30
Figura 3.2-7. Clasificación de tuberías vía CCTV (PACP). Fuente: Angkasuwansiri (2014).....	30
Figura 3.3-1. Análisis segmentos de tubería. Fuente: Hoffman (2014).....	31
Figura 3.3-2. Consecuencia de falla de tubería. Fuente: Hoffman (2014).....	32
Figura 3.3-3. Cálculo de nBCR en distintas secciones de tuberías. Fuente: Hoffman (2014).....	33
Figura 3.3-4. Área de los proyectos establecidos. Fuente: Hoffman (2014).....	34
Figura 3.3-5 Representación de Riesgo. Fuente: Baah (2014).....	36
Figura 3.4-1 Transición de Estados. Fuente: Dirksen (2008).....	39
Figura 3.4-2. Distribución del estado de las tuberías para un período de 50 años. Fuente: Dirksen (2008).....	42
Figura 3.4-3. Probabilidades de transición de estados. Fuente: Baik (2006).....	44
Figura 3.4-4. Resultados de la modelación de deterioro. Fuente: Ugarelli (2013).....	48
Figura 3.4-5. Simulación de la evolución de la condición de la red. Fuente: Ugarelli (2013).....	48
Figura 3.4-6. Simulación del plan de rehabilitación A1. Fuente: Ugarelli (2013).....	49
Figura 3.4-7 (a), (b): Curvas de Deterioro y (c) de Operación. Fuente: Fazal (2007).....	52
Figura 3.4-8. Representación Gráfica modelo árbol de decisión. Fuente: Syachrani (2013).....	55
Figura 3.4-9. Resultados modelo árbol de decisión. Fuente: Syachrani (2013).....	56
Figura 3.4-10. Representación de ASE para los tres modelos. Fuente: Syachrani (2013).....	58
Figura 3.4-11. Resultados Árbol de Decisión. Fuente: Harvey (2015).....	60
Figura 3.4-12a. Simulación para un estado 1 o peor, para tres casos. Fuente: Duchesne (2012)...	65
Figura 3.4-12b. Simulación para un estado 2-3 o peor, para tres casos. Fuente: Duchesne (2012)	65
Figura 3.4-13. Representación gráfica de 1000 repeticiones para 500 observaciones. Fuente: Duchesne (2012).....	66
Figura 3.5-1. Localización del Estudio. Fuente Sousa (2014).....	73
Figura 3.5-2. Fuente: Chae (2001).....	76
Figura 3.5-3 Fuente: Chae (2001).....	77
Figura 3.5-4 Fuente: Chae (2001).....	78
Figura 3.5-5 Fuente: Chae (2001).....	79
Figura 3.5-6 Fuente: Chae (2001).....	79

Figura 3.5-7 Fuente: Chae (2001).....	80
Figura 3.5-8 Fuente: Chae (2001).....	81
Figura 3.5-9 Fuente: Chae (2001).....	81
Figura 3.6-1 Análisis Espacial. Fuente: Williamson (2014).....	85
Figura 3.6-2 Niveles para llegar a un manejo Pro-Activo. Fuente: Le Gauffre (2014).....	86
Figura 3.6-3. Fuentes para Rehabilitación. Fuente: van Riel (2015).....	90
Figura 3.6-4 Distribución de las Fuentes. Fuente: van Riel (2015).....	91
Figura 3.6-5 Red con las distintas combinaciones encontradas. Fuente: van Riel (2015).....	92
Figura 4-1 Herramientas utilizadas en la ciudad de Bogotá. Fuente: Acueducto de Bogotá, Departamento de Ingeniería Especializada.....	96
Figura 4-2 Herramienta SIMA. Fuente: Acueducto de Bogotá, Departamento de Ingeniería Especializada.....	97
Figura 4-3 Herramienta SIRA. Fuente: Acueducto de Bogotá, Departamento de Ingeniería Especializada.....	98
Figura 4-4. Niveles de Profundización. Fuente: Le Gauffre (2014).....	100
Figura 4-5 Ubicación de la Red. Fuente: Bennis (2003).....	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3a Resumen General.....	8
Tabla 3b Resumen General.....	9
Tabla 3.1-1. Evaluación de las inspecciones.....	14
Tabla 3.2-2. Información hidráulica de la cuenca seleccionada. Fuente: Bennis (2003).....	22
Tabla 3.2-3. Resultados cálculo de índices. Fuente: Bennis (2003).....	23
Tabla 3.2-4. Resultados con aumento de diámetro de la tubería 16. Fuente: Bennis (2003).....	23
Tabla 3.2-5. Condición Interna (IC). Fuente: Bennis, Tagherouit (2011).....	26
Tabla 3.2-6. Resultados del modelo difuso. Fuente: Bennis, Tagherouit (2011).....	27
Tabla 3.3-1. Rango de clasificación. Fuente: Hoffman (2014).....	31
Tabla 3.3-2. Características relevantes de la tubería. Fuente: Baah (2014).....	36
Tabla 3.3-3. Niveles de Impacto. Fuente: Baah (2014).....	37
Tabla 3.3-4. Matriz de Riesgo. Fuente: Baah (2014).....	37
Tabla 3.3-5. Características en ArcGIS. Fuente: Baah (2014).....	38
Tabla 3.4-1 Criterios de Evaluación. Fuente: Dirksen (2008).....	40
Tabla 3.4-2. Criterios Clasificación Ciudad San Diego. Fuente: Baik (2006).....	43
Tabla 3.4-3. Parámetros utilizados en la modelación. Fuente: Baik (2006).....	45
Tabla 3.4-4. Ejemplo para selección de inspección. Fuente: Baik (2006).....	45
Tabla 3.4-5. Agrupación de Tuberías. Fuente: Ugarelli (2013).....	47
Tabla 3.4-6 Características de las tuberías usadas en modelos. Fuente: Fazal (2007).....	50
Tabla 3.4-7 Variables para el desarrollo del modelo. Fuente: Syachrani (2013).....	54
Tabla 3.4-8. Características y densidad de cada grupo (Cluster). Fuente: Syachrani (2013).....	54
Tabla 3.4-9. Clasificación según el tipo de material (Fuente: Syachrani, 2013).....	55
Tabla 3.4-10. Comparación de modelos mediante ASE. Fuente: Syachrani (2013).....	57
Tabla 3.4-11 Tasa de Desempeño y de Falsos Negativos. Fuente: Harvey (2015).....	61
Tabla 3.4-12. Agrupación en Cohortes de las tuberías inspeccionadas. Fuente: Duchesne (2012).....	64
Tabla 3.4-13. Resultados de los 5 casos presentados en resultados. Fuente: Duchesne (2012).....	65
Tabla 3.4-14. Resultados de la raíz del error cuadrático medio. Fuente: Duchesne (2012).....	66
Tabla 3.5-1 Distribución tuberías según material y su condición. Fuente: Mashford (2011).....	68
Tabla 3.5-2. Características de las tuberías usadas para el modelo. Fuente: Mashford (2011).....	69
Tabla 3.5-3 Resultados del Modelo. Fuente: Mashford (2011).....	70
Tabla 3.5-4 Resultados del Modelo. Fuente: Mashford (2011).....	70
Tabla 3.5-5 Clasificación de Modelos. Fuente Sousa (2014).....	72
Tabla 3.5-6 Atributos de las tuberías. Fuente Sousa (2014).....	74
Tablas 3.5-7 (a), (b) y (c) Resultados del Modelo, Porcentajes de Acierto. Fuente Sousa (2014)...	75
Tabla 3.5-8 Fuente: Chae (2001).....	82
Tabla 3.6-1. Municipalidades Holandesas. Fuente: van Riel (2015).....	89

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Contar con un sistema de alcantarillado es uno de los indicadores básicos para calificar el nivel de vida para una sociedad así como uno de los servicios elementales que una ciudad debe brindar a sus ciudadanos. La ausencia de un sistema de alcantarillado está directamente relacionado con enfermedades y problemas sanitarios; por tales motivos contar hoy en día con este servicio es algo que está implícito por defecto, especialmente en poblaciones de primer mundo y en vías de desarrollo como la nuestra. La concepción de una red de alcantarillado ha ido evolucionando con los años, ha pasado de ser un sistema poco eficiente, que pretendía evacuar aguas residuales y pluviales de manera rápida, a ser un sistema eficiente e integrado. Esta concepción integrada ahora toma en cuenta factores ambientales como es el cuerpo receptor y la optimización de la red ya construida. Ahora se piensa en conjunto con todos los actores que conforman una red de alcantarillado y es aquí donde se concentra la investigación del presente trabajo. Debido a reglamentaciones ambientales cada vez más rigurosas que pesan sobre el sistema integrado de drenaje urbano a nivel mundial es fundamental tener métodos precisos para determinar el estado de la red y así poder adaptar, modernizar y mejorarla.

Por efectos de visibilidad de la red, la rehabilitación de un sistema de alcantarillado es generalmente aplazada hasta que ocurre una gran falla, lo que resulta en una rehabilitación de mayor dificultad y costo. Lamentablemente en ciudades latinoamericanas como Quito y Bogotá, este tipo de fallas son comunes y la predisposición que se toma es la de "arreglan cuando fallan y si es que fallan" (Baik, 2009). Pero este problema no se presenta por simple negligencia; la rehabilitación de redes de alcantarillado es un verdadero reto. Primero, porque la mayor parte de la rehabilitación se la debe llevar a cabo en zonas densamente pobladas, lo que implica suspensión del servicio, excavaciones, interrupción del tránsito vehicular y peatonal entre otras. Segundo como se mencionó inicialmente, estas rehabilitaciones se las realiza cuando una gran falla se presenta, lo que representa un mayor grado de dificultad así como mayor tiempo invertido en el arreglo. Es más muchos autores (R. Wirahadikusumah, Baik) mencionan que este tipo de reparaciones resultan ser de dos a diez veces más costosas que si se las hubiera realizado de forma planificada, además de ocasionar daños ambientales y publicidad adversa a la empresa de alcantarillado a cargo.

Pero dichas dificultades no son exclusivas de nuestro medio, ya que en Estados Unidos, según un informe anual que realiza la ASCE, donde evalúa las distintas áreas de ingeniería en territorio americano, en cuanto a infraestructura de alcantarillados esta obtuvo una calificación "D" que corresponde a mala. Lamentablemente con el pasar de los años esta ha ido empeorando, puesto que en 1988 tenía calificación "C". Dicho informe incluye información preocupante, como el hecho

que 900 billones de galones de agua sin tratar son vertidos en el país debido al estado de la infraestructura de los sistemas de alcantarillado (A. Selvakumar, et al., 2013). Con ello se puede comprender la importancia de determinar el estado de las redes de alcantarillado, ya que conocer su estado brinda información clave, para estimar el tiempo de vida útil restante de las redes, así como para realizar una evaluación a largo plazo de la red y su desempeño bajo nuevas formas de diseño urbano.

Los municipios alrededor del mundo tienen un gran reto; el manejar redes de alcantarillado de rápido envejecimiento con exponenciales incrementos de demanda, bajos presupuestos y regulaciones ambientales cada vez más estrictas (Egger C, et al., 2013). Para alcanzar el nivel de eficiencia deseado de este servicio, es indispensable contar con información precisa para su constante monitoreo, lo cual permitiría saber el estado exacto de las tuberías que conforman la red, realizar planes de renovación preventivos y mantener un inventario de tuberías (Halfawy R, et al., 2013).

Por ello el concepto introducido por Baik (2009) de un sistema de gestión de aguas residuales proactivo es de suma importancia, el cual plantea que es necesario un conocimiento del desempeño presente y futuro de la red, tanto de sus condiciones hidráulicas, estructurales y ambientales. Además de la utilización de herramientas computacionales adecuadas que contribuyan a la toma de decisiones para inspecciones así como la óptima asignación de recursos y ubicación de los proyectos de rehabilitación más necesarios. El presente trabajo hará énfasis en este último; la determinación del estado de las redes no solo consiste en inspecciones, ya que estas únicamente dan una imagen instantánea de las condiciones de la tubería. Por lo tanto se exploraran las distintas formas (modelos, índices) que acompañadas de inspecciones en sitio permiten una predicción del estado futuro de la red, para lo cual es indispensable conocer las condiciones pasadas a la red, con inspecciones mediante circuitos cerrados de televisión (CCTV). Con esta información las empresas de alcantarillado podrán orientarse según sus distintas necesidades y las particularidades de cada ciudad y así escoger la mejor opción para determinar el estado de sus redes. También podrán preparar un plan de mantenimiento y operación preventivo, trazar inspecciones efectivas, y detectar las zonas más sensibles y en necesidad de mantenimiento presentes en la red.

El trabajo de tesis consta de cinco secciones; en la primera se expondrá la necesidad de determinar el estado de las redes de alcantarillado así como la realidad y desafíos que existen para determinarlos. La segunda parte es un marco teórico, donde se explicará las distintas causas de deterioro de la red y sus efectos a nivel local y global. La tercera parte explora métodos para determinar el estado de una red, los cuales se subdividen en seis grupos de acuerdo con sus características y alcances. En la cuarta sección se pretende explorar la manera en que actualmente la ciudad de Bogotá determina el estado de su red de alcantarillado, con el fin de recomendar uno de los métodos investigados que mejor se ajuste a la realidad que vive la ciudad con sus múltiples limitaciones Finalmente se presenta una conclusión que pretende evaluar las bondades y

limitaciones de los métodos para determinar el estado de la red, además del trabajo futuro que podría realizarse en otras investigaciones.

1.2 Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Explorar en la literatura los distintos métodos utilizados para determinar el estado de las redes de alcantarillado urbano, mediante los cuales se puedan predecir: vida útil restante y desempeño estructural en el futuro. Lo anterior con el objetivo de facilitar a las entidades especializadas en la toma de decisiones en cuanto a planes óptimos de rehabilitación o renovación de tuberías, así como la priorización de inspecciones.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar en la literatura propuestas nuevas e innovadores para conocer el estado de las redes.
- Identificar experiencias documentadas en la literatura de otras ciudades en cuanto a métodos de realizar inspecciones a sus redes de alcantarillado.
- Identificar nuevas tecnologías para la inspección de alcantarillados y en su posibilidad el alcance y desempeño que tuvo al ser aplicado a una ciudad.
- Encontrar métodos o modelos para la automatización de la información encontrada en las inspecciones, al tratarse de ciudades grandes con miles de kilómetros de redes.
- Identificar la información de entrada y demás, que requieren modelos predictivos del estado de redes de alcantarillado.
- Encontrar patrones o características similares que compartan tanto modelos como índices predictivos de redes.
- Determinar las limitaciones y alcance de los modelos predictivos encontrados.
- Determinar las limitaciones e incertidumbre al realizar inspecciones a tiempo real.
- De los métodos investigados seleccionar los más apropiados que se ajusten a la realidad de ciudades como Quito y Bogotá.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Deterioro en tuberías de alcantarillado

2.1.1. Necesidad de Rehabilitación o Renovación

La necesidad de rehabilitación nace de los constantes cambios y expansiones que experimenta una ciudad, donde el centro de ella, generalmente la zona más antigua, cuenta así mismo con tuberías de drenaje muy deterioradas, por el paso de los años. Estas tuberías a su vez han sido acopladas o añadidas a otras zonas relativamente nuevas de la ciudad, como es el caso típico de Quito y Bogotá. Hoy en día algunas zonas de este sistema antiguo pueden estar sub-dimensionadas y las cargas de tráfico han cambiado exponencialmente siendo mayores a las consideradas inicialmente en el diseño, si es que lo hubo (Butler, 2004).

Adicionalmente el material con el que fueron construidas las tuberías así como su instalación pudo ser de baja calidad, dadas las limitaciones de la época. Si bien es cierto, en muchas zonas antiguas continúan en funcionamiento a pesar de la falta de mantenimiento, esto solo quiere decir que eventualmente ocurrirá una gran falla estructural y sus consecuencias serán graves y seguirán incrementándose a medida que el tiempo transcurra sin rehabilitación o renovación (Butler, 2004).

Además de las consecuencias mencionadas en la ciudad, la falta de mantenimiento genera serios problemas en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Cuando los sistemas de drenaje se deterioran, aguas de infiltración pueden ingresar al sistema, ocasionando primero una reducción en la capacidad del sistema así como en la planta, lo que a su vez genera un incremento en la carga hidráulica produciendo mayores costos de capital tanto en la operación como mantenimiento (R. Wirahadikusumah, et al., 1998).

2.1.2. Problemas comunes que causan deterioro en tuberías

Las tuberías de alcantarillado están sujetas a una serie de factores que causan su deterioro, disminuyendo su vida útil y desempeño, de los cuales se destacan:

BLOQUEOS:

Se los puede definir como parciales o totales, comúnmente se encuentran en tuberías de diámetros pequeños. Dichos bloques están asociados a defectos del sistema (juntas separadas, cambios severos en la dirección). Los efectos del bloqueo van desde pérdida de capacidad hasta interrupción completa.



Ilustración 1: Fuente Wu (2013)

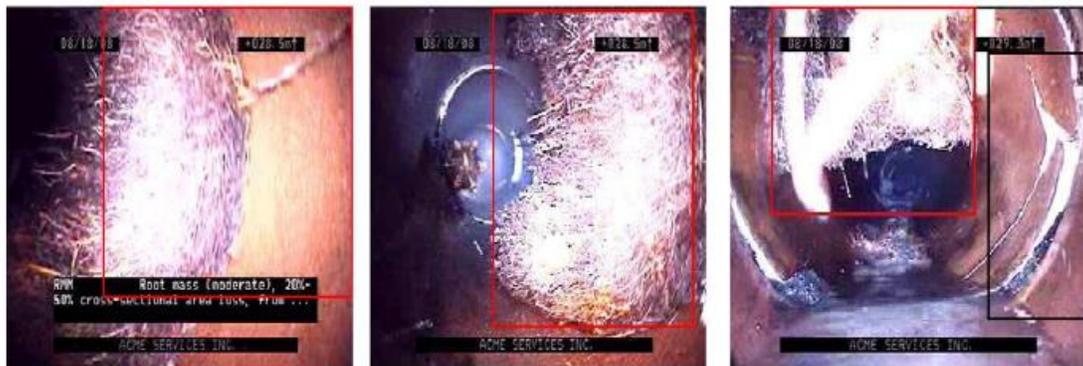


Ilustración 2. Fuente Halfawy R, et al., (2013)

SEDIMENTACIÓN:

Se presenta cuando partículas se asientan en el fondo de la tubería, generando depósitos de estos. Normalmente se presenta en tuberías largas y anchas, puede ocasionar pérdidas de capacidad.

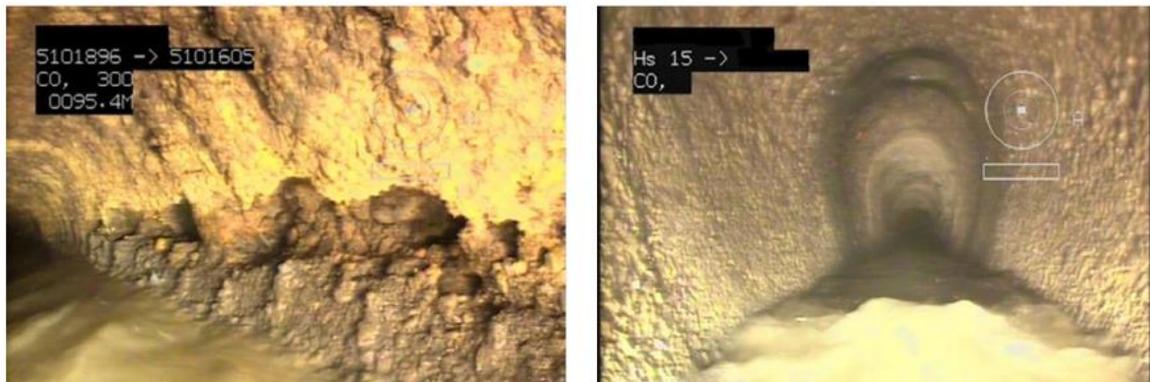


Ilustración 3. Fuente: Mashford (2011)

GRASA:

Es causada en establecimientos de comida, mas no en sectores domésticos, ocurre generalmente con lavadores de platos que trabajan a altas temperaturas que remueven la grasa, pero al ser arrojadas al sistema y enfriarse estas aguas abajo se solidifican, causando pérdidas de capacidad hidráulica.

INTRUSIÓN DE RAÍCES:

Los alcantarillados son susceptibles a la intrusión de raíces de árboles, que buscan condiciones húmedas. Las raíces en si son una molestia, causan que el flujo se retarde e inician futuros bloqueos con sólidos más grandes, además por las aberturas que generan para introducirse generan problemas de infiltración o ex-filtración.



Ilustración 4. Fuente: Ariamalar, Selvakumar (2012)

INTROMISIONES LATERALES:

Son comúnmente resultado de instalaciones o construcciones de pobre calidad, dicho problema reduce la sección transversal de la tubería, causando los mismos problemas antes mencionados en la intrusión de raíces (Butler, 2004).



Ilustración 5. Fuente: Ariamalar, Selvakumar (2012)

Como consecuencia de los problemas antes mencionados, la presencia de uno o la combinación de ellos puede desembocar en problemas graves como:

- Colapso
- Inundaciones de calles y propiedades (En especial es sistemas combinados)
- Incremento en la contaminación de los cursos de agua
- Altos niveles de infiltración

Los defectos antes mencionados, son considerados como síntomas para una inmediata rehabilitación o renovación, claro está además de fenómenos naturales extremos o cambios en el uso de suelo que generen sobrecarga en las tuberías. Por ello la importancia de la determinación del estado de las redes, para así lograr desarrollar un planeamiento de renovación optimizado, sin esperar grandes fallas que alertan dicha necesidad.

3. MÉTODOS PARA DETERMINAR EL ESTADO DE LAS REDES DE ALCANTARILLADO

TABLA 3a RESUMEN GENERAL

Métodos para Determinar el Estado	Tipo	Artículo	Autor	Descripción	Detalles
Inspecciones En Sitio	CCTV	Evaluation of State-of-the-Art Wastewater Collection Systems Condition Assessment Technologies	Ariamalar Selvakumar / ASCE	Aplicación de las tecnologías existentes para determinar el estado de las redes en la ciudad de Kansas, Missouri	Se compara el uso de : CCTV, Zoom Cámara, Electro-Scanning, Digital Scanning, Laser Scanning y Sonar Scanning
	Nuevas Tecnologías	Classification of defects with ensemble methods in the automated visual inspection of sewer pipes	Wei Wu, Zheng Liu	Uso de Tecnología SSET, la cual brinda mayor calidad de imagen y con ello abstraer mayor información	Trata acerca de una nueva manera de abstraer información valiosa(tipo de defecto), sin la subjetividad de CCTV. Convierte las imágenes a escala de grises
		Evaluation of ultrasonic inspection and imaging systems for concrete pipes	Shivprakash Iyer / The Pennsylvania State, University	Propone el desarrollo de una clasificación automatizada de tuberías de concreto a través de inspecciones ultrasónicas	Un generador produce un pulso que se transmite como ola acústica en el agua. Si encuentra una diferencia en la amplitud, la clasifica automáticamente, dependiendo del defecto.
Índices	Hidráulicos	Hydraulic Performance Index of a Sewer Network	Saad Bennis	Índice del desempeño hidráulico relacionado a la posibilidad de sobrecarga de la tubería	Con el índice se busca identificar zonas vulnerables que pueden requerir rehabilitación. Es capaz de identificar si la sobrecarga es a causa de la tubería seleccionada o causada aguas abajo
	Rendimiento	A Fuzzy Expert System for Prioritizing Rehabilitation of Sewer Networks	Saad Bennis, Wided Ben Tagherouit	Índice que toma en cuenta el desempeño hidráulico y estructural.	El índice estructural es calculado a través de un sistema difuso. El mismo que toma en consideración el estado interno de la tubería, condición alrededor y vulnerabilidad del sitio. Con lo que al final se desarrolla un índice global de desempeño para cada tubería
		Development of a Robust Wastewater Pipe Performance Index	T. Angkasuwansiri / Virginia Tech	Índice de desempeño global para el cual primero se encuentra un índice estructural y de funcionamiento.	Como dato de partida utiliza inspecciones de CCTV e información básica de las tuberías. Luego desarrolla un modelo difuso para encontrar los índices.
Análisis de Daños y Representaciones Georeferenciadas	Evaluación de Daños	Portland's Sewer Rehabilitation Program Development & Implementation	Joe Hoffman	Con inspecciones de CCTV se calcula un rating para las tuberías. Las mismas que posteriormente son ubicadas en GIS y a través de un proceso de decisión que incluye análisis de daños se determina que acción de rehabilitación se debe llevar a cabo	Las tuberías son separadas en tramos. Los mismos que son ubicados en GIS y de acuerdo a una evaluación (consecuencia de falla) se determina que tramos necesitan rehabilitación con mayor prioridad
	Enfoque Basado en Riesgo	A risk-based approach to sanitary sewer pipe asset management	Kelly Baah / Guelph Canada	Mediante una valoración del riesgo, priorizar futuras inspecciones, de manera que optimice los costos de un posible impacto negativo ya sea ambiental u otro	Mediante la probabilidad y consecuencia de falla se pretende realizar planes de priorización de inspecciones y de rehabilitación

Resumen de los métodos para la determinación de estado (Elaboración Propia).

TABLA 3b –RESUMEN GENERAL

Métodos para Determinar el Estado	Tipo	Artículo	Autor	Descripción	Detalles
Modelos Predictivos Para el Estado Futuro de Tuberías	Estadísticos con fundamentos de Markov	Probabilistic modeling of sewer deterioration using inspection data	J. Dirksen / Delf University, Holanda	A partir de inspecciones de CCTV se realizó un modelo de deterioro de tuberías, utilizando fundamentos de Markov	Puesta en marcha o validado en una ciudad Holandesa
		Estimating Transition Probabilities in Markov Chain-Based Deterioration Models for Management of Wastewater Systems	Hyeon-Shik Baik / San Diego, USA	Modelo "Probit": Desarrollado para estimar las probabilidades de transición de estado en una cadena de Markov, para un sistema de alcantarillado	El modelo fue aplicado y evaluado utilizando los datos de estado de las tuberías de la ciudad de San Diego. Dicho modelo únicamente es útil para predecir si la tubería se encuentra o no en un estado deficiente
		Wastewater pipes in Oslo: from condition monitoring to rehabilitation planning	R. M. Ugarelli / Oslo	Modelo de Deterioro estadístico, basado en cadenas de Markov	Para dicho modelo se desarrolló el programa GompitZ. El principal dato de entrada es el estado de las tuberías determinado a través de CCTV
	Árboles de Decisión	Decision Tree–Based Deterioration Model for Buried Wastewater Pipelines	Syadaruddin Syachrani / Kansas	A través de una serie de reglas de predicción, determina la edad REAL de la tubería	Con el denominado "Clustering" agrupa las tuberías, de acuerdo a sus atributos y características. Fue comparado con otros dos modelos para resaltar su desempeño.
		Tools for Planning Sanitary Sewer Condition Inspection	Richard Harvey / Universidad Guelph Canadá	Árboles de Decisión que mediante algoritmos aprenden de inspecciones de CCTV previas para poder predecir el estado de un grupo de tuberías	Pretende obtener una relación entre distintas características de una tubería (pendiente, diámetro) y su respectiva condición estructural o de funcionamiento. Para lograr planes prioritarios de inspección.
	Modelo de Supervivencia de Tuberías	A Survival Analysis Model for Sewer Pipe Structural Deterioration	Sophie Duchesne / Quebec, Canadá	Estudio que a través de agrupar las tuberías en "Conjuntos" determina el tiempo en el que una tubería permanece en cada estado de deterioro	Compara los resultados obtenidos, variando la cantidad de parámetros (detalle de la información) y con ello analiza los mejores resultados
	Regresiones	Infrastructure Condition Prediction Models for Sustainable Sewer Pipelines	Chughtai, Tarek Zayed / Canadá	Propuesta de una metodología para determinar el estado estructural y operacional de una red de alcantarillado	Se generan curvas de deterioro para representar una relación entre la calificación de condición y su edad. Pretende ayudar a determinar secciones críticas de la red.
Análisis en la Toma Directa de Decisiones	Análisis Proactivo	From sewer inspection programs to rehabilitation needs	Mehdi Ahmadi	Análisis de los distintos niveles que se pueden presentar en la toma de decisiones	Resalta la necesidad de llegar a un nivel de toma de decisiones "proactivo" donde exista una adecuada toma de datos para poder desarrollar modelos que permitan desarrollar planes a largo plazo de rehabilitación
	Situación de Emergencia	DEVELOPING A SUCCESSFUL WASTEWATER COLLECTION SYSTEM REHABILITATION PROGRAM IN CORPUS CHRISTI, TEXAS	Temple T. Williamson / ASCE 2014	Descripción del manejo que adopto la ciudad para la rápida movilización de recursos y personal para el mantenimiento y rehabilitación de su red de alcantarillado	Mediante el denominado: Entrega Indefinida / Cantidad Indefinida le permitió a la ciudad contar con una empresa constructora bajo contrato de un año para rehabilitar de manera emergente porciones del sistema en mal estado
	Influencia de Decisiones Políticas	Decision-making for sewer asset management: Theory and practice	Wouter van Riel / Delft 2015	El enfoque principal del estudio es como las herramientas de predicción (modelos) son puestas en práctica en la realidad para la toma de decisiones al momento de determinar si un tramo de tubería necesita renovación o rehabilitación	Análisis de 11 ciudades Holandesas y como estas determinaron sus proyectos de rehabilitación o renovación de su red. En gran parte a decisiones políticas
Inteligencia Artificial	Support Vector Machines	Prediction of Sewer Condition Grade Using Support Vector Machines	John Mashford / ASCE	Aplicación de Vectores de Soporte de Decisión para estimar el estado de una tubería de alcantarillado	Establecer una relación entre la condición de la tubería (estado) con sus atributos o características.
	Redes Neuronales	Evaluation of artificial intelligence tool performance and uncertainty for predicting sewer structural condition	Vitor Sousa / Universidad de Lisboa 2014	Uso de redes neuronales para un municipio de la ciudad de Lisboa con el fin de determinar su estado estructural	El principal objetivo es determinar las redes que necesitan inmediata intervención. Compara los resultados corriendo otros dos modelos, uno de Regresiones y otro de Vectores de decisión
		NEURO-FUZZY APPROACHES FOR SANITARY SEWER PIPELINE CONDITION ASSESSMENT	Myung Jin Chae / Purdue University 2001	Uno de los primeros papers que propone el uso de redes neuronales	Utilizada principalmente para la interpretación de inspecciones mediante SSET (sewer scanner)

Resumen de los métodos para la determinación de estado (Elaboración Propia).

3.1 Inspecciones en Sitio (Estado Actual)

3.1.1 Inspecciones CCTV y tecnologías similares

Inspecciones de alcantarillados con CCTV (Circuito Cerrado de Televisión) son las más comunes encontradas en la literatura y a pesar de estar vigente desde los años 60, siguen siendo las de mayor uso, han ido evolucionando con aparatos cada vez más pequeños y con costos muy competitivos. La recolección de datos por este método seguida de un análisis de la información para lograr determinar el estado actual estructural, calidad del agua y estado hidráulico de una tubería es un componente vital para determinar el estado de una red de alcantarillado.

Dentro de las distintas tecnologías utilizadas en la actualidad un estudio realizado por Ariamalar, Selvakumar (2013) detalla la experiencia de la ciudad de Kansas, Estados Unidos, al utilizar 5 distintos tipos de tecnologías para inspección de alcantarillados y comparar sus resultados, los cuales se detallan a continuación:

CCTV

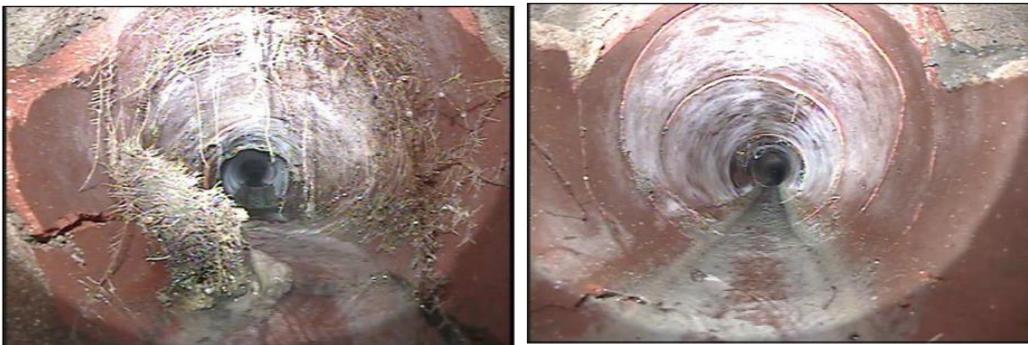
Este tipo de inspecciones fueron introducidas en los años 1960s para la inspección de sistemas de alcantarillados. Los videos obtenidos proveen de una representación visual de la condición interior de la tubería por encima del nivel del agua, al que se encuentre al momento de la inspección. Generalmente es utilizada para localizar defectos específicos como: deficiencias estructurales, necesidad de mantenimiento, defectos de instalación o construcción, intrusión de raíces, bloqueos entre otras. Ya que la cámara debe recorrer el interior de la tubería esta necesita un lavado previo que le permita movilidad (Ariamalar, Selvakumar, 2013).

ZOOM CAMARA:

A diferencia de CCTV, este tipo de cámara permanece fija en una base, generalmente ubicada en el pozo y realiza un zoom dentro de la tubería hasta 30 metros para no viajar dentro de ella y tener imágenes más estables y de mejor resolución. Las ventajas que presenta son que no necesita limpieza previa de la tubería y su operación es más simple y rápida ya que no debe atravesar toda la sección de tubería. En cuanto a desventajas no puede identificar el estado de la tubería por debajo del nivel del agua y su gran limitante es la distancia hasta que logra captar imágenes, ya que en tramos largos (mayores a 30 metros) tanto por luz como capacidad del aparato no logrará captar imágenes.



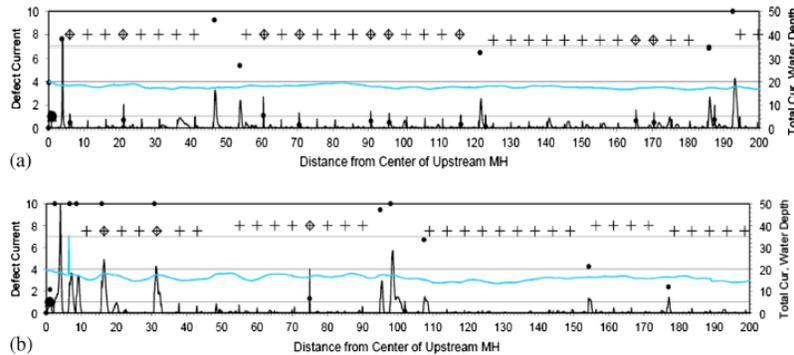
Fotografía 1. Zoom Cámara. Fuente: Ariamalar, Selvakumar (2012).



Fotografías 2 y 3. Resultados de inspecciones con Zoom Cámara. Fuente: Ariamalar, Selvakumar (2012).

ELECTRO-SCANNING:

Esta inspección se lleva a cabo aplicando un voltaje eléctrico entre un electrodo en la tubería, llamada sonda y un electrodo en la superficie, que normalmente es una estaca de metal presionada contra la parte inferior de la tubería. Dada la alta resistencia eléctrica de la pared de la tubería que no permite que la corriente eléctrica escape entre los dos electrodos al menos que haya un defecto en la tubería como una grieta, junta defectuosa o conexión mal realiza. Los resultados por este medio son típicamente graficados para mostrar los elevados niveles o picos que ocurren en la corriente eléctrica cuando se presentan defectos en la tubería (Ver Figura 3.1-1).



Note: Spiked in current (anomalies) indicate potential for leakage. Crosses indicate joint locations, and diamonds indicate joints with leakage potential. Anomalies not associated with a joint indicate other defect types.

Figura 3.1-1. Resultados de Electro-Scanning. Fuente: Ariamalar, Selvakumar (2012).

SCANNING DIGITAL

Similar a CCTV, las cámaras digitales son transportadas a través del alcantarillado utilizando rastreadores autopropulsados o plataformas flotantes. Este tipo de tecnología cuenta dos cámaras de alta definición con lentes de gran ángulo en el frente y en su parte trasera, que le permite grabar video e imágenes estables. Además cuenta con luces LED en los costados para facilitar la toma de imágenes, como se aprecia en la Fotografía 4.



Fotografía 4. Scanning Digital. Fuente: Ariamalar, Selvakumar (2012).

SCANNER LASER:

Generalmente utilizada en conjunto con inspecciones de CCTV para proveer información adicional de la condición de la tubería. Específicamente esta tecnología provee información de la geometría de las paredes de la tubería y puede ser usada para evaluar deflexiones, agujeros y otro tipo de defectos. Como parte de los resultados genera una imagen bi-dimensional del contorno interior de

la tubería, esta imagen luego es comparada con una figura referencial idéntica de la tubería para identificar defectos (deflexiones) y necesidades de mantenimiento.



Fotografía 5. Scanner Laser Fuente: Ariamalar, Selvakumar (2012).

SCANNER SONAR:

A diferencia de otras tecnologías esta logra inspeccionar la superficie de la tubería por debajo del nivel de agua y estimar la acumulación de sedimento y escombros. Esta inspección se logra pasando una unidad de sonar a través de la tubería. Dependiendo de las dimensiones de la tubería y condiciones del flujo la cabeza del sonar es colocada en una balsa u otro medio de transporte. Conforme avanza el sonar en la tubería éste emite una onda de sonido de alta frecuencia, la misma que es reflejada por las paredes de la tubería así como de la acumulación de sedimentos y recibida nuevamente por el sonar. La señal reflejada al sonar varía según el material, lo que permite identificar distintos tipos defectos como también cuantificar los sedimentos depositados.



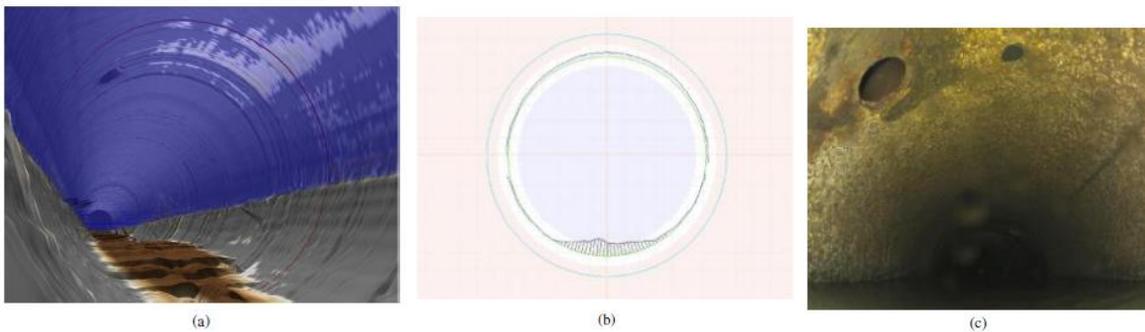
Fotografía 6. Sonar. Fuente: Ariamalar, Selvakumar (2012).

Posteriormente en el estudio se realiza una prueba de campo en la ciudad de Kansas, Estados Unidos para evaluar el desempeño de cada una de las tecnologías antes mencionada, cuyos resultados se observan en la Tabla 3.1-1.

Tabla 3.1-1. Evaluación de las inspecciones Fuente: Ariamalar, Selvakumar (2012).

Contributing factor	CCTV	Zoom camera	Electro-scanning	Multi-sensor (laser, sonar and digital scanning)
Training requirements	Medium	Medium	Low	Medium
National certification	PACP	PACP	None required	PACP for digital scanning
Equipment operation	Low	Low	Medium	Medium
Pipe preparation	Cleaning may be required	None required	None required	None required
Data analysis	Low to medium	Low to medium	Low	High
Overall complexity rating	Low to medium	Low to medium	Low to medium	Medium to high

De los resultados obtenidos, los autores destacan la facilidad de operación y análisis de datos de tecnologías de cámara de vídeo, tanto CCTV como Zoom Cámara. Tecnologías de láser y escáner detectan un mayor número defectos en especial en cuanto a problemas de filtraciones, fugas y juntas defectuosas, sin embargo no detecta otro tipo de defectos como bloqueos que se aprecian claramente con CCTV. Ante lo mencionado en el estudio se adapta un sensor múltiple formado con tecnología láser, sonar y scanning digital. Con la cual se obtuvo la mejor descripción y número de defectos, como se aprecia en la Fotografía 7. Pero lamentablemente los costos, operación y análisis de datos la vuelven poco competitiva comparada a las otras tecnologías. Pero se la podría recomendar para casos puntuales en que cierta sección de tubería requiera un grado de inspección avanzado puesto que es indispensable para el funcionamiento de toda la red.



Fotografía 7. Inspección con Sensor Múltiple Fuente: Ariamalar, Selvakumar (2012).

3.1.2 Nuevas Tecnologías

3.1.2.1 Clasificación de defectos con tecnología automatizada

La clasificación de defectos en inspecciones de sistemas de alcantarillados es de vital importancia para el mantenimiento del mismo, usualmente un operador es el que identifica dichos defectos a través de las imágenes proporcionadas. Sin embargo la subjetividad e incertidumbre están presentes ya que dependiendo del operario el tipo de defecto encontrado y su severidad pueden

cambiar drásticamente. Ante este desafío Wei Wu (2013) propone una clasificación de defectos automatizada; para ello el autor propone una extracción de información a través de las imágenes de la inspección, transformando dichas imágenes a una escala de grises y luego a través de unos filtros generar un vector con características estadísticas. Posteriormente un conjunto de clasificadores tomarán este vector para determinar el tipo de defecto, terminando así con la subjetividad (Wu, 2013).

En la Figura 3.1-2 se puede observar el proceso a escala de grises que sufre la imagen proporcionada en la inspección.

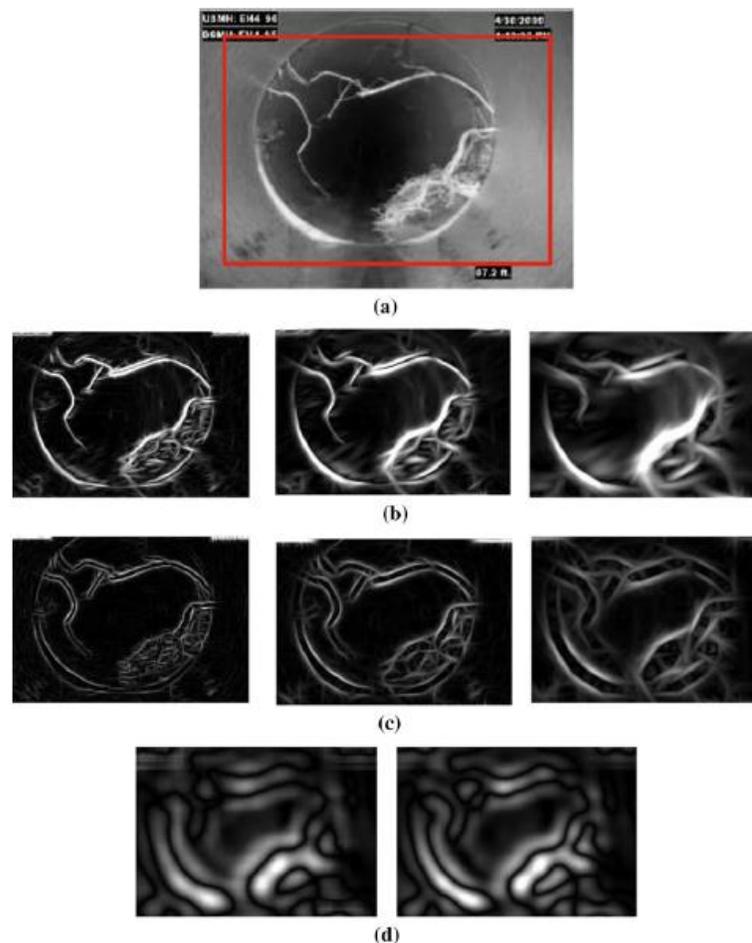


Figura 3.1-2. Proceso de transformación de la imagen de inspección. Fuente: Wu (2013).

3.1.2.2 Inspección Ultrasónica

Este tipo de inspección continúa en pruebas de laboratorio pero de desarrollarse por completo posee un gran potencial para identificar defectos difíciles de percibir con otras tecnologías.

El ensayo realizado en laboratorio por Iyer (2012) consistió en sumergir una placa de hormigón de las mismas características de una tubería de concreto y a través de un acoplador (material que sirve como medio de transporte de la onda) que en este caso es agua, un transmisor emite una onda ultrasónica (onda sonora que vibra con una frecuencia superior a la más alta frecuencia audible por el oído humano) que se transmite por todo el cuerpo de la placa de hormigón y vuelve nuevamente al transmisor. Durante este viaje de ida y vuelta la onda (o señal) experimenta distintas resistencias dependiendo de las características de la placa que pueden ser representadas y caracterizadas dependiendo del tipo de defecto que se presente en el objeto de análisis.

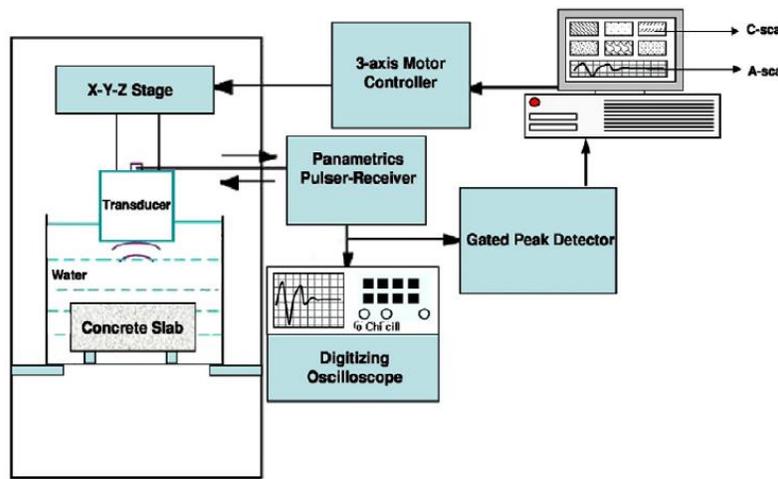


Figura 3.1-3. Esquema del ensayo de laboratorio. Fuente: Iyer (2012).

En la Figura 3.1-3 se puede observar el esquema utilizado en laboratorio y además que la representación de las ondas se denominan “A-B-C Scan”. Estas representaciones muestran la variación de amplitud de la señal ultrasónica conforme atraviesa la placa de hormigón del experimento. Se ensayaron placas con fallas como fracturas, orificios entre otras para caracterizar el cambio en la señal y detectar automáticamente el tipo de daño que se presenta, evitando así cualquier tipo de subjetividad. Las variaciones de amplitud en una placa ensayada con una falla de agujero pueden apreciarse en la Figura 3.1-4.

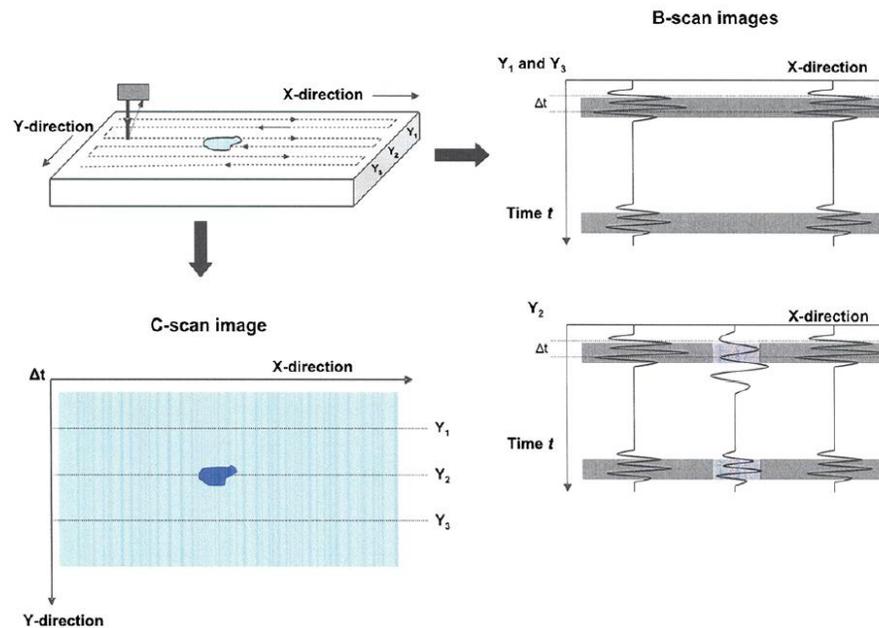


Figura 3.1-4. Representaciones del cambio de amplitud en una placa con orificio. Fuente: Iyer (2012).

3.2 Índices

3.2.1 Índice Hidráulico

Un índice hidráulico consiste en una metodología distinta para el diagnóstico de secciones de una red de alcantarillado que puedan requerir rehabilitación. Dicho concepto fue establecido por Bennis (2003) el cual realizó una investigación exhaustiva donde relaciona este mencionado índice con la predicción de sobrecargas en las tuberías y sus efectos aguas arriba de la red. Con el mencionado índice es posible distinguir el desempeño de cada sección analizada y con ello la responsabilidad de cada una en un posible evento de una sobrecarga. Una vez con el índice plenamente identificado la empresa a cargo del servicio puede visualizar las vulnerabilidades de cada sitio y considerar el efecto de una posible sobrecarga que causaría en el sitio. Con ello se estará en condición de planear rehabilitaciones y priorizar inspecciones.

METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL ÍNDICE

Puesto que el índice desarrollado por Bennis está directamente relacionado con sobrecarga, cabe recordar que el fenómeno de sobrecarga ocurre cuando el flujo dentro de la tubería cambia de flujo abierto (condición deseada en alcantarillados) a flujo presurizado que usualmente ocurre cuando la capacidad de la tubería ha sido sobrepasada, dicha capacidad puede verse sobrepasada por una o más de las siguientes causas:

- El diámetro de la tubería es insuficiente para drenar la tasa de escorrentía

- b) Disminución en la pendiente o incremento en la rugosidad en la dirección del flujo
- c) Presencia de obstáculos causando pérdidas menores (sedimentos u objetos dentro de la red)

Ahora para lograr establecer un índice directamente relacionado con el fenómeno previamente descrito es necesario utilizar el siguiente criterio y evaluarlo:

- ❖ Capacidad hidráulica de la sección
- ❖ Frecuencia y duración de la descarga
- ❖ Volumen del desbordamiento
- ❖ Duración de la inundación
- ❖ Área afectada por la inundación
- ❖ Costo del daño causado en área pública o privada

Para evaluar los criterios mencionados Bennis propone utilizar la herramienta SWMM; dicho modelo es capaz de reproducir las condiciones del sistema existente bajo los criterios antes señalados. Con ello para el desarrollo del índice este toman los datos de salida obtenidos de SWMM para calcular el índice de desempeño hidráulico para cada sección de tubería.

Para dicho cálculo Bennis toma como referencia una sección típica de tubería entre dos pozos de inspección, definiendo todos sus niveles y distancias como se observa en la Figura 3.2-1.

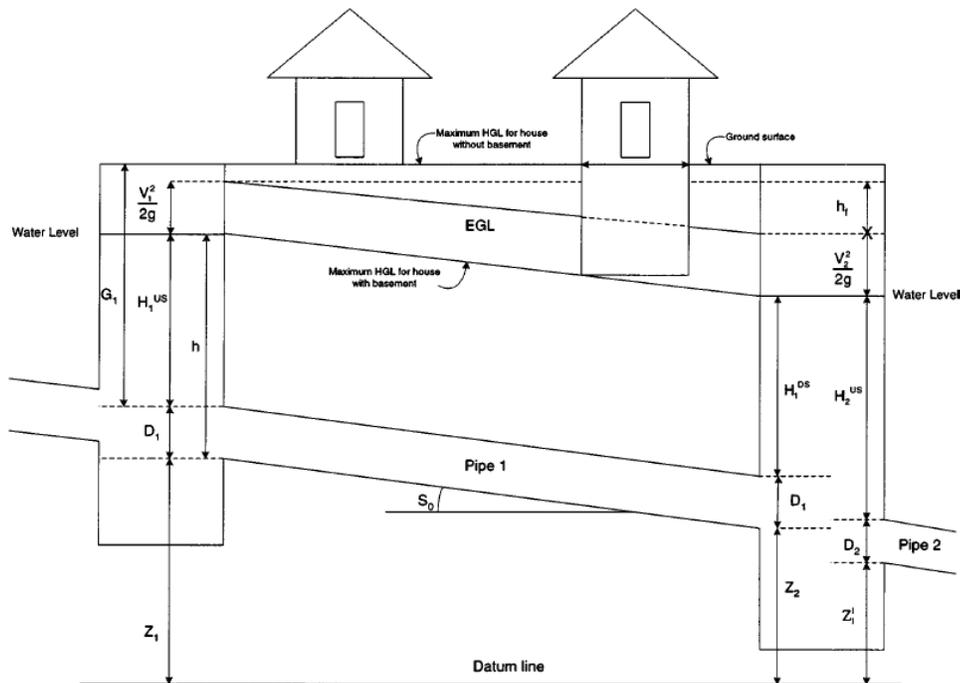


Figura 3.2-1. Esquema de una sección de tubería (Fuente: Bennis, 2003).

Es claro en el esquema que una falla hidráulica en una tubería i está directamente relacionada con la altura máxima de sobrecarga H_i^{US} . Cuando $H_i^{US} = 0$, existe una condición deseada de flujo a canal abierto. Por el contrario si la altura de sobrecarga llega a la superficie del suelo o nivel de sótano, la inundación comienza. Entre estas dos condiciones extremas, una notación es necesaria para expresar el grado directo de sobrecarga de la tubería, que es el índice propuesto por Bennis, resumido en la siguiente relación:

$$N_i = 100\% \times \frac{H_i^{US}}{G_i}$$

(Fuente: Bennis, 2003)

dónde:

H_i^{US} = La máxima altura de sobrecarga en el pozo situado inmediatamente aguas arriba de la tubería i

G_i = Profundidad a la cual la tubería ha sido enterrada medida desde la superficie del suelo hasta la corona de la tubería i aguas arriba

N_i = Índice (rating, evaluación) expresado como un porcentaje de la profundidad enterrada, varía de 0% a 100%.

Si bien la ecuación anterior es la idea principal del índice, este también puede incluir otras consideraciones y con ello modificar ligeramente la ecuación dependiendo de la red que se este analizando. Una de estas consideraciones es que para ciertos diseños la línea de gradiente hidráulico puede ser requerida por debajo de la superficie del suelo, con lo que el índice cambiaría, según la ecuación: (Bennis,2003)

$$N_i = N_{\min} + (N_{\max} - N_{\min}) \frac{H_i^{US}}{G_i} \quad (\text{Fuente: Bennis, 2003})$$

Otra de las consideraciones adoptadas por Bennis es cuando la capacidad de la tubería es excedida, los primeros niveles de sobrecarga no tienen el mismo riesgo y consecuencias como los niveles justo antes de la inundación, con lo que nuevamente se modifica al índice para expresar dicho fenómeno:

$$N_i = N_{\min} + (N_{\max} - N_{\min}) \left[1 - \left(1 - \frac{H_i^{US}}{G_i} \right)^n \right] \quad (\text{Fuente: Bennis, 2003})$$

En esta nueva ecuación el término nuevo introducido " n " permite asignar una importancia estratégica a la sección analizada dependiendo de la vulnerabilidad del sitio. Por ejemplo si se está analizando una zona densamente poblada o un sector comercial y ningún nivel de sobrecarga es permitido el valor n puede ser asignado un valor de 2 o 3 según criterio del usuario para incrementar la penalidad de sobrecarga.

CONSIDERACIÓN DE LOS EFECTOS AGUAS ABAJO

Una vez definido el índice de desempeño hidráulico con las ecuaciones previamente descritas, se analiza los efectos de una tubería sub-dimensionada en un fenómeno de sobrecarga en las diferentes secciones de la red.

En un sistema de alcantarillado, la sobrecarga de una sola sección de tubería es suficiente para subir la línea de gradiente hidráulico por encima de la corona de la tubería en un buen número de tuberías aguas arriba. El sobre flujo en una tubería causado por represamiento originado aguas abajo puede engañar las insuficiencias hidráulicas propias de la tubería en mención.

Por ello la importancia de identificar las verdaderas tuberías causantes de la sobrecarga, para lograr esto Bennis parte de la ecuación de Bernoulli, escrita de la forma Mironer (1979):

$$Z_1^{US} + D_1 + H_1^{US} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_1^{DS} + D_1 + H_1^{DS} + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{1}{g} \int_{US}^{DS} \frac{\partial V}{\partial t} dl + h_f + \sum h_s$$

(Fuente: Bennis, 2003)

Y dadas las condiciones del flujo en cuanto a aceleración, Bennis modifica la ecuación anterior de la siguiente manera:

$$N_1^1 = N_{\min} + (N_{\max} - N_{\min}) \frac{(H_1^{US} - H_1^{DS})}{G_1}$$

(Fuente: Bennis, 2003)

El primer término al lado derecho de la ecuación expresa el efecto de una sobrecarga aguas abajo en la tubería 1. El segundo término, expresa la sobrecarga neta que la tubería 1 causa en ella mismo. La sobrecarga en el pozo aguas abajo debe ser considerada también, con lo que finalmente el índice es calculado con la ecuación a continuación:

$$N_1^2 = (N_{\max} - N_{\min}) \left(\frac{H_1^{DS} - H_2^{DS}}{G_1} \right)$$

(Fuente: Bennis, 2003)

donde:

N_2^1 = La contribución de la tubería 2 para la sobrecarga en la tubería 1 (la tubería 2 se la considera como aguas abajo)

H_1^{DS} = Efecto de la sobrecarga aguas abajo en la tubería 1

H_2^{DS} = Altura de la sobrecarga aguas abajo, de la tubería 2

Aplicando esta metodología en un sector determinado de la red, procediendo de aguas abajo hacia aguas arriba, es posible separar los efectos de represamiento que cada tubería genera para sí misma de los efectos causados en el resto de tuberías localizadas aguas arriba de ella en el mismo sector.

IMPLEMENTACIÓN DEL ÍNDICE

La metodología propuesta fue aplicada en la ciudad de Laval, Canadá en una pequeña cuenca; la tormenta simulada fue de tres horas de duración tipo Chicago, con un período de retorno de 5 años. La cuenca seleccionada es mostrada en la Figura 3.2-2, y sus valores en la Tabla 3.2-2, la misma que incluye diámetros, pendientes, elevaciones y longitudes.

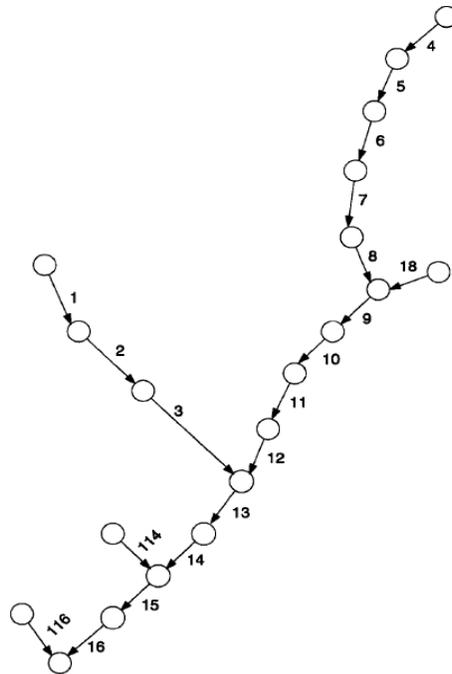


Figura 3.2-2. Cuenca seleccionada, Laval Canadá (Fuente: Bennis, 2003).

Tabla 3.2-2. Información hidráulica de la cuenca seleccionada (Fuente: Bennis, 2003)

Conduit number	Length (m)	Invert elevation (m)	Slope (%)	Design values of diameter	Undersized values
04	50	25.9	7.06	0.305	0.305
05	69	22.3	5.2	0.305	0.305
06	30	18.7	2.78	0.460	0.460
07	35	17.9	0.17	0.915	0.915
08	33	17.8	0.18	0.915	0.915
09	60	17.8	0.25	1.065	1.065
10	30	17.7	0.09	1.065	1.065
11	30	17.5	1.10	1.065	1.065
12	38	17.2	0.47	1.065	1.065
13	46	17.0	0.55	1.065	0.610 ^a
14	49	16.8	0.18	1.370	0.610 ^a
15	30	16.7	2.10	1.370	0.610 ^a
16	30	16.1	0.10	1.525	0.610 ^a

^aReduced diameter.

Con la información detallada de la Figura 3.2-2 y Tabla 3.2-2, se procede a correr el modelo de escorrentía del programa SWMM, el mismo que permitirá obtener variaciones en el flujo, nivel, velocidad en las tuberías y en los distintos pozos. Cabe resaltar que para resaltar los efectos de la sobrecarga, Bennis decide reducir el diámetro de las 4 últimas tuberías del circuito principal de la cuenca, como se puede apreciar en la Tabla 3.2-2.

Con la información que arroja el modelo SWMM es posible calcular los índices para cada sección, mostrados en la Tabla 3.2-3. Los números que aparecen en la tabla corresponden al índice de sobrecarga expresado en porcentaje, que se encuentran en la intersección de la línea *i* con la columna *j*; en otras palabras la sobrecarga de la tubería *j* causada por la tubería *i*. Con ello si se analiza la primera línea, esta indica que la tubería 16, la más lejana aguas abajo, crea por sí misma una sobrecarga interna del 33% de su profundidad enterrada, la cual se esparce aguas arriba desde la tubería 15 hasta la 5.

Por otro lado los ceros que aparecen a partir de la tubería 12 (últimas 9 líneas) indican que sus diámetros son hidráulicamente suficientes para no generar una sobrecarga por sí mismos. Ahora analizando las tuberías que se les redujo su diámetro (16,15,14,13) causan sobrecargas sobre ellas mismo de 33, 12, 43 y 29% respectivamente.

La última línea de la Tabla 3.2-3 corresponde al total de la sobrecarga que sufre cada tubería a pesar que esta no haya sido la causante. Es interesante observar los resultados de las tuberías 10, 11 y 12, que tienen un índice total de sobrecarga del 100% a pesar que estas no son responsables, se debe por efecto de las tuberías aguas abajo. Finalmente la última columna expresa la contribución total

de cada tubería a la sobrecarga de todo el ramal analizado, donde la tubería 14 es la mayor responsable con el 34%.

Tabla 3.2-3. Resultados cálculo de índices (Fuente: Bennis, 2003).

Pipe	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	Surcharge on branch
16	33	20	28	23	23	23	23	11	19	19	20	4	0	27
15	0	12	16	13	13	13	13	7	11	12	12	2	0	15
14	0	0	43	35	35	35	35	17	30	30	31	6	0	34
13	0	0	0	29	29	29	29	14	24	25	25	5	0	24
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total ^a	33	32	87	100	100	100	100	49	84	86	88	17	0	100%

Note: Pipes 16, 15, 14, and 13 are undersized.

^aSurcharge in each pipe.

Este análisis además permite explorar distintos escenarios, ya que dada una emergencia la empresa encargada del servicio deberá decidir que sección rehabilitar primero y para ello se puede explorar un escenario en el que solo se rehabilite una sección, cuanto se alivia el sistema y con ello la sección prioritaria por reparar. Este escenario se puede observar en la Tabla 3.2-4, donde se incrementa el diámetro de la tubería 16 para que no se genere sobrecarga y con ello visualizar el alivio que experimenta todo el ramal.

Tabla 3.2-4. Resultados con aumento de diámetro de la tubería 16 (Fuente: Bennis, 2003).

Pipe	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	Surcharge on branch
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	12	16	13	13	13	13	7	12	12	12	3	0	15
14	0	0	44	35	35	35	35	17	30	30	31	7	0	34
13	0	0	0	29	29	29	29	14	24	25	25	5	0	24
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total ^a	0	12	60	77	77	77	77	38	66	67	68	15	0	73%

Note: Pipes 15, 14, and 13 are undersized.

^aSurcharge in each pipe.

La Tabla 3.2-4 indica que dicho aumento generó un alivio de la sobrecarga del 27%, correspondiente al mismo valor de la última columna de la Tabla 3.2-3. Esto quiere decir, visto de otra manera que

los porcentajes de la última columna de la Tabla 3.2-3 indican el alivio que experimentaría el sistema si se rehabilita dicha sección, término de gran utilidad para decidir que sección priorizar para rehabilitar. Además de presentarse un caso que el índice indique que ese tramo no experimenta sobrecarga ni por sí mismo ni por efectos aguas abajo, pero a pesar se reportan problemas, querrá decir que la sección muestra otro inconveniente como obstrucción, rotura, etc. y necesita una inspección de campo (CCTV) para identificar su condición.

3.2.2. Índices Rendimiento

3.2.2.1 Índice con Modelos Difuso

Para lograr determinar el desempeño de una tubería es necesario conocer su estado físico y estructural; para ello los autores Bennis y Tagherouit proponen en su estudio complementar el trabajo previamente realizado por Bennis (2003) y desarrollar una metodología sistemática para la determinación del estado de una red considerando tanto el desempeño hidráulico como estructural.

La metodología propuesta consiste en desarrollar un esquema de clasificación prioritario para la rehabilitación de alcantarillados. Un sistema difuso fue empleado para este fin, el cual toma como datos de entrada tanto la valoración hidráulica como estructural. El sistema difuso en mención se divide en dos partes, la primera el *Sistema Difuso Estructural (FES)* el cual calcula un índice desempeño global *Estructural*, utilizando información de su condición interna, condición de su alrededor y vulnerabilidad del sitio (SV). La segunda parte en un *Sistema Difuso Hidráulico (FHS)* que utiliza el índice de desempeño hidráulico (Descrito por Bennis en el anterior estudio) y vulnerabilidad del sitio (SV) para calcular un índice de Desempeño Global Hidráulico. Para finalmente un Sistema Global Difuso utilice todos estos parámetros para calcular un Índice Global de Desempeño para cada tubería.

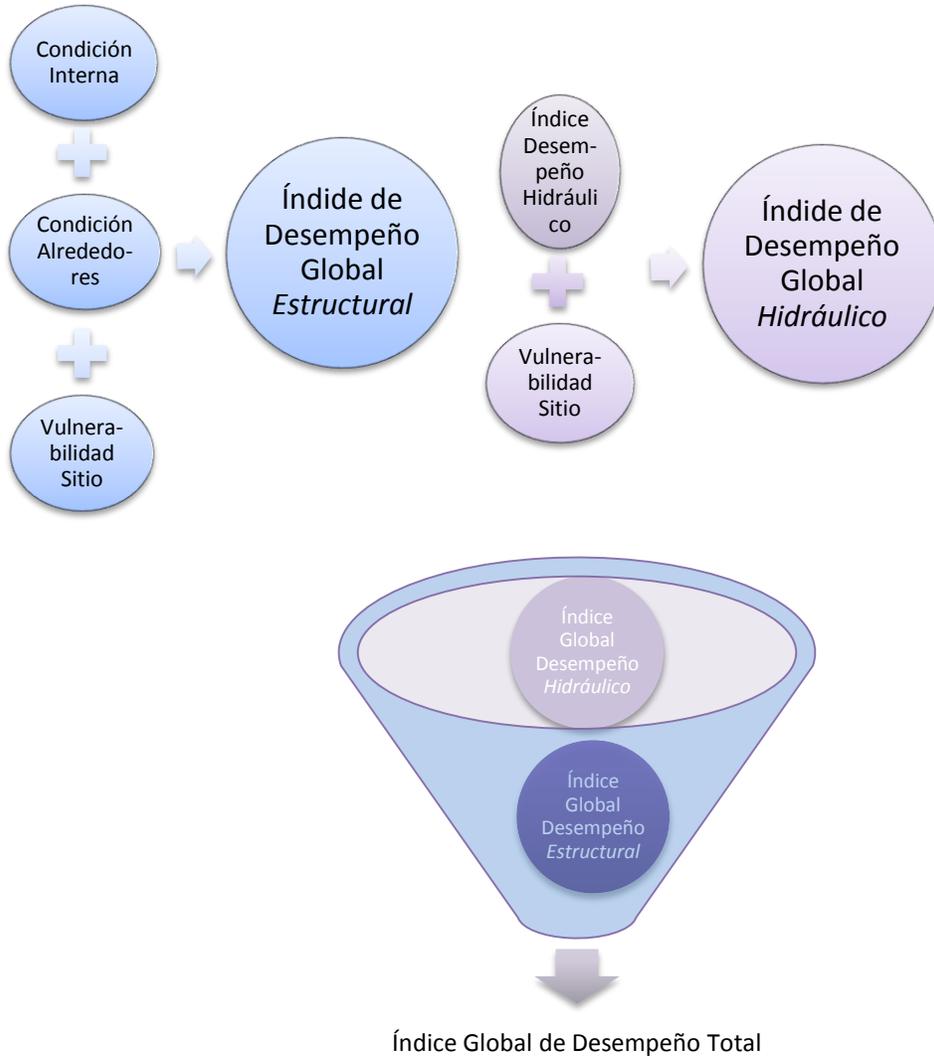


Figura 3.2-3. (a) Estructural. (b) Hidráulico. (c) Total (Adaptación de Bennis, Tagherouit, 2011).

DESEMPEÑO HIDRÁULICO

Para el cálculo de este índice, se utiliza el mismo criterio expuesto por Bennis en el 2002, el cual es denominado índice de desempeño hidráulico o HPI por sus siglas en inglés.

$$HPI_i = 100\% \times \frac{H_i^{US}}{G_i}$$

(Fuente: Bennis, Tagherouit, 2011)

Y además para complementar, nuevamente se utiliza el criterio de Bennis, para el efecto de sobrecarga en una tubería “i” originado aguas abajo, al cual lo denominan el índice del impacto de desempeño hidráulico (HPII).

$$HPII_i = 100\% \frac{H_i^{DS}}{G_i} \quad (\text{Fuente: Bennis, Tagherouit, 2011})$$

EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN INTERNA (IC)

Este tipo de evaluación permite clasificar una sección de tubería tomando en cuenta aparentes defectos que puede presentar el tramo en estudio. Esta evaluación se logra gracias a inspecciones de CCTV y bajo la normativa canadiense se le asigna una calificación; cabe resaltar que para uso del modelo difuso fue necesario transformar la calificación canadiense a una propia dada por los autores en la Tabla 3.2-5.

Tabla 3.2-5. Condición Interna (IC) (Fuente: Bennis, Tagherouit, 2011).

<i>IC</i>	<i>Description</i>	<i>Numerical scale</i>
Grade 5	Collapse; or Deformation >10% with other serious defects (open joints, cracks...)	[95, 100]
Grade 4	Deformation 5–10% and cracks or serious degradation of the pipe	[60, 95]
Grade 3	Deformation 0–5%, cracks and many defects or minor degradation of the pipe	[30, 60]
Grade 2	Circular cracks; or minor joint defects	[5, 30]
Grade 1	No structural defects	[0, 5]

EVALUACION CONDICIÓN ALREDEDORES

Esta evaluación se la realiza ya que su entorno puede incrementar su tasa de deterioro, u ocasionar un impacto negativo en el ambiente alrededor. Al igual que la condición interna, está clasificada en 5 niveles.

EVALUACIÓN VULNERABILIDAD DEL SITIO

Dependiendo de las condiciones de la localización del tramo de tubería y factores del alrededor, esta puede ser clasificada en vulnerabilidad: baja, moderada y alta. Esta ya que si cierto tramo se encuentra sirviendo a un hospital tiene un mayor impacto a una falla localizada al inicio de la red.

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

El modelo fue implementado para una pequeña cuenca de la ciudad de Laval, Canadá, la misma que facilitó las inspecciones realizadas a dicho sector vía CCTV.

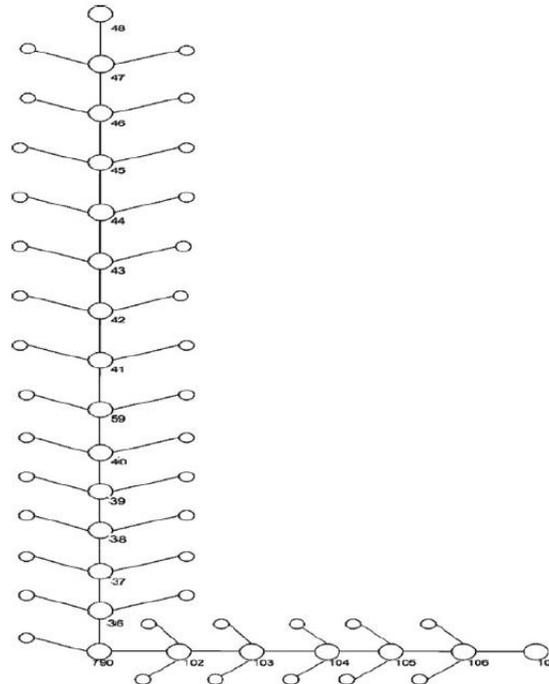


Figura 3.2.-4. Cuenca analizada en Laval (Fuente: Bennis, Tagherouit, 2011).

Con dicha información recopilada se procede al cálculo de índices y clasificación de las tuberías para correr el sistema difuso y con ello obtener la clasificación prioritaria para rehabilitación. El esquema del sistema difuso se puede apreciar en la Figura 3.2-3, mientras que los resultados del modelo difuso en la Tabla 3.2-6.

Tabla 3.2-6. Resultados del modelo difuso (Fuente: Bennis, Tagherouit, 2011).
Fuzzy hydraulic, structural, and global system results

<i>Pipes</i>	<i>HPI</i>	<i>HPII</i>	<i>SV</i>	<i>FHI</i>	<i>IC</i>	<i>SC</i>	<i>FSI</i>	<i>GPI</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

De los resultados obtenidos se puede observar que estos son ordenados según su índice global de desempeño (GPI), donde un valor alto de este indica su prioridad para ser rehabilitado y por ello se encuentra al tope de la tabla, como es el caso de la tubería 48. Es claro que índice de sobrecarga (HPI) es el parámetro que más influye para el índice global hidráulico (FHI), por ello la tubería 106 con un HPI de 59% tuvo una calificación global hidráulica (FHI) de 85% lo que al final influye significativamente para obtener un índice global alto (GPI=87) y estar ubicada segunda en la lista.

Mientras que el desempeño estructural, la condición interna (IC) es el parámetro que mayor influye en este índice como lo demuestran las tuberías 103 y 36 donde su evaluación interna fue del 0% (buena) y con ello su índice global estructural fue de 6% para ambas.

Cabe resaltar que los factores de Vulnerabilidad del Sitio (SV) y Condición de los Alrededores (SC) se hacen evidentes cuando la tubería se encuentra relativamente deteriorada, valores altos de SV y SC incremental significativamente el índice global de desempeño (GPI) como lo demuestran las tuberías 790 y 43.

Finalmente los autores resaltan el valor del estudio para priorizar rehabilitaciones, además mencionan que dicha información puede ser agregada a un programa GIS para visualizar las zonas conflictivas de la ciudad y poder planear un calendario de rehabilitación.

3.2.2.2 Índice Desempeño Robusto

Este es un índice de desempeño propuesto por Angkasuwansiri (2014), similar al analizado anteriormente, puesto que también utiliza un sistema difuso. Los parámetros para el presente modelo fueron agrupados según las características de la tubería y su condición estructural. El modelo es utilizado para evaluar cada parámetro y combinarlos a través de un sistema difuso que refleje la importancia relativa de los distintos factores. El modelo evalúa el desempeño de una tubería de alcantarillado en 8 módulos:

- Carga
- Corrosión Externa
- Corrosión Interna
- Desgaste de la Superficie
- Bloqueo
- Infiltración
- Penetración de Raíces
- Capacidad

Cada parámetro es evaluado en una escala de 0 a 5, donde 0 es un estado óptimo y 5 un estado cercano al colapso, en la Figura 3.2-5 se puede observar como a través de los 8 módulos y los dos índices (Estructural y Funcional) se determina un Índice de desempeño global.

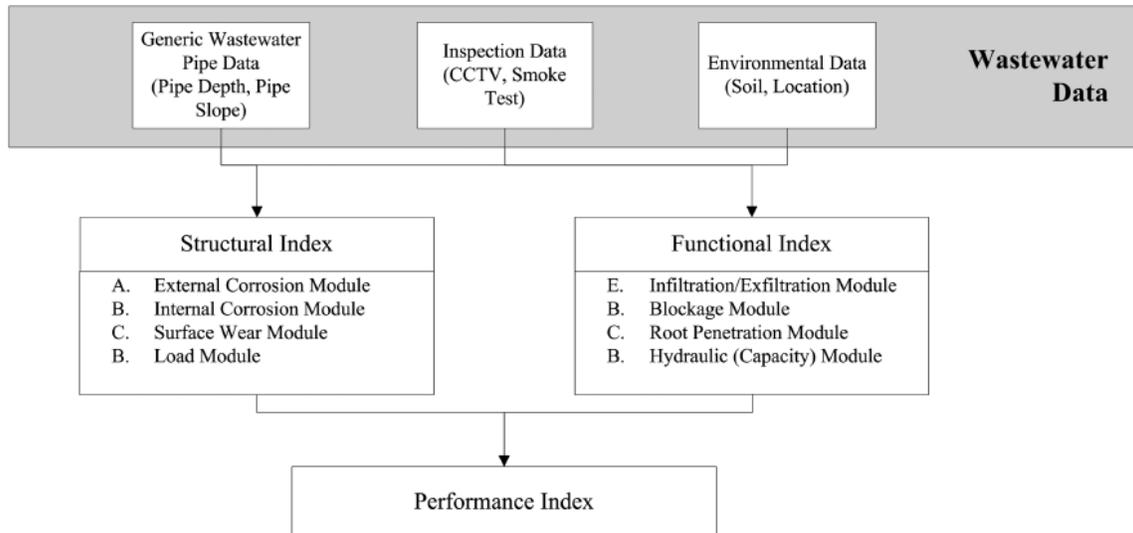


Figura 3.2-5. Esquema del funcionamiento del modelo (Fuente: Angkasuwansiri, 2014).

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

Para lograr aplicar el modelo los autores toman información de una ciudad “A” de los Estados Unidos, la misma que cuenta con inspecciones de CCTV y con ellas logran evaluar los módulos antes mencionados. Además la ciudad en mención cuenta con un sistema estandarizado denominado PACP por sus siglas en inglés, usado para evaluar inspecciones vía CCTV, con ello los defectos visuales son identificados y evaluados según el sistema, para finalmente tener una calificación de 0 a 5, que será comparada con el índice calculado mediante el sistema difuso.

A continuación en la Figura 3.2-6, se muestran los resultados obtenidos correspondientes al índice de desempeño, los mismos que son ubicados en el programa GIS para ilustrar su distribución en la ciudad. Además se comparan los resultados con la evaluación PACP (Figura 3.2-7), de lo cual se destaca que mediante el sistema difuso las tuberías muestran estar en peor estado que con la evaluación simple vía CCTV; esto se debe principalmente a que el modelo difuso toma en cuenta un mayor número de parámetros, lo cual lo hace más confiable.

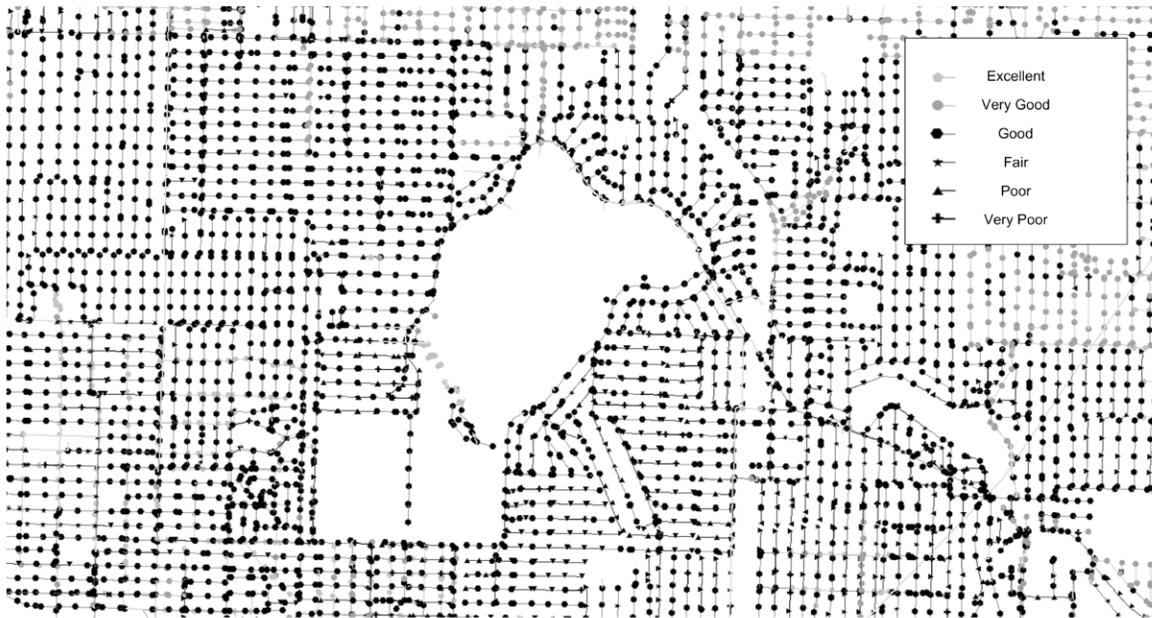


Figura 3.2-6. Índice de desempeño calculado por modelo difuso (Fuente: Angkasuwansiri, 2014).



Figura 3.2-7. Clasificación de tuberías vía CCTV (PACP) (Fuente: Angkasuwansiri, 2014).

3.3 Análisis de Daños y Riesgo

3.3.1 Evaluación Daños: Caso de Estudio Ciudad Portland

Una manera distinta para determinar el estado de una red de alcantarillado es mediante el análisis de los daños que se causarían y mediante información georreferenciada para ubicar los sectores más sensibles. La ciudad de Portland, Estados Unidos se embarcó en mega-proyecto para la rehabilitación de su sistema de alcantarillado mediante el análisis de daños antes mencionado.

En un estudio realizado por el Departamento de Servicios Ambientales a cargo de Hoffman (2014) explica que la ciudad utiliza inspecciones de CCTV para determinar las condiciones estructurales y operacionales del sistema de alcantarillado. Las inspecciones se han realizado a un 75% de la red en los últimos 10 años. Mediante las inspecciones, los defectos según su complejidad son asignados un puntaje que luego es ingresada a un programa computacional que a vez determina una calificación de la sección de tubería del rango de 1 a 5, donde 1 es un estado excelente, como se aprecia en la Tabla 3.3-1.

Tabla 3.3-1. Rango de clasificación (Fuente: Hoffman, 2014).

Grade	Condition	Description	Structural Score Range*
1	Excellent	No defects or few minor defects	0 – 9
2	Good	Minor defects or few moderate defects	10 – 99
3	Fair	Moderate defects continuing to deteriorate	100 – 999
4	Poor	Moderately severe defects that will be Grade 5 defects in the foreseeable future	1,000 – 9,999
5	Very Poor	Defects requiring immediate attention. (Failure or failure imminent.)	10,000 +

Una vez con la calificación determinada, el estudio procede a un análisis de severidad y distribución de los defectos. Dicho análisis se consigue dividiendo las tuberías en secciones de 10 pies en una representación de GIS (Sistema de Información Geográfica). Posteriormente se procede a determinar la calificación del segmento de 10 pies, bajo las mismas condiciones mostradas en la Tabla 3.3-1. Dicho análisis lo vemos en la Figura 3.3-1.



Figura 3.3-1. Análisis segmentos de tubería (Fuente: Hoffman, 2014).

CONSECUENCIA DE FALLA

Las secciones con puntajes altos (calificación 4-5) son consideradas para un análisis más exhaustivo e identificar que acción es la más apropiada. Dentro de este análisis está la consecuencia de falla. Esta representa el resultado de la misma expresada en costos ya sea directos, indirectos, económicos, ambientales y sociales. Una falla de tubería puede ser considerada como estructural e incluye sobrecarga, inundación de sótanos y calles y potenciales grietas en las calles. Las consecuencias de dicha falla varían dependiendo del tamaño y profundidad de la tubería como también su ubicación cercana a áreas sensibles.

Una vez definida la consecuencia de falla, se analizan estos sectores y se cuantifican los daños que generaría al ocurrir dicha falla, como se observa en la Figura 3.3-2. Al ser una sección cercana a una escuela, los costos de falla serían muy altos.

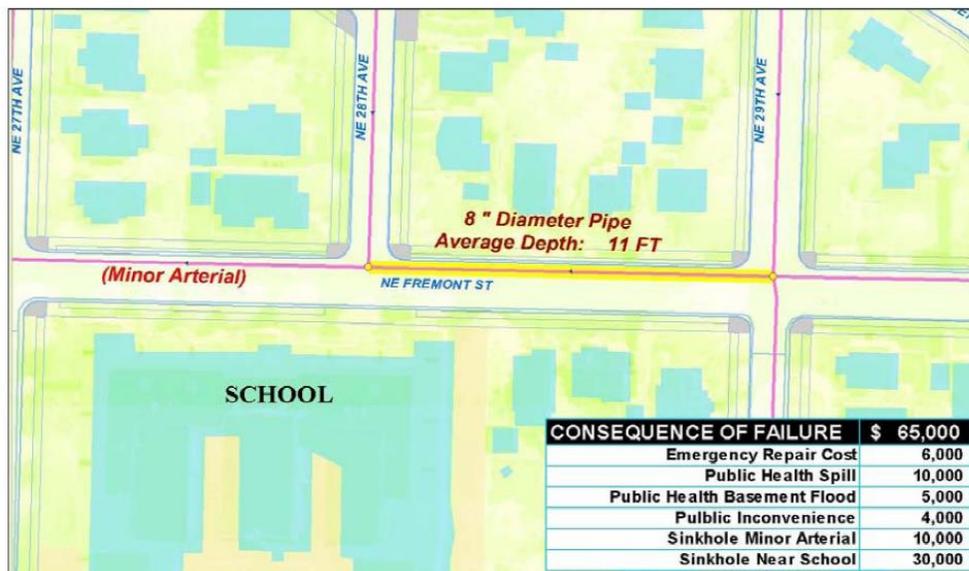


Figura 3.3-2. Consecuencia de falla de tubería (Fuente: Hoffman, 2014).

PROBABILIDAD DE FALLA

Posteriormente el estudio define la probabilidad de falla; esto se logra con la información de inspecciones y curvas que relacionan la condición de la tubería con su vida útil restante. Este cálculo se lo realiza nuevamente para los segmento de 10 pies, para que exista una concordancia con los otros parámetros hallados previamente.

PRIORIZACIÓN DE PROYECTOS BASADOS EN REDUCCIÓN DE RIESGOS

Con los parámetros hallados previamente, se calcula el riesgo, el mismo que es igual a:

$$\text{Business Risk (\$)} = \text{consequence of failure (\$)} \times \text{likelihood of failure (\%)} \quad (\text{Fuente: Hoffman, 2014})$$

Este valor de riesgo es de vital importancia ya que para priorizar proyectos se busca reducir la consecuencia de falla y con ello el riesgo total. Por ello en el estudio se compara el riesgo con el costo que tendría un proyecto para mitigar ese riesgo. El cálculo para establecer los beneficios de dicha comparación los da relación costo beneficio neto (nBCR). Usando dicha formulación, el valor de nBCR representa el retorno de la inversión para reducir el riesgo. Al calcular esta relación (nBCR) en proyectos individuales, resulta en un método muy útil para la priorización de proyectos basado en la habilidad de reducir el riesgo de una manera costo efectiva.

Al aplicar la mencionada relación en las secciones de tuberías, se logra segmentar y priorizar los proyectos de rehabilitación, como se observa en las Figuras 3.3-3 y 3.3-4.

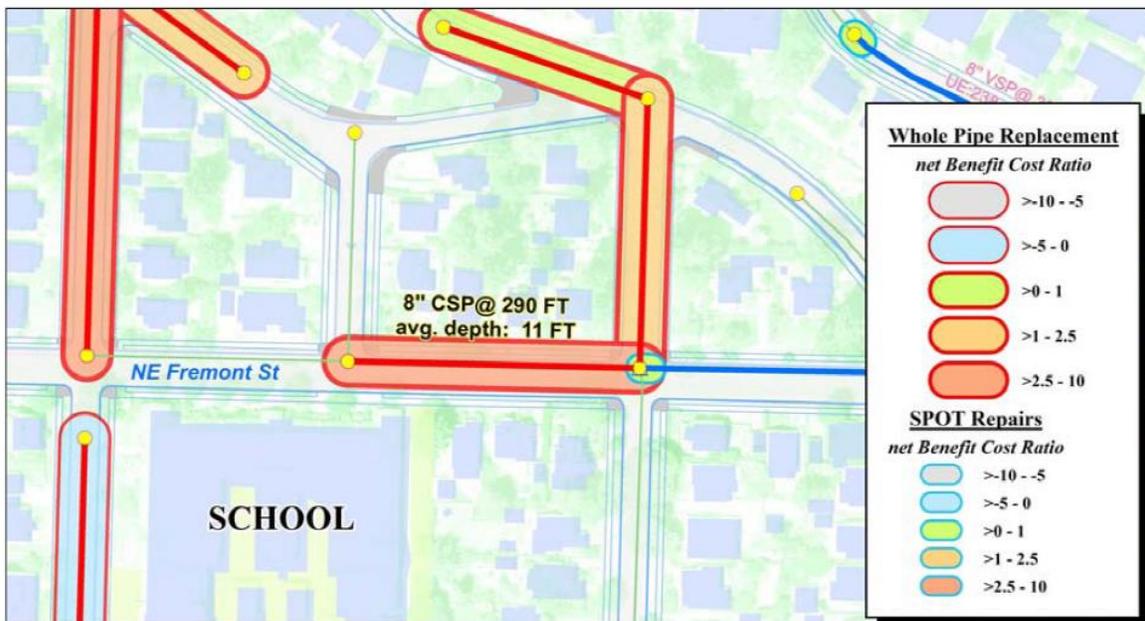


Figura 3.3-3. Cálculo de nBCR en distintas secciones de tuberías (Fuente: Hoffman, 2014)

Los valores positivos de nBCR indicarán un alto retorno de la inversión al reducir riesgos; con ello es posible identificar los sectores prioritarios y construir distintos proyectos alrededor a desarrollarse en distintas fechas y con el tiempo necesario para conseguir su financiación. Este es el ejemplo de Portland que con mencionada metodología estableció 16 proyectos, indicando los prioritarios y estableciendo planes a largo plazo de rehabilitación con el menor riesgo, como se observa en la Figura 3.3-4.

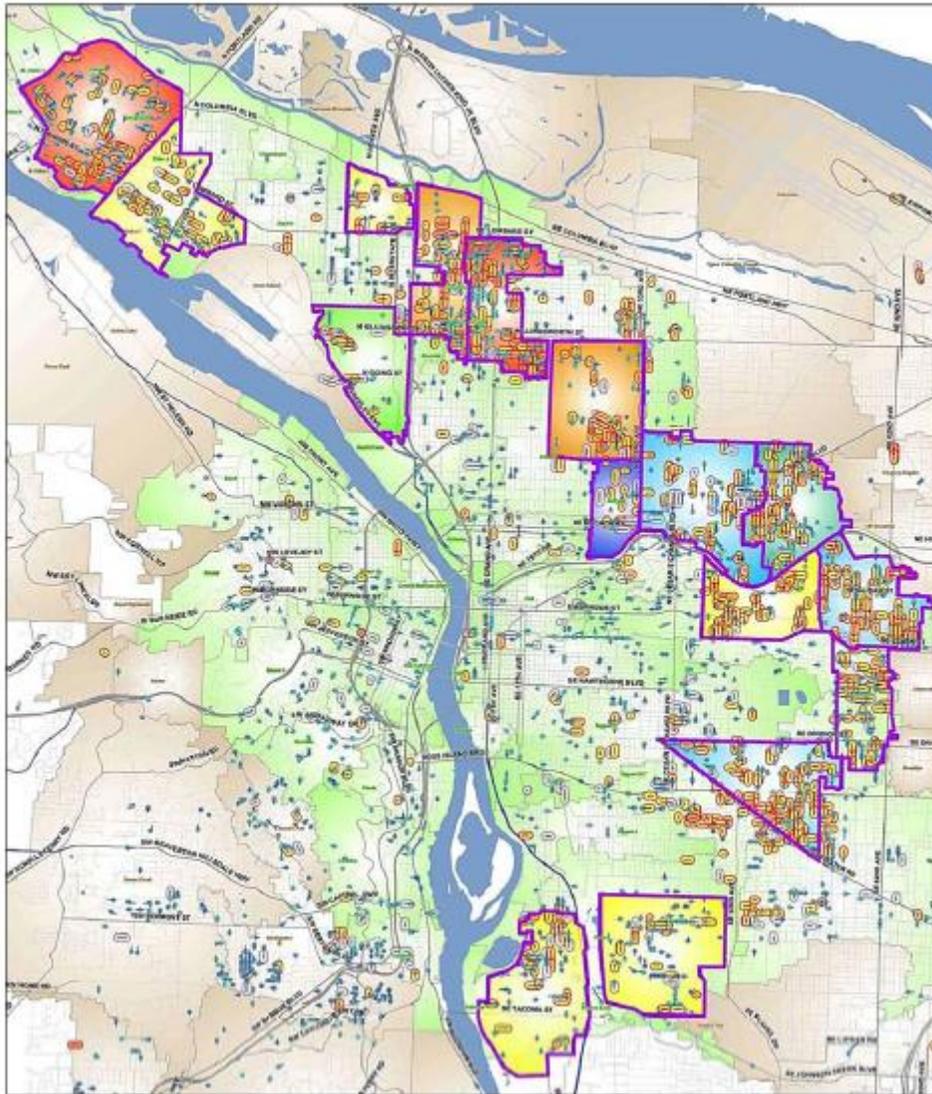


Figura 3.3-4. Área de los proyectos establecidos (Fuente: Hoffman, 2014).

Con los 16 proyectos señalados la ciudad de Portland planea realizarlos en un plazo de 8 años y estableciendo con anticipación claramente los costos de cada uno de ellos, por un valor total de \$123 millones de dólares (Hoffman, 2014).

3.3.2 Enfoque Basado en Riesgo

La gestión de riesgos puede ser utilizada como una herramienta muy efectiva para priorizar la asignación de recursos y con ello un manejo más adecuado en cuanto a la determinación del estado de una red de alcantarillado. Herramientas de este tipo nacen de la necesidad de las distintas municipalidades en desarrollar métodos efectivos y a bajo costo para determinar el estado de su red, como consecuencia de una desigual asignación de recursos entre departamentos.

Dado que el riesgo es una función tanto de la probabilidad y de la consecuencia, para determinar el riesgo de que una tubería de alcantarillado falle, envuelve tanto la probabilidad como la *consecuencia de falla* (CoF por sus siglas en inglés) dentro de toda la red. Al ser analizados y calculados correctamente ambos factores antes mencionados, se puede contar con una herramienta que permita priorizar las tuberías que requieran inmediata inspección o incluso rehabilitación o renovación.

Con el potencial antes señalado de la gestión de riesgo, los autores canadienses Baah y Dubey realizaron un estudio para determinar en tuberías de alcantarillado tanto la consecuencia de falla (CoF) como su probabilidad en una red real canadiense. Para dicho estudio la CoF es evaluada mediante un sistema georreferenciado GIS y una matriz con puntajes ponderados. Con la información disponible obtenida de la red analizada, se consideran 11 factores que contribuyen en un impacto alto o leve en caso de falla. Pero además del cálculo de la CoF, el estudio señala la necesidad de obtener la probabilidad de falla, que es considerada como la condición de la tubería (calificación de la condición interna). Como se ha señalado en los estudios analizados en el presente trabajo, la condición de la tubería se la determina mediante inspecciones de CCTV. Cabe resaltar que la ciudad estudiada por Baah, no contaba con toda su red inspeccionada vía CCTV, por lo que un modelo predictivo fue utilizado para determinar la condición de las tuberías que no han sido inspeccionadas. Así es que el estudio de Baah (2014) si bien se basa en la gestión de riesgos, parte de un modelo predictivo para determinar la condición de la red.

CÁLCULO CoF

Para el cálculo de la CoF se seleccionaron 11 atributos influyentes de la tubería considerados por los autores y además contaban con dicha información dada por la ciudad analizada. (Tabla 3.3-2)

Tabla 3.3-2. Características relevantes de la tubería (Fuente: Baah, 2014).
 Performance values and predetermined weights for the CoF impact factors.

Impact factor	Impact factor sub-criteria (S_{ij})	Performance values (PV)	Weight (W_j)
Roadway type	Intersecting ON road class 2	3	0.2
	Intersecting ON road class 4	2.4	
	Intersecting ON road class 5	1	
Intersecting a railway track	Yes	3	0.2
	No	0	
Pipe size	Diameter ≤ 300 mm	1	0.16
	Diameter > 300 m and ≤ 600 m	1.5	
	Diameter > 600 m and ≤ 900 m	2.25	
	Diameter > 900 m	3	
Pipe burial depth	Depth ≤ 3 m	1	0.16
	Depth > 3 m and ≤ 10 m	1.5	
	3: Depth > 10 m	3	
Located downtown	Yes	3	0.2
	No	0	
Proximity to hospital	Pipe distance ≤ 120 m	3	0.2
	Pipe distance > 120 m	0	
Proximity to school	Pipe distance ≤ 200 m	3	0.2
	Pipe distance > 200 m	0	
Distance to building	3: Distance < 5 m	3	0.2
	Distance ≥ 5 m and ≤ 10 m	1.5	
	Distance > 10 m	0	
Proximity to river	Pipe distance ≤ 15 m	3	0.2
	Pipe distance > 15 m	0	
Proximity to park or recreational areas	Pipe distance ≤ 20 m	3	0.16
	Pipe distance > 20 m	0	
Proximity to bad stormwater pipe	Distance ≤ 10	3	0.2
	Distance > 10	0	

El cálculo de la consecuencia de falla se lo realiza para cada tubería de la red, mediante la siguiente ecuación:

$$Cof = \text{Consequence of failure}(Pipe_i) = \sum_{j=1}^{11} (S_{ij} \times W_j)$$

(Fuente: Baah, 2014)

donde:

- ❖ S_{ij} : es la calificación de desempeño, la cual es calculada mediante una programación simple que toma en cuenta las 11 características de la tubería previamente seleccionados como influyentes en el estudio (ver Tabla 3.3-2). De acuerdo con estas características la programación asigna una calificación de 0 a 3 (0 equivale a que no hay riesgo y 3 riesgo alto), donde por ejemplo si la profundidad a la cual está enterrada la tubería es menor o igual 3 metros se asigna una calificación de desempeño de 1.

- ❖ W_j : Representa el valor de ponderación asignado a cada uno de los 11 atributos. Esta ponderación fue seleccionada luego de un repaso bibliográfico y experiencia de los autores.

Una vez calculada la CoF mediante la ecuación señalada, se procede a una nueva clasificación, donde de acuerdo con el valor obtenido de la ecuación se asigna una clasificación de 5 niveles, en el cual 1 representa una consecuencia de falla leve y 5 muy alta (Ver Tabla 3.3-3).

Tabla 3.3-3. Niveles de Impacto (Fuente: Baah, 2014).
 Sewer pipe failure impact factor ratings obtained from Jenks natural breaks classification.

Jenks natural break cut-off values	Impact factor rating	Description
0.32–0.64	1	Low
0.65–0.98	2	Low-to-moderate
0.99–1.32	3	Moderate
1.33–1.82	4	High
1.83–2.90	5	Very high

DETERMINACIÓN RIESGO DE FALLA

Como se mencionó inicialmente el riesgo de falla depende de la consecuencia de falla y la probabilidad que esta ocurra. La probabilidad de falla está dada por la condición de la tubería, determinada por las inspecciones de CCTV y por el modelo predictivo en las tuberías no inspeccionadas; está calificación va de 1 a 5, donde 1 representa un estado bueno y 5 crítico. De la misma manera la CoF está en un rango de 1 a 5 en concordancia con la probabilidad, por ello los autores generaron la matriz que se muestra en la Tabla 3.3-4 a continuación, que relaciona ambas funciones de manera sencilla.

Tabla 3.3-4. Matriz de Riesgo (Fuente: Baah, 2014).

Probability of failure (or condition state)	Consequence of failure				
	1 (Low)	2 (Low to moderate)	3 (Moderate)	4 (High)	5 (Very high)
1 (Low)	Low	Low	Fair	Fair	Fair
2 (Fair)	Low	Low	Moderate	Moderate	Moderate
3 (Moderate)	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate
4 (High)	Moderate	Moderate	Moderate	Very high	Very high
5 (Very High)	Moderate	Moderate	Moderate	Very high	Very high

Dado que todas las tuberías están representadas gráficamente por el programa ArcGIS con todas sus respectivas características utilizadas en el estudio (Ver Tabla 3.3-5), es sencillo adicionar nuevas capas, que este caso son la CoF, probabilidad de falla y finalmente el riesgo de falla. Al hacer esto se obtienen gráficamente la ubicación de las tuberías con riesgo alto de falla, lo que facilita la toma de decisiones para determinar planes prioritarios de inspección y de rehabilitación (Ver Figura 3.3-5).

Tabla 3.3-5. Características en ArcGIS (Fuente: Baah, 2014)

FID	ASSET_ID	preci	StormDPV	DiamPV	RoadPV	DepthPV	RailDPV	DTwnPV	HospDPV	RiverDPV	SchoolPV	ParkPV	DBuildingP	T Score
237	PWOPRSED0007316	Bad	0.6	0.16	0.6	0.16	0	0	0	0	0	0	0	1.52
342	PWOPRSED0004417	Bad	0	0.16	0.6	0.16	0	0	0	0	0.6	0	0	1.52
400	PWOPRSED0004442	Bad	0	0.16	0.2	0.16	0	0	0	0	0.6	0	0.3	1.42
445	PWOPRSED0007456	Bad	0	0.24	0.48	0.16	0	0	0	0.6	0	0	0	1.48
488	PWOPRSED0002979	Bad	0	0.24	0.68	0.16	0	0	0	0	0.6	0	0	1.68
520	PWOPRSED0000528	Bad	0.6	0.24	0.2	0.16	0	0	0	0	0.6	0	0	1.8
540	PWOPRSED0003862	Bad	0	0.24	0.68	0.24	0	0.6	0	0.6	0	0	0	2.36

Sin embargo el gran limitante al utilizar esta metodología es la asignación de los atributos que intervienen en la consecuencia de falla y la selección de sus respectivas ponderaciones. No deja de ser muy subjetiva su selección y estrechamente ligada a la información disponible de cada municipio.

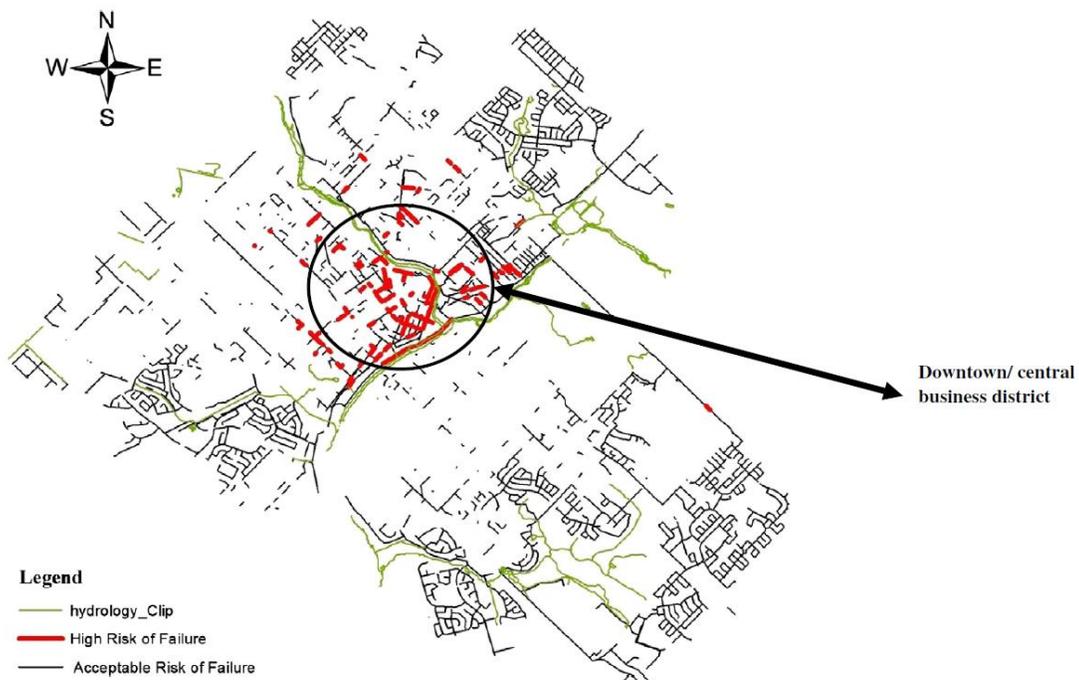


Figura 3.3-5 Representación de Riesgo (Fuente: Baah, 2014).

3.4 Modelos predictivos para el estado futuro de tuberías

A pesar que inspecciones de redes de alcantarillado, ya sea por CCTV o tecnologías similares, ciertamente brindan un mejor entendimiento de lo que está ocurriendo dentro de la red, dichas inspecciones únicamente brindan un instante de las condiciones de la red al momento de la inspección. Por tal motivo una predicción de las condiciones futura de la red, en base a información pasada de inspecciones, es crucial y necesaria para un manejo proactivo y eficiente de un sistema de alcantarillado (Baik, 2006).

Predicciones precisas del estado de una red sólo pueden lograrse con una buena calidad de información de entrada y la selección del modelo predictivo junto a la herramienta computacional apropiada para la ciudad o población en estudio. Sin embargo sigue en discusión cual es el mejor modelo a utilizar, no se ha logrado establecer cuál es el que arroja resultados más cercanos a la realidad; esto en gran parte porque dichos modelos se han desarrollado con información de distintas ciudades cada una con sus respectivas particularidades y raramente distintos modelos han sido ensayados con la misma información de entrada en un mismo lugar para medir sus desempeños (Syadaruddin Syachrani, 2013).

Con lo planteado empresas públicas y privadas que brindan el servicio de alcantarillado tienen un gran reto por delante: escoger el modelo de predicción adecuado que les permita desarrollar estrategias proactivas, así como priorización de inspecciones, reparaciones, calendarios y proyectos a largo plazo de reemplazo de tuberías, para eliminar los altos costos asociados con fallas de tuberías en zonas densamente pobladas. Implementando este tipo de manejo la empresa a cargo del alcantarillado estará en capacidad de mejorar el nivel de servicio, lo que a su vez será una mejora en su publicidad y desempeño (Salman, 2006).

3.4.1 Modelos estadísticos con fundamentos de Cadenas de Markov

3.4.1.1 J. Dirksen (Delf Holanda)

El primer modelo presentado, fue desarrollado por J. Dirksen (2008) de la universidad del Delf, en Holanda, para su modelo el autor se basa en fundamentos de la denominada “Cadena de Markov”. Una cadena de Markov consiste en representar un sistema por sus estados y la posibilidad de cambio entre ellos. Se analiza la probabilidad de que un elemento del sistema cambie de estado durante un período de tiempo.

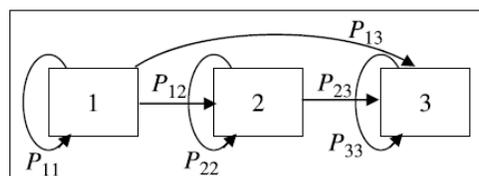


Figura 3.4-1 Transición de Estados (Fuente: Dirksen, 2008).

Como se puede apreciar en la Fig. 3.4-1 el modelo busca encontrar la probabilidades de transición entre estados; esto quiero decir por ejemplo la probabilidad de que al estar en el estado uno permanezca en el mismo (P_{11}), o la probabilidad de que pase al estado dos (P_{12}) o en su defecto la probabilidad de pasar al estado tres (P_{13}). La mayor limitación que presenta el modelo es que únicamente toma en cuenta el estado actual en el que se encuentra, mas no la información histórica, que influye significativamente para el caso de tuberías de alcantarillado.

Para sobrellevar la limitación antes mencionada, Dirksen propone lo que denomina un modelo Semi-Markov, donde la mayor diferencia está en que las probabilidades de transferencia de estado dependen ya no solo del estado en el que se encuentra, sino también del tiempo que ha transcurrido en el mismo. Para la distribución del tiempo total que permanece en cada estado, distintas funciones de distribución pueden ser aplicadas como la: exponencial, Rayleigh, normal, lognormal, gamma, Weibull, Gumbel and Herz.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO APLICADO EN HOLANDA

Para el desarrollo del modelo se utilizó información de un pequeño municipio de Holanda, donde se han llevado a cabo inspecciones de CCTV desde 1996 hasta el 2005. La longitud total de las tuberías es de 95 kilómetros, de los cuales el 65% (62 km) han sido inspeccionados durante las fechas indicadas anteriormente. De las tuberías instaladas un 99% fueron construidas después de 1950 y del total 86% son tuberías de concreto (Dirksen, 2008).

Con el fin de representar de mejor manera las posibilidades de deterioración, los autores decidieron modelar únicamente *daño de la superficie por corrosión o acción mecánica*. Cabe resaltar que dicho daño consta en la legislación Holandesa y Europea, donde están los demás criterios de evaluación de tuberías vía inspecciones de CCTV (Tabla 3.4-1).

Tabla 3.4-1 Criterios de Evaluación (Fuente: Dirksen, 2008).

	Aspect	Condition states
Leak tightness	Infiltration of groundwater	1, 2, 3, 4 or 5
	Ingress of soil from surrounding ground	1, 2, 3, 4 or 5
	Longitudinal displacement	1, 2, 3, 4 or 5
	Radial displacement	1,2 or 5
	Angular displacement	1 or 5
	Intruding sealing ring	1, 3 or 5
	Intruding sealing material	1, 2, 3, 4 or 5
Stability	Damage	1 or 5
	Surface damage by corrosion or mechanical action	1, 2, 3, 4 or 5
	Fissure (cracks and fractures)	1, 2, 3, 4 or 5
	Deformation of cross sectional shape (only for flexible materials)	1, 2, 3, 4 or 5
Flow (gradient)	Intruding connection	1, 3 or 5
	Root intrusion	1, 2, 3, 4 or 5
	Fouling	1, 2, 3, 4 or 5
	Encrustation of grease or other deposits	1, 2, 3, 4 or 5
	Settled deposits (sand and waste)	1, 2, 3, 4 or 5
	Other obstacles	1, 2, 3, 4 or 5
	Water level	1, 2, 3, 4 or 5

Para la puesta en marcha del modelo, este inicia con la construcción de una matriz de transición, la misma que consta de las probabilidades de transición de estados. Cabe resaltar que para simplicidad los autores deciden trabajar únicamente con 3 posibles estados, de los 5 que rigen en la legislación holandesa, esto ya que en el estado 3 pueden ser compilados los estados 4, 5, ya que son los que con menor frecuencia se presentan, según se pudo apreciar en las inspecciones. Con lo dicho la matriz de transición es igual a:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ 0 & P_{22} & P_{23} \\ 0 & 0 & P_{33} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} 0 \leq P_{ij} \leq 1, \quad 0 \leq i, j \leq r \\ \sum_{j=0}^r P_{ij} = 1, \quad i = 0, 1, 2, \dots, r \end{array}$$

(Fuente: Dirksen, 2008)

Donde r es igual al número total de estados, abriendo la posibilidad que se incluyan más. Por otro lado el diferencial de tiempo seleccionado es de un año.

Las probabilidades de transición de dicha matriz se las calcula utilizando una función de probabilidad. Esta función es una medida de la probabilidad de ocurrencia de las observaciones (obtenidas a través de las inspecciones de CCTV). Mientras que la función de probabilidad del sistema es igual al producto de las probabilidades de todas las observaciones. Y por último la probabilidad de una observación puede ser calculada utilizando las ecuaciones de Chapman-Kolmogov (Dirksen, 2008).

Con el procedimiento para el cálculo detallado, en la Figura 3.4-2 se puede observar los resultados a los cuales llegaron en la investigación, donde se aprecia como el deterioro inicia a exteriorizarse a partir de los 10 años. Claro está que dicha investigación es para un sistema en una ciudad pequeña, sin mayor complejidad, por lo que utilizando el mismo modelo con distinta información de entrada correspondiente a una ciudad de mayor población, se esperaría que dicho deterioro cambie considerablemente.

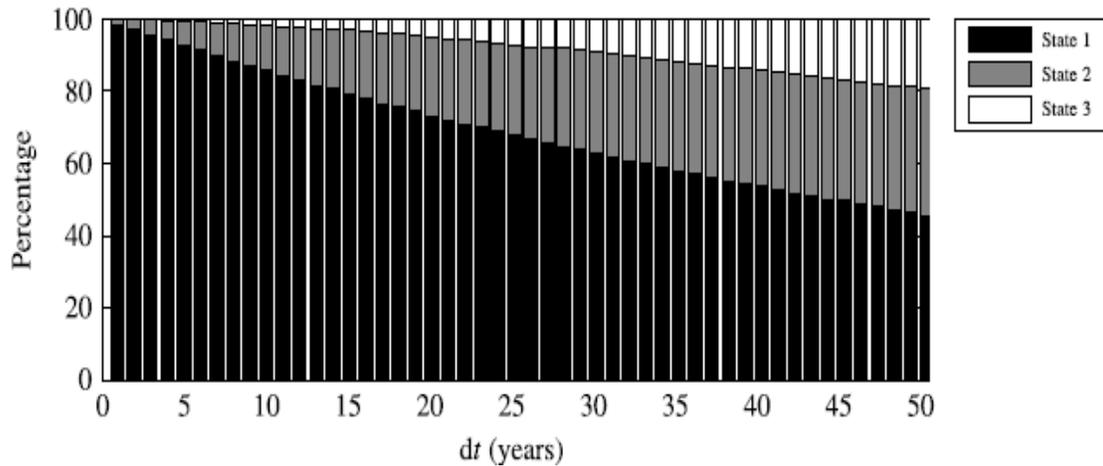


Figura 3.4-2. Distribución del estado de las tuberías para un período de 50 años (Fuente: Dirksen, 2008).

Como conclusión Dirksen señala que el uso del Modelo de Markov, es un buen punto de partida para modelar el deterioro de alcantarillados, sin embargo deben continuar estudios a mayor escala para confirmar el uso de dicho modelo; además de la necesidad de inspecciones de CCTV con menor incertidumbre, ya que la información a través inspecciones es fundamental para obtener resultados confiables en el modelo.

3.4.1.2 Baik (Estudio Ciudad de San Diego)

El estudio realizado por Baik (2006) puede ser descrito como el más robusto en cuanto a Modelos de Markov, por ello hasta la fecha ha sido el artículo más citado en cuanto al tema significa (citado 58 veces). Si bien utiliza los conceptos detallados anteriormente en el estudio de Dirksen, Baik incluye el concepto para el cálculo de las transiciones de probabilidades, denominado el “Ordered Probit Model”.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El primer paso para el desarrollo del modelo es la determinación del estado actual de la red, tanto su condición interna como hidráulica. Una vez más para iniciar es necesario contar con información proveniente de inspecciones de CCTV. El presente estudio toma dicha información de inspecciones reales realizadas por la ciudad de San Diego, Estados Unidos que forman parte del programa de 10 años de rehabilitación, mantenimiento e inspección de su red compuesta por más de 4,800 km de tuberías de alcantarillado sanitario. Las inspecciones en mención forman parte de la Etapa A1 del programa y fueron inspeccionadas a 90 km de tuberías, en su mayoría de cerámica vitrificada y PVC de diámetros entre 150 mm y 250 mm. La ciudad de San Diego cuenta con un sistema propio de evaluación, el cual consiste en 108 criterios, agrupados en 7 subgrupos. Cada uno de estos subgrupos cuenta con criterios de evaluación que describe sus características así como como la

severidad de los defectos. Para cada criterio un puntaje estructural y o de mantenimiento es asignado para el segmento en análisis, para finalmente dichos puntajes ser computados, mediante la ecuación:

$$\text{Score} = \frac{\sum SP \times SW + \sum MP \times MW}{LS}$$

(Fuente: Baik, 2006)

Donde SP es el puntaje estructural, SW el factor de peso estructural, MP el puntaje de mantenimiento, MW factor de peso de mantenimiento. Una vez computados los puntajes, la condición del segmento de tubería es representada utilizando las letras A hasta E, donde puntajes en el rango de 0 – 2.5 corresponden a la letra A y mayores a 6 indican una calificación E. En dicho criterio la letra A corresponde a un estado óptimo.

Tabla 3.4-2. Criterios Clasificación Ciudad San Diego (Fuente: Baik, 2006).

Condition rating	Grade	Score range
1	A	0–2.5
2	B	0–2.5
3	C	2.5–4.0
4	D	4.0–6.0
5	E	Above 6.0

Como se mencionaba anteriormente la gran diferencia usada por Baik (2009) es el denominado “Ordered Probit Model” para el cálculo de probabilidades de cambio de estado en la matriz de transición, desarrollada en el Numeral 3.4.1.1, donde los cambios de condición (rating) durante un período de transición son calculados y posteriormente utilizados como resultado discretos en el modelo “Probit”. La probabilidad estimada para un incremento es un resultado discreto específico, puede ser interpretada como la probabilidad de transición del modelo de cadena de Markov. (Baik, 2006).

Si la condición de un segmento de alcantarillado cambia del estado i al j , durante un período de transición, el incremento de tal transición es $(j-i)$. Si se estiman las probabilidades para incrementos de cada estado de condición, los valores de cada fila de la matriz de transición pueden ser calculados. Además de lo mencionado, el modelo “Probit” utiliza la denominada variable latente, la cual es utilizada como base para la clasificación de los datos discretos. En el estudio realizado por Baik, la variable latente es la deterioración actual del sistema de alcantarillado, la misma que es continua y variable entre 0 y $+\infty$.

APLICACIÓN DEL MODELO EN LA CIUDAD DE SAN DIEGO

Con la información de las inspecciones facilitadas por la ciudad de San Diego, Estados Unidos y con la ayuda de Software Estadístico Baik logra determinar parámetros y fronteras para el desarrollo del modelo. Un año fue seleccionado como período de transición y con un total de 5 variables utilizadas durante el proceso de modelación, mostrados en la Tabla 3.4-3.

Tabla 3.4-3. Parámetros utilizados en la modelación (Fuente: Baik, 2006).

Name of variable	Description of variable
Length	Length of pipe segments between manholes in feet
Size	Diameter of pipe segments in inches
Type of material	Vitrified clay or PVC
Age	Age at year 2001 from installation year
Slope	Slope of pipe segments between manholes Slope=(elevation of upstream invert— elevation of downstream invert)/length

Una vez establecidos los parámetros, se pone en marcha el modelo “Probit” para el cálculo de probabilidades en la matriz de transición, lo que posteriormente utilizando los conceptos del modelo Markov, Baik logra establecer las probabilidades con las que el sistema de alcantarillado cambiaría de estado en un período de 60 años, resultados que se muestran en la Figura 3.4-3

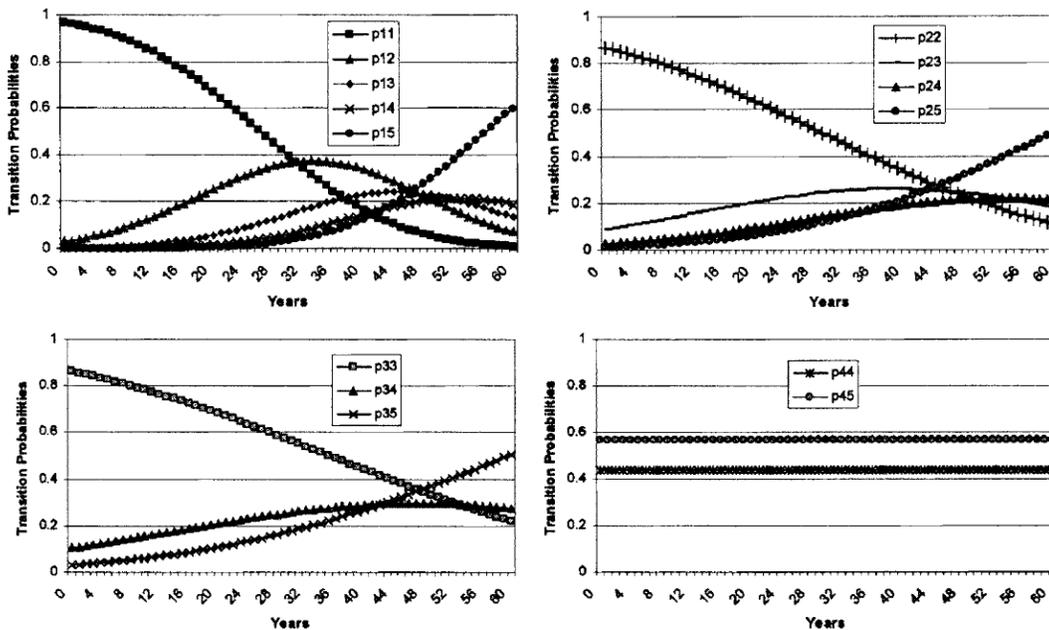


Figura 3.4-3. Probabilidades de transición de estados (Fuente: Baik, 2006).

De los resultados obtenidos por Baik, se puede realizar las siguientes observaciones: En la primera gráfica de la Figura 3.4-3, se indica como las probabilidades de cambio de basen en el estado 1 o A según la clasificación de San Diego, claramente la probabilidad de que permanezca en el estado 1 durante los primeros años es alta, pero al acercarse a los 60 años, esta baja considerablemente hasta ser casi nula; mientras que la probabilidad que del estado 1 pase al 5, inicia a incrementarse a partir de los 20 años y es bastante alta al final de los 60 años. Otro hecho a resaltar de los resultados es en la última gráfica del costado inferior derecho, donde se aprecia que una vez que la red llega al estado 4, permanece en el mismo constantemente, lo que indica que los estados 4 y 5 al ser estados críticos de la tubería no se diferencia mayormente entre ellos, puesto que ya indican un deterioro grave de la tubería, que difícilmente puede aumentar, ya que está muy cerca del colapso. Continuando con el estado 4 incluso en el 3, Baik resalta el hecho que una vez que el segmento de tubería llega a este estado los factores que más afectan su condición son: pendiente, longitud y diámetro mas no su edad. Adicionalmente para todos los estados (1 – 5) el factor que mayor deterioro genera es la pendiente.

Finalmente Baik propone un que los resultados que arroja el modelo, pueden ser de gran ayuda para generar calendarios de inspección de tramos de tubería, en especial cuando se tengan dudas entre segmentos de similares características, puesto que al aplicar el modelo este aclarará que tramo se deteriorará con mayor rapidez y por ende necesita una inspección anticipada. Como se aprecia en el ejemplo de la Tabla 3.4-4.

Tabla 3.4-4. Ejemplo para selección de inspección (Fuente: Baik, 2006).

Sewer pipe	Material	Diameter [mm(in.)]	Length [m(ft)]	Slope	Inspection year	
					A-OPM	B-NLO
1	Vitrified clay	200 (8)	198 (650)	0.01	35	49
2	Vitrified clay	200 (8)	229 (750)	0.001	40	49

Como se observa en el ejemplo dichos segmentos son muy similares, en longitud, mismo material, pero el modelo toma en cuenta más parámetros como la pendiente y edad, hecho que genera que tales segmentos tengan deterioros distintos, necesitando el segmento 1, una inspección anticipada al 2.

3.4.1.3 Ugarelli

En cuanto a aplicaciones a mayor escala de modelos de Markov, Ugarelli (2013) detalla la experiencia de la capital Noruega, Oslo en su plan maestro para mejorar la eficiencia y seguridad en el monitoreo y control de aguas residuales y pluviales. Dicho plan contempla la estimación de recursos requeridos para mejorar las condiciones del sistema con acciones de rehabilitación.

El modelo utilizado para dicho plan es denominado GompitZ, el cual define la relación existente entre el estado actual y el tiempo esperado de servicio en tuberías de alcantarillado, utilizando inspecciones de CCTV como dato de entrada. Esta herramienta GompitZ, modela un segmento de tubería (usualmente entre dos pozos de inspección) el deterioro que experimenta como una sucesión de la evaluación de su condición (rating) dentro del marco de Cadenas de Markov.

La probabilidad de que un segmento de tubería este en una condición dada o mejor es formalizada como una función de supervivencia de la edad de la tubería, derivada de una distribución Gompertz. Esta función de supervivencia depende de las características del tramo de tubería y su entorno, influenciando su condición inicial (al ser instalada) o su velocidad de deterioro.

Además de lo mencionado el modelo GompitZ contiene un módulo con el propósito de simular un programa de rehabilitación. Se permite modelar cuatro tipos de estrategias para rehabilitación y por consiguiente poder compararlas:

- i) El escenario de NO realizar ninguna acción, simplemente simular el deterioro de la red ante la ausencia de una rehabilitación
- ii-iii) Un escenario donde el usuario especifique la longitud de la red a ser reparada o en su defecto el presupuesto disponible; con ello simula que la rehabilitación se realiza anualmente a las tuberías más deterioradas
- iv) La simulación de un escenario óptimo, donde se estima la longitud media anual óptima a rehabilitar, para lograr que la red obtenga una condición global de deterioro establecida por el usuario (Ugarelli, 2013).

Con lo descrito, dicho módulo resulta ser de gran utilidad puesto que es posible calcular los beneficios en términos de mejoras de la red a comparación del escenario i) de no realizar ninguna rehabilitación; con lo cual se pueden contrastar costos y beneficios para adoptar la mejor decisión que beneficie a la red.

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO:

Para iniciar el modelo necesita la información proveniente de las inspecciones de CCTV, donde mediante reglamentos noruegos, los segmentos de tuberías son evaluados en una escala de 1 a 5, donde 1 es un estado óptimo, mientras que 5 indica cercano al colapso. Además como información base también es requerida su longitud, diámetro y edad de la tubería al momento de la inspección. Cabe resaltar que la ciudad de Oslo, sitio de la investigación y aplicación del programa cuenta con una red 1,960 km de longitud, de las cuales 31% corresponden a alcantarillado combinado, 34% a pluvial, 31% a sanitario y el restante es indeterminado.

Una vez con la información mencionada, se procede agrupar las tuberías en cuatro grupos, de los cuales se modelan independientemente; en el artículo en mención solo indican el ejemplo para el grupo BET que corresponde a tuberías de concreto de hasta 600 mm de diámetro, como se puede apreciar en la Tabla 3.4-5.

Tabla 3.4-5. Agrupación de Tuberías (Fuente: Ugarelli, 2013).

Group	# of pipes	Length [m]	Comment
BET	22,416	884,489	Concrete pipes up to 600 mm
cBET	4,286	163,530	Concrete culverts from 600 mm
CULV	1,189	47,766	Other culverts from 600 mm
PIPE	19,416	733,111	All other pipes materials up to 600 mm
Sum	47,307	1,828,896	

Aparte de agrupar las tuberías, el modelo GompitZ toma en cuenta co-variables (características de la tubería y el entorno) que pueden afectar al deterioro de las tuberías; por ello analizan las siguientes co-variables:

- Diámetro tubería (mm).
- Tipo de efluente (pluvial o sanitario).
- Proximidad a paso de tren (si/no).
- Presencia de árboles cerca de la tubería (si/no).
- Período de construcción (1850–1929, 1930–1945, 1946–1969, 1970–2011).
- Tráfico soportado (0, 1–500, 501–5,000, 5,001–15,000 vehículos/día).
- Tipo de material en el que se asienta

A continuación se muestran los resultados obtenidos por la modelación GompitZ, para el grupo BET, del cual se puede indicar que la velocidad de deterioro decrece significativamente con el diámetro. Al contrario la velocidad de deterioro incrementa al tratarse de una tubería de aguas combinadas (pluvial y sanitaria), también por el tipo de suelo y la presencia cercana de árboles.

En la Figura 3.4-4, vemos los resultados del modelo bajo dos condiciones y comparándolas con las observaciones reales tomadas del CCTV. La primera condición “Modelo Marginal” se refiere a la velocidad de deterioro promedio, mientras que el “Modelo IFF” considera la fragilidad individual. Claramente en la Figura 3.4-4, se ve como el deterioro modelado se asemeja al real obtenido de las observaciones. La figura indica las probabilidad de la condición en la que se encontrará dicho segmento de la tubería, representado por verde oscuro la condición 1 y en rojo la más adversa. En el eje “y” se encuentra el valor de la probabilidad (máximo 1 o 100%) mientras que en el eje x la escala de tiempo, donde cada barra representa una variación de 5 años. Con lo dicho se ve como en el Modelo Marginal para un tramo de tubería en los primeros 5 años la probabilidad que se encuentre en estado 1 (óptimo) es alrededor del 70%.

tenga una probabilidad aproximada del 80% de encontrarse en un estado 1 (óptimo), con una alta tasa de rehabilitación por los mismos 15 años (Figura 3.4-6).

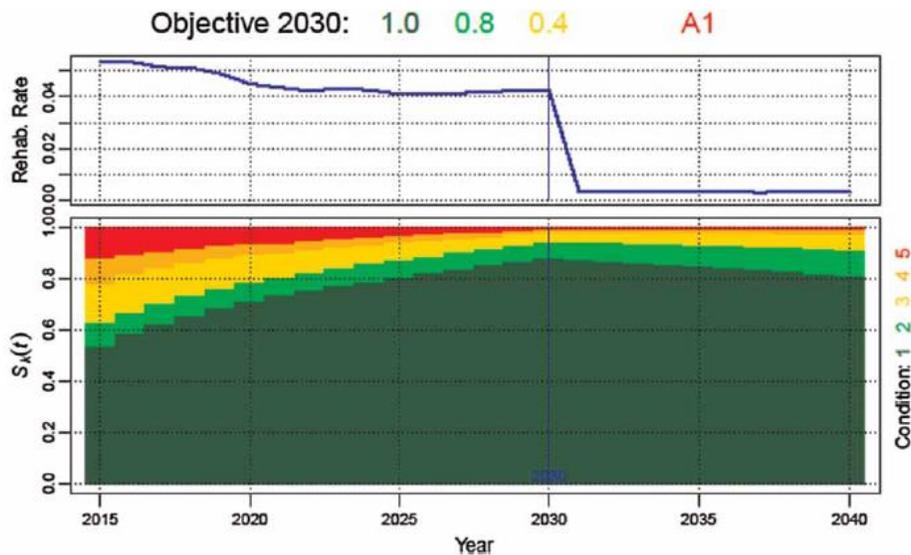


Figura 3.4-6. Simulación del plan de rehabilitación A1 (Ugarelli, 2013).

Con las últimas modelaciones se puede apreciar la utilidad de GompitZ para el manejo a largo plazo de una red, ya que se puede buscar el financiamiento con la debida antelación, así como los beneficios que traería una rehabilitación de tal envergadura de 15 años.

3.4.2 Estadísticos con Regresiones

En la metodología propuesta por Fazal Chughtai (2007) se busca priorizar la inspección y rehabilitación de tuberías en una red de alcantarillado, las cuales sean más vulnerables o propensas a sufrir una falla. Tratar de identificar las tuberías vulnerables antes mencionadas aleatoriamente o solamente basándose en la experiencia resulta ser extremadamente costoso y causante de una gran pérdida de tiempo en utilización del equipo de inspección y con ello recursos (Fazal, 2007). Es allí donde el modelo propuesto toma fuerza, al contar con una herramienta previa a la inspección y rehabilitación que fortalezca la decisión de que tuberías inspeccionar y rehabilitar. Para el desarrollo del modelo Fazal parte del hecho que la condición existente de la tubería puede ser dividida en dos categorías, estructural y operacional. El estado estructural se refiere a las condiciones físicas de una tubería, mientras que operacional describe la capacidad de la tubería para cumplir sus requerimientos de servicio. Por ello el autor desarrolla modelos para representar la condición estructural y operacional de segmentos de tubería utilizando múltiples regresiones, para finalmente construir curvas de deterioro de tuberías (Fazal, 2007).

FACTORES CONSIDERADOS PARA EL DESARROLLO DEL MODELO

Para iniciar con el modelo es necesario identificar los factores que afectan a las tuberías; para ello el autor realiza una extensa consulta bibliográfica, donde considera que utilizar todos los factores encontrados en la literatura es inviable. Por ello considera aquellos factores que influyen con mayor intensidad al estado estructural y operacional, que están descritos en la Tabla 3.4-6 a continuación:

Tabla 3.4-6 Características de las tuberías usadas en modelos (Fuente: Fazal, 2007).

Table 3. Description of Pipe Factors Considered in the Developed Models

Model type	Number	Attributes	Description
Structural condition prediction	1	Pipe material	Concrete, asbestos cement, polyvinyl chloride
	2	Pipe depth (m)	Installation depth of pipe in m
	3	Pipe length (m)	Length of pipe between two manholes
	4	Pipe age (years)	Age of laid pipe
	5	Pipe diameter (mm)	Nominal diameter of pipe
	6	Pipe material class	Concrete or asbestos cement class
	7	Bedding factor	According to bedding material class
	8	Street category	According to ASCE specifications
Operational condition prediction	1	Pipe material	In terms of Manning's roughness coefficient
	2	Age (years)	Age of laid pipe
	3	Length (m)	Length of pipe between two manholes
	4	Diameter (mm)	Nominal diameter of pipe
	5	Bed slope (m/m)	Laid bed slope of pipe

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

Para validar el modelo propuesto, el autor decide implementarlo en dos municipalidades canadienses, las cuales le proporcionan un inventario general de su red e inspecciones de CCTV. Con ello inicia el desarrollo del modelo, el cual cabe resaltar que trata directamente con los datos recolectados y no toma en cuenta el proceso atrás de ello de cómo se los obtuvo y recolecto.

Para iniciar el modelo de regresión se debe establecer claramente la existencia de interacciones entre las variables consideradas (Ver Tabla 3.4-6). Para ello se construyen matrices con las variables predictores y sus respectivas respuestas, con lo que se logrará determinar las mejor combinaciones de variables, que arrojen el menor error y variación. Con lo mencionado se construyen 4 modelos de regresión, los tres primeros para estimar el estado estructural para los distintos materiales (Asbesto Cemento, Concreto, PVC) y finalmente uno para estado operacional que incorpora a los tres distintos tipos de material. Los modelos mencionados se detallan mediante las siguientes ecuaciones:

(i) Asbestos cement pipe structural condition prediction model

$$\text{Structural_Grade} = \sqrt{20.9 + 542 \frac{\text{Log}_{10} \text{Depth}}{\text{Length}} + 0.207 \text{Age} - 0.742 \text{Asbestos_Cement_Class} - 14.8 \text{Diam}^{0.1}}$$

(ii) Concrete pipe structural condition prediction model

$$\text{Structural_Grade} = \left[\begin{array}{l} 3.94 + 0.592 \frac{\text{Log}_{10} \text{Diam}}{\text{Length}} - 0.00681 e^{\text{Street_Category}} \\ - 3.22 \text{Log}_{10} \text{Depth} - 1.6 \frac{\text{Log}_{10} \text{Age}}{\text{Concrete_Class}} \\ + 6.92 \frac{\text{Log}_{10} \text{Depth}}{\text{Bedding_Factor}} - 5.75 \frac{1}{\text{Bedding_Factor}} \end{array} \right]^{-1}$$

(iii) PVC pipe structural condition prediction model

$$\text{Structural_Grade} = -\text{Log} \left[\begin{array}{l} 2.25 - 0.00642 \text{Age} - 1.89 \text{Length}^{0.01} \\ - 0.0302 \text{Bedding_Factor} - 0.0405 \text{Street_Category} \\ - 0.0000(\text{Diam})^{0.3}(\text{Depth})^4 \end{array} \right]$$

(iv) Operational condition prediction model for asbestos cement, concrete, and PVC sewers

$$\text{Operational_Grade} = \left[\frac{0.308 + 0.567 \left(\frac{\text{Age}}{\text{Diam}^n} \right) (\text{Length})^{\text{Slope}}}{\text{Age}} \right]^{1/0.63}$$

Ecuaciones para cálculo de grado estructural y operacional para tuberías de: Asbesto de Cemento, Concreto y PVC (Fuente: Fazal, 2007).

El resultado de cada una de las 4 ecuaciones dará una calificación del estado estructural y operacional de la tubería que oscila entre 1 y 5 donde 1 representa un estado bueno y 5 crítico.

Para comprobar que los resultados dados por los modelos de regresiones con sus respectivas ecuaciones sean veraces, el autor somete los resultados a una validación estadística. Las validaciones principales son: Coeficiente de determinación múltiple (R^2), Diagnóstico Residual y Falta de Ajuste (LOF), donde destaca la medida de R^2 ya que esta indica la variación proporcional en la condición estructural y operacional ocasionada por los atributos de la tubería como edad, diámetro, material, etc. (Fazal, 2007).

En resumen la validación estadística indica que el coeficiente de determinación múltiple (R^2) muestra que del 72 al 88% de la variabilidad total en la condición estructural y operacional de alcantarillados puede ser explicada a través del desarrollo de modelos de regresión. De manera similar el resto de indicadores estadísticos antes mencionados muestran que en promedio el porcentaje de veracidad de estos modelos están en un rango del 82 al 86%, que es considerado como aceptable.

Ya que la validación estadística es aceptable se procede a la elaboración de curvas de deterioro para las municipalidades antes mencionadas (Ver Figura 3.4-7). Tanto las curvas de deterioro operacionales y estructurales son generadas para representar la relación entre la calificación de su condición y su edad. Las curvas a continuación muestran el cambio en su condición estructural y operacional en un período de 50 años; están divididas en 3 figuras según el material y las condiciones del suelo.

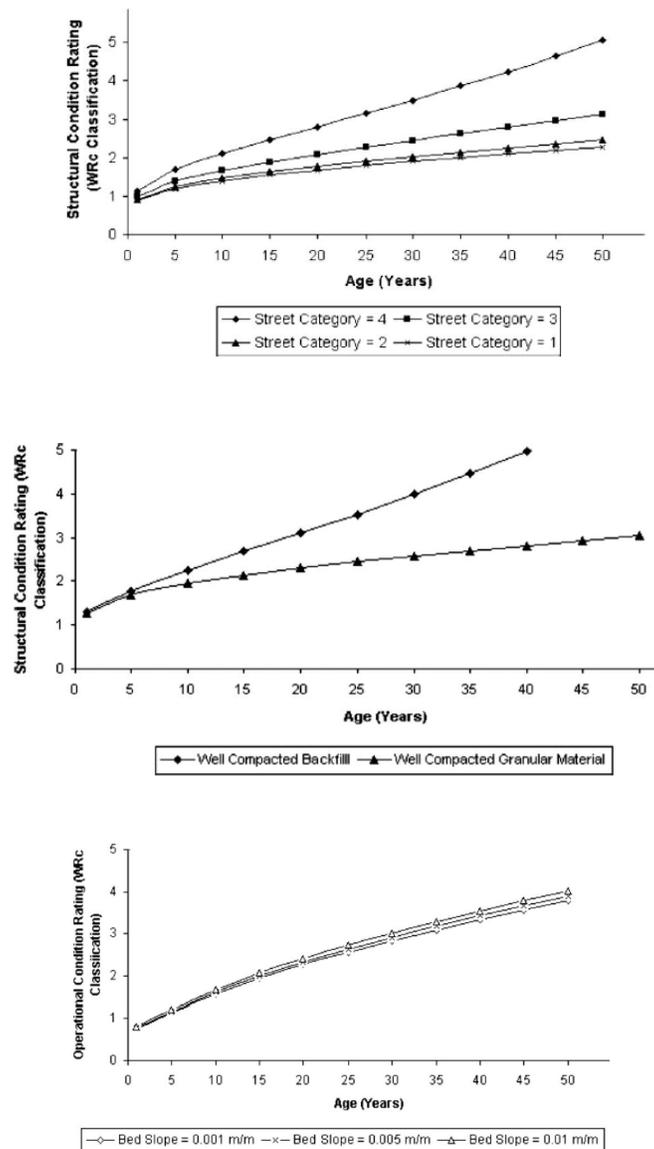


Figura 3.4-7 (a), (b): Curvas de Deterioro y (c) de Operación (Fuente Fazal, 2007).

Gracias a la investigación realizada por Fazal, se puede identificar secciones críticas de la red de alcantarillado que necesitan una inmediata intervención o una inspección más exhaustiva. Con ello municipios y en especial los ingenieros a cargo podrán fortalecer sus decisiones al momento de rehabilitar tramos de la red de alcantarillado.

3.4.3 Árboles de Decisión

3.4.3.1 Priorización para Rehabilitación

Este tipo de modelo, no es común en la literatura, sin embargo presenta una manera innovadora e ingeniosa para determinar el estado de una red. Dentro de las bondades del modelo, el autor resalta que es fácilmente reproducible y provee una representación visual lo suficientemente buena que la hace fácil de entender. Adicionalmente, los árboles de decisión poseen una buena combinación de tasa de error y velocidad si los comparamos con otros algoritmos. Por ello aparte de desarrollar el modelo de árbol de decisión el autor compara los resultados obtenidos corriendo con los mismos datos otros dos modelos, uno de regresión y el otro de redes neuronales. Con esto finalmente compara cual es el modelo que arroja resultados con la menor cantidad de errores. (Syachrani, 2013)

DATOS DE ENTRADA PARA EL MODELO:

Para el estudio, la información del estado de las tuberías de alcantarillado fue proporcionada por la empresa de alcantarillado del condado de Johnson, Kansas en Estados Unidos. Dicha empresa proporcionó 82,855 observaciones de secciones de tuberías, donde cada observación contenía originalmente 140 atributos, por lo que fue necesario eliminar varias observaciones que les faltaba valores además fue necesario recodificar una serie de variables, para finalmente utilizar 36 variables en el presente estudio, como lo indica la Tabla 3.4-7.

Tabla 3.4-7 Variables para el desarrollo del modelo (Fuente: Syachrani, 2013).

Number	Variable	Description	Type	18	GLU3	Cultural entertainment/recreational	Numeric
1	UniqueID	Unique identity	Numeric				
2	Age	Pipe age in 2006	Numeric	19	GLU4	Farm/ranch agricultural	Numeric
3	MTRL_CODE	Type of material	Character	20	GLU5	Single family residential	Numeric
4	Diameter	Diameter of the pipe	Numeric	21	GLU6	Multifamily residential	Numeric
5	Length	Length of the pipe	Numeric	22	GLU7	Office: Commercial	Numeric
6	Slope	Slope of the pipe	Numeric	23	GLU8	Office: Institutional	Numeric
7	Condition Rating	Condition rating (1 = new to 5 = fail)	Numeric	24	GLU9	Quarrying operation	Numeric
8	RootProblem	Root problem rating (1 = new to 5 = fail)	Numeric	25	GLU10	Right of way public and private	Numeric
9	SludgeProblem	Sludge problem rating (1 = new to 5 = fail)	Numeric	26	GLU11	Transportation/utility	Numeric
				27	GLU12	Vacant residential use	Numeric
10	JointProblem	Joint problem rating (1 = new to 5 = fail)	Numeric	28	GLU13	Unknown land use	Numeric
				29	StreamX	Stream crossing	Numeric
11	GreaseProblem	Grease problem rating (1 = new to 5 = fail)	Numeric	30	HighwayMajRoadX	Highway/major road crossing	Numeric
12	DebriProblem	Debris problem rating (1 = new to 5 = fail)	Numeric	31	RailroadX	Railroad crossing	Numeric
				32	LakeWetland	Lake/wetland area	Numeric
13	BrokenProblem	Broken condition	Numeric	33	UnderStructure	Under structure	Numeric
14	CollapsedProblem	Collapsed condition	Numeric	34	BackupArea	Backup area	Numeric
15	CrackedProblem	Cracked condition	Numeric	35	Restaurant	Close to restaurant	Numeric
16	GLU1	Commercial warehouse/retail uses	Numeric	36	Tree	Number of trees above the pipe	Numeric
17	GLU2	Commercial/industrial	Numeric				

A pesar de reducir las variables a 36, continúa siendo un número poco manejable, por lo cual se realiza un proceso de “clustering”. Este consiste en agrupar toda esta información de las inspecciones basándose en su ubicación y características similares; por ejemplo si están ubicadas bajo una vía de alto tráfico, condiciones operacionales entre otras. Para ello el estudio utiliza la técnica de “clustering” k-promedio en combinación del Componente Principal de Análisis (PCA) desarrollado por Saita (2008). La técnica k-promedio consiste en un algoritmo que divide los datos en “k” grupos y luego con el método PCA se reduce las dimensiones de los datos creando un set de componentes principales, que explican o describen la mayor variabilidad en la información. Básicamente el método PCA es usado para determinar el número de grupos “k” que existen para la información de las inspecciones. Los resultados del proceso de “clustering” y de PCA se aprecian en la Tabla 3.4-8.

Tabla 3.4-8. Características y densidad de cada grupo (Cluster) (Fuente: Syachrani, 2013).

Cluster	Frequency count	Frequency count (%)	Strong characteristic
1	15,768	29.83	Nonsingle family residential
2	2,685	5.08	Commercial, restaurant
3	4,406	8.34	Multifamily residential
4	967	1.83	HighwayX, transportation, right-of-way
5	11,124	21.05	Trees
6	17,905	33.88	Single family residential
Total	52,855	100.00	

Una vez hecha esta clasificación se decide tomar los grupos 1, 5 y 6 para el estudio ya que son los que contienen mayor cantidad de inspecciones. En estos tres grupos existen dos tipos de materiales de tubería, cerámica vitrificada y PVC. Por ello se procede a realizar otro filtro a la información y separarlos de acuerdo con el tipo de material y al grupo que pertenece como se observa en la Tabla 3.4-9.

Tabla 3.4-9. Clasificación según el tipo de material (Fuente: Syachrani, 2013).

Dataset	Important variables
Cluster1-PVC	Condition, sludge problem, diameter, slope
Cluster1-VCP	Condition, sludge problem, root problem
Cluster5-PVC	Condition, sludge problem, slope, streamX, diameter
Cluster5-VCP	Condition, length, sludge problem, root problem
Cluster6-PVC	Condition, sludge problem, slope, diameter, root problem
Cluster6-VCP	Condition, sludge problem, root problem

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE ÁRBOL DE DECISIÓN

El modelo pretende predecir una variable objetivo, que para este caso es la EDAD REAL (RA) de la tubería, que difiere de su edad calendario, ya que esta es una edad ajustada dada las condiciones de su ubicación y condiciones actuales de su operación. Dependiendo de los patrones únicos de deterioro de una tubería, la edad real puede ser mayor o incluso menor a su edad calendario. Se determina dicha edad gracias a una serie de reglas predictivas que son representadas a través de una estructura de árbol. El proceso continua dividiendo al grupo principal o raíz en ramas, llamadas nodos de decisión. Para cada proceso de división el número de observaciones desde el nodo superior hacia el inferior son distribuidas; dicho proceso continuará hasta que todas las observaciones tengan una misma clasificación. Como se puede apreciar en la Figura 3.4-8, una vez que terminan las divisiones llega a la denominada “hoja” (Syachrani, 2013).

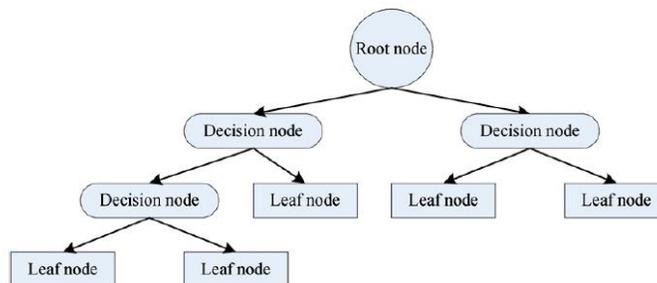


Figura 3.4-8. Representación Gráfica modelo árbol de decisión (Fuente: Syachrani, 2013).

En el estudio, el criterio de división en cada rama está basado en el valor estadístico de Pearson χ^2 de predictor de variables, desarrollado por Devoere (2004). Este valor de χ^2 luego es convertido en

un valor de probabilidad, con lo que al iniciar el proceso de división el modelo escogerá la variable que tenga la probabilidad más alta. Además el modelo cuenta con límites o fronteras establecidas por el usuario, con lo que el proceso de división continuará hasta que ninguna variable supere los valores de los límites establecidos; al ocurrir esto se llegará a la denominada hoja, en donde se calcula la edad real de la tubería, como un promedio de todas las observaciones correspondientes a dicha hoja. En la Figura 3.4-9 se puede apreciar los resultados del modelo para tres diferentes grupos.

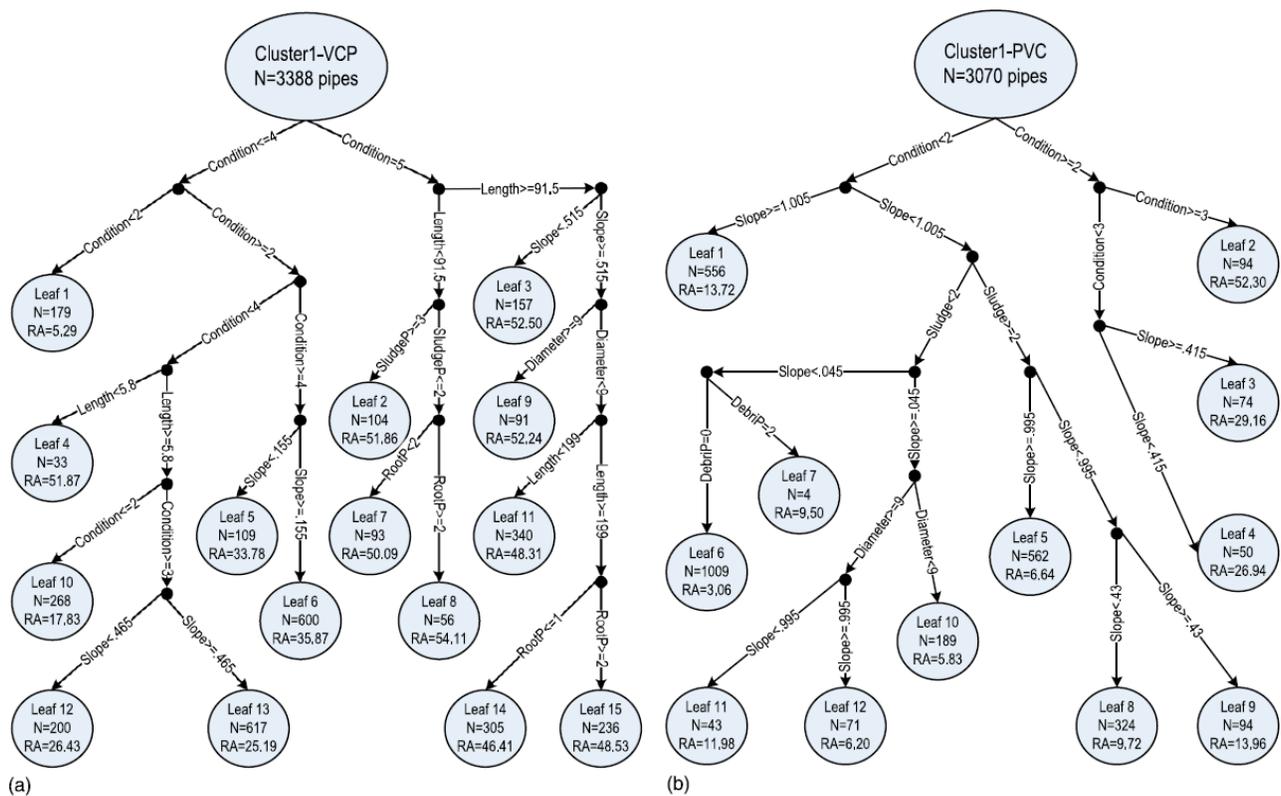


Figura 3.4-9. Resultados modelo árbol de decisión (Fuente: Syachrani, 2013).

Al analizar el grupo “Cluster 1 – VCP” se ve cómo la primera división por ende la variable con mayor probabilidad es para una condición mala de 5 y menor o igual a 4, indicando que el estado de dicho grupo es delicado. Continuando en el mismo grupo, observando la Hoja 2, esta indica que ninguna otra variable presente en las 104 tuberías está por encima de los límites pre-establecidos. Por ende la rama con la variable problema de sedimentos (sludge problema) ≥ 3 se convierte en una Hoja. La representación gráfica del árbol hace fácil rastrear su historia de clasificación para cada hoja, por ello retomando la Hoja 12 para brindar una información más completa, esto es que consiste de 104 tuberías con una condición=5, longitud<27.9m y problemas de sedimentos ≥ 3 ; con un valor predictivo para todo el grupo de 51.86 años de Leaf de edad real.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

De los datos de entrada proporcionados, el 50% fueron ocupados para el desarrollo del modelo y el restante para la validación del mismo, esto por medio del Error Cuadrático Medio o ASE por sus siglas en inglés. El autor decidió realizar esto con el fin de comparar el modelo de árbol de decisión expuesto, con uno de Regresión y de Redes Neuronales, utilizando exactamente los mismos datos de entrada. Para medir el desempeño de los modelos se utiliza el parámetro ya mencionado de ASE, donde un valor pequeño de este indicará cual modelo está representando de mejor manera la realidad.

Los resultados de la evaluación mencionada se muestran en la Tabla 3.4-10 y Figura 3.4-10, en las cuales se aprecia un mejor desempeño del modelo de árbol de decisión, con valores de Error Cuadrático Medio menores.

Tabla 3.4-10. Comparación de modelos mediante ASE (Fuente: Syachrani, 2013).

	Regression model		Neural network model		Decision tree model	
	Training	Validation	Training	Validation	Training	Validation
Cluster1-VCP						
Number of observations	3,388	3,388	3,388	3,388	3,388	3,388
Average squared error	53.38	54.02	41.11	41.53	31.37	29.45
Maximum absolute error	50.80	50.80	36.43	36.43	40.95	41.95
Root average squared error	7.30	7.35	6.41	6.44	5.60	5.43
Cluster1-PVC						
Number of observations	3,071	3,071	3,071	3,071	3,071	3,071
Average squared error	18.19	19.34	16.28	17.34	11.94	13.17
Maximum absolute error	45.16	50.39	44.84	49.07	41.98	44.36
Root average squared error	4.26	4.40	4.06	4.16	3.46	3.63

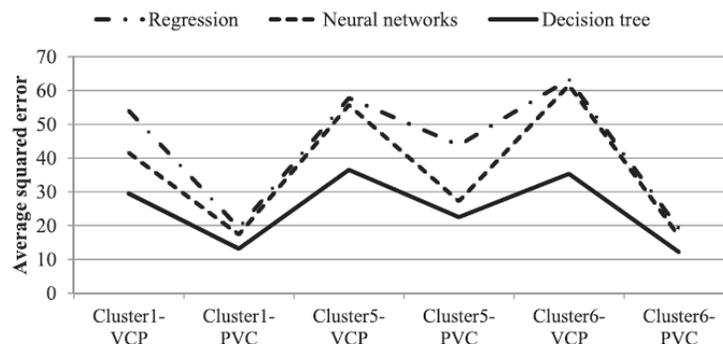


Figura 3.4-10. Representación de ASE para los tres modelos (Fuente: Syachrani, 2013).

Finalmente los autores recomiendan que con el cálculo de la edad real y la edad de vida útil dada por el fabricante o análisis propio, es posible determinar la edad restante de la tubería con una simple resta. Dicha edad sería de gran ayuda para priorizar proyectos de rehabilitación así como su financiación oportuna. Además recomiendan que dicho modelo sea para redes medianas a

pequeñas que cuenten con la información necesaria, ya que el proceso de “clustering” el cual agrupa las tuberías de acuerdo con sus características es de vital importancia para el desempeño del modelo. De esa manera se obtendrán árboles más compactos y sencillos de interpretar, reduciendo la heterogeneidad de la base de datos.

3.4.3.2 Priorización para Inspecciones

La metodología propuesta por Harvey (2015) parte del hecho que un gran número de municipalidades no cuentan con el presupuesto ni el tiempo requerido para realizar grandes planes de inspección de circuito cerrado de televisión (CCTV). Como consecuencia de lo anterior, tales municipalidades desconocen el estado real de la red de alcantarillado, lo cual les hace incapaces de predecir una falla futura en la red. Ante esta problemática se plantea un modelo predictivo, que sea capaz de aprender de inspecciones pasadas, para conocer el estado futuro de las tuberías que componen la red de alcantarillado.

En términos generales el modelo de árbol de decisión consiste en predecir la condición de una tubería, partiendo de una base de datos (inspecciones pasadas) de manera que una estructura tipo árbol ilustre las relaciones existentes entre datos de entrada predictores y una condición objetivo.

DESCRIPCIÓN DE LOS ÁRBOLES DE DECISIÓN

Al ser una herramienta de clasificación gráfica, los árboles de decisión inician en el nodo superior, llamado rama, en el cual se encuentran todas las observaciones, contenida en una gran base de datos. Desde allí inicia el proceso de clasificación, se divide en nodos internos, que representan una prueba a unos datos de entrada y los ramales a su vez son las respuestas a estas pruebas. Dependiendo de los atributos de cada tubería esta irá bajando por los ramales hasta que sea clasificada. La base de datos con la que debe contar el modelo, son las características específicas de las tuberías, que pueden ser obtenidas de inventarios de la empresa de alcantarillado que se encuentran representados a través de Sistemas Georreferenciados; mientras que el objetivo de la clasificación es la calificación de su condición, asignada a cada tubería (Harvey, 2015).

Para simplificar la clasificación y el desbalance que pueda existir al tener 5 distintas calificaciones del estado de tuberías (donde 1 equivale a un estado bueno y 5 a crítico), el autor decide para dicha metodología dividirla en un formato binario de tuberías en buen estado y en estado pobre. Esto se realiza principalmente para mejorar la habilidad del modelo en identificar las tuberías en mal estado. Al definir esto, el siguiente paso del modelo es calibrarlo, con especial cuidado en reducir al máximo la tasa de los “falsos negativos” que son las tuberías que se encuentran en estado pobre pero han sido incorrectamente predichas como buenas.

La metodología adoptada para la construcción de los árboles de decisión es la denominada CART por sus siglas en inglés, que significa árbol de clasificación y regresión. En primera instancia las

tuberías son colocadas en grupos pequeños homogéneos; posteriormente la metodología CART genera un algoritmo capaz de evaluar todas las potenciales divisiones y encuentra aquella que brinde la menor cantidad de aleatoriedad. El proceso de evaluación continúa, con cada grupo nuevo generado, hasta llegar a uno lo suficientemente homogéneo que permita estimar su condición, como ya se mencionó anteriormente, un estado bueno o crítico.+ (Harvey, 2015).

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

Para comprender de manera eficiente el funcionamiento de la metodología Cart, se expone a continuación su aplicación en la ciudad Guelph, Canadá. La ciudad cuenta con las características óptimas sugeridas por el modelo, al contar con una población de 120.000 habitantes con una red de alcantarillado de 515 km de longitud, de las cuales solo 221 km han sido inspeccionados (Harvey, 2015).

Los resultados se presentan gráficamente, como observamos en la Figura 3.4-11.

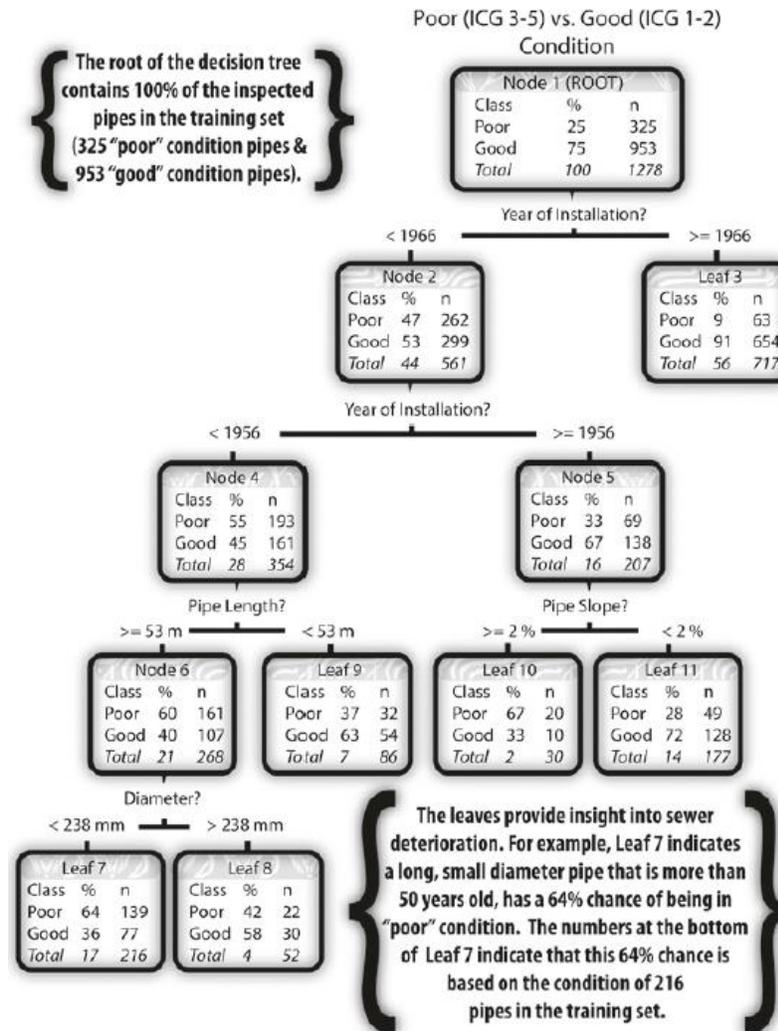


Figura 3.4-11. Resultados Árbol de Decisión (Fuente: Harvey, 2015)

En la figura se puede observar los distintos grupos de clasificación según sus características, representadas, por las denominadas hojas. Por ejemplo la "Hoja 7" indica que una tubería larga mayor o igual a 53 metros, de diámetro pequeño de 238 mm, de 50 años de edad tiene un 64% de posibilidades de estar en una condición pobre, basándose en la condición de 216 tuberías pertenecientes a ese grupo. Otro factor a analizar de la figura es el hecho que tuberías instaladas entre los años 1956 y 1966, que tienen una pendiente mayor al 2% tienen un 67% de probabilidad de estar en un estado pobre, que es mucho mayor si se comparan con tuberías similares pero con una pendiente menor al 2%; esto se debe a que tuberías con pendiente mayor tienden a tener un deterioro mayor ya que el flujo llega con mayor velocidad, causando mayor erosión en la superficie interna de la tubería.

Pero además de estos resultados, el autor decide mejorarlos analizando la tasa de precisión de las predicciones y las tasas de falsos positivos y negativos. Para ello el autor puede variar ligeramente la precisión que están obteniendo para bajar las tasas de falsos negativos (tubería en condición real pobre pero predichas como buena), que como se mencionó anteriormente es la tasa que debe tener principal consideración. Para ello se presentan a continuación en la Tabla 3.4-11 las calibraciones realizadas para bajar la tasa de falsos negativos, a pesar que esto cause una baja en la precisión del resto de predicciones.

Tabla 3.4-11 Tasa de Desempeño y de Falsos Negativos (Fuente: Harvey, 2015).

		Predicted condition	
		Poor (ICG 3–5)	Good (ICG 1–2)
Actual condition	Poor (ICG 3–5)	48	44
	Good (ICG 1–2)	33	239

$$\text{Accuracy} = (48 + 239)/(48 + 44 + 33 + 239) = (287)/(364) = 0.79$$

$$\text{True positive rate} = (48)/(48 + 44) = (48)/(92) = 0.52 \text{ (correctly classified poor pipe)}$$

$$\text{False positive rate} = (33)/(33 + 239) = (33)/(272) = 0.12 \text{ (incorrectly classified good pipe)}$$

$$\text{True negative rate} = (239)/(33 + 239) = (239)/(272) = 0.88 \text{ (correctly classified good pipe)}$$

$$\text{False negative rate} = (44)/(48 + 44) = (44)/(92) = 0.48 \text{ (incorrectly classified poor pipe)}$$

$$\text{Area under the ROC curve} = 0.77$$

		Predicted condition	
		Poor (ICG 3–5)	Good (ICG 1–2)
Actual condition	Poor (ICG 3–5)	73	19
	Good (ICG 1–2)	97	175

$$\text{Accuracy} = (73 + 175)/(73 + 19 + 97 + 175) = 0.68$$

$$\text{True positive rate} = (73)/(73 + 19) = (73)/(92) = 0.79 \text{ (correctly classified poor pipe)}$$

$$\text{False positive rate} = (97)/(97 + 175) = (97)/(272) = 0.36 \text{ (incorrectly classified good pipe)}$$

$$\text{True negative rate} = (175)/(97 + 175) = (175)/(272) = 0.74 \text{ (correctly classified good pipe)}$$

$$\text{False negative rate} = (19)/(73 + 19) = (19)/(92) = 0.21 \text{ (incorrectly classified poor pipe)}$$

$$\text{Area under the ROC curve} = 0.77$$

Como se observa en la Tabla 3.4-11 a pesar de que en un principio se contó con una precisión del 79%, la tasa de falsos negativos era muy alta, del 48%. Hecho que alertó al autor para optar por una disminución en la precisión al 68%, para reducir drásticamente la tasa de falsos negativos a un 21%.

Con los resultados descritos anteriormente la municipalidad de Guelph puede generar varios planes de trabajo, por ejemplo los atributos únicos de las tuberías NO inspeccionadas, pueden ser usados en la metodología para predecir la probabilidad de tuberías en estado pobre y con ello identificar cuáles deben ser inspeccionadas con mayor urgencia.

Sin embargo, la municipalidad no puede contar con el tiempo o presupuesto para examinar todas las tuberías en estado pobre que indica el modelo. Para ello una alternativa es seleccionar o focalizar

un grupo menor de tuberías que sea más manejable. Por ello la ciudad de Guelph con los resultados dados del modelo, focalizó las tuberías en mal estado que se encuentran próximas a infraestructura deteriorada del municipio, como son los alcantarillados pluviales cuyo caudal podría estar filtrándose con aguas sanitarias. Finalmente se desarrolló un plan de rehabilitación prioritario donde se rehabilitarán primero a las tuberías sanitarias que estén junto a tuberías pluviales, que a su vez se encuentran en estado pobre, esto con el fin de frenar posibles vertimientos de aguas lluvia mezclada con aguas sanitarias a ríos o algún otro cuerpo receptor.

3.4.4 Modelo de supervivencia de tuberías

Este tipo de modelo es de carácter estadístico, usado para predecir el deterioro de tuberías de alcantarillado. En la investigación realizada por Duchesne (2012) se propone un modelo de supervivencia en el cual se especifique la proporción de tuberías en un estado en particular como una función de su edad, ya sea para todo el sistema o para grupos de tuberías que compartan características similares. Este modelo se basa en el análisis de funciones de densidad de probabilidad (PDF) para el tiempo en el cual una tubería permanece en cada estado de deterioro.

El modelo propuesto por Duchesne destaca por tres factores primordiales:

- a) Con la calibración del modelo propuesta, se supera la limitación de no conocer el *momento específico* en el cual una tubería analizada ingreso al estado en el cual se encuentra actualmente (al momento de la inspección).
- b) Se analiza como las tuberías pueden ser agrupadas en cohortes para configurar de mejor manera al modelo y así representar al estado global de una red. Además se alerta que no se puede desarrollar un modelo con un cohorte, si es que este no cuenta con el suficiente número de tuberías para establecer una relación estadística considerable entre edad y deterioro.
- c) Se analiza cómo afecta el número de observaciones o inspecciones en los resultados del modelo y si es que este solo es recomendado para cierto tipo de ciudades.

DESARROLLO DEL MODELO

El modelo se basa en principios de análisis de supervivencia; representa el tiempo en el cual una tubería permanece en cada estado de deterioro, como una variable aleatoria. Se supone que las tuberías están evaluadas de 0 a 3, de acuerdo con su estado estructural realizado por inspecciones de CCTV. El estado de 0 representa que la tubería no presenta ningún defecto estructural considerable, mientras que un estado 3 indica que una inmediata intervención es requerida. Con ello el modelo simula el tiempo de permanencia en cada estado antes mencionado; esto lo hace considerando dicho tiempo como una variable aleatoria con una función de densidad de probabilidad y que la función de supervivencia da la probabilidad que una tubería permanezca un tiempo mayor a “t” en un estado “i”. Las ecuaciones del modelo pueden ser utilizadas con cualquier

Función de Densidad de Probabilidad, por lo cual se emplean la distribuciones: Exponencial y Weibull. De las ecuaciones antes mencionadas una serie de parámetros deben ser calibrados mediante un proceso detallado de calibración que toma en cuenta el tiempo de ocurrencia de cambios de estados antes de la inspección así como futuros.

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

El modelo anteriormente descrito fue implementado en la ciudad de Quebec, Canadá, ciudad que cuenta con 5,333 km de tuberías entre sanitaria, pluvial y en menor proporción combinada (676 km). La ciudad ha realizado inspecciones de CCTV por más de diez años con lo que puede evaluar el estado de las tuberías según normas canadienses de 0 a 5. Para el estudio se tomaron 15,122 tuberías para la calibración (936 km) y para la simulación 4,368 km de tuberías.

Posteriormente se procede a la agrupación de tuberías en cohortes según sus características; se seleccionaron varios casos para determinar cuál brinda mejores resultados. La mayor dificultad fue encontrar cohortes que contengan suficientes tuberías para establecer una relación estadística entre su edad y condición estructural. Cabe resaltar que la ciudad de Quebec cuenta con un nivel de detalle mínimo en sus inspecciones, razón por la cual los cohortes no cuentan con mayor detalle como se observa en la Tabla 3.4-12.

Tabla 3.4-12. Agrupación en Cohortes de las tuberías inspeccionadas (Fuente: Duchesne, 2012).
 Description of the analyzed cohort definition methods

Case	Cohorts	Calibration	Simulation
A	Single cohort:	All inspected pipes ($n = 15,122$)	All pipes of the network ($n = 164,582$)
B	Cohort #1:	All inspected wastewater pipes ($n = 12,372$)	All wastewater pipes of the network ($n = 56,860$)
	Cohort #2:	All inspected combined and stormwater pipes ($n = 2,744$)	All combined and stormwater pipes of the network ($n = 106,944$)
C	Cohort #1:	Inspected reinforced concrete wastewater pipes ($n = 9,526$)	All reinforced concrete wastewater pipes in network ($n = 15,089$)
	Cohort #2:	Inspected reinforced concrete combined and stormwater pipes ($n = 2,093$)	All reinforced concrete combined and stormwater pipes in network ($n = 8,571$)
	Cohort #3:	Inspected nonreinforced concrete wastewater pipes ($n = 507$)	All nonreinforced concrete wastewater pipes in network ($n = 922$)
	Cohort #4:	Inspected asbestos cement wastewater pipes ($n = 658$)	All asbestos cement wastewater pipes in network ($n = 1,255$)
	Cohort #5:	Inspected vitrified clay combined and stormwater pipes ($n = 342$)	All vitrified clay combined and stormwater pipes in network ($n = 2,771$)
	Cohort #6:	Inspected PVC wastewater pipes ($n = 1,411$)	All PVC wastewater pipes in network ($n = 7,824$)
	Cohort #7:	Cohort #1 of Case B	All wastewater pipes not included in other cohorts ($n = 31,770$)
	Cohort #8:	Cohort #2 of Case B	All combined and stormwater pipes not in other cohorts ($n = 95,602$)
D	6 Cohorts:	As in Case C, but without Cohorts #7 and #8 ($n = 9,526; 2,093; 507; 658; 342; \text{ and } 1,411$)	As in Case C, but without Cohorts #7 and #8 ($n = 15,089; 8,571; 922; 1,255; 2,771; \text{ and } 7,824$)
E	Cohort #1:	As in Case B (all inspected wastewater pipes, $n = 12,372$)	All pipes in the network included in simulation Cohorts #1, #3, #4, and #6 of Case C ($n = 25,090$)
	Cohort #2:	As in Case B (all inspected combined and stormwater pipes, $n = 2,744$)	All pipes in the network included in simulation Cohorts #2 and #5 of Case C ($n = 11,342$)

El primer caso A, es el más simple; consiste en calibrar un solo modelo utilizando todas las tuberías inspeccionadas y aplicar los parámetros hallados para todas las tuberías de la red inspeccionadas. En el caso B, dos modelos distintos son aplicados, uno para tuberías sanitarias y otro para combinadas. El tercero, C es el más detallado consiste en 8 cohortes por tipo de material, 4 cohortes para tuberías de agua sanitaria hechas de: concreto reforzado, concreto, cemento y PVC; 2 cohortes para tuberías de aguas combinadas y pluviales hechas de concreto reforzado y cerámica vitrificada respectivamente; y los dos últimos incluyen tuberías que no pudieron ser integradas en los otros grupos ya sea porque son de un material del que no hay suficientes tuberías. Cabe resaltar que los últimos grupos contienen un número menor de tuberías ya que son de las cuales se tiene certeza su material, a diferencia de los otros grupos, esto con el fin de comprender si tal incertidumbre afecta mayormente a los resultados.

De los resultados mostrados a continuación en la Figura 3.4-12, lo primero que se observa es que los casos B y C tienen resultados similares ya sea para el estado en el que se lo analice. Esto indica que para determinar un estado general de la estructura de las tuberías, dividir las por tipo de material y tipo de efluente no varía significativamente en la evaluación de la red, esto comparándola a simplemente dividir con tipo de efluente. Pero por otro lado no realizar ninguna agrupación y simular toda la red sin ningún tipo de distinción, genera una sobre estimación de la proporción de

tuberías que se encuentran en buen estado (corresponde a un estado 0). Por lo cual una agrupación del tipo B es la más apropiada para una ciudad con las características de Quebec, no solo por los buenos resultados que obtiene, sino también por el tiempo y recursos que significa menores tiempos computacionales como esfuerzos en la división de cohortes.

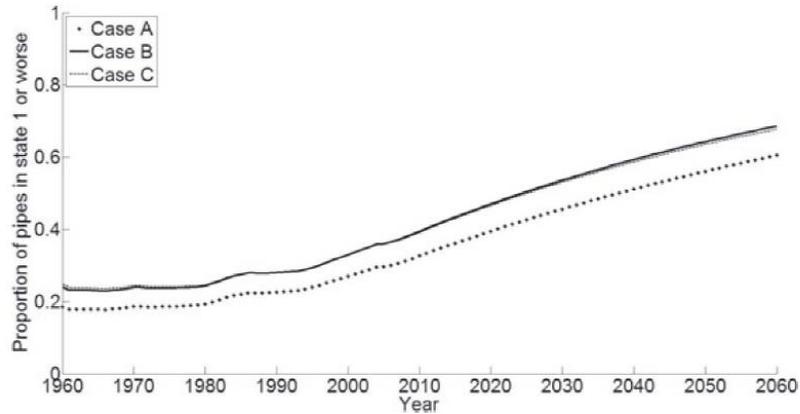


Figura 3.4-12a. Simulación para un estado 1 o peor, para tres casos (Fuente: Duchesne, 2012).

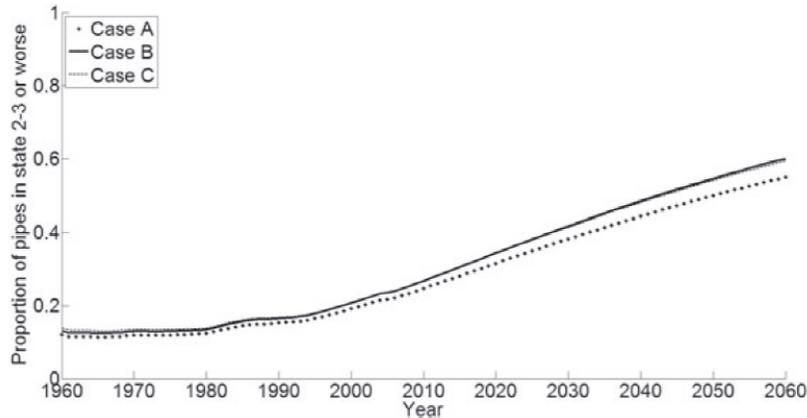


Figura 3.4-12b. Simulación para un estado 2-3 o peor, para tres casos (Fuente: Duchesne, 2012).

Tabla 3.4-13. Resultados de los 5 casos presentados en resultados (Fuente: Duchesne, 2012).

	Type of cohorts	Total number of pipes	State 0	State 1	State 2 or 3	State 4 or 5
Case A	Global	164,582	52.7%	7.2%	31.4%	8.7%
Case B	Wastewater vs. combined	163,804	44.6%	11.6%	32.8%	11.0%
Case C	Detailed	163,804	45.2%	11.3%	32.3%	11.2%
Case D	Detailed	36,432	52.8%	6.7%	29.7%	10.8%
Case E	Wastewater vs. combined	36,432	50.3%	7.9%	31.8%	10.0%

Finalmente el estudio demuestra que para un número menor de observaciones continuando arrojando resultados deseables. Para ello realizan simulaciones con 250, 500, 1000, 2000 y 4000 observaciones y las repite mil veces para comprobar que en todas las repeticiones los resultados

sean similares, además de calcular la raíz cuadrada del error cuadrático medio que deben ser valores cercanos a cero.

Como se aprecia en la Figura 3.4-13 al correr la simulación con 500 observaciones y repitiéndola 1000 veces los resultados confluyen en un rango aceptable. Misma situación se ve en la Tabla 3.4-14 donde los valores de la raíz cuadrada del error cuadrático medio son muy cercanos a 0 y conforme aumentan el número de observaciones este valor mejora acercándose aún más a cero. Con lo dicho la autora recomienda dicho modelo para ciudades pequeñas a pesar que no cuenten con un número de inspecciones como las de Quebec.

Tabla 3.4-14. Resultados de la raíz del error cuadrático medio (Fuente: Duchesne, 2012).

	$n_s = 250$	$n_s = 500$	$n_s = 1,000$	$n_s = 2,000$	$n_s = 4,000$
Weibull model					
$S_0(t)$	0.0457	0.0401	0.0368	0.0357	0.0380
Exponential model					
$S_0(t)$	0.0449	0.0416	0.0401	0.0398	0.0417
$S_{01}(t)$	0.0458	0.0420	0.0410	0.0405	0.0416
$S_{012}(t)$	0.0126	0.0114	0.0107	0.0106	0.0112

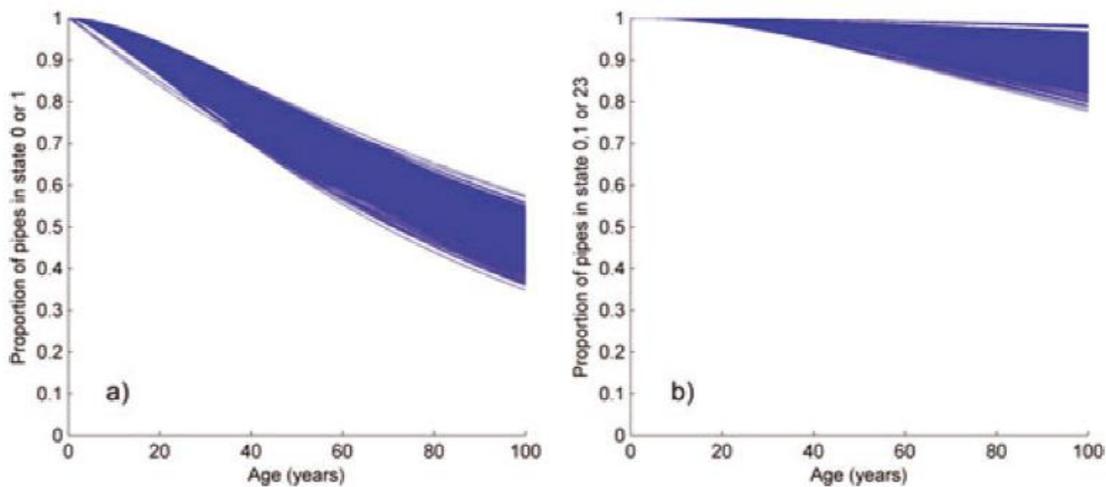


Figura 3.4-13. Representación gráfica de 1000 repeticiones para 500 observaciones (Fuente: Duchesne, 2012).

3.5 Inteligencia Artificial

3.5.1 Vectores Soporte (Support Vector Machines)

Esta metodología es del tipo de inteligencia artificial y se concentra en el estudio realizado por Mashford (2011). Este tipo de modelos poseen ciertas ventajas sobre modelos estadísticos tradicionales; primero no necesitan información específica de la condición interna de la tubería

requiere de un set de calibración más pequeño a comparación de otros modelos, como redes neuronales, por ejemplo.

Este modelo establece la pregunta: ¿Si dado un conjunto de atributos de una tubería es suficiente para determinar su estado funcional u operacional? Para ello, uno puede *tomar unas características de la tubería y examinar a todo el alcantarillado con esas características; si la mayoría de las tuberías con dichas características tienen la misma o similar condición (calificación generalmente de 1 a 5), entonces una relación funcional puede ser establecida* (Mashford, 2011).

No obstante, en la práctica, con la escasez de información en las distintas municipalidades tanto en inventarios como en inspecciones de la red, dificultan la aplicación de modelos estadísticos tradicionales (Regresiones, Cadenas de Markov, etc). Por ello técnicas de inteligencia artificial como la planteada por Mashford, tratan de tomar el problema mediante otro enfoque para predecir el estado de una red con información limitada.

DESCRIPCIÓN DE LOS VECTORES DE SOPORTE

Similar y relacionado con modelos de redes neuronales, los vectores soporte hacen parte de la teoría de aprendizaje estadística, que puede ser utilizada para tareas de regresión y clasificación. El objetivo principal de los vectores soporte es encontrar una forma funcional adecuada que mejor describa la relación desconocida entre un número de variables independientes con una variable dependiente.

La gran diferencia de esta metodología respecto a otras estadísticas tradicionales es su capacidad de aprendizaje; “(...) Este proceso de aprendizaje es generalmente guiado considerando una base de datos finita de ejemplos y la mejor función es aquella que minimiza el riesgo, el cual es la pérdida esperada incurrida al utilizar cualquier función de predicción (...)” (Mashford, 2011).

CASO DE ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

El caso de estudio para la aplicación de la metodología de vectores de soporte, es la ciudad de Adelaide en Australia. Dicha ciudad cuenta con 1.1 millón de habitantes; los rangos de diámetros que se encuentran en la red varían de 150 mm a 2,250 mm, de estos los materiales predominantes son el PVC, Cerámica vitrificada, distintos tipos de concreto y acero en menor porcentaje. La ciudad se embarcó en un plan maestro de inspección de tuberías de 7 años para conocer el estado real de su red; esto se logró gracias a inspecciones de CCTV donde se determinó la condición de la red desde tuberías en estado 1 (bueno) a 5 (crítico) (Mashford, 2011).

La Información que fue utilizada para la implementación del modelo se presenta en la Tabla 3.5-1, como se puede apreciar se indica según el tipo de material el número de tuberías que se encuentran en los distintos estados.

Tabla 3.5-1 Distribución tuberías según material y su condición (Fuente: Mashford, 2011).

Material	Condition grade					Total
	1	2	3	4	5	
RC	0	22	424	135	137	716
CONC	0	0	148	54	49	251
RCRJ	0	3	271	66	34	371
VC	103	0	0	0	0	103
Total	103	25	843	255	220	1,441

Note: CONC is concrete; RC is reinforced concrete; RCRJ is reinforced concrete with rubber joint; VC is vitrified clay.

Una vez con esta información el objetivo del modelo es estimar y clasificar el estado de tuberías que no han sido inspeccionadas. Para ello el primer paso que desarrollan los autores es seleccionar los atributos de las tuberías que serán analizados para el modelo. Ya que la ciudad cuenta con una gran información de los atributos de las tuberías, se decide desarrollar 4 distintos modelos, donde cada uno de ellos toma distintos datos de entrada. Los atributos de las tuberías tomadas como datos de entrada para cada modelo se los describe a continuación:

- ✚ Modelo I: Diámetro, edad de la tubería (desde la instalación), tipo de vía en la que fue colocada, pendiente, elevación de batea al inicio del tramo, elevación de batea al final del tramo y material de la tubería.
- ✚ Modelo II: Los atributos del Modelo I más: Corrosividad del suelo y presencia de sulfatos en el suelo y aguas subterránea. Ambas expresadas en un rango de 1 a 5.
- ✚ Modelo III: Los atributos del Modelo I más: Δ Grado y Δ Ángulo. Ambos parámetros para estimar cambios en la dirección de la tubería
- ✚ Modelo IV: Todos los atributos. (Ver Tabla 3.5-2) (Mashford, 2011).

Tabla 3.5-2. Características de las tuberías usadas para el modelo (Fuente: Mashford, 2011).

Attribute	Description
Diameter	Nominal internal diameter of the sewer main (mm)
Time laid	The time the sewer was laid based on gazettal year, month, and day
Road	Binary flag to indicate sewers located under roads (1/0)
Grade	Slope of the sewer main (m/100 m)
Start invert	Invert elevation at the start (upstream end) of the sewer main (<i>m</i>)
End invert	Invert elevation at the end (downstream end) of the sewer main (<i>m</i>)
Material	Construction material
Δ Grade	Change of grade at the upstream manhole or maintenance shaft
Δ Angle	Maximum change of direction through the upstream manhole
Soil corrosivity	Corrosion potential for surrounding soil type (1 to 5)
Sulfate soil/ groundwater	Categorical indicator of risk of the combination of acidic soil and sewer below groundwater depth (1 to 5)

Una vez con los datos de entrada, se desarrolla el modelo, tanto en su calibración como en su puesta en marcha. Cabe destacar los parámetros para medir el desempeño del mismo, que son:

- Tasa de desempeño Global (OSR): Tasa de clasificación correcta, varía de 0 a 1. Donde 1 es un desempeño perfecto
- Tasa de clasificación Errónea (MC_j): Es la proporción de resultados clasificados incorrectamente.
- Bondad de Ajuste (X²): Qué tan cerca está el modelo de la clasificación perfecta
- Prueba de Acuerdo (K): Varía de un intervalo de -1 a 1. Donde 1 representa acuerdo perfecto, 0 no hay acuerdo y -1 total desacuerdo

Para los parámetros de desempeño antes mencionados se los encontró mediante la matriz de confusión, la cual indica una directa y detallada representación del desempeño del modelo. Todos los parámetros mencionados son derivados de esta matriz de confusión (Mashford, 2011).

Una vez con los parámetros de desempeño establecidos para poder corroborar la utilidad o no del modelo, se presentan los resultados en las tablas a continuación:

Tabla 3.5-3 Resultados del Modelo (Fuente: Mashford, 2011).

Model	Data set	OSR	MC_j (%)					χ^{2a}	κ
			1	2	3	4	5		
I	Train and test	0.96	0	0	2.4	8.8	10.6	0.62	0.92
I	Test	0.91	0	0	5.6	20.7	25.6	1.63	0.82
II	Test	0.82	0	0	4.8	47	47.5	— ^b	0.66
III	Test	0.86	0	0	6.7	35.3	27.5	— ^b	0.72
IV	Test	0.73	0	100	8.3	70	77.1	— ^b	0.48

^aCritical value of χ^2 is 0.71 at a 95% confidence level and 4 degrees of freedom.

^b χ^2 not defined where $P[1] = 0$.

De los resultados se puede destacar el buen desempeño del Modelo I, que es el que menor número de atributos tomo en cuenta como datos de entrada. El valor de 0.96 de la tasa de desempeño global, así como los valores bajos en la tasa errónea de calificación, demuestran que es el modelo que mejor se desempeña; a pesar que para la condición 5 que es la más crítica y por ende donde menos error se debería permitir tiene un valor de 10.6, pero considerablemente menor si se compara con el resto de modelos.

Ya que el Modelo I fue el de mejor desempeño, el autor decide realizar un análisis factorial de dicho modelo, dónde lo que se hace es partir el modelo en grupos de acuerdo con su material. Esto con propósito de presentar los resultados de manera más detallada, como se muestra en la Tabla 3.5-4 a continuación.

Tabla 3.5-4 Resultados del Modelo (Fuente: Mashford, 2011).

Material	OSR	MC_j (%)					χ^{2a}	κ
		1	2	3	4	5		
RC	0.938	0	0	3.9	11.9	9.2	— ^b	0.89
Concrete	0.980	0	0	0.5	0	21.1	— ^b	0.94
RCRJ	0.978	0	0	1.3	6.7	9.1	— ^b	0.93
VC	1.00	0	0	0	0	0	— ^b	—

^aCritical value of χ^2 is 0.71 at a 95% confidence level and 4 degrees of freedom.

^b χ^2 not defined where $P[1] = 0$.

De los resultados según material, se observa que la tasa de desempeño global es similar y considerablemente buena, pero con algunas observaciones. Si bien para cerámica vitrificada (VC) se obtiene un valor perfecto, esto es por lo que en la inspecciones las tuberías de este tipo no se encontraban en estado 3-4-5, que es el estado más crítico donde existen mayores variaciones. Por otro lado si bien las tuberías de concreto obtienen un desempeño global alto, su tasa de calificación errónea para el estado 5 es considerablemente alta del 21%. Todo esto indica que a pesar del buen desempeño de un modelo, siempre existirá un porcentaje de incertidumbre de error, pero además que cada tipo de material se comporta distinto; por ello se podría considerar un modelo diferente para cada material, lo que sin duda es un reto.

Si bien los resultados encontrados pueden ser considerados como buenos el autor señala unas recomendaciones muy valiosas para este tipo de metodologías. Primero, trabajar previamente con algoritmos de clasificación y depuración de datos de entrada (atributos de tuberías) que mejoren el desempeño y precisión del modelo. Además si se tiene una gran base de datos, como lo ocurrido

en Adelaide, si estos no son precisos, a pesar de utilizar una gran cantidad de datos de entrada la precisión y desempeño del modelo no mejora; por ello es necesario utilizar una base de datos extensa, pero también precisa sin datos faltantes o incompletos, que sean influyentes directos de la tubería y su deterioro (Mashford, 2011).

3.5.2 Redes Neuronales

3.5.2.1 Predictivas

Ante las crecientes demandas ambientales alrededor del mundo, la mentalidad en el manejo de alcantarillados ha evolucionado para mejorar sustancialmente su mantenimiento y operación. Ante ello se han usado generalmente modelos estadísticos, pero las presiones ambientales y sociales han sido tan grandes que han generado la necesidad de crear modelos cada vez más confiables que se acercan más a la realidad de la red. Ante la necesidad antes mencionada, el autor Vitor Sousa (2014) desarrolló un modelo basado en redes neuronales para predecir el estado futuro de una red de alcantarillado en Portugal; pero además compara los resultados obtenidos con un modelo tradicional estadístico de regresiones y con otro de inteligencia artificial, como son los vectores de soporte. Lo que pretende el autor con dicha comparación es demostrar que para una misma ciudad con la misma información suministrada, modelos con redes neuronales pueden brindar mejores resultados.

ANTECEDENTES

Para entender de mejor manera lo propuesto por Sousa (2014), es necesario identificar las limitaciones mencionadas de los modelos tradicionales estadísticos y sus distintos tipos. Para iniciar, los modelos estadísticos tradicionales, *requieren un conocimiento previo de la función o estructura que mejor represente las características de las tuberías (diámetro, material, edad) y su influencia en su desempeño*. Esto a decir de Sousa es un gran limitante, porque los efectos e interacciones entre las características de la tubería y cómo se relacionan con el desempeño de la red, en primero lugar no se conocen y en segundo son muy difíciles de determinar y cambian drásticamente dependiendo de la ciudad. Por ejemplo ¿el diámetro y la edad de la tubería interactúan como una suma, producto o como cual formulación matemática? Consecuentemente en la mayoría de los casos para modelos estadísticos únicamente se toma una de las características de la tubería, usualmente la edad (Sousa, 2014).

Dependiendo del tipo de resultado que brinden los modelos estos pueden ser clasificados en determinísticos o estocásticos. Los determinísticos presentan estimaciones en un formato exacto y absoluto mientras que los estocásticos presentan en cierta forma incertidumbre o variabilidad en cuanto a sus resultados. Ahora con respecto a los modelos predictivos para el estado de alcantarillados, pueden ser clasificados también como empíricos o mecánicos, dónde la mayoría de modelos encontrados en la literatura pertenecen a los primeros (Sousa, 2014).

“(…) Los modelos empíricos utilizan herramientas y métodos estadísticos para obtener una relación entre las variables conocidas y la condición de la red de alcantarillado, basándose en datos históricos. Estos modelos utilizan la premisa que el patrón de deterioro permanecerá igual en el futuro” (Sousa, 2014). Dentro de los modelos empíricos, dos categorías destacan: a) Modelos basados en funciones y b) modelos basados en datos. Si bien es cierto, ambas categorías se basan en ajustar datos observados, para modelos basados en funciones las expresiones matemáticas que relacionan los datos de entrada con los de salida, son predefinidas desde un inicio del modelo. Por ello las operaciones de ajuste de estos modelos buscan determinar los coeficientes de las funciones que minimicen el error entre los valores observados y estimados (…)” (Sousa, 2014).

Por otro lado en los modelos basados en datos no existe ninguna expresión predefinida que relacione los datos de entrada con los de salida. Los modelos de inteligencia artificial son de este tipo y tienen “(…) La habilidad de aprender patrones de procesos subyacentes de datos pasados y generalizar la relación entre datos de entrada y salida, siendo capaces de predecir o estimar una salida dada una nuevo serie de variables de entrada” (Sousa, 2014).

Un resumen de los modelos expuestos y sus respectivas categorizaciones se puede observar en la Tabla 3.5-5 a continuación:

Tabla 3.5-5 Clasificación de Modelos (Fuente Sousa, 2014).

Empirical models used for estimating the condition of sewers.

Category	Class	Type
Function-based	Deterministic	Linear regression Non-linear regression
	Stochastic	Survival function Ordinal regression Markov chains Semi-Markov chains
Data-based	Artificial intelligence	Discriminant analysis Artificial neural networks – ANNs Fuzzy set Case based reasoning – CBR Support vector machines – SVMs
	Genetic programming	Evolutionary polynomial regression – EPR

DESCRIPCIÓN DEL TIPO DE RED NEURONAL UTILIZADA Y CASO DE ESTUDIO

Redes neuronales pueden ser descritas también como un sistema procesador de información que se asemeja al cerebro humano y sus tipos varían desde aquellas con una o dos capas, con una sola dirección lógica hasta complejos sistemas con múltiples entradas y varias direcciones y capas (Sousa, 2014). Dentro de esta variedad de tipos de redes neuronales las que comúnmente se utilizan son: Redes Perceptrón Multicapa (MLP) y Función de Base Radial (RBF). Las redes del tipo MLP son de alimentación directa compuestas de tres o más capas. Este tipo de red es la escogida por el autor para desarrollar el presente estudio.

El autor decidió realizar el estudio en el *Sistema de Sanamiento da Costa Estoril*, que corresponde a las aguas residuales de dos municipalidades que en total suman 800.000 habitantes y por convenio es transportada por un gran interceptor de 24.7 km de longitud que bordea la costa de la zona hasta llegar a la respectiva planta de tratamiento.



Figura 3.5-1. Localización del Estudio (Fuente Sousa, 2014)

Este sistema de saneamiento cuenta con información detallada de los colectores de las dos municipalidades, puesto que son los más propensos a fallar; al momento de la investigación habían sido inspeccionados por tercera vez. Ante esta situación Sousa decide enfocar el estudio en los 25.4 km de colectores que cuentan con información detallada, como se muestra en la Tabla 3.5-6. Si bien de las inspecciones vía CCTV se obtuvo la calificación de su estado en una escala de 1 (bueno) a 5 (peor condición) para simplicidad del estudio y para enfocarse en las tuberías en estado crítico, se adopta una nueva escala donde en un estado 1 están las tuberías en estado bueno (1-2-3) y un estado 2 (4-5) que son tuberías que requieren inmediata intervención.

Tabla 3.5-6 Atributos de las tuberías (Fuente Sousa, 2014).

Material/diameter	Sewers [no.]	Total length [m]	Average age [years]	Average depth [m]	Average slope [%]	Average length [m]
VC (1)	134	4370.50	54.55	2.52	2.14	32.62
200	7	186.13	45.00	2.68	1.32	26.59
250	15	389.41	58.13	2.41	1.09	25.96
300	38	1232.85	49.74	1.98	2.95	32.44
350	69	2484.68	58.17	2.82	1.83	36.01
400	1	42.23	39.00	2.31	1.11	42.23
PC (2)	53	1408.70	29.85	2.47	2.08	26.58
315	1	51.26	30.00	2.73	2.09	51.26
500	52	1357.44	29.85	2.47	2.08	26.10
PVC (3)	348	12682.20	11.53	2.88	1.72	36.44
200	3	80.44	8.00	2.19	7.22	26.81
250	59	2291.46	10.37	2.34	4.14	38.84
315	38	957.03	12.39	2.46	0.90	25.19
400	112	4347.90	11.59	2.98	1.75	38.82
500	73	2868.81	12.26	3.03	0.87	39.30
630	27	1132.64	10.37	3.12	0.81	41.95
700	30	915.38	12.00	3.47	0.53	30.51
800	6	88.54	12.00	3.47	0.34	14.76
HDPE (4)	122	4102.04	9.84	3.53	1.23	33.62
360	38	1206.47	10.00	3.70	0.96	31.75
400	4	111.03	9.75	3.31	1.68	27.76
450	4	217.33	9.00	2.07	1.26	54.33
500	66	2154.48	9.92	3.76	1.50	32.64
600	10	412.73	9.00	2.08	0.27	41.27
C-PP (5)	60	1771.99	9.65	3.02	1.51	29.53
315	26	908.06	9.96	4.42	2.83	34.93
400	4	122.89	12.00	3.23	0.26	30.72
500	29	713.70	9.03	1.72	0.46	24.61
630	1	27.34	10.00	3.40	2.71	27.34
C-PVC (6)	28	1033.74	4.42	3.87	1.24	39.76
350	7	165.00	6.20	2.83	2.71	33.00
400	21	868.74	4.00	4.12	0.89	41.37
Total	745	25369.17	19.92	2.94	1.71	34.14

RESULTADOS

Una vez con los datos de entrada definidos y tipo de red neuronal, se procede a correr el modelo propuesto y además comparar los resultados obtenidos con dos otros modelos; el primero similar de inteligencia artificial como son los vectores de soporte y un estadístico tradicional como es el de regresiones.

En las Tablas 3.5-7 a continuación se puede observar los resultados de los tres modelos, con sus respectivos porcentajes de acierto y de error para predecir los dos estados previamente mencionados.

Tablas 3.5-7 (a), (b) y (c) Resultados del Modelo, Porcentajes de Acierto (Fuente Sousa, 2014).

LR model performance predicting the structural condition of the test sample.

Observed Categories	Predicted (complete)		Correct/incorrect	Predicted (reduced)		Correct/incorrect
	1	2		1	2	
1	68	13	83.9%/16.1%	68	13	83.9%/16.1%
2	33	21	38.9%/61.1%	33	21	38.9%/61.1%
Correct/incorrect	67.3%/32.7%	61.8%/38.3%	65.9%/34.1%	67.3%/32.7%	61.8%/38.3%	65.9%/34.1%

(a) Regresión

ANN model performance predicting the structural condition of the test sample.

Observed Category	Predicted (complete)		Correct/incorrect	Predicted (reduced)		Correct/incorrect
	1	2		1	2	
1	74	16	82.2%/17.8%	80	7	92.0%/8.0%
2	13	32	71.1%/28.9%	27	21	43.8%/56.2%
Correct/incorrect	85.1%/14.9%	66.7%/33.3%	78.5%/21.5%	74.8%/25.2%	75.0%/25.0%	74.8%/25.2%

(b) Redes Neuronales

CMA-ES optimized SVM model performance predicting the structural condition of the test sample.

Observed Category	Predicted (complete)		Correct/incorrect	Predicted (reduced)		Correct/incorrect
	1	2		1	2	
1	65	15	81.2%/18.8%	65	15	81.2%/18.8%
2	22	33	60.0%/40.0%	22	33	60.0%/40.0%
Correct/incorrect	74.7%/25.3%	68.8%/31.3%	72.6%/27.4%	74.7%/25.3%	68.8%/31.3%	72.6%/27.4%

(c) Vectores Soporte (Support Vector Machines)

De los resultados se puede observar que si bien son relativamente similares, las redes neuronales son las que tienen un mayor porcentaje de aciertos. Especialmente se observa el hecho que para la categoría 2 que es la más crítica, redes neuronales tiene un porcentaje de incorrectos del 28.9%, mientras que en los otros modelos (Vectores y Regresiones) supera el 40%. Cabe resaltar que para una municipalidad estimar el estado 2 es el más relevante para concretar planes de rehabilitación inmediata e inspecciones prioritarias.

Por otro lado como limitante concerniente a redes neuronales es el hecho de la variabilidad de los resultados cuando se da la ponderación inicial a las conexiones neuronales; si bien es capaz de lograr mejores resultados, esta sensibilidad debe ser considerada. Por otro lado, los vectores soporte mostraron una menor variabilidad pero un desempeño menor de igual manera, por lo que para una visión conservadora como indica el autor, recomienda vectores soporte.

3.5.2.2 Detección Automática de Defectos

Si bien “Redes Neuronales” en una técnica de vanguardia utilizada para estimar el estado futuro de redes de alcantarillado, años atrás ya ha sido utilizada para el mantenimiento de alcantarillados, pero mucha más vinculada a la inspección automatizada, concretamente a la detección de fallas dentro de tuberías. Ante lo mencionado Chae, Myung, profesor de la Universidad de Purdue en Estados Unidos realizó un estudio visionario para la época respecto a la utilización y el potencial a futuro de redes neuronales.

En el estudio realizado por Chae (2001), se parte del hecho que para la detección de defectos dentro de una alcantarilla se puede realizar bien por inspecciones físicas de expertos, mediante fotografías y la más usada y que domina el mercado inspecciones mediante circuito cerrado de televisión (CCTV). Ahora con respecto a las inspecciones de CCTV, estas dependen de la habilidad y correcta interpretación del técnico a cargo de la inspección; por ello para mejorar la confiabilidad de este tipo de inspecciones se han desarrollado tecnologías para complementarlas, como es el caso de la Escáner de Alcantarillados y Tecnología de Evaluación o SSET (Sewer Scanner and Evaluation Technology) por sus siglas en inglés. Ya que la metodología propuesta por Chae, parte del análisis de imágenes de SSET, a continuación se dará una breve descripción de dicha tecnología.

SSET

La tecnología SSET fue desarrollada en Japón por una empresa tecnológica, básicamente consiste en la complementación de las imágenes de CCTV a través de un escáner óptico y un giroscopio que recorren el alcantarillado conjuntamente con el equipo de CCTV. Lo que dará como resultado una inspección mucho más detallada que incluye el video recopilado de CCTV, una imagen escaneada completa de la circunferencia de la tubería, una imagen computarizada codificada a color de los defectos encontrados y la deflexión horizontal y vertical de la tubería, como se observa en la Figura 3.5-2 a continuación (Chae, 2001).

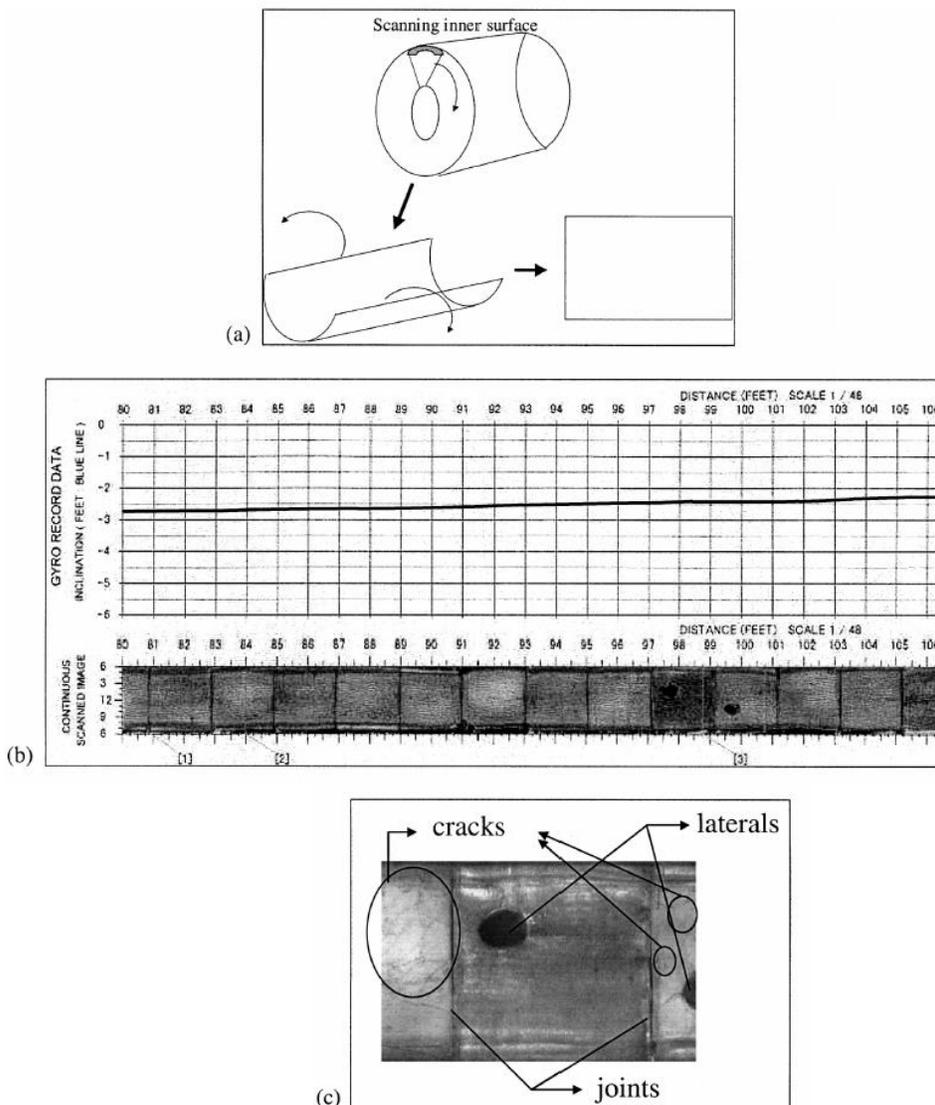


Figura 3.5-2 (Fuente: Chae, 2001).

Una vez que se obtienen estas imágenes inicia el pre-procesamiento de las mismas, que consiste en lograr que sean más visibles a las fallas que puedan existir. Cabe resaltar que este proceso no genera nada nuevo en la imagen, simplemente la hace más visible o fácilmente identificable. Como parte de este pre-procesamiento es transformar la imagen a escala de grises y almacenar dicha información (intensidad de grises) en una matriz. Al realizar esta transformación se pueden ejecutar una serie de algoritmos para la detección defectos, como es la detección de aristas, con lo que se logran detectar grandes contrastes en la imagen (ya transformada a escala de grises) facilitando la detección de algún defecto, como vemos en la figura a continuación (Chae, 2001).

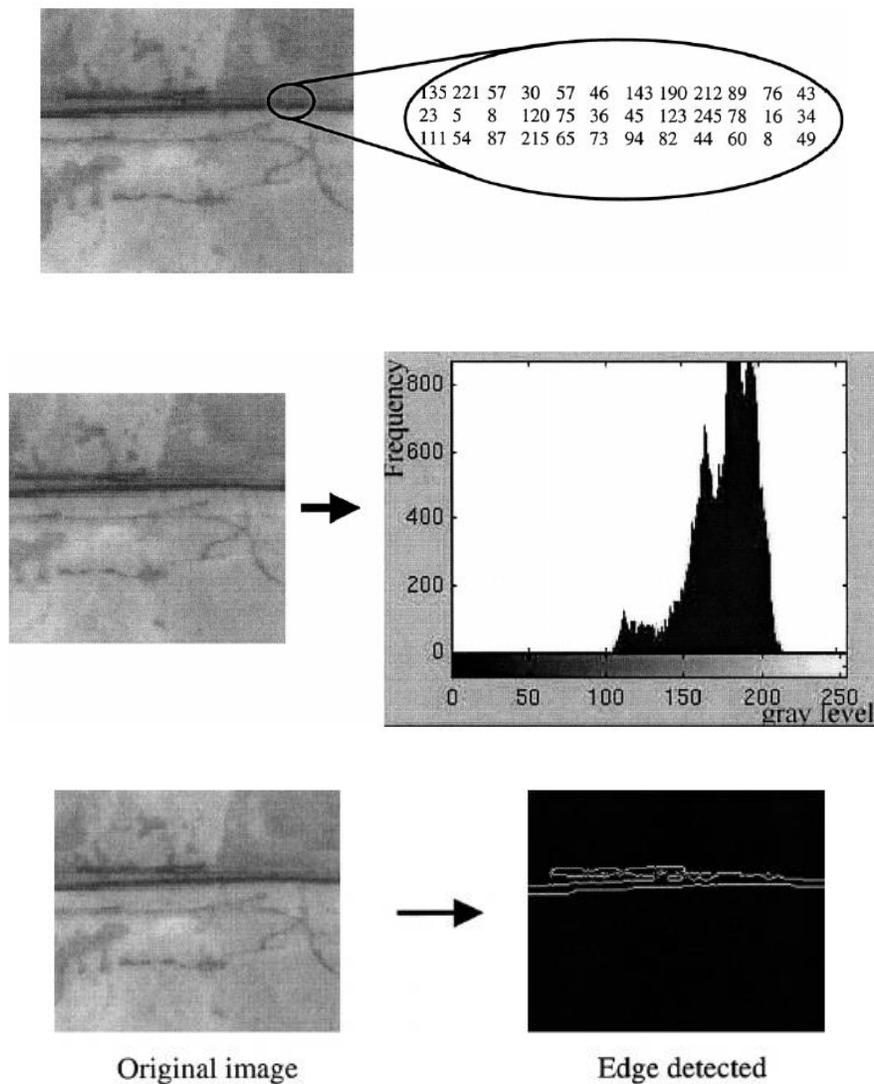


Figura 3.5-3 (Fuente: Chae, 2001).

Si bien este tipo de tecnología parecería ser muy eficiente y es de gran ayuda no deja de depender de la interpretación del técnico a cargo, ni la imagen deja de ser subjetiva dependiendo de distintos

técnicos que la observen. A partir de ello Chae desarrolla un modelo para detección automatizada a través de redes neuronales.

REDES NEURONALES PARA DETECCIONES AUTOMATIZADAS

“(…) Redes neuronales consisten en un gran número de neuronas o unidades procesadoras; cada entrada aplicada a la red es multiplicada por una ponderación. Las entradas ponderadas son sumadas para determinar el nivel de activación de la neurona, estas ponderaciones representan el conocimiento del sistema. El procesamiento de información se lleva a cabo a través de la interacción de estas unidades (…)” (Chae, 2001). Posteriormente la entrada neta es procesada por una función de activación para producir la señal de salida de la neurona. Cuando el primer set de datos de entrada ingresa a la red esta produce una salida muy diferente a la deseada, por ello debe ser calibrada. Existe un logaritmo de calibración que ajusta las ponderaciones en la red para lograr las salidas deseadas; esto se realiza iterativamente para todos los datos hasta que la red produzca sets de salidas cercanos a los deseados. Una vez que la red este calibrada estará en capacidades de simular nuevas salidas con datos nuevos de entrada (Chae, 2001).

El proceso descrito se lo puede visualizar en la Figura 3.5-4:

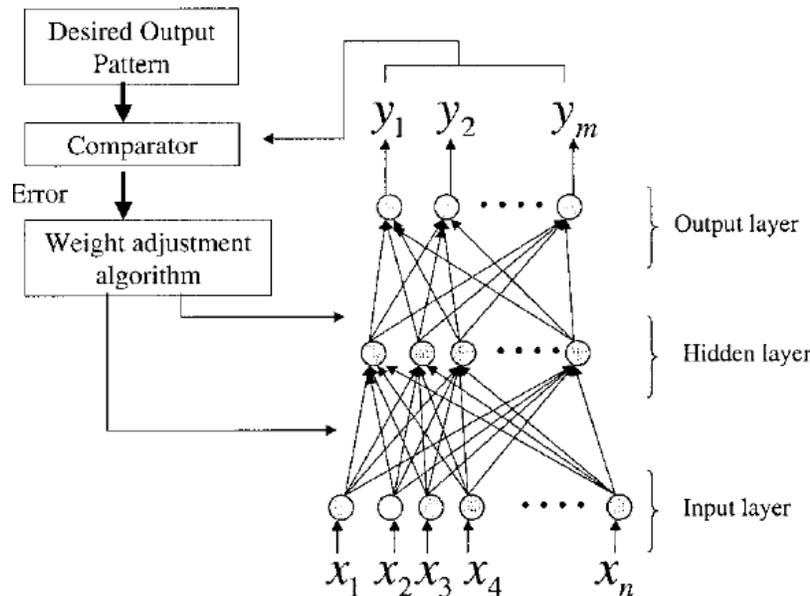


Figura 3.5-4 (Fuente: Chae, 2001).

Una vez descrita una red neuronal, se procede a la descripción del sistema automatizado de interpretación de inspecciones a tuberías de alcantarillado, mediante redes neuronales. Este sistema consta de cuatro pasos descritos continuación:

- a) *Adquisición de Imágenes:* De las inspecciones las imágenes son digitalizadas a matrices de dos dimensiones, donde cada fila y columna identifica un punto en la imagen y su correspondiente valor en la escala de grises.
- b) *Procesamiento:* El objetivo principal es modificar la imagen original, a elementos y sub-imágenes más pequeñas, para que pueden ser utilizadas con mayor facilidad. Para ello mediante filtros, escala de grises, aislamiento de regiones, etc, puedan ser tratadas por redes neuronales. Para ser tratada dicha imagen es convertida a un formato binario, con lo cual se facilita su procesamiento en la red y su velocidad (Chae, 2001).

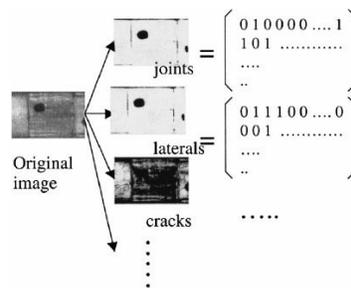


Figura 3.5-5 (Fuente: Chae, 2001).

- c) *Reconocimiento de Defectos mediante redes neuronales:* Para cada defecto se realiza una red distinta, para efectos del estudio se realizan únicamente dos, una red neuronal para juntas y otra para grietas. Con ello como dato de entrada para cada red se dará la imagen procesada y los datos de salida para cada red serán los atributos del defecto, como por ejemplo número de grietas, longitud de la grieta, entre otros.

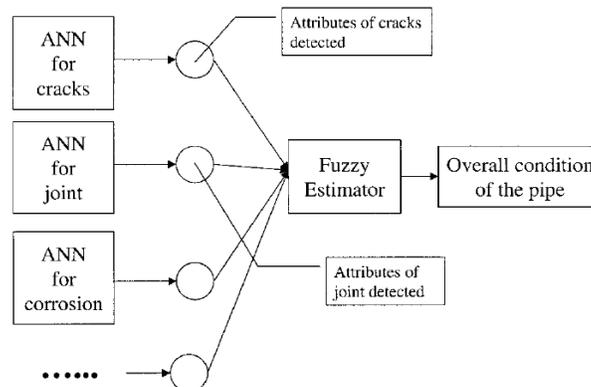


Figura 3.5-6 (Fuente: Chae, 2001).

- d) *Técnicas difusas para la evaluación del estado de tuberías:* La técnica difusa propuesta pretende automáticamente identificar, clasificar, calificar defectos encontrados en tuberías, mientras minimiza los errores provenientes de la red neuronal. Este estimador difuso da a los datos de salida una manera de ser interpretados y ayuda a describir la condición general de la tubería. Una de las principales ventajas de esta técnica, es que

no tiene cambios bruscos entre estados; más bien puede moverse suavemente entre regiones donde el sistema está dominado por una regla u otra.

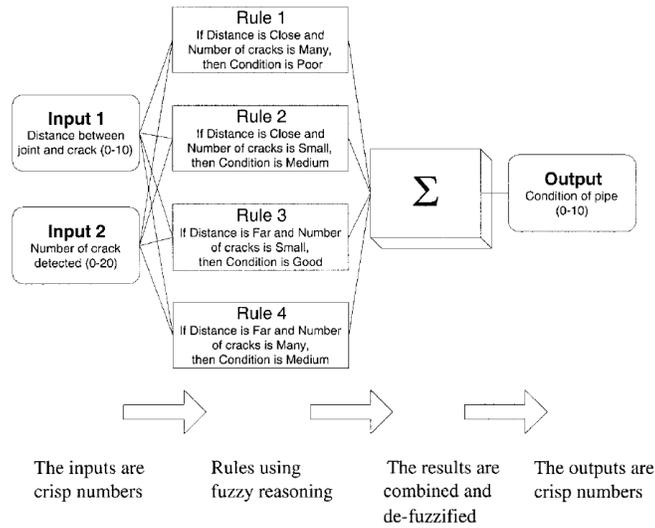


Figura 3.5-7 (Fuente: Chae, 2001).

CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Para validar la metodología automatizada propuesta los autores realizaron un pequeño prototipo del modelo, con información de inspecciones de alcantarillados hechas con CCTV y complementadas con tecnología SSET. La ciudad de San José, California, facilitó las inspecciones de 192 tramos de alcantarillado.

Dado que es un prototipo únicamente se construyeron redes para dos tipos de defectos; grietas y desplazamiento de juntas. Para iniciar la red de juntas establece previamente el tipo de datos de salida que deben ser los atributos para tal defecto como son: número de juntas, ancho de la junta, presencia de grietas cerca de la junta, entre otras.

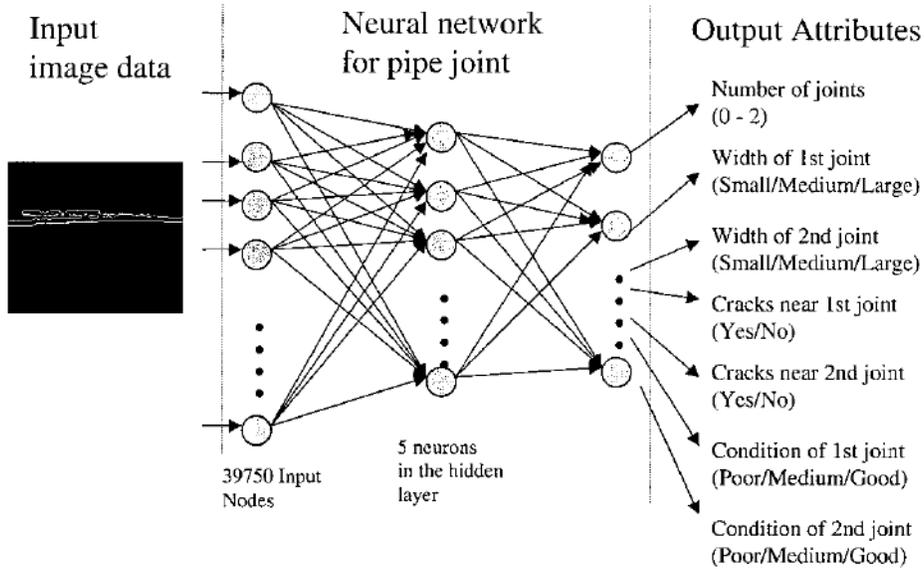


Figura 3.5-8 (Fuente: Chae, 2001).

Ahora la red neuronal para grietas cambia ligeramente, puesto que es mucho más difícil de reconocer dicho defecto a través de las imágenes, para ello la segmentación y ampliación de imágenes es vital para esta red. Hecho esto la red neuronal estará en capacidad de identificar ciertas características de la grieta (como longitud, ángulo, etc.) que luego son analizados y extraídos para encontrar patrones que solo presentan cuando existe en efecto una grieta.

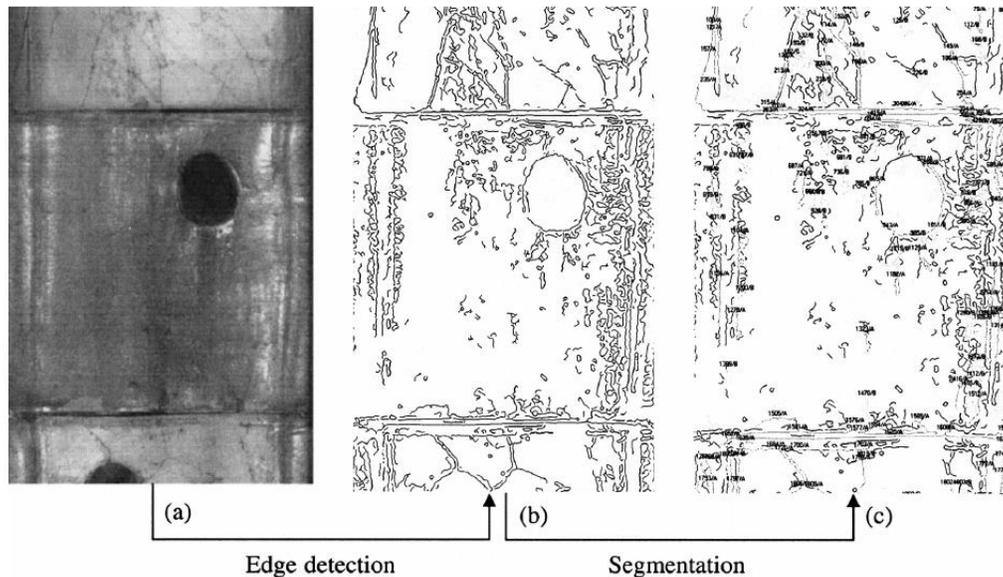


FIG. 19. Image Segmentation
 Figura 3.5-9 (Fuente: Chae, 2001).

Finalmente, para terminar el proceso la técnica difusa consolida los datos de salida de ambas redes para determinar una condición general de la red, en escala de 1 a 10, donde 1 es la mejor. Por ejemplo para la determinación del estado por grietas el sistema difuso analiza la distancia entre la grieta y la junta así como el número de grietas (ambos datos son las salidas de la red neuronal) y con reglas pre-establecidas, para dichas condiciones establece un estado de la tubería.

Con los atributos dados por las redes y consolidada la información con el sistema difuso, se comparan los resultados con el análisis de un experto en inspecciones de alcantarillados, para observar que su modelo se acerque al razonamiento humano y que tanto acierta a los defectos encontrados.

Tabla 3.5-8 (Fuente: Chae, 2001).

Image number (1)	Number of joints (2)	Width (first joint) (3)	Width (second joint) (4)	Cracks (Y/N) ^b (1/0) (first joint) (5)	Cracks (Y/N) ^b (1/0) (second joint) (6)	Condition (first joint) (7)	Condition (second joint) (8)
1	1 (1)	2 (1)	— ^a	N (N)	— ^a	3 (3)	— ^a
2	2 (2)	1 (2)	2 (2)	N (N)	Y (Y)	3 (3)	2 (2)
3	2 (2)	2 (2)	2 (2)	N (N)	N (N)	3 (3)	3 (3)
4	1 (1)	2 (2)	— ^a	N (N)	— ^a	3 (3)	— ^a
5	2 (2)	2 (2)	2 (2)	N (Y)	N (N)	3 (3)	3 (3)
6	1 (1)	2 (2)	— ^a	N (N)	— ^a	2 (1)	— ^a
7	1 (1)	2 (1)	— ^a	N (Y)	— ^a	2 (1)	— ^a
8	2 (2)	2 (2)	2 (2)	N (Y)	N (Y)	3 (2)	2 (2)
9	1 (1)	2 (2)	— ^a	N (N)	— ^a	0 (3)	— ^a
10	2 (2)	2 (2)	2 (1)	N (N)	N (N)	3 (3)	3 (3)
11	2 (2)	2 (1)	2 (2)	N (N)	N (N)	3 (3)	3 (3)
12	1 (1)	1 (1)	0 (0)	N (N)	Y (N)	2 (3)	0 (0)
13	2 (2)	2 (2)	2 (3)	Y (N)	N (N)	2 (3)	2 (2)
[Ratio of correct answers]	13/13	13/13	6/8	9/13	6/8	8/13	8/8

Note: Percentage of overall correct answers = 83%, percentage of correct answers regarding joint condition and width = 84%, percentage of correct answers regarding number of pipe joints = 100% (accuracy of joint detection), and percentage of correct answers regarding cracks = 72% (accuracy of crack detection).

^aSecond pipe joint is not available.

^bY and N refer to “yes” and “no.”

De los resultados (Tabla 3.5-8) se puede concluir que el modelo propuesto detecta y determina el estado de una tubería comparado a un experto. En general en un 83% el modelo acertó a la opinión de un experto, hallando mayores aciertos en identificar juntas, donde se obtuvo un 100% de acierto. Por otra parte, a diferencia de las juntas, las grietas al ser más subjetivas presentaron un acierto del 72%. Valores que sin duda pueden ser mejorados con mayor trabajo en la extracción de información en las imágenes, ya que para la época se recortó en exceso la imagen y su resolución fue disminuida con el objetivo de ahorrar el tiempo de cálculo en el computador.

3.6 Análisis de Toma Directa de Decisiones

3.6.1 Situación de Emergencia

Como se ha podido describir en secciones anteriores del presente trabajo, existe una gran variedad de metodologías para determinar el estado de las redes y su necesidad o no de rehabilitación. Si bien lo óptimo es un plan a largo plazo que ha sido analizado mediante modelos, índices etc, en muchas ocasiones la entidad a cargo del servicio se encuentra en una situación de emergencia que le impide contar con el tiempo y proceso requerido. Por ello se analizará como realmente algunas empresas de alcantarillado toman la decisión de rehabilitar una red y en base a qué criterio lo hacen. Un estudio realizado por Williamson (2014) como parte de la ASCE ejemplifica lo mencionado anteriormente, con la experiencia en el plan de rehabilitación de su red de alcantarillado de la ciudad de Corphus Christi en los Estados Unidos.

Tras años de presentar serios problemas en su red de alcantarillado, que se traducen en sobrecargas, fallas de tuberías y en general una visión reactiva, de reparar solamente lo que se daña y si es que se daña, en el 2010 la ciudad decide cambiar esta visión y embarcarse en un trabajo proactivo en cuanto a la rehabilitación de su red. Este trabajo proactivo consiste en lograr mover rápidamente recursos a los sitios que necesitan rehabilitación de emergencia, con el sistema denominado: “Entrega Indefinida / Cantidad Indefinida” (Williamson, 2014).

ANTECEDENTES:

La ciudad de Corphus Christi cuenta con una red de alcantarillado a gravedad de 1,122 millas de longitud, 19,176 pozos de inspección, con un costo aproximado de reposición de toda la red cercano a los 1.5 billones de dólares. Aproximadamente el 25% de la red fue instalada alrededor de los años 1960's, con lo que llevan en servicio más de 50 años, cumpliendo su vida útil. Por ello tras inspecciones realizadas se encontró tasas alarmantes de filtración e infiltración, además de reducción de la capacidad de la red por depósitos de sedimentos y con ello un sin número de sobrecargas en cámaras de inspección (Williamson, 2014).

APLICACIÓN DEL SISTEMA ENTREGA INDEFINIDA / CANTIDAD INDEFINIDA (ID/IQ)

Tras la problemática planteada la ciudad puso en marcha el sistema Entrega Indefinida / Cantidad Indefinida, el cual le permite contar con una compañía constructora que estará a cargo de realizar cualquier tipo de trabajo emergente o no emergente que sea requerido en la red, así como realizar rehabilitaciones en zonas conflictivas, sin importar su localización o gravedad.

Esto en coordinación con la empresa contratante, ya que para cualquier trabajo que se vaya a realizar se requiere una autorización escrita de la empresa donde se incluye la localización del proyecto, condiciones existentes, método recomendado para rehabilitar, costo estimado y plazo de

entrega. Este programa pretende que sea ininterrumpido y los proyectos continúen hasta que toda la red se encuentre en un estado aceptable de funcionamiento.

Los proyectos que está en capacidad de realizar la compañía incluyen a más de 330 rubros sin ser este su límite y dado el caso pueden incluir más, como por ejemplo: rehabilitación y mantenimiento en plantas de tratamiento, rehabilitación y reposición de pozos de inspección, rehabilitación o renovación de tuberías de alcantarillado, control de sobrecargas a través de bombeos, limpieza e inspección vía CCTV de tuberías, reparación de pavimento y calles afectadas por los trabajos, entre otros (Williamson, 2014).

PROCESO DE SELECCIÓN DE PROYECTOS

Para la selección de proyectos la empresa se basó en tres fuentes: reparaciones emergentes, defectos encontrados durante mantenimientos y mediante un análisis de priorización en la red. Este último utiliza un sistema de información geográfica (GIS) que cuenta con importante información de la red como: número y ubicación de fallas, número de quejas de los usuarios, reportes de sobrecarga y de filtraciones, entre otros. De esta manera con la información antes mencionada se logró identificar los sectores más críticos de la ciudad, como por ejemplo se identificó que el 26% de la sobrecarga de aguas residuales está concentrada en tan solo un 5% de la ciudad, con lo que esa zona, fue identificada como uno de los proyectos prioritarios de rehabilitación. En la Figura 3.6-1 se puede observar un análisis espacial de la concentración de sobrecargas antes mencionado.

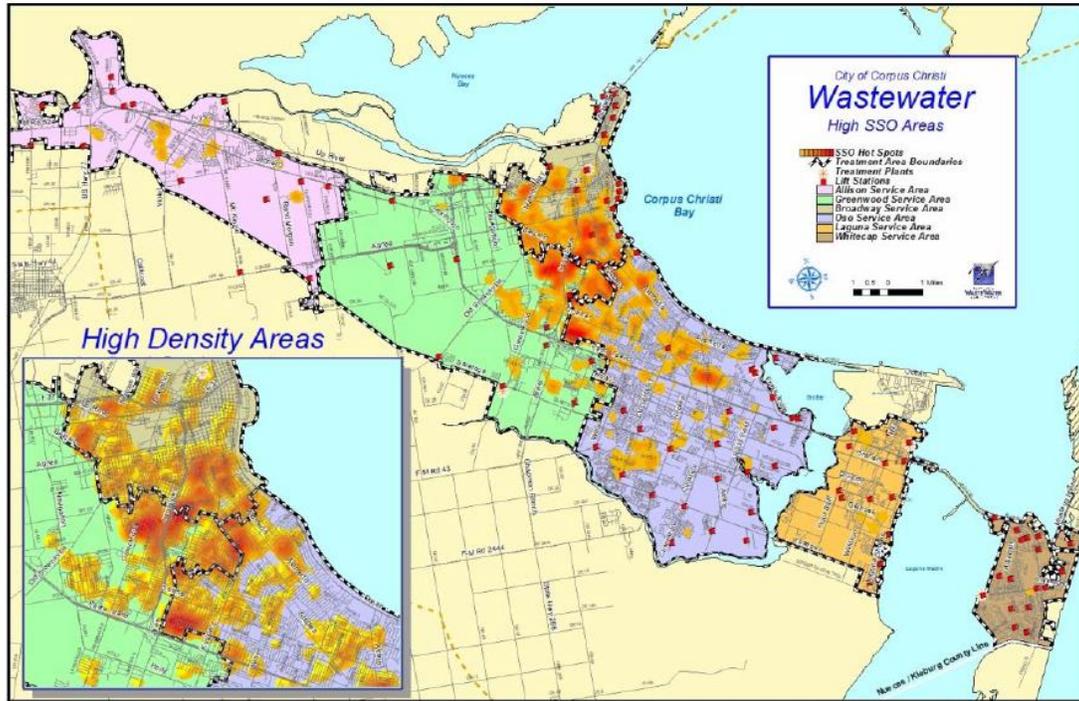


Figura 3.6-1 Análisis Espacial (Fuente: Williamson, 2014).

Mediante el análisis de priorización antes mencionado se logró que un 35% de los proyectos realizados por el sistema ID/IQ provengan mediante la fuente mencionada, mientras que un 6% correspondió a reparaciones emergentes y el restante mediante las inspecciones de CCTV que identificaron las tuberías más propensas a fallar.

RESULTADOS DEL SISTEMA (ID/IQ)

Una vez que el Sistema pudo manejar toda la ola de trabajo reactivo represado de tuberías que necesitaban inmediata intervención, se pudo cambiar a un trabajo proactivo de rehabilitación preventiva. Con ello al tercer año de trabajo, solo un 6% de proyectos correspondieron a reparaciones de emergencia, el resto fue preventivo. Además el reporte de sobrecargas e infiltraciones se redujeron drásticamente, lo que equivale a un ahorro de dinero significativo y un desempeño garantizado a futuro de la red de alcantarillado.

3.6.2 Análisis Proactivo

Dentro del manejo de una empresa de alcantarillado hay que establecer el nivel de profundidad para determinar el estado de su red y con ello generar planes de rehabilitación a largo plazo. Para ello la denominada gestión de activos de alcantarillados, SAM (Sewer Asset Management) por sus siglas en inglés, explora las distintas acciones que deben tomar para llegar a un estado óptimo de la

red. El estudio encabezado por Le Gauffre (2014) profundiza las acciones a seguir antes mencionadas para un correcto manejo de la red.

El denominado SAM identifica claramente los pasos a seguir para llegar a un enfoque proactivo de manejo de alcantarillados, en la Figura 3.6-2 a continuación se observa los distintos pasos y niveles a los cuales se propone llegar, de un estado (1) a un (4) que sería el proactivo.

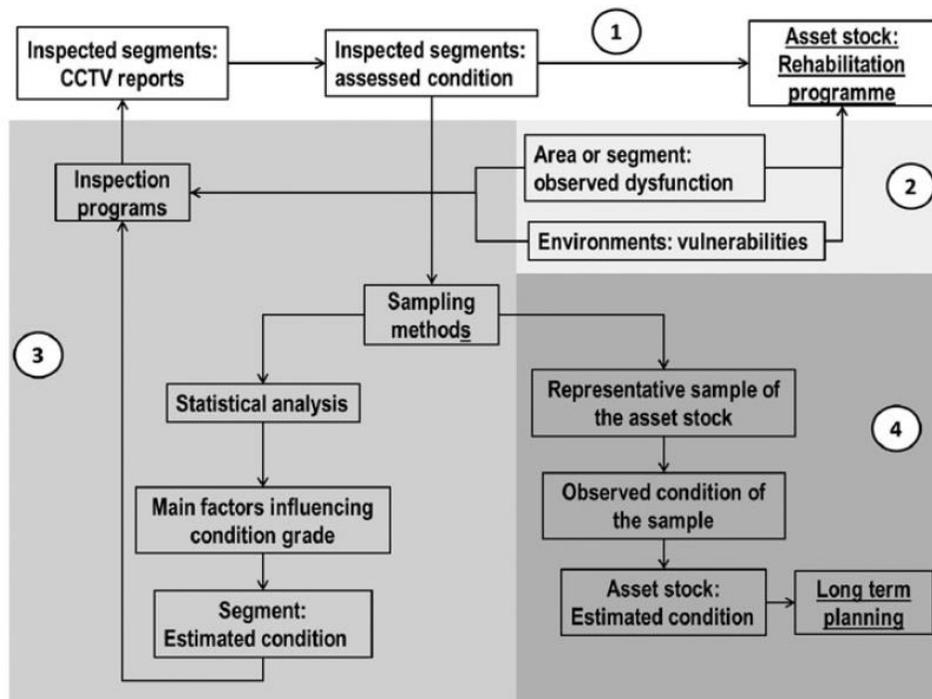


Figura 3.6-2 Niveles para llegar a un manejo Pro-Activo (Fuente: Le Gauffre et al., 2014).

En la figura se puede apreciar que:

- El primer nivel (1) muestra la forma más simple en la que se puede determinar el estado de una red. Consiste en inspeccionar vía CCTV una porción de la red aleatoriamente o por cierto indicio sin mayor análisis, luego determinar la condición del tramo inspeccionado y finalmente determinar el tipo de rehabilitación a realizarse basándose en la condición que se obtuvo de la inspección.
- En el segundo nivel (2) se ve una ligera variación ya que al momento de determinar la condición de la red (calificarla) se toma en cuenta además el entorno y ya no solo lo visto a través de CCTV; de esta manera se determina cual sección de tubería traería consecuencias más graves si es que falla. Además de identificar las zonas más vulnerables o propensas a fallo para priorizar inspecciones.

- El tercer nivel (3) se establecen prioridades de inspección basándose en estimaciones o en vulnerabilidades, por ejemplo sitios donde fallas de la red podrían traer consecuencias graves
- Finalmente la última evolución (4), se concentra en planes a largo plazo; para ello es necesario estimar la condición ya no solo de una porción de la red sino todos los activos de la red. Para ello se debe contar con un modelo que sea capaz de trabajar con una muestra significativa y estimar el estado total de la red. Lo anterior con el propósito de establecer estrategias a largo plazo, que contemplen inspecciones anuales, presupuestos necesarios, etc., y así evitar fallas durante los períodos de servicio. Con ello no se deja de lado ningún sector o barrio y disminuyen las probabilidades de fallas para el período de servicio.

RECOMENDACIONES PARA EL MANEJO PROACTIVO

El principal objetivo de la gestión de activos de alcantarillados es mantener el servicio óptimo de la red a largo plazo con restricciones presupuestarias. Para lograr lo dicho, se requiere llegar a los cuatro niveles de evolución antes mencionados, pero considerando que para lograr el objetivo mencionado la calidad y disponibilidad de datos puede ser un gran limitante. Pues los grandes inventarios con las características de las tuberías pueden tener información incompleta e imprecisa. La mayor preocupación de la calidad y disponibilidad de datos radica en las inspecciones a través de CCTV, puesto que su interpretación es muy subjetiva; además los códigos y normas para interpretar las inspecciones cambian en gran medida dependiendo de la ciudad y muchas son tan complejas que resultan ser contraproducentes arrojando resultados imprecisos de la condición (Por ejemplo: Falsos Negativos, cuando un defecto está presente pero no es detectado en la tubería).

Para sobrellevar el limitante mencionado de disponibilidad y calidad, los autores hacen un énfasis en la importancia de contar con una base de datos, que sea recolectada de una manera eficiente y relacionada con las necesidades de los activos y los modelos a utilizar. Contar con una gran recolección de datos y a largo plazo debe ser una prioridad en todas las empresas a cargo (Le Gauffre et al., 2014).

Además de la recolección de información, los autores sugieren que para seleccionar las prioridades de rehabilitación los sistemas difusos pueden ser de gran ayuda ya que estos pueden tratar eficientemente la incertidumbre presente en la base de datos así como con las calificaciones de las tuberías obtenidas de las inspecciones.

3.6.3 Influencia de Decisiones Políticas

Durante el desarrollo del presente trabajo se ha presentado una serie de metodologías para determinar el estado de redes de alcantarillado, en muchos casos aplicadas a gran escala en una ciudad y en otras a manera de prototipo. Pero no todos los proyectos se los realiza siguiendo una metodología establecida ya que los criterios cambian de acuerdo a la ciudad, sus

características y necesidades. Por otra parte, dichos criterios cambian además, por influencias políticas en la ejecución de proyectos de rehabilitación. Con este antecedente los autores holandeses de la universidad de Delft, van Riel, van Bueren, desarrollaron una investigación para contrastar la teoría y la toma real de decisiones en municipios holandeses.

Se analiza desde el punto de vista teórico, los modelos predictivos así como tecnologías avanzadas de inspección, brindan la información necesaria para conocer suficientemente el estado de la red; facilitando teóricamente la toma de decisiones en cuanto a la realización de un proyecto. Ahora desde el punto de vista práctico, el proceso de toma de decisiones involucra una serie de factores entre ellos compromisos, negociaciones que dificultan la realización de proyectos y va más allá de un simple análisis analítico. Los gestores de proyectos deben procurar extender el trabajo y en lo posible integrarlo a otras áreas, como por ejemplo rehabilitaciones urbanas.

VISIONES EN LA TOMA DE DECISIONES

Generalmente se distinguen dos tipos de modelos de decisiones, el racional y el político, que en la realidad se aplican ambos y se los describe a continuación:

- ✚ **Visión Racional:** Este visión es presentada como un modelo paso a paso, dónde la toma y análisis de datos (por ejemplo inspecciones) juegue un papel primordial, ya que se debe estar en condiciones de considerar todas las posibles alternativas y evaluar todas las posibles consecuencias. Para esta visión el actor en la toma de decisiones puede ser un gobierno, grupo, pero considerado como una sola entidad. La visión ideal racional contiene las siguientes características:
 - Un solo actor en la toma de decisiones
 - Procesos paso a paso
 - Datos recolectados y procesados que brinden información y conocimiento
 - Evaluación de las alternativas y sus consecuencias
 - Definir objetivos
 - Un punto de decisión clave en el tiempo
- ✚ **Visión Política:** Este tipo de visión enfatiza que la toma de decisiones es ejecutada por múltiples actores. Cada uno de ellos con distintos intereses y prioridades, cambiantes en el tiempo. Como resultado de este comportamiento dinámico de los actores, se toman decisiones insuficientemente estructuradas en base a un proceso poco claro y definido. Además interviene en esta visión la denominada ‘ventana de oportunidad’, donde se aprovecha la realización de cierto proyecto para extenderlo, tomando en cuenta otras áreas, por ejemplo la oportunidad de reemplazar cierta tubería en una calle que será rehabilitada y se ejecutarán excavaciones.

Este tipo de visión en la toma de decisiones está caracterizada de la siguiente manera:

 - La negociación es un esfuerzo de grupo con el objetivo de lograr compromisos.

- Objetivos, valor de intereses, varían según el actor, afectando la decisión que tomará.
- El proceso es interactivo, lo que lleva a procesos circulares, sin claros inicios y finales.
- Relaciones de causa y efecto son difíciles de establecer y de evaluar, dado los distintos actores y variables que intervienen.

(van Riel, 2015).

CASO DE ESTUDIO

Los autores desarrollaron el estudio en distintos municipios de Holanda, pero para comprender como se ejecutan los proyectos de rehabilitación en ese país, se dará una breve descripción de las particularidades y manejo de las redes de alcantarillado. Para empezar, el manejo de agua potable, alcantarillado, planeamiento urbano, manejo de flora y fauna entre otras es competencia de los municipios. Segundo, las municipalidades están encargadas de recolectar, transportar y tratar aguas lluvias y residuales, donde los costos son asumidos en su totalidad por impuestos a sus habitantes.

El estudio realizado consiste en seleccionar proyectos de renovación o rehabilitación de alcantarillados que se han realizado en los últimos años en 11 ciudades representativas del país (con poblaciones que varían de los 10.000 a los 750.000 habitantes). La información de los proyectos realizados se la obtuvo a través de entrevistas a los principales gerentes y gestores de alcantarillado de cada ciudad. Previo a la entrevista se les solicitó a los entrevistados contar con una lista de proyectos de rehabilitación o renovación concluidos. En la Tabla 3.6-1 a continuación se observan las municipalidades entrevistadas con sus características.

Tabla 3.6-1. Municipalidades Holandesas (Fuente: van Riel, 2015).

Municipality	Nr. of inhabitants at 01-01-2013 (Statistics Netherlands, 2013) (10 ³)	Population density (Statistics Netherlands, 2013) (inh./km ² of land)	Sewer length* (km)	Issued sewer tax per household 2013* (Euro)	Available tax per household per km of sewer (Euro/km)
Almere	195	1506	1100	110	0.10
Amsterdam	799	4822	3811	155	0.04
Barneveld	54	305	624	154	0.25
Breda	178	1413	1050	180	0.17
Ede	110	345	462	176	0.38
Rotterdam	616	2956	2906	189	0.07
Ruchpen	22	346	117	192	1.65
Scherpenzeel	9	682	48	215	4.48
The Hague	506	6178	1439	126	0.09
Utrecht	322	3412	1147	223	0.19
Woudenberg	12	337	61	160	2.62

Note: *Data is extracted from the municipal sewerage plan per municipality. The sewer length is the total length of gravitational sewers.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN RECOLECTADA

Hechas las entrevistas se procedió a su procesamiento, el cual pretende establecer ¿cómo? y ¿por qué? se desarrollaron los proyectos señalados en las municipalidades. Para lo mencionado se

agrupo la información obtenida y mediante códigos, de características que se encontraron se repiten en las distintas ciudades, se logró una consolidación de la información.

De las 11 ciudades entrevistadas se identificaron 150 proyectos ejecutados entre el 2003 y el 2013, de dónde la argumentación para la toma de decisiones para dichos proyectos reveló una serie de fuentes de información involucradas para el inicio de los mismos. Siendo las fuentes principales:

- ✚ Información del Sistema: Corresponde a información típica como inspecciones vías CCTV, edad tubería, diámetro, resultados de modelaciones hidráulicas
- ✚ Entorno del sistema de alcantarillado: Representan al contexto, son usualmente identificadas como suplementarias. Influencian la planeación operacional del sistema. Por ejemplo tasa de asentamiento del suelo.
- ✚ Información Organizacional: Se refiere a información en un grado estratégico, que abarca decisiones a largo plazo para desarrollo del sistema.

En la Figura 3.6-3 a continuación se muestra las fuentes antes señaladas que más se repitieron en las entrevistas:

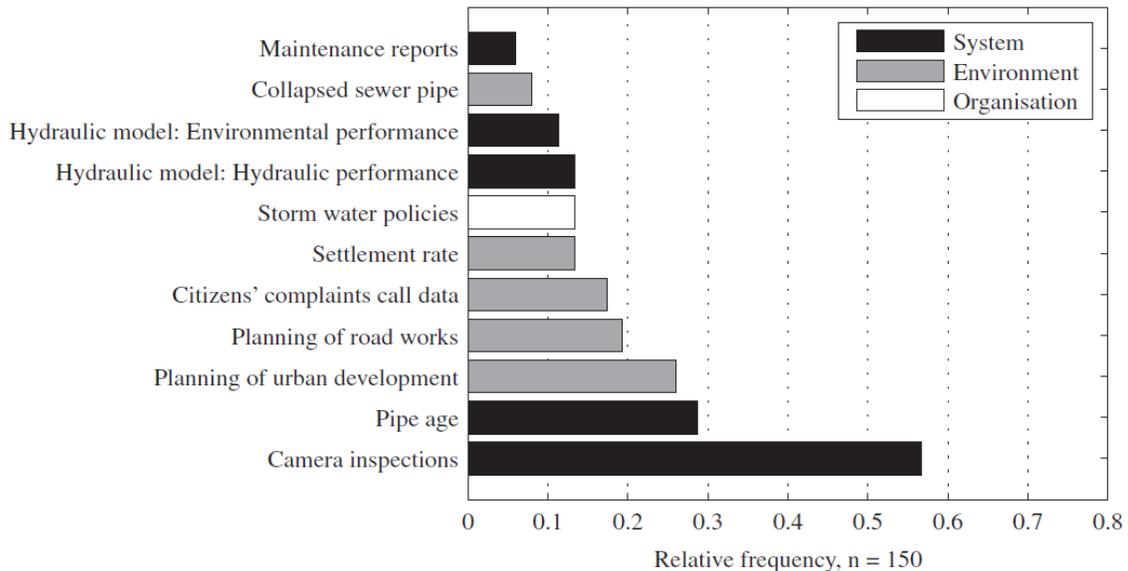
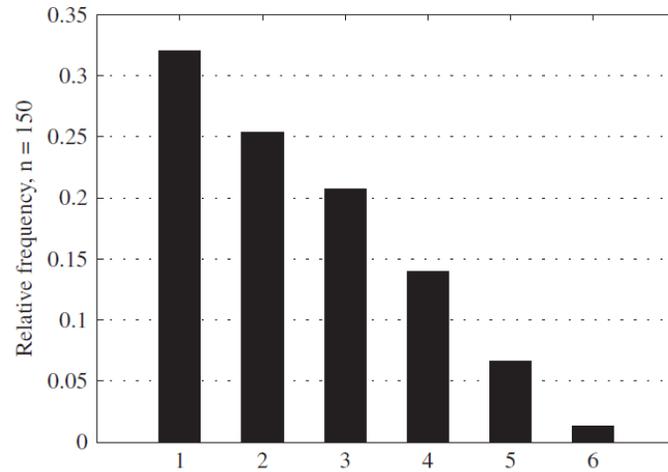


Figura 3.6-3. Fuentes para Rehabilitación (Fuente: van Riel, 2015).

Se identificó que un tercio de los proyectos, únicamente se basan en una fuente. Parte de ello se debe a proyectos de emergencia, donde únicamente con una fuente se podía determinar su daño que era muy evidente, principalmente a través de CCTV. En la Figura 3.6-4 se aprecia dicha distribución, siendo evidente que más de 3 fuentes de información no es común, por ello su media es de 2.4 fuentes de información por proyecto (van Riel, 2015).



Amount of indicated information sources per project, mean = 2.4

Figura 3.6-4 Distribución de las Fuentes (Fuente: van Riel, 2015).

Sin embargo la mayoría de los proyectos (2/3) utiliza más de una fuente, por lo que es interesante observar las distintas combinaciones utilizadas en los municipios. Para ello en la Figura 3.6-5 a continuación se pueden observar las combinaciones más frecuentes al momento de tomar una decisión. Siendo estas:

- Inspecciones vía CCTV más edad de la tubería
- Inspecciones vía CCTV más planes de rehabilitación de vías
- Inspecciones vía CCTV más planes de regeneración urbana
- Edad de la tubería más planes de rehabilitación de vías
- Denuncias o quejas de la ciudadanía más tasa de asentamiento del suelo

Cabe destacar que para la toma de decisiones los gerentes y gestores de alcantarillado incorporan particularidades propias de su municipio al contexto en su toma de decisiones. Aunque en general combinar varias fuentes puede fortalecer la toma de decisiones, no siempre es conveniente ya que los intereses particulares de cada área pueden crear contradicciones en las percepciones de la necesidad de rehabilitar o reemplazar cierto tramo de la red.

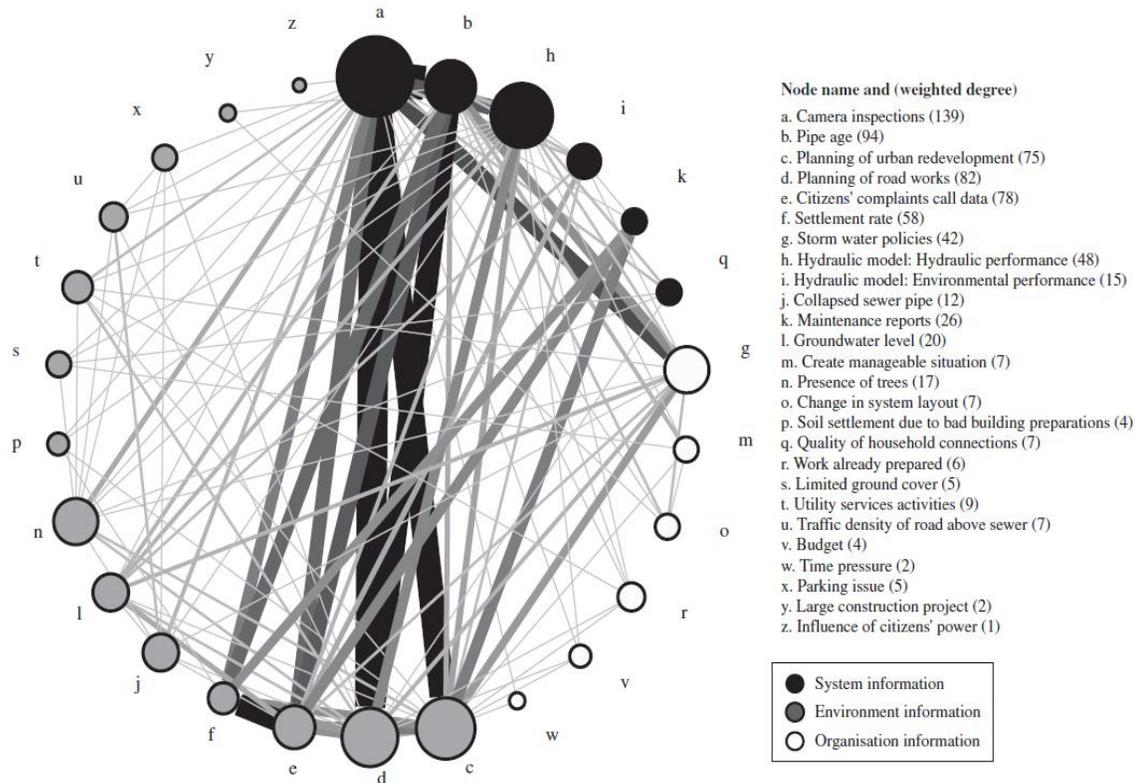


Figure 3. Network graph of all information combinations. Node size represents degree. Edge thickness and colour intensity represent weight (frequency) of connection.

Figura 3.6-5 Red con las distintas combinaciones encontradas (Fuente: van Riel, 2015).

DESCRIPCIÓN Y TIPOS DE PROYECTOS

Si bien los 150 proyectos parecerían ser distintos, comparten ciertas características:

- i. Proyectos con un solo actor: Estos incluyen los ejecutados por emergencias o calamidades (9% de los proyectos analizados) y los cuales hacen parte enteramente de estrategias de rehabilitación y planes de renovación anuales (40% de los proyectos analizados). Cabe resaltar que en ambos casos los proyectos son generados directamente por el departamento de alcantarillado de la municipalidad.
- ii. Proyectos con múltiples actores: Intervienen distintas instituciones, las mismas que pueden ser: municipales (departamento de urbanismo) o entidades gubernamentales (secretaría del agua, infraestructura, etc.). Desde un inicio se debe llegar a acuerdos y negociaciones entre todos los actores.

Proyectos emergentes con un solo actor:

Este tipo de proyectos podrían ser catalogados como los más simples en decidir, aunque su ejecución y trabajo en obra sea complicado. Generalmente tras un llamado emergente o inspección se detecta el daño, se recopila la información e inmediatamente se da la autorización para el arreglo, claro está señalando la metodología, plazo, presupuesto etc. El ejemplo perfecto es el encontrado en una de las municipalidades donde una tubería de la red sanitaria se encontraba presurizada, ocasionando que estas y las adyacentes aguas abajo presenten corrosión y con ello grandes grietas. Tras inspecciones con CCTV se verificó que las tuberías se encontraban en estado crítico, por lo que fueron reemplazadas. Como demuestra el ejemplo la situación de emergencia, ocasionó que solo intervenga un actor, el cual bajo un razonamiento sencillo y siguiendo pasos definidos, optó por una decisión clara (van Riel, 2015).

Proyectos Estratégicos con un solo actor:

Para este tipo de proyectos intervienen dos factores para su ejecución. El primero información relevante de la red, puede ser bien modelos predictivos, índices o inspecciones a gran escala. El segundo normas o políticas municipales, como por ejemplo cumplir con reglamentos ambientales de descarga de aguas. Como ejemplo en una de las municipalidades se identificaron zonas donde la red presenta deterioro, pero además se trataban de tuberías de alcantarillado combinado, hecho que fue decisivo para su reemplazo, ya que por políticas de la municipalidad procuran una red separada. En dicho ejemplo si bien los defectos en la red inspeccionada no eran críticos, las normas de dicha empresa y de la legislación holandesa en cuanto a vertimientos, ayudo a los encargados a tomar una decisión y seleccionar correctamente prioridades de rehabilitación (van Riel, 2015).

Proyectos con múltiples actores:

En este tipo de proyectos existe una mezcla de información, así como de intereses, lo que genera un proceso de negociación y con ello una serie de compromisos. Uno de los proyectos investigados de este tipo es el ocurrido cuando se procedió a realizar una gran regeneración urbana, las calles iban a ser excavadas por lo que se procedieron a inspecciones vía CCTV, lo cual reveló que solo una de las calles estaba en estado crítico y en las otras no se obtuvo resultados concretos. Por otro lado la compañía eléctrica también decidió unirse al proyecto para ampliar su cobertura; ante ello se generaron compromisos por parte de la empresa de alcantarillado de renovar cierto tramo, lo que generaría la oportunidad a la empresa eléctrica de colocar su red. Si bien en ese tramo no se obtuvieron resultados concretos del estado de la red, las presiones generadas y los compromisos con los otros actores finalmente influyeron en renovar dicho tramo. En la entrevista el gerente encargado manifestó que mirando atrás dicho tramo pudo ser pospuesto para renovar años después. Como se puede observar, en este tipo de proyectos influyen más los compromisos

políticos y de negociación, más que la información racional, para la toma de decisiones. Esta “ventana de oportunidad” antes mencionada se hace presente al no querer perder la oportunidad de reemplazar la tubería si es que de todas maneras se procederá a excavaciones (van Riel, 2015).

TEORÍA VS PRÁCTICA EN LA TOMA DE DECISIONES

Si bien es cierto en un buen porcentaje los proyectos investigados las decisiones en los mismos fueron a través de un razonamiento racional, la otra mitad se basaron en influencias políticas. Esta influencia política se hace aún más evidente cuando los proyectos hacen parte del manejo de espacio público, ya que intervienen varios actores y negociaciones.

Como aspecto positivo dentro de la práctica en la toma de decisiones y su influencia política, es la posibilidad que se “abra” una ventana de oportunidad; que se refiere a integrar el trabajo con otras áreas. Pero como aspecto negativo es que en el proceso de decisión muchas veces la información objetiva del funcionamiento del sistema de alcantarillado (resultados de modelos, índices, inspecciones, etc.), es subordinada a segundo plano con respecto a otros criterios durante las negociaciones.

Las diferencias principales entre la teoría y la toma real de decisiones son:

- ❖ El poder de decisión y presupuesto está dividido entre los distintos actores. Cada uno de estos actores puede influenciar donde, cuando y con quién ejecutar el proyecto.
- ❖ Se generan compromisos como resultado de las negociaciones y no son decisiones fijas.
- ❖ Decisiones son tomadas en un proceso mixto con percepciones distintas del problema y no es secuencial paso a paso.
- ❖ Los intereses de los distintos actores pueden dirigir el proyecto y no información objetiva.

A pesar de que en la realidad la toma de decisiones para determinar el estado de una red de alcantarillado está fuertemente influenciada por factores políticos, esto no quiere decir que los esfuerzos para desarrollar modelos y recolección de información relevante, deban ser dejados de lado. Al contrario esto significa que los esfuerzos deben incrementarse para que su influencia en la toma de decisiones sea más fuerte, incluso superando a la política.

4. CASO DE ESTUDIO: CIUDAD DE BOGOTÁ

Si bien el objetivo principal de la presente investigación es un estudio del estado del arte para la determinación de la condición de redes de alcantarillado, se pretende también una aproximación que lo investigado sea analizado dentro de la realidad latinoamericana. Países en vías de desarrollo como Ecuador y Colombia, requieren metodologías de investigación aplicadas a la realidad que viven sus empresas de alcantarillado. Para ello es necesario entender la ciudad de Bogotá a la que se pretende aplicar la metodología y la manera actual de operar de la empresa encargada del servicio (fortalezas y debilidades). Lo que permitirá adaptar una de las metodologías investigadas a la realidad de la ciudad en tanto a sus recursos como a la disponibilidad de su empresa de alcantarillado.

Bogotá, capital colombiana, es una de las más extensas de Sudamérica, con una población de más de 7'794 000 habitantes según datos del DANE del 2014. Para esta ciudad el brindar a todos sus usuarios servicios de calidad como son agua potable y alcantarillado, resulta ser un verdadero reto para la Empresa. Dicha empresa pública tiene como visión “ser responsable con la gestión integral del agua y el saneamiento básico como elementos comunes de vida y derechos humanos fundamentales, generadora de bienestar, que contribuye a la sostenibilidad ambiental del territorio” (Acueducto de Bogotá: Plan General Estratégico, 2012-2016).

Puesto que dentro de los objetivos estratégicos de la ciudad se encuentran: la renovación, rehabilitación del sistema troncal y secundario del alcantarillado pluvial y sanitario con el objetivo de mantener un buen estado en la infraestructura y en el servicio, las metodologías investigadas y simplificadas en el presente trabajo son de gran relevancia para la ciudad.

Como parte del cumplimiento de estos objetivos la Dirección de Ingeniería Especializada del Acueducto de Bogotá (DIE) ha trabajado en “(...)la conceptualización y desarrollo del Sistema de Información para la Gestión del Alcantarillado (SIGA) con el fin de obtener una herramienta de gestión aprovechando al máximo la información disponible y el desarrollo de modelos para lograr el diagnóstico, planeación y desarrollo de los proyectos de rehabilitación para mejorar las condiciones de operación de las redes de alcantarillado de la ciudad (...)” (Acueducto de Bogotá, DIE, 2014).

4.1 SISTEMA DE INFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN DEL ALCANTARILLADO (SIGA)

El SIGA fue creado con el fin de poder contar con un sistema que facilitara la gestión del alcantarillado, mediante la implementación de distintas herramientas que permitirán la estimación de indicadores diseñados para evaluar el cumplimiento de objetivos estratégicos (DIE, 2014). Dicho sistema contiene a su vez tres herramientas (SIMA, SIPA y SIRAH) para gestionar los planes de

rehabilitación así como los de mantenimiento. Cada herramienta está enfocada a un área en específico para obtener resultados más claros donde no intervengan tantas variables. Dichas herramientas se las describe a continuación.

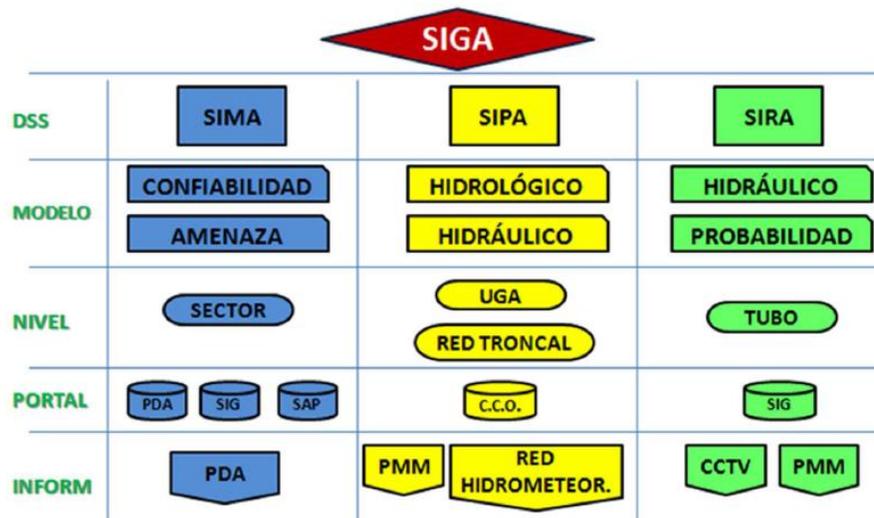


Figura 4-1 Herramientas utilizadas en la ciudad de Bogotá (Fuente: Acueducto de Bogotá, Departamento de Ingeniería Especializada).

4.1.1 SISTEMA DE INFORMACIÓN PARA EL MANTENIMIENTO DEL ALCANTARILLADO (SIMA)

La herramienta SIMA está enfocada al mantenimiento de la red, por ello sirve como un soporte para la toma de decisiones en la selección y ubicación de sectores propensos a sufrir obstrucciones en las redes. Esta herramienta se ha desarrollado tomando como referencia la información topológica de las redes de alcantarillado de la ciudad y la información histórica del mantenimiento efectivo de las redes de alcantarillado de la ciudad desde el año 2004 a la fecha que se encuentra registrada en SAP (Plataforma Institucional).

El análisis se realiza a partir de ciertas áreas básicas, las cuales se denominaron “Sectores de Mantenimiento Preventivo” o SMPS mismas que representan áreas que un verificador debe revisar en una visita de inspección preventiva. Dentro de cada SMP se prioriza la posibilidad de tener obstrucción, evaluando aspectos tales como el tiempo promedio entre fallas efectivas y la probabilidad de falla histórica. La aplicación sirve como soporte para la planeación del mantenimiento preventivo de la red (Departamento de Ingeniería Especializada, 2014).

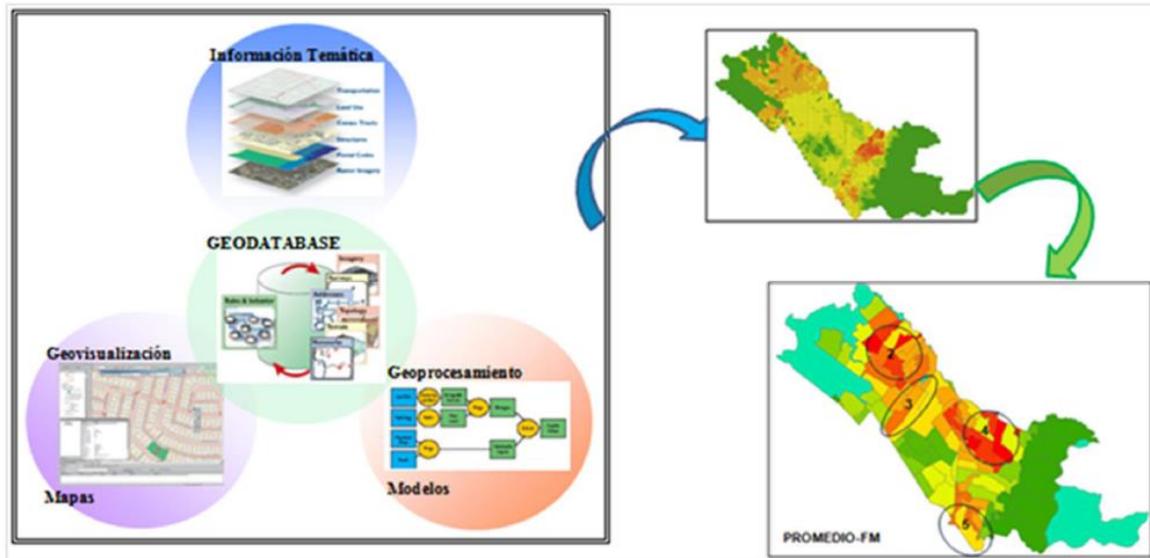


Figura 4-2 Herramienta SIMA (Fuente: Acueducto de Bogotá, Departamento de Ingeniería Especializada).

El resultado de esta herramienta es la ubicación espacial de cada una de las SMPS con el dato de la probabilidad de falla, además de cada una de las características de cada tramo que se tienen definidas. La información espacial, al igual que la del valor de probabilidad de falla, se representan en un archivo shape que es actualizado mensualmente. Finalmente las diez direcciones más críticas son enviadas mediante memorando interno a los responsables pertinentes para que toman las acciones del caso. (DIE, 2014)

4.1.2 Sistema de Información para la Rehabilitación del Alcantarillado (SIRA)

Este sistema está enfocado en el estado estructural de las tuberías y pretende estimar su estado futuro, así como de los tramos no inspeccionados. La herramienta se basa en los resultados de las inspecciones vía CCTV que se han realizado. Las inspecciones se encuentran clasificadas de acuerdo con la normatividad de la empresa, donde mediante una escala de 1 a 5 se clasifica el grado de deterioro (5 representa el estado más crítico). Los resultados del modelo estructural, está soportado sobre un modelo de redes neuronales estructural que predice de manera aproximada la condición estructural de las redes del sistema. (Departamento de Ingeniería Especializada, 2014).

Por medio del modelo de priorización se obtuvo un archivo shape para alcantarillado pluvial y otro para alcantarillado sanitario y combinado donde se indica el grado estructural estimado de todos los tramos del sistema de alcantarillado. Cabe resaltar que no se pudo dar continuidad a la ejecución de la herramienta y solo se la uso por una vez, brindando únicamente resultados parciales, como se puede observar a continuación:

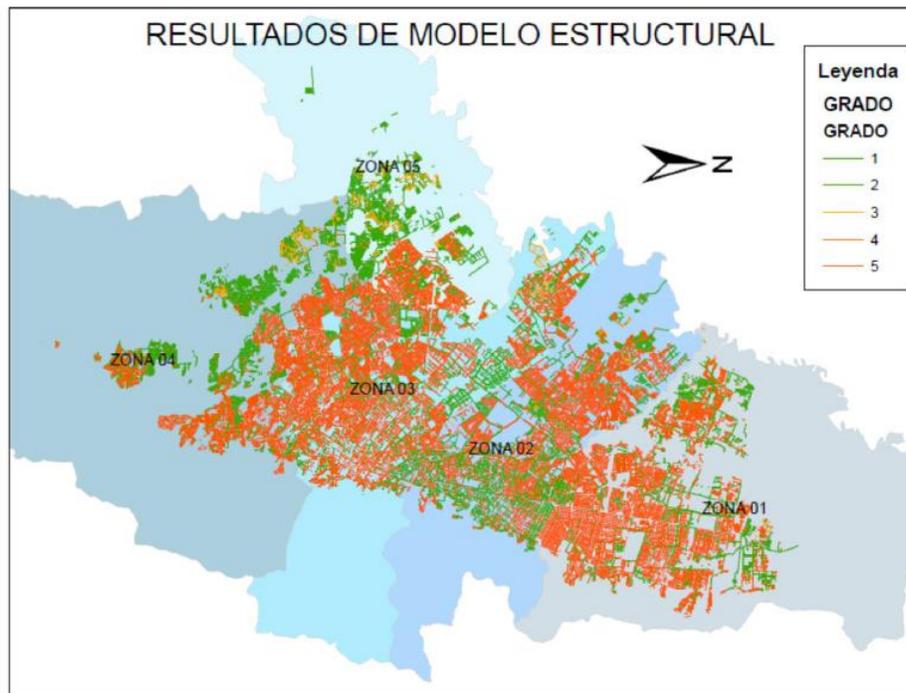


Figura 4-3 Herramienta SIRA (Fuente: Acueducto de Bogotá, Departamento de Ingeniería Especializada).

4.1.3 Sistema de Información para la Planificación del Alcantarillado (SIPA)

Finalmente el sistema SIPA está enfocado a un modelo hidrológico global con el fin de poder conocer las variaciones de cantidad y calidad de agua a lo largo de la ciudad, que permitirá desarrollar modelos hidráulicos detallados. El modelo hidrológico permite:

- Entender la interacción entre distintos elementos del sistema como los colectores, interceptores, alivios, canales, estaciones de bombeo, PTAR's y ríos.
- Cuantificar los impactos globales sobre la cantidad y calidad de agua de nuevas obras de infraestructura.
- Definir y revisar los compromisos de reducción de carga contaminante en los cuerpos receptores.

Como parte de este modelo se desarrolló un Plan Maestro de Mediciones, con fines de calibración así como de conocer cómo se comporta el sistema en tiempo real. Dicho plan cuenta con 58 puntos de medición permanente de la red de alcantarillado de la ciudad, midiendo la cantidad y calidad de los caudales que fluyen por los principales colectores, interceptores y canales del sistema de alcantarillado (Departamento de Ingeniería Especializada, 2014).

Los principales resultados que se pretenden obtener con el modelo hidrológico son:

- Calidad de Agua: Datos reales para el diseño de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).

- Cantidad de Agua: Datos reales y en tiempo real para la alerta temprana y control de inundaciones. Determinación real de factores de diseño de redes de alcantarillado.
- Datos para la alimentación y calibración de los modelos de calidad del Río Bogotá.
- Información de las redes de alcantarillado concentrada en el Centro de Control.

4.2 Metodologías Factibles para el Acueducto de Bogotá

Una vez que se ha investigado la metodología con la que trabaja el Acueducto de Bogotá para determinar el estado de sus redes de alcantarillado, se pretende recomendar alternativas encontradas en la literatura. Estas recomendaciones consideran las limitaciones presupuestarias y dificultades que presenta hoy en día el acueducto de Bogotá, siendo las de mayor consideración: a) Falta de inspecciones y reportes de CCTV, puesto que en la mayoría de modelos encontrados este es el dato básico de entrada para el desarrollo de modelos predictivos y b) Falta de un inventario actualizado de tuberías, que indiquen datos básicos como material, edad, tipo de suelo de asentamiento, condiciones y vulnerabilidades de los alrededores.

Bajo estas consideraciones las metodologías propuestas van acorde a la realidad mencionada y no obstante si es cierto que no podrían ser aplicadas a gran escala inmediatamente, servirían a manera de prototipo para ser aplicadas en un pequeño sector, pero representativo de la ciudad, que incluso ayudaría a la calibración del modelo para posteriormente ser aplicado a una escala mayor. Aunque la empresa se enfoca mayormente a la operación y no a la prevención de la red, resultados exitosos de los prototipos pueden fortalecer la toma de decisiones para que esfuerzos de carácter preventivo sean incluidos en los presupuestos. Por ejemplo que en el plan general estratégico del acueducto, dentro de sus macro-proyectos se incluya primero un proyecto a largo plazo de inspección de redes y desarrollo de modelos predictivos antes que un plan “reactivo” que existe en la actualidad de renovación y rehabilitación.

4.2.1 Metodología para un Manejo Proactivo (SAM)

La primera metodología propuesta al Acueducto de Bogotá está descrita en el Numeral 3.6.2, y debería ser el primer paso a seguir en toda entidad a cargo de alcantarillado. Pues su propuesta fundamental es establecer distintos niveles de profundización para llegar a un estado proactivo en el manejo de una red de alcantarillado. El objetivo a largo plazo del acueducto de Bogotá sería llegar a un nivel de profundización 4, pero los objetivos a corto plazo durante cada administración podrían ser que medidas en conjunto con otras metodologías tomar para que al cabo de 4 o 5 años (tiempo que dura la administración) escalar una posición el nivel de profundización (Ver Figura 4-4).

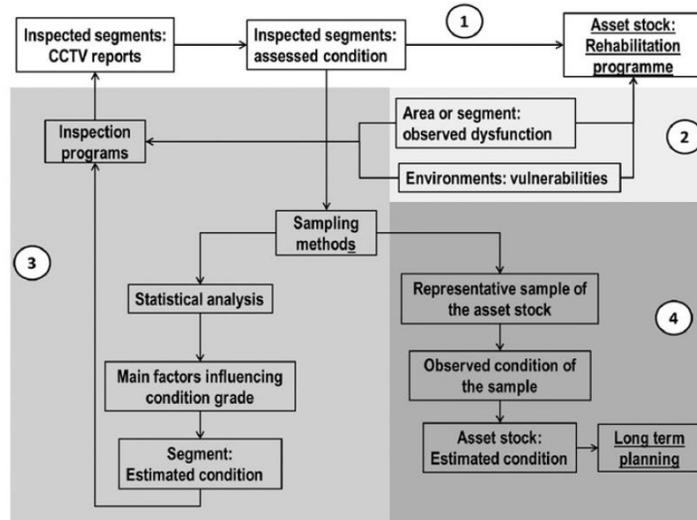


Figura 4-4. Niveles de Profundización (Fuente: Le Gauffre et al., 2014).

Al separar en niveles de profundización la empresa de acueducto podría concentrar esfuerzos para lograr objetivos alcanzables en el mediano plazo, aún más si se consideran las limitaciones presupuestarias. Así por ejemplo bajo las condiciones actuales del acueducto se desea llegar a un nivel 4, donde exista un modelo capaz de predecir efectivamente el estado de toda la red es inalcanzable en un corto plazo. Pensar en llegar a un estado 2, donde primero se identifique y luego se priorice inspecciones, segmentando áreas y evaluando las vulnerabilidades de sus alrededores, es un objetivo factible en el mediano plazo (4 años o una administración). De esta manera independientemente del partido político de las alcaldías o de los nuevos gerentes que lleguen en cada período, el objetivo debería ser el mismo: escalar niveles de profundidad hasta llegar y mantener un manejo proactivo de la red de alcantarillado.

4.2.2 Árboles de Decisión

La segunda recomendación propuesta para el acueducto de Bogotá es una priorización para la inspección vía CCTV de su red de alcantarillado. La metodología propuesta está plenamente descrita en el Numeral 3.4.3.2 y la principal razón por la que encaja con Bogotá es que parte del hecho que donde se realizó el estudio la ciudad de Guelph, Canadá presenta las mismas dificultades que en Bogotá. Estas dificultades son inspecciones de CCTV muy costosas que solo permiten realizar análisis en pequeñas zonas de la ciudad sin la certeza que estas sean las zonas más críticas o urgentes por inspeccionar.

Ante esta necesidad, el modelo propuesto aparece como una alternativa capaz de aprender de inspecciones pasadas para determinar las zonas donde las tuberías se encuentran en estado crítico y requieren inspección inmediata. Dentro de las bondades del modelo es su capacidad mediante algoritmos de clasificar las tuberías en grupos pequeños homogéneos, con lo cual se facilita

establecer relaciones entre estas características de la tubería (edad, longitud, pendiente, etc.) y su probabilidad de encontrarse en un estado bueno y crítico.

Dado que el acueducto de Bogotá para la implementación del Sistema de Información para la Rehabilitación del Alcantarillado (SIRA) realizó inspecciones de CCTV, si bien una cantidad pequeña comparando la totalidad de la red (además que el Acueducto cuenta con equipo propio de CCTV para inspecciones). Sin embargo podría ser suficiente para que el modelo propuesto logre determinar las relaciones antes mencionadas y con ello identificar las tuberías con alta probabilidad de encontrarse en un estado crítico.

Como parte del modelo este también recomienda relacionar las zonas donde se encuentran las tuberías identificadas como críticas con otros aspectos que fortalezcan la decisión de realizar una rehabilitación. Este factor para el caso de Bogotá es fundamental, ya que dadas las limitaciones presupuestarias que limitan tanto los proyectos y las inspecciones cabe fortalecer dicha decisión. Por ello si se relacionan las zonas donde se encuentran las tuberías con alta probabilidad de falla con zonas sensibles de la ciudad como hospitales, cercanía con grandes colectores o canales o a su vez en zonas donde se construirán otras obras (regeneraciones urbanas: peatonalización de la carrera séptima o excavaciones para el metro) se lograría priorizar las zonas que necesitan inmediata inspección o rehabilitación.

4.2.3 Índices de Desempeño

Dadas las condiciones actuales del Acueducto la alternativa de los índices para la determinación del estado de su red, es la que mejor se acomoda a las características encontradas en Bogotá. El primero índice recomendado es el más básico relacionado únicamente a la sobrecarga y que podría ser aplicado en la ciudad con los datos disponibles hoy en día. Mientras que el segundo índice que es de desempeño general, mucho más robusto, sería para una aplicación futura, que podría considerarse como el objetivo a largo plazo.

4.2.3.1 Índice de Sobrecarga

Se recomienda este tipo de índice (claramente desarrollado en el Numeral 3.2.1) por su facilidad de uso, dado que utiliza información básica del tramo analizado, como son profundidad a la que está enterrada la tubería, diámetro, longitud y pendiente. Dicha información se la puede obtener fácilmente en campo de no existir en el inventario del acueducto además la modelación se la realiza en un programa comercial ampliamente conocido como es el SWMM.

Otra de las razones por la que se recomienda este tipo de índice es que dada la edad avanzada que se encuentra la mayor parte de la red pluvial de Bogotá, las tormentas con las que fueron diseñadas pueden haber cambiado mucho con el tiempo (mayores intensidades en tiempos menores) aún más si tomamos en cuenta el cambio climático, o a su vez para la época no había normativa que obligue

a calcular correctamente las tormentas. En fin todo esto se traduce a mayor caudal que ingresa a la red. Bajo estas condiciones actuales el índice propuesto encaja perfectamente, puesto que se transita en SWW la nueva tormenta y con los niveles de caudal que esta genera en los pozos el índice entra en acción para identificar correctamente el porcentaje de sobrecarga en cada una de las tuberías y lo que es más importante identifica cual(es) es la causante de sobrecargar al sistema y en que porcentaje. Este es un dato clave ya que para trabajos de rehabilitación emergente se conocerá que tubería rehabilitar primero para aliviar de mayor manera al sistema.

Se conoce que actualmente los mayores problemas del acueducto de Bogotá en cuanto a alcantarillado se enfocan al tratamiento de aguas residuales en las PTAR para sanear al río Bogotá y a la sobrecarga de aguas residuales en sectores densamente poblados (Plan General Estratégico, DIE). Con esto lo que se quiere resaltar es que si bien al momento la sobrecarga pluvial no es una prioridad, debido a la edad de la tubería, expansión de la ciudad y cambios en las tormentas entre otros factores, dentro del corto al mediano plazo dicho problema puede agravarse. Por lo que el uso del índice recomendado es de gran importancia para evitar que dicha amenaza se desarrolle.

Con lo visto se recomienda en primera instancia tomar un sector pequeño de la ciudad donde denuncias ciudadanas señalen que en períodos de lluvia agua emerge de los pozos. Dicho análisis puede ser de las dimensiones propuestas por los autores, de no más de 16 pozos (Ver Figura 4-5). De obtener resultados favorables en identificar correctamente las tuberías con sobrecarga y lograr un alivio en el sistema analizado, dicho estudio servirá como prototipo para aplicarlo en otros sectores de la ciudad y a su vez traer la atención del Acueducto para ser considerado en los planes estratégicos.



Fig. 3. Storm drainage system diagram

Figura 4-5 Ubicación de la Red (Fuente: Bennis, 2003).

4.2.3.2 Índice de Desempeño Global

El índice de desempeño global propuesto es similar al propuesto inicialmente, ya que fue desarrollado por el mismo autor, Bennis con otros colaboradores, años más tarde como se encuentra descrito en el Numeral 3.2.2.1. La gran ventaja de este índice sobre el anterior y razón por la cual se lo decide incluir en la recomendación al Acueducto de Bogotá, es la evaluación global que realiza de la tubería, además del índice de sobrecarga incluye tres factores sumamente relevantes para priorizar una rehabilitación o renovación. Estos factores son la condición interna de la tubería, evaluación de las condiciones del entorno y vulnerabilidad del sitio, factores que sin duda influyen en el deterioro de una tubería. Como se mencionó anteriormente en el Numeral 3.6.3 respecto a la toma de decisiones, donde no siempre se llegan a proyectos bajo un razonamiento racional, este índice brinda una mayor cantidad de argumentos (mediante las evaluaciones) para demostrar las necesidades de rehabilitación, además de resaltar otros aspectos del sitio que pueden contribuir a que otras áreas (vías, infraestructura) identifiquen otras necesidades de renovación y con ello se desarrolle un solo proyecto en conjunto. Otro aspecto es la herramienta utilizada para combinar las distintas evaluaciones de la tubería (índice de sobrecarga, condición interna, ect.), esta es los sistemas difusos, que como se explicará en el próximo numeral, hace parte de los sistemas de inteligencia artificial que han demostrado trabajar satisfactoriamente en tuberías de alcantarillado y en la actualidad son los sistemas que mejores resultados brindan en esta área.

Finalmente se advierte que los requerimientos para el uso de este tipo de índice, actualmente no se encuentran en el Acueducto de Bogotá, especialmente a lo referente a la condición interna de la red e identificar las zonas más vulnerables del sistema. Sin embargo sería una herramienta de gran utilidad en un futuro, cuando la ciudad se encuentre en un nivel 4 de profundidad en el manejo proactivo de la red, según lo visto en el Numeral 4.2.1.

4.2.4 Inteligencia Artificial

Es importante recomendar este tipo de metodologías puesto que actualmente es la principal tendencia que se encuentra en la literatura y en el corto plazo investigaciones de este tipo prometen facilitar su aplicación y desarrollo. El potencial a futuro de este tipo de metodologías es lo que más ha motivado a investigadores para que desarrollen trabajos de este tipo. Como bien lo describe Sousa en su investigación (3.5.2.1) la gran ventaja de este tipo de metodologías es que ya no es necesario encontrar una función que relacione a los datos de entrada con los de salida, hecho que es el gran limitante de los modelos estadísticos.

Concretamente dentro de los distintos tipos de inteligencia artificial se recomiendan para el Acueducto de Bogotá los siguientes:

-
- a) Redes Neuronales: El modelo propuesto por Vitor Sousa (2014) demostró que los resultados de redes neuronales fueron los que menor error obtuvieron con la menor tasa de falsos negativos, superando a vectores de soporte y sobre todo al modelo estadístico de regresión
 - b) Vectores Soporte: Igualmente Sousa demostró que si bien es cierto esta metodología se vio superada por redes neuronales, la sensibilidad y variabilidad de resultados fue menor, por lo que es una gran opción para una visión conservadora.
 - c) Modelos Difusos: Para el desarrollo de los índices propuestos por Bennis y Angkasuwansiri demostraron ser la herramienta adecuada para relacionar las distintas evaluaciones efectuadas a las tuberías para conformar un solo índice global de desempeño.

Su bien esta es una tecnología recomendada para ser aplicada en un futuro en el Acueducto de Bogotá y su funcionamiento todavía permanece del tipo de “caja negra” las investigaciones futuras prometen aclarar este modelo y simplificar su desarrollo y aplicación, lo que dará resultados más precisos y cercanos a la realidad al momento de determinar el estado de funcionamiento de una red de alcantarillado.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Durante esta investigación se ha logrado establecer importantes patrones y características para determinar el estado de una red de alcantarillado, las mismas que serán presentadas a continuación. Además con lo hallado se abren las posibilidades de continuar con el estudio y complementarlo de la mejor manera.

5.1 Conclusiones

INSPECCIONES EN SITIO

- Inspecciones a través CCTV o tecnologías de video similares se encuentran presentes en la mayoría de investigaciones recopiladas. Gracias a su facilidad de operación, agilidad en el procesamiento de resultados obtenidos, sus costos competitivos (en comparación a otras tecnologías), CCTV es la tecnología más usada en la inspección de alcantarillados en distintas ciudades del mundo.
- Las inspecciones tipo CCTV y similares, tienen dos grandes limitaciones:
 - a) No se puede determinar con certeza el estado de la parte inferior de la tubería por donde corre el flujo al momento de la inspección.
 - b) Una vez recopilado el video e imágenes de las inspecciones, sus interpretaciones son muy subjetivas al momento de caracterizar sus defectos y asignarles una calificación; a pesar de existir guías de interpretación de defectos, el criterio ambiguo del analista siempre está presente.
- Si bien existen otro tipo de tecnologías que brindan mayor detalle en la inspección incluso por debajo del nivel de agua de la tubería, la dificultad en su operación y el procesamiento de resultados las vuelven poco populares en empresas de alcantarillado urbano.
- El uso de tecnologías más avanzadas que CCTV como un Sensor Múltiple sugerido por Selvakumar, se recomienda para secciones de mayor riesgo e importancia en la red, donde un daño en la misma signifique el riesgo de falla de la mayor parte de la red. En aquellos casos se requiere gran detalle en la inspección para prevenir cualquier falla.
- Las nuevas tecnologías apuntan hacia la automatización de información de las inspecciones y terminar con la subjetividad de la interpretación de defectos. Se busca que las inspecciones sean analizadas computacionalmente y su defecto o condición sean dadas sin necesidad de juzgamiento humano.

MODELOS PREDICTIVOS DEL ESTADO DE TUBERÍAS

- Para realizar proyectos maestros a gran escala de rehabilitación de un sistema de alcantarillado, una inspección simple del estado actual de las tuberías o al momento de la inspección no es suficiente. Se recomienda aplicar un modelo predictivo para priorizar los

sectores a donde deben ir los proyectos de renovación y así impedir serios y costosos problemas de fallas en la red.

- Los modelos preventivos son de gran ayuda para evitar fallas graves y de gran magnitud en tuberías, puesto que con predicciones acertadas y decisiones de los encargados a tiempo basadas en el modelo, se pueden rehabilitar los tramos conflictivos antes de que estos fallen, evitando así daños y pérdidas económicas.
- Se alerta el gran riesgo que corren ciudades grandes y medianas alrededor del mundo que no cuenten con planes a largo plazo de rehabilitación de sus redes, puesto que se llegaría a un punto que la mayor parte de la red (70-80%) se encuentre en estado de riesgo cercano al colapso. Llegar a esa situación y pretender repararla no solo sería económicamente difícil, también generaría un caos en la movilidad de la ciudad, afectando seriamente las actividades cotidianas de sus habitantes.
- De los modelos investigados, el de Ugarelli (Método estadístico con fundamentos de Markov) aplicado a la ciudad de Oslo, ha sido la aplicación a mayor escala y fue utilizado para el desarrollo del plan maestro de rehabilitación de alcantarillado de la ciudad que se llevará a cabo en los próximos 15 años.
- El modelo de supervivencia de tuberías desarrollado por Duchesne es el único que fue validado para distintos parámetros (detalle de información de inspecciones) como para el número de tuberías. Para ambos casos el modelo obtuvo resultados confiables, abriendo la posibilidad para que sea aplicado en otra ciudad de distintas características poblacionales.
- No existe un modelo prototipo que pueda ser aplicado a cualquier ciudad; cada modelo fue desarrollado según las particularidades de la ciudad de estudio. Para poder aplicarlo se debería modificar al modelo escogido y adaptarlo a las características de la nueva ciudad donde se desee implementarlo.
- Los autores de los modelos coinciden en que la mayor parte de la incertidumbre encontrada en sus trabajos se debe a las limitaciones de las inspecciones de CCTV para determinar el estado de la red. La subjetividad al momento de decidir o aplicar una calificación a determinado tramo hace que la determinación del estado no siempre coincida con la realidad y la probabilidad que dicha condición sea errada es muy alta. Esto afecta los resultados predictivos del modelo, puesto que dicha evaluación de las redes es utilizada como dato de entrada para TODOS los modelos descritos en el trabajo.
- A pesar de la incertidumbre presente en inspecciones de CCTV, los modelos presentados las utilizan ya que en la realidad la mayor parte de ciudades solo cuenta con este tipo de inspecciones y es la única información disponible.
- Una de las maneras para reducir la incertidumbre en las inspecciones es la implementación de una misma reglamentación. De esta manera tener un mismo criterio para evaluar los defectos encontrados y así poder valorar el desempeño de modelos en distintas ciudades.

ÍNDICES

- Consisten en una alternativa complementaria para las inspecciones de CCTV, con el fin de la determinación del estado de una red más cercana a la realidad. Esto ya que considera una serie de parámetros que las inspecciones pasan por desapercibidas como es el fenómeno de sobrecarga o vulnerabilidades del sitio.
- El primer índice hidráulico propuesto por Bennis es el único que no requiere información de inspecciones de CCTV, dicho modelo puede ser desarrollado con información básica de la tubería como diámetro, pendiente y profundidad de excavación. Se recomendaría su uso para zonas de ciudades pequeñas a medianas donde no cuenten con inspecciones de CCTV y existan problemas constantes de sobrecarga en períodos de lluvia.
- Para calcular un índice robusto que indique el estado de una tubería, información sobre su desempeño hidráulico como estructural es requerido. Para determinar dicho estado estructural modelos difusos fueron los que presentaron los mejores resultados para su desempeño.
- El índice hidráulico propuesto por Bennis está directamente relacionado al fenómeno de sobrecarga y es capaz de diferenciar si dicho fenómeno es causado por la tubería en análisis o por los efectos de tuberías aguas abajo.

ANÁLISIS DE DAÑOS Y REPRESENTACIÓN GEOREFERENCIADA

- Para la determinación de prioridades de mantenimiento y reparación de alcantarillado, el análisis de daños es una herramienta muy útil, puesto que si múltiples proyectos de rehabilitación se deben llevar a cabo, un análisis de daños puede ayudar a empresas a decidir cuál es el proyecto más costo eficiente.
- Una representación Georreferenciada de las condiciones en las que se encuentran las tuberías es de vital importancia para poder realizar análisis de daños, ya que se logra identificar zonas sensibles de la ciudad como hospitales o centros de estudio entre otras.
- Este tipo de métodos deben ser considerados como complementarios y aplicados en conjunto con alguna otra metodología de las propuestas. Tal es el caso de la investigación de Baah, dónde un modelo para determinar la condición de la tubería es usado en conjunto con un análisis de riesgo y consecuencia de falla.
- Una representación gráfica del estilo usada en la investigación de Baah, es primordial para entender de mejor manera el funcionamiento de la red. Baah demostró que al utilizar programas georreferenciados como ArcGis y asignar en sus distintas capas propiedades relevantes de la tubería (condición interna, consecuencia de falla), se logra obtener una visión general del funcionamiento de la red, con la opción de poder correlacionarlo con otros factores relevantes a la rehabilitación y renovación.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

- En la literatura se encuentra una tendencia de este tipo de investigaciones, que podría entenderse que a futuro será la metodología predominante para la determinación del estado de redes de alcantarillado, como lo fueron en su tiempo los modelos estadísticos.
- Según las comparaciones hechas por el autor Vitor Sousa, redes neuronales es el tipo de metodología que mayor porcentaje de aciertos brinda para predecir el estado de una red de alcantarillado.
- Si bien las investigaciones de inteligencia artificial han traído resultados favorables, todavía no han sido aplicados a gran escala. De las investigaciones que se tiene conocimiento han sido a nivel de estudio y en sectores específicos de municipalidades.
- La principal razón que de cierta manera detiene una aplicación a gran escala de inteligencia artificial, concretamente redes neuronales, es su funcionamiento del tipo caja negra, que impide una correcta calibración una vez que el modelo llega a ser aplicado a una municipalidad. Sin embargo mayores investigaciones en el tema como viene sucediendo prometen superar este hecho y facilitar su aplicación. Hecho que además ocurre por un arraigo que todavía persiste en el uso de modelos estadísticos, los cuales dominaron la literatura y el mercado años atrás.

ANÁLISIS EN LA TOMA DE DECISIONES

- El estudio realizado por la universidad de DELF trae a discusión un factor poco mencionada en la literatura, el cual es la influencia política en la toma de decisiones para proyectos de renovación y rehabilitación. En la toma real de decisiones en Holanda se evidenció que en el 51% de proyectos de rehabilitación fueron mayormente influenciados por temas políticos.
- Una alta intervención política en la toma de decisiones para proyectos de rehabilitación de ninguna manera implica dejar de lado la investigación de metodologías y recolección de datos en las redes de alcantarillado; al contrario lo que genera es un mayor esfuerzo y compromiso para desarrollar mejores modelos y métodos cada vez más eficientes y con mejores resultados para poder influir con mayores argumentos en la decisiones políticas.
- Cabe considerar que para la toma de decisiones muy difícilmente se impondrá la decisión racional que viene a través de modelos, en la realidad intervienen un mayor número de actores con distintas prioridades e intereses, por lo que se debe estar abierto a la posibilidad de llegar a acuerdos mediante negociaciones.

GENERAL

- Al momento de seleccionar una metodología para determinar el estado de una red de alcantarillado, se debe pensar no sólo en la tecnología más avanzada para realizar la inspección en sitio, si no en como procesar dicha información de una manera óptima y automatizada con reglamentación y estándares de calificación claros que permitan establecer el estado real de la tubería en análisis.
- Una vez que se cuente con el estado de determinada tubería, necesariamente se debe pensar en complementar dicha información ya sea con un modelo predictivo o índice, puesto que una simple inspección en sitio es insuficiente para desarrollar un proyecto futuro de rehabilitación.
- *La gran utilidad de los modelos predictivos es emplear al máximo y de mejor manera la información obtenida de las inspecciones, ya no solo utilizar dichas inspecciones para rehabilitar las zonas más críticas o que ya han colapsado. El futuro está en el uso de dichos modelos para desarrollar planes de rehabilitación o renovación a largo plazo, donde tuberías que actualmente lucen como regulares, conocer el momento más probable que entraran en un estado deficiente y rehabilitarlas, sin tener que esperar a que colapse para renovarla.*
- La recolección de datos vía CCTV o tecnologías similares nunca debe detenerse, incluso estas con el tiempo deben ampliarse considerando más factores aparte de la tubería, como son características del sitio donde se encuentra instalada, su entorno y vulnerabilidades visibles. Esta información es el dato de entrada para la mayoría de metodologías investigadas y sin estos muy difícilmente se logrará desarrollar un modelo u herramienta que ayude a priorizar e identificar proyectos de renovación y rehabilitación.
- Ningún modelo u metodología investigada puede ser señalado como la “mejor”, puesto que cada ciudad o municipio tiene sus particularidades tanto operativas como de funcionamiento de la red de alcantarillado. Las metodologías de inteligencia artificial e índices de desempeño global son los más prometedores y podrían ser adaptadas a las particularidades de cada ciudad. En primer lugar métodos de inteligencia artificial no requieren encontrar una función que relacione los atributos de la tubería con su condición; tiene un enfoque totalmente distinto basado en iteraciones y los datos de entrada, y lo mejor es que se ha demostrado que obtiene resultados con menor porcentaje de error, comparado con otros modelos. Y por último los índices de desempeño global toman en consideración no solo factores hidráulicos, los combinan con otros igualmente influyentes en el desempeño de la tubería, lo que lo hace un indicador mucho más robusto.

5.2 Trabajo Futuro

- Analizar la guía de inspecciones colombiana así como la tecnología y metodología con la que realizan inspecciones, para poder recomendar un índice o modelo predictivo que podría ser utilizado en Bogotá.
- Aplicar una de las metodologías recomendadas al acueducto de Bogotá en un sector proporcionado por la empresa. Analizar dichos resultados para contemplar la posibilidad de aplicarlo a una escala mayor.

6. REFERENCIAS

- Ariamalar, Selvakumar. (2012) “Demonstration and Evaluation of State-of-the-Art Wastewater Collection Systems Condition Assessment Technologies”.
- Angkasuwansiri, T. (2014) “Development of a Robust Wastewater Pipe Performance Index”, Virginia Tech. ASCE.
- Baah Kelly, Brajesh Dubey, Richard Harvey, Edward McBean (2014). “A risk-based approach to sanitary sewer pipe asset management”. University of Guelph, Science of the Total Environment.
- Baik, Hyeon-Shik. (2006) “Estimating Transition Probabilities in Markov Chain-Based Deterioration Models for Management of Wastewater Systems”. University West Lafayette. Journal of water resources planning and management.
- Bennis, Saad. (2003). “Hydraulic Performance Index of a Sewer Network”, JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING. ASCE.
- Bennis, Saad, Tagherouit Ben. (2011). “A Fuzzy Expert System for Prioritizing Rehabilitation of Sewer Networks”. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering.
- Butler, David. (2011). “Urban Drainage”. London. Spoon Press.
- Chae Myung Jin, Dulcy M. Abraham (2001). “Neuro-Fuzzy Approaches for Sanitary Sewer Pipeline Condition Assessment”. Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 15.
- Cortés, Manuela. (2014). “Minería de datos para el mantenimiento predictivo de redes de distribución de agua potable”. Universidad de los Andes.
- Dirksen, J. (2008). “Probabilistic modeling of sewer deterioration using inspection data”. Delf University Netherland. IWA Publishing.
- Duchesne, Sophie. (2013). “A Survival Analysis Model for Sewer Pipe Structural Deterioration”, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. Quebec, Canada.
- Duchesne Sophie, Kassandra Bouchard (2014). “Assessing the impact of renewal scenarios on the global structural state of sewer pipe networks”. NRC Research Press.
- E. V. Ana, W. Bauwens (2010). “Modeling the structural deterioration of urban drainage pipes: the state-of-the-art in statistical methods”. Urban Water Journal.

-
- Egger C., A. Scheidegger (2013). “Sewer deterioration modeling with condition data lacking historical records”. *Water Research* 47.
- Fazal Chughtai, Tarek Zayed (2008). “Infrastructure Condition Prediction Models for Sustainable Sewer Pipelines”. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 22. ASCE.
- Halfawy Mahmoud, Jantira Hengmeechai (2013). “Automated defect detection in sewer closed circuit television images using histograms of oriented gradients and support vector machine”. *Automation in Construction* 38.
- Harvey Richard, Edward McBean (2015). “A Data Mining Tool for Planning Sanitary Sewer Condition Inspection”. University of Guelph, Springer International Publishing.
- Hoffman, Joe P.E. (2014) “Portland’s Sewer Rehabilitation Program Development & Implementation”. City of Portland, Bureau of Environmental Services. ASCE.
- Iyer, Shivprakash. (2011) “Evaluation of ultrasonic inspection and imaging systems for concrete pipes”. The Pennsylvania State, University.
- Le Gauffre P, Dirksen J., F. H.L.R. Clemens, H. Korving, F. Cherqui, , T. Ertl , H. Plihal , K. Müller & C. T.M. Snaterse (2013). “The consistency of visual sewer inspection data”. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*.
- Mashford John, David Marlow (2011). “Prediction of Sewer Condition Grade Using Support Vector Machines”. American Society of Civil Engineers.
- Mehdi Ahmadi, Frédéric Cherqui, Jean-Christophe De Massiac & Pascal Le Gauffre (2014). “From sewer inspection programmes to rehabilitation needs: research and results related to data quality and availability with the support of numerical experiment”. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.
- Sousa, Vitor José P. Matos (2014). “Evaluation of artificial intelligence tool performance and uncertainty for predicting sewer structural condition”. *Universidade de Lisboa, Automation in Construction*.
- Syadaruddin Syachrani. (2013). “Decision Tree–Based Deterioration Model for Buried Wastewater Pipelines”. American Society of Civil Engineers.
- Ugarelli, R.M, Y. Le Gat. (2013) “Wastewater pipes in Oslo: from condition monitoring to rehabilitation planning”. SINTEF (Research, technology and innovation).

-
- van Riel Wouter, Ellen van Bueren, Jeroen Langeveld, Paulien Herder & François Clemens (2015). “Decision-making for sewer asset management: Theory and practice”. Urban Water Journal.
- van Riel W., J.G. Langeveld, P.M. Herder & F.H.L.R. Clemens (2014). “Intuition and information in decision-making for sewer asset management”. Urban Water Journal
- Williamson Temple T., W. Logan Burton (2014). “Developing a Successful Wastewater Collection System Rehabilitation Program in Corpus Christi, Texas. Pipelines 2014. ASCE.
- Wirahadikusumah, R. (1998). “Assessment technologies for sewer system rehabilitation”. Automation in Construction 7.
- Wu Wei, Zheng Liu. (2013). “Classification of defects with ensemble methods in the automated visual inspection of sewer pipes”. Sichuan University.