

CADENAS DE MARKOV APLICADAS A LA TOMA DE DECISIONES EN
GESTIÓN PATRIMONIAL DE ALCANTARILLADOS

YENNY KAROLA GUANAY FORERO
NATHALIE HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2011

CADENAS DE MARKOV APLICADAS A LA TOMA DE DECISIONES EN
GESTIÓN PATRIMONIAL DE ALCANTARILLADOS

YENNY KAROLA GUANAY FORERO
NATHALIE HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ

Trabajo presentado para la obtención del título de Ingeniería Civil

ANDRÉS TORRES
(IC, MSc, PhD)
Director

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2011

DEDICATORIA

A nuestras familias y amistades que siempre caminarán a nuestro lado y estarán ahí para brindarnos su apoyo incondicional. Ustedes son nuestra fuente de motivación y la razón de querer ser un orgullo para ustedes.

“A mis padres Josué Guanay y Consuelo Forero, que son las personas que más amo en este mundo y han estado presente en cada paso que doy. Su ejemplo, constancia y amor han sido vitales para llegar a este punto en mi vida, los amo.

A mis hermanos Josué, Edward, Jorge, a mi tía Marina y a Wylliam porque nunca han dejado de confiar en mí, y se han convertido en mi apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.” Yenny Guanay Forero.

“A mi papá José Rafael Hernández Hernández que fue mi fuente de inspiración, guía y sabiduría para seguir adelante al terminar mi carrera profesional como él hubiese querido. Y esta tesis y demás logros obtenidos son dedicados a su memoria.

A mi mamá Ana Elvira Rodríguez Jiménez y a mis hermanos por apoyarme durante este proceso.

A mi mamita Empera, tíos y primos que fueron una mano de apoyo en los momentos difíciles que enfrenté, ayudándome a salir a adelante y a culminar mi carrera profesional. Los quiero mucho” Nathalie Hernández Rodríguez.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo damos gracias a Dios por la vida y las oportunidades que nos ha brindado para salir adelante, por nuestros padres porque gracias a ellos estamos culminando nuestra carrera profesional, y porque nunca nos abandonó llenándonos de fuerza y perseverancia para la finalización de esta etapa de nuestras vidas.

Al Ingeniero Andrés Torres, que fue nuestra guía en la elaboración de este trabajo, por la confianza que depositó en nosotras. Su paciencia, dedicación y consejos fueron vitales para la realización de este trabajo de grado.

A los amigos, que nos acompañaron en este proceso. Su amistad incondicional y su apoyo sincero se convirtieron en fuente de motivación para la realización de este trabajo.

A los ingenieros William Clavijo, Luis Alberto Jaramillo y Juan Manuel Gutiérrez por su constante interés y aportes que fueron la base de este trabajo de grado.

A la Pontificia Universidad Javeriana por facilitarnos los equipos y espacios necesarios para la realización de este trabajo.

Contenido

1	INTRODUCCIÓN.....	12
2	MARCO TEÓRICO.....	15
2.1	Alcantarillados.....	15
2.1.1	Definiciones.....	15
2.1.2	Mantenimiento (Navarro y Sandoval, 2010).....	16
2.1.3	Rehabilitación y mantenimiento según Norma Técnica Ras 2000.....	18
2.2	Métodos de Análisis de datos.....	19
2.2.1	Percentiles (Anderson, Sweeney et al, 2004).....	19
2.2.2	Prueba de Bartlett (Martín, Cabero, et al. 2008).....	19
2.2.3	Shapiro Wilk (Hanwen, Gutiérrez, 2010).....	20
2.2.4	Valor p (Anderson, Sweeney et al. 2004).....	21
2.2.5	Prueba t (Berenson, Krehbiel et al, 2006).....	21
2.2.6	Análisis de Varianza ANOVA (Lind, Marchal et al, 2004).....	22
2.2.7	Prueba de Kruskal-Wallis (Anderson, Sweeney et al, 2004).....	22
2.2.8	PCA (Análisis de componentes principales) (Pla. Laura, 1986).....	23
2.3	Cadenas de Markov (Wai-ki C y Ng. M, 2006).....	24
2.4	Simulaciones de Montecarlo (Evans, 2000).....	25
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
3.1	Zona de estudio.....	26
3.1.1	Historia del alcantarillado en Bogotá (Rodríguez, 2003).....	26
3.1.2	Descripción de la Cuenca. (Alcaldía Mayor de Bogotá, Universidad militar, 2008).....	29
3.1.3	Información existente de la zona de estudio.....	33
3.2	Herramientas computacionales.....	35
3.2.1	ArcGIS.....	35
3.2.2	Programa R (R Development Core Team 2011).....	36
3.3	Metodología empleada para estimar la Condición Actual de una red de alcantarillado.....	37
3.4	Metodología para estimar la Condición Futura de una red de alcantarillado	42
4	RESULTADOS.....	45
4.1	Condición actual de una red de alcantarillado.....	45
4.1.1	Pruebas Preliminares.....	45
4.1.2	Probabilidad de existencia.....	51

4.2	Clasificación de tuberías.....	52
4.3	Predicción de la condición futura de una red de alcantarillado	66
4.3.1	Condición año a año.....	66
4.3.2	Proyección condición año a año	74
5	CONCLUSIONES.....	89
6	RECOMENDACIONES.....	91
7	REFERENCIAS	92

Índice de tablas

Tabla 1. Localidades en la Cuenca Salitre	29
Tabla 2. Longitud de Redes Alcantarillado Sanitario Cuenca Salitre	32
Tabla 3. Longitud de Redes Alcantarillado Pluvial Cuenca Salitre	32
Tabla 4. Datos reporte del daño en la cuenca El Salitre	34
Tabla 5. Base de datos redes de tuberías cuenca El Salitre	35
Tabla 6. Librerías de R usadas en el proyecto.	36
Tabla 7. Funciones de R usadas en el proyecto.	37
Tabla 8. Daños existentes en la zona de estudio	38
Tabla 9. Clasificación de los daños propios de las tuberías	38
Tabla 10. Atributos de las tuberías	39
Tabla 11. Muestra base de datos inicial	39
Tabla 12. Combinación de daños y su condición respectiva.	41
Tabla 13. Escenarios propuestos	43
Tabla 14. Kruskal-Wallis, tuberías sanitarias.....	46
Tabla 15. Kruskal-Wallis, tuberías pluviales	46
Tabla 16. Prueba t, Relación entre daños	46
Tabla 17. Kruskal-Wallis Domiciliaria Reconstruida	47
Tabla 18. Kruskal-Wallis con variable dependiente el tipo de daño	48
Tabla 19. Prueba t. Relación de daños con el tipo de tuberías.	48
Tabla 20. Prueba t. Relación daños con longitud	48
Tabla 21. Probabilidad de existencia de falla	52
Tabla 22. Total tuberías por condición	55
Tabla 23. Condición tuberías Sanitarias.....	57
Tabla 24. Condición tuberías Pluviales	58
Tabla 25. Tuberías en Condición 0	60
Tabla 26. Tuberías en Condición 1	61
Tabla 27. Tuberías en condición 2	62
Tabla 28. Tuberías en Condición 3	63
Tabla 29. Tuberías en Condición 4	64
Tabla 30. Tuberías en condición 5	65
Tabla 31. Daños presentados en cada año.....	66
Tabla 32. Condiciones año 2003.....	67
Tabla 33. Condición tuberías año 2004.....	68
Tabla 34. Condición tuberías año 2005.....	69
Tabla 35. Condiciones tuberías año 2006	70
Tabla 36. Condiciones tuberías año 2007	71
Tabla 37. Condiciones tuberías año 2008	72
Tabla 38. Condición tuberías año 2009.....	73
Tabla 39. Matriz de relación tuberías existentes escenario 2003-2004-2005	74
Tabla 40. Proyección No. tuberías al 2008	75
Tabla 41. Proyección No. tuberías al 2009	75
Tabla 42. Relación VP/FP, para cada escenario propuesto según año proyectado	78
Tabla 43. Proyección No. tuberías al 2007	79

Tabla 44. Probabilidad de condición para cada tubería de la red, en el año 2007 - Escenario escogido	80
Tabla 45. Carta de Colores para la condición más probable.....	80
Tabla 46. Carta de colores para la segunda condición más probable.....	86

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa Cuenca El Salitre.....	30
Figura 2. Localización reporte de tipos de daños cuenca El Salitre	33
Figura 3. Localización tuberías cuenca El Salitre	34
Figura 4. Subcuencas de la cuenca El Salitre	53
Figura 5. Condición actual tuberías de alcantarillado pluvial y sanitaria, cuenca El Salitre	54
Figura 6. Condición actual tuberías de alcantarillado sanitarias. Cuenca Salitre ..	56
Figura 7. Condición actual tuberías de alcantarillado pluvial. Cuenca Salitre	57
Figura 8. Tuberías con Condición 0 actual.....	60
Figura 9. Tuberías con Condición 1 actual.....	61
Figura 10. Tuberías con Condición 2 actual.....	62
Figura 11. Tuberías con Condición 3 actual.....	63
Figura 12. Tuberías con Condición 4 actual.....	64
Figura 13. Tuberías con Condición 5 actual.....	65
Figura 14. Condición actual tuberías año 2003.....	67
Figura 15. Condición actual tuberías año 2004.....	68
Figura 16. Condición actual tuberías año 2005.....	69
Figura 17. Condición actual tuberías año 2006.....	70
Figura 18. Condición actual tuberías año 2007.....	71
Figura 19. Condición actual tuberías año 2008.....	72
Figura 20. Condición actual tuberías año 2009.....	73
Figura 21. Condición más probable de las tuberías para el año 2006	81
Figura 22. Probabilidad de las tuberías en condición 5 (C5) para el año 2006	81
Figura 23. Condición más probable de las tuberías para el año 2007	82
Figura 24. Probabilidad en la tuberías en condición 5 (C5) para el año 2007	82
Figura 25. Condición más probable para el año 2008.....	83
Figura 26. Probabilidad de las tuberías en condición 5 (C5) para el 2008	83
Figura 27. Condición más probable para el año 2009.....	84
Figura 28. Probabilidad de las tuberías en condición 5 (C5) para el año 2009	84
Figura 29. Condición más probable para el año 2008-Escenario No 5	85
Figura 30. Probabilidad de la condición 5 (C5) para el año 2008-Escenario No 5	85
Figura 31. Segunda condición más probable para el año 2006 - Escenario escogido.....	86
Figura 32. Probabilidad de la condición 4 (C4) para el año 2006-Escenario Escogido	87
Figura 33. Segunda máxima probabilidad escenario 2003-2004 proyectado al año 2008	88

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Boxplot del Tiempo de reparación para el daño Domiciliaria Reconstruida para cada tipo de tubería	47
Gráfica 2. Boxplot de la longitud respecto cada tipo de daño	49
Gráfica 3. Representación de PCA con variable de separación tipo de daño: "daño 1" con respecto al "daño 2"; componente 1 en x, componente 2 en y.....	50
Gráfica 4. Representación del grado de pertenencia de cada variable por los componentes principales 1 (en x) y 2 (en y).....	51
Gráfica 5. Distribución tipo de tuberías en la red.....	53
Gráfica 6. Representación de las condiciones presentadas en la cuenca El Salitre.	55
Gráfica 7. Representación condiciones tuberías sanitarias.....	57
Gráfica 8. Representación condiciones tuberías pluviales	58
Gráfica 9. Representación tuberías en Condición 0	60
Gráfica 10. Representación tuberías en Condición 1	61
Gráfica 11. Representación gráfica tuberías en Condición 2	62
Gráfica 12. Representación gráfica tuberías en Condición 3	63
Gráfica 13. Representación gráfica tuberías en Condición 4	64
Gráfica 14. Representación gráfica tuberías en Condición 5	65
Gráfica 15. Representación gráfica Condición año 2003	67
Gráfica 16. Representación gráfica tuberías año 2004	68
Gráfica 17. Representación gráfica tuberías año 2005	69
Gráfica 18. Representación gráfica tuberías año 2006	70
Gráfica 19. Representación gráfica tuberías año 2007	71
Gráfica 20. Representación gráfica tuberías año 2008	72
Gráfica 21. Representación gráfica tuberías año 2009	73
Gráfica 22. VP vs No. Simulaciones para el año 2008.....	76
Gráfica 23. VP vs No. Simulaciones para el 2009.....	77
Gráfica 24. Variación VP/FP por escenarios	79

Índice de Anexos

Anexo No. 1: Base inicial de datos

Anexo No. 2: Relación de combinación de daños y condición obtenida

Anexo No. 3: Pruebas estadísticas iniciales con variable dependiente el tiempo de reparación según el tipo de tubería

Anexo No. 4: Pruebas estadísticas iniciales con variable dependiente el tiempo de reparación según el daño presentado

Anexo No. 5: Pruebas estadísticas iniciales con variable dependiente el daño presentado

Anexo No. 6: Análisis de componentes principales (PCA)

Anexo No. 7: Probabilidad de existencia de falla

Anexo No. 8: Proyección de los escenarios escogidos año a año

Anexo No. 9: Mapas de máxima probabilidad

Anexo No. 10: Mapas de segunda máxima probabilidad

Anexo No. 11: Código del programa

1 INTRODUCCIÓN

Desde siglos atrás, producto de las constantes epidemias originadas por la desorganización de las nacientes ciudades europeas, se establecieron sistemas de alcantarillado como una solución para mejorar el bienestar y la salubridad de sus habitantes, y es por esto que las diferentes naciones se han preocupado por mantener un estándar en este servicio.

Dado el constante desarrollo y crecimiento demográfico que se ha tenido a través del tiempo, se han realizado diversas investigaciones y escenarios aplicativos en ciudades de diferentes países para una mejor toma de decisiones en un ambiente de alta incertidumbre, típico de sistemas de alcantarillado. Dichas herramientas han sido claves para el desarrollo de estos sistemas y para su sostenibilidad técnica, financiera y ambiental. A continuación se menciona una breve síntesis de las metodologías utilizadas en algunas ciudades:

En el Reino Unido en el año 1978 (Yehuda Kleiner et al. 2007) se realizó un proyecto investigativo de las fallas en las tuberías de los alcantarillados, con el fin de desarrollar un manual para clasificar los daños en las tuberías y para sugerir métodos de solución. Este manual se basa en la clasificación de deterioro de las tuberías a partir de dos protocolos: (i) WRC (Water research centre-UK) el cual usa cinco calificaciones con rangos que varían de 0 a 165; (ii) NRC (National Research Council-Canadá) el cual usa seis calificaciones con rangos que varían de 0 a 20. Yehuda Kleiner et al. (2007) proponen una sola clasificación fusionando las clasificaciones estructurales y operacionales de los protocolos mencionados arriba y utilizando procesos markovianos con el fin de pronosticar el deterioro de las tuberías a lo largo del tiempo. La clasificación propuesta da como resultado siete rangos (excellent, good, adequate, fair, por, bad y failing), para posteriormente aplicar los procesos markovianos para el año 2000 sobre dos redes de alcantarillado. Finalmente la conclusión a la cual llega este estudio es que es muy difícil asegurar que la inspección y evaluación del estado llevado a cabo durante muchos años de diferencia muestre resultados consistentes. Esto limita este tipo de estudios y requiere la aplicación de criterios ingenieriles para el uso de ponderación de variables resultado de inspecciones consideradas poco fiables.

En Copenhague (Dinamarca), se desarrolló la herramienta HAZOP (Johansen N.B. et al. 2007), la cual, a partir de una recolección de datos en una zona determinada de la ciudad y con el criterio de expertos, realiza una evaluación detallada de riesgos para poder reducirlos e identificar los más críticos. Este proyecto contó con la colaboración de Copenhagen Council's Sewer System, entidad encargada del servicio de alcantarillado en la ciudad de Copenhague, la cual proporcionó la base de datos de la zona de estudio.

En Correggio (Italia) (Ugarelli Rita et al. 2007) se implementó un método para encontrar un balance entre costos y número aceptable de fallas, en función del mantenimiento de las tuberías. El criterio utilizado para evaluar las soluciones

propuestas fue el nivel de servicio, el cual abarca características físicas, hidráulicas y operacionales con base en inspecciones CCTV de las redes tales como: topología de la red, tamaño de la tubería, forma del tubo, nivel de la tubería, material de la tubería, niveles de los pozos de inspección, carga hidráulica del líquido, nivel freático, cargas de tráfico y de superficie, tipo de suelo, edad, técnicas de construcción, historial de las obstrucciones anteriores e historial de mantenimiento y rehabilitación de la red.

En Flandes (Bélgica) (G. De Guedre et al. 2007) se desarrolló e implementó “Hydroplan EU”, con base en datos provenientes de cinco ciudades europeas. Este aplicativo permite generar un análisis del impacto de las posibles fallas de alcantarillado a partir de la identificación del daño (hidráulico, ambiental o estructural) para adoptar una solución específica en los tramos evaluados. La ventaja más sobresaliente fue lograr una gestión integrada para los administradores de este servicio en grandes ciudades, mostrando una metodología que garantice menores inversiones de dinero en la operación y mantenimiento de las redes de tubería, aumentando el nivel de servicio, por medio de la atención priorizada de los riesgos más probables. “Hydroplan EU” es una metodología flexible para la gestión de activos, abierto a la gestión y las decisiones de ingeniería. Hace un uso limitado de programas específicos, integrando bases de datos existentes.

En la Ciudad de Edmonton (Canadá), se realizó una metodología para predecir la condición de fallas de las tuberías a partir de tres escenarios (Anna, E. Jr. & Bauwens, W. 2007): *(i)* en el primero se pretende conocer la condición inicial de las tuberías a través de la edad y características físicas (longitud, material) de las mismas; *(ii)* el segundo pretende predecir el estado futuro (5 años) de la tubería, partiendo de las condiciones actuales; *(iii)* finalmente, el último escenario se refiere al pronóstico de los costos presentes y futuros asociados a las acciones de gestión patrimonial del alcantarillado, mediante herramientas probabilísticas como Cadenas de Markov y métodos no determinísticos como el método de Montecarlo.

Los anteriores escenarios mencionados tan sólo son algunos ejemplos de una gran cantidad que existen en diferentes países desarrollados. A pesar de esta vasta experiencia, en Colombia no se han implementado o desarrollado aún metodologías para las condiciones propias de las redes de alcantarillados existentes, a pesar que se tienen bases de datos en las empresas responsables de la prestación de este servicio público.

Al poder mitigar los daños en las tuberías, se previenen no sólo daños estructurales e hidráulicos, sino que también se disminuye el impacto ambiental originado por sus fallas, las cuales generan infiltración del agua residual en el suelo, contaminación del agua subterránea y flujo a lo largo de la superficie de la tierra y/o las calles, que hace que estos problemas se conviertan en una amenaza para la salud pública.

Partiendo de las problemáticas antes mencionadas, de los beneficios que traería una mejor toma de decisiones en gestión patrimonial de alcantarillados urbanos y de la guía de las metodologías desarrolladas en otras ciudades, el objetivo de este trabajo de grado es el desarrollo de una herramienta para la toma de decisiones en gestión patrimonial de sistemas de alcantarillados aplicable a Bogotá D.C.; para esto fue necesario implementar una metodología para diagnosticar la condición actual de tramos de alcantarillados urbanos, proponiendo un método para estimar la evolución de las condiciones de funcionamiento con base en la metodología creada, para así establecer la aplicabilidad del método propuesto en la ciudad de Bogotá D.C, mediante su aplicación en la cuenca Salitre.

Este trabajo consta de las siguientes partes. En el capítulo 2 se encuentra una descripción sobre los conceptos básicos para el desarrollo del tema, así como de los conceptos teóricos utilizados para el mismo, sea el caso de todo lo concerniente al tema de alcantarillados, el mantenimiento de éstos y las técnicas existentes de rehabilitación. En el capítulo 3 se presenta una reseña histórica del alcantarillado de la ciudad de Bogotá D.C., la descripción de la zona de estudio, una breve presentación de las herramientas utilizadas para el análisis de datos y la metodología desarrollada para llegar al objetivo general. En el capítulo 4, se presentan los resultados obtenidos luego del análisis de datos que muestran la condición actual de las tuberías, la condición real año a año y la condición futura estimada. Finalmente se presentan los capítulos de conclusiones y recomendaciones obtenidos del análisis de los resultados de la aplicabilidad de esta metodología.

2 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se encuentra una contextualización de los conceptos y definiciones de los temas que se desarrollan en este trabajo, empezando por los alcantarillados, seguidos de su mantenimiento para finalizar con las técnicas de reparación de los mismos.

2.1 Alcantarillados

Para la realización de este trabajo, se trabajaron temas referentes a los daños presentados en las tuberías de las redes de alcantarillado, así como las características físicas que ellas presentan. Por este motivo, y teniendo en cuenta su importancia, a continuación se presenta un breve resumen de sus características.

2.1.1 Definiciones

Antes de entrar en materia, es necesario tener una concepción clara de los temas que involucra el proyecto y para esto se debe iniciar por diferenciar el tipo de agua transportada por los alcantarillados (Ministerio de desarrollo económico, 2000). Estas aguas se clasifican en tres tipos: *(i)* aguas lluvias, que son las provenientes de la precipitación pluvial, *(ii)* aguas residuales, que son generadas en residencias, edificios, fábricas e industrias y *(iii)* aguas servidas, que son las resultantes de los lavamanos, duchas y artefactos que no descargan materia fecal.

La anterior clasificación permite establecer los diferentes tipos de alcantarillados, entendiendo éstos como un conjunto de obras para la recolección, conducción y/o disposición final de las aguas residuales y de las aguas lluvias. Los tres tipos de alcantarillados son: *(i)* alcantarillado sanitario, que se encarga de la recolección y transporte de las aguas domésticas e industriales, *(ii)* alcantarillado pluvial, que recolecta y transporta las aguas lluvias y *(iii)* alcantarillado combinado que recolecta y transporta tanto aguas residuales como aguas lluvias (Ministerio de desarrollo económico, 2000).

Los alcantarillados están conformados por tuberías prefabricadas o construidas en el sitio. Éstas vienen fabricadas en múltiples materiales entre los que se pueden encontrar concreto, concreto reforzado, plástico, poliuretano de alta densidad, asbesto-cemento, hierro fundido, gres vitrificado, PVC, plástico con refuerzo de fibra de vidrio u otro material cuya tecnología y proceso de fabricación cumplan con las normas técnicas correspondientes (Ministerio de desarrollo económico, 2000).

Dentro de la red, existe un orden jerárquico que depende de la capacidad de flujo que reciben los elementos que la conforman y transitan por ellas. Los primeros elementos que conforman la red son las tuberías que salen de cada predio hacia el alcantarillado público a las que se les denominan “Conexiones Domiciliarias o Domiciliarias”. Éstas se dirigen hacia tuberías de mayor diámetro a las cuales se

les denomina colectores. Allí se origina la “Red secundaria de alcantarillado”, la cual dirige el flujo a colectores de mayor diámetro hasta llegar a conformar la “Red primaria del sistema de alcantarillado” o “Red Matriz”. Los conductos que reciben las afluencias de la red matriz generalmente se construyen cerca a quebradas o ríos y se conocen como interceptores. Su fin es evitar el vertimiento de las aguas residuales a los mismos (Caballero Sánchez, 2003).

Las tuberías suelen tener fallas durante su periodo de vida útil, estas pueden presentarse por obstrucciones que se originan por grasas, trapos o plásticos arrojados a las cámaras de inspección, por el crecimiento de raíces que penetran las tuberías causando daño total y/o piedras que son arrastradas a las red provocando dificultades en la tubería (Navarro, Sandoval, 2011); o por el desplazamiento con respecto a la posición inicial.

Al igual que otras estructuras de ingeniería, las tuberías de aguas pluviales tienden a presentar fallas que llevan al deterioro de las mismas. El deterioro de éstas se puede dividir en deterioro estructural y deterioro hidráulico. El primero es un proceso constante que reduce la capacidad de carga y se puede diagnosticar mediante la identificación de grietas y fracturas. Respecto al segundo, también es un proceso continuo pero que reduce la capacidad hidráulica de la tubería y se puede observar a través de una reducción de la sección transversal y un aumento de la rugosidad de la tubería debido a defectos hidráulicos tales como intrusiones de raíces de árboles y depósitos de sedimentos. El deterioro hidráulico lleva a fallas hidráulicas, tales como la obstrucción y el desbordamiento de las tuberías, generando inundaciones (Tran, 2007).

Por otro lado, las tuberías que se diagnostican como colapsadas, son tuberías que tienen una destrucción total de la estructura o parte de esta que impiden la prestación del servicio (EAAB-ESP, 2010). Esto puede ocurrir al presentarse una falla estructural o una falla operacional.

Las fallas estructurales se definen como el estado límite del servicio por encima del cual las deformaciones existentes o la capacidad estructural del sistema ha sido superado, que puede ser generado por deficiencias en el diseño o en la construcción, por aumento de las cargas actuantes o desplazamientos del terreno (EAAB-ESP, 2001), mientras las fallas operacionales están relacionadas con la pérdida de la capacidad en la conducción de los flujos, debido a la reducción de la sección transversal y/o aumento de la sedimentación, y por el aumento de las cargas actuantes o por desplazamientos del terreno (EAAB-ESP, 2001).

2.1.2 Mantenimiento (Navarro y Sandoval, 2010)

Para impedir la existencia de daños en las tuberías y aumentar su vida útil, las empresas prestadoras del servicio desarrollan acciones como: *(i)* mantenimientos preventivos, que son tipos de acciones que se ejecutan en las instalaciones y/o equipos para prevenir daños (Ministerio de desarrollo, 2000).; *(ii)* mantenimientos correctivos, los cuales son definidos como el conjunto de actividades que se

deben llevar a cabo cuando un equipo, instrumento o estructura ha tenido una parada forzosa o imprevista (Ministerio de desarrollo, 2000).; (iii) rehabilitación en las redes, que trata de la recuperación de los sistemas de alcantarillado que presentan fallas hidráulicas, estructurales y/o colmatación que impidan el flujo normal de las aguas, para conservar las condiciones originales de diseño y de construcción (EAAB-ESP, 2001); y (iv) renovación en las redes, que se refiere al grupo de técnicas que permiten sustituir o renovar una tubería de alcantarillado, con el fin de resolver problemas tanto estructurales como hidráulicos, implicando la colocación de tubería nueva de igual o de mayor diámetro(EAAB-ESP, 2001).

El mantenimiento de las tuberías de alcantarillado se realiza con el fin de buscar el mejoramiento de la superficie de las mismas, las cuales presentan deterioro en la superficie interior o exterior que impide su correcto funcionamiento, modificando sus características hidráulicas y disminuyendo su ciclo de vida, proceso que consta de dos etapas; la primera es el análisis de la necesidad en donde se debe tener en cuenta el desarrollo de la misma, la planeación para solventarla y la construcción del bien que la mitiga; la segunda etapa, se refiere a la vida útil del proyecto, que inicia en el momento en que empieza a operar el sistema terminando con el reemplazo total del mismo; mientras esto último sucede se van desarrollando tres momentos importantes como lo son la reparación, rehabilitación y reemplazo del sistema.

- i. Reparación: Hace referencia a actividades de menor trabajo. Las técnicas más comunes son limpieza y utilización de revestimiento con mortero. Las técnicas de limpieza se clasifican en tres modalidades, que varían según el instrumento empleado, ya que esta puede ser hidráulica, con rastrillo o con raspador mecánico. Por otra parte, la utilización del revestimiento con mortero mejora la superficie de la tubería, dando homogeneidad y proporcionando una disminución en la rugosidad de la superficie y se usa cuando se necesita implementar reparaciones en un punto localizado. Dentro de las técnicas de revestimiento se encuentra la estabilización química, el sellado de juntas y fisuras, los parches de reparación, recuperación de sección (Rerounding), reparaciones con robot y sellado de juntas de elementos de mampostería.
- ii. Rehabilitación: Trata de las actividades de renovación, es decir, incorporar nuevas tuberías para mejorar el rendimiento de un tramo, sin necesidad de destruir la tubería existente. Las técnicas más comunes de renovación son: Splining que es un método que permite ingresar una tubería de menor diámetro en otra de mayor, sin destruirla; Swagelining, técnica en la que se calienta y se disminuye el diámetro de una tubería de polietileno ligeramente menor a la existente para ser introducida en la antigua; Roldown que al igual que en el Swagelining, se disminuye el diámetro de la tubería de polietileno por medio del uso de rodillos y Ultraliner, el cual consiste en introducir una tubería de PVC o polietileno delgada y doblada dentro de la tubería a rehabilitar, y por medio de aire a presión se adhiere a las paredes de la tubería existente.

- iii. Reemplazo: Está demarcado por el momento en donde termina la vida útil del sistema, por lo que debe ser reemplazado. Existen dos maneras de reemplazo de tuberías: El método sin excavación de zanja (NS-061), y el método de excavación de Zanja a cielo abierto. El primero es un método de rompimiento de la tubería (Pipe Bursting) y de remoción de la tubería (Pipe Eating); el segundo es un método más convencional que normalmente está regido por normas propias para cada sistema de alcantarillado, para Bogotá estas normas son: (i) “NS-038. Manual de manejo de impacto urbano”, (ii) “NS-107. Requerimientos mínimos de higiene y seguridad industrial para el manejo de equipos empleados en labores de construcción de sistemas de acueducto y alcantarillado” y (iii) “NS-041. Requerimientos de higiene y seguridad industrial en excavaciones”.

2.1.3 Rehabilitación y mantenimiento según Norma Técnica Ras 2000

El proceso de rehabilitación y mantenimiento que sigue la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - ESP (EAAB-ESP) está regido por las normas y especificaciones del Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, que para el desarrollo de este trabajo se enfoca en el Título D. “Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y pluviales” el cual reglamenta que se debe iniciar por un mantenimiento preventivo de la red, siendo éste el resultado de un programa de inspección del sistema que permita detectar con anticipación los puntos potencialmente críticos.

De acuerdo con el nivel de complejidad del sistema, el mantenimiento debe seguir los siguientes requerimientos:

- (i) Para todos los niveles de complejidad del sistema se debe tener un programa de mantenimiento preventivo y las actividades de todo equipo electromecánico deben ser preferiblemente preventivas.
- (ii) La limpieza de redes mediante equipos varía según el nivel de complejidad del sistema (ver tabla D.8.4, RAS 2000), así mismo la frecuencia mínima de inspección varía para cada nivel, cada año para niveles de complejidad alto, cada dos años para niveles de complejidad medio alto y cada tres años para niveles de complejidad bajo y medio.

En el caso de alcantarillados simplificados de aguas residuales domésticas, la frecuencia de las inspecciones debe incrementarse a seis meses como mínimo con disponibilidad de equipos de limpieza como rotoondas y presión. El mantenimiento en estos sistemas debe concentrarse en los colectores y pozos principales, y dentro de estos últimos en los previos a estructuras especiales como sifones y estructuras de alivio.

Para los alcantarillados pluviales, es necesario limpiar los desarenadores ubicados al pie de laderas empinadas después de aguaceros fuertes y establecer la

evacuación de lodos provenientes de conexiones sanitarias erradas (*RAS 2000, Capítulo D*).

2.2 Métodos de Análisis de datos

Para el análisis de datos, se utilizaron los siguientes métodos: percentiles, prueba de Bartlett, Shapiro Wilk, prueba t , Análisis de varianza ANOVA, Kruskal Wallis, Análisis de componentes principales (PCA) y Taguchi.

A continuación se describen los métodos mencionados.

2.2.1 Percentiles (*Anderson, Sweeney et al, 2004*)

El percentil es el valor que da información acerca de cómo se distribuyen los valores sobre un intervalo, desde el menor hasta el mayor. Para datos que no tienen muchos valores repetidos, el p -ésimo percentil divide los datos en dos partes. Aproximadamente el $100-p$ por ciento de las observaciones tienen valores mayores que el p -ésimo percentil. Este percentil se define como sigue: El p -ésimo percentil es un valor tal que por lo menos p por ciento de las observaciones son menores o iguales que este valor y por lo menos $100-p$ por ciento de las observaciones son mayores o iguales que este valor.

Para el cálculo del p -ésimo percentil se aplica el siguiente método:

Primero se ordenan los datos de manera ascendente, luego se procede al cálculo del índice i

$$i = \left(\frac{p}{100} \right) n$$

en donde p es el percentil de interés y n es la cantidad de observaciones.

Posteriormente si i no es entero, se redondea. El valor entero inmediato mayor que i indica la posición del p -ésimo percentil; si i es entero, el p -ésimo percentil es el promedio de los valores de los datos ubicados en los lugares i e $i+1$.

2.2.2 Prueba de Bartlett (*Martín, Cabero, et al. 2008*)

La prueba de Bartlett se utiliza para someter a comprobación la hipótesis de que la matriz de correlaciones es la matriz identidad.

Si una matriz de correlaciones es la matriz identidad significa que las intercorrelaciones entre las variables son cero. En la diagonal principal hay unos, puesto que la correlación de una variable consigo misma es siempre uno. La función que tiene la matriz identidad en el álgebra matricial es idéntica a la función del uno en la aritmética clásica.

La prueba de Bartlett consiste en una estimación de chi-cuadrado a partir de una transformación del determinante de la matriz de correlaciones. Si se considera que $|R| = 1 \rightarrow R = 1$, la hipótesis nula se puede escribir de la siguiente forma:

$$H_0: R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = I \quad R = 1$$

Si se confirma H_0 significa que las variables no están correlacionadas, por lo tanto la nube de puntos en el espacio formaría una esfera unitaria.

Esta prueba contrasta si la matriz de correlaciones es una matriz identidad, que indicará que el escenario factorial es inadecuado. Esta prueba se fundamenta en que el determinante de una matriz es un índice de la varianza generalizada de la misma. Un determinante próximo a cero indica que una o más variables se podrían expresar como una combinación lineal de otras variables. Se ha demostrado que estos determinantes siguen una distribución chi-cuadrado.

La expresión matemática de la prueba de Barlett es:

$$X^2 = - \left[N - 1 - \frac{1}{6(2n + 5)} \right] \ln|R|$$

donde N es el número de individuos de la muestra y n el de variables que entran a formar parte de la matriz de correlaciones. Los grados de libertad vienen dados por la expresión:

$$g = \frac{1}{2(n^2 - n)}$$

Si con el test de esfericidad se obtienen valores altos de X^2 , se rechaza la hipótesis nula con un cierto grado de significación. En caso de no rechazarse la hipótesis nula, significaría que las variables no están correlacionadas. En este caso debería reconsiderarse la aplicación de un análisis factorial.

Para aplicar esta prueba se requiere que los datos procedan de una población que sigue una distribución normal multivariante.

2.2.3 Shapiro Wilk (Hanwen, Gutiérrez, 2010)

Shapiro & Wilk (1965) propusieron una prueba estadística para verificar que la distribución normal describe bien a un conjunto de datos x_i, \dots, x_n . El sistema de hipótesis de interés es:

- H_0 : La distribución normal es adecuada para los datos
- H_1 : La distribución normal no es adecuada para los datos

Para este sistema, la estadística de prueba se define como

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

donde la constante a se define como

$$(a_1, \dots, a_n) = \frac{m'V^{-1}}{m'V^{-1}V^{-1}m}^{1/2}$$

donde los componentes de m : m_1, \dots, m_2 son las esperanzas de las estadísticas de una muestra aleatoria con distribución normal estándar y V es la matriz de varianzas y covarianzas de las n estadísticas de orden.

Para completar la regla de decisión, se necesita la distribución nula de W , que en este caso es muy complicado hallarla, y por consiguiente se halla la distribución nula de W con diferentes valores de n que son obtenidos simulando repetidamente muestras de la distribución normal. En la práctica se rechaza H_0 para valores pequeños de W .

2.2.4 Valor p (Anderson, Sweeney et al. 2004)

El valor p es un método que permite decidir si se rechaza o no H_0 . Al suponer que la hipótesis nula es verdadera, el valor p es la probabilidad de obtener un resultado de la muestra que sea al menos tan improbable como lo que se observa. Con frecuencia al valor p se le llama *nivel observado de significancia*. El valor p para pruebas unilaterales siempre es el área hacia el extremo de rechazo de la distribución, en el estadístico de prueba. Con una prueba unilateral inferior y un valor de estadístico z mayor que cero, el valor p del área hacia el extremo inferior de rechazo será mayor que 0.05, lo que indica que H_0 no puede rechazarse.

2.2.5 Prueba t (Berenson, Krehbiel et al, 2006)

La prueba t es utilizada cuando la media poblacional y la desviación estándar de una muestra es desconocida. En su lugar se utiliza la desviación estándar muestral s . Si se supone que la población tiene una distribución normal, la distribución muestral de la media seguirá una distribución t con $n-1$ grados de libertad. Si la población no tiene una distribución normal, es válido utilizar la prueba t si el tamaño de la muestra es lo suficientemente grande como para que tenga efecto el teorema del límite central. La siguiente ecuación define al estadístico prueba t para determinar la diferencia que existe entre la media muestral \bar{X} y la media poblacional μ cuando se utiliza la desviación estándar muestral s .

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

donde el estadístico de prueba t sigue una distribución t que tiene $n-1$ grados de libertad.

2.2.6 *Análisis de Varianza ANOVA (Lind, Marchal et al, 2004)*

ANOVA es un método con el que se comparan tres o más medias poblacionales para determinar si son iguales. Adicionalmente, ANOVA se utiliza frecuentemente para estudiar la influencia de variables o factores sobre la variabilidad de un fenómeno medido a partir de una o más variables dependientes.

Para usar ANOVA se debe considerar que las poblaciones a estudiar: (i) estén distribuidas normalmente; (ii) tengan desviaciones estándar iguales, y (iii) las muestras se seleccionen independientemente.

La estrategia fundamental es calcular la varianza poblacional (desviación estándar al cuadrado) en dos formas.

$$MS_1 = \frac{SS_1}{K-1} \text{ y } MS_2 = \frac{SS_2}{K-1}$$

donde SS_1 es la desviación de todas las muestras, SS_2 la desviación de una muestra y $K-1$ son los grados de libertad.

Después de encontrar estas varianzas, si la razón es aproximadamente igual a 1, entonces las dos estimaciones son iguales. Si la razón es muy diferente de 1, se concluye que las medias de población no son iguales.

2.2.7 *Prueba de Kruskal-Wallis (Anderson, Sweeney et al, 2004)*

La prueba de Kruskal-Wallis es una prueba alterna a ANOVA. Estas se utilizan cuando no se puede comprobar la homogeneidad de varianzas ni la normalidad en el juego de datos. Su objetivo es el mismo que el de ANOVA.

Esta prueba se aplica para ver si tres o más poblaciones son idénticas, con $k \geq 3$ poblaciones; sus supuestos se establecen como sigue:

$$\begin{aligned} H_0: & \text{ Todas las poblaciones son idénticas} \\ H_a: & \text{ No todas las poblaciones son idénticas} \end{aligned}$$

La prueba de Kruskal-Wallis se basa en el análisis de muestras aleatorias independientes de cada una de las k poblaciones.

La prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis se puede emplear con datos ordinales y también con datos de intervalo o de relación. Además, esta prueba no requiere los supuestos de normalidad ni de varianzas iguales que requiere el análisis de varianza ANOVA. Por consiguiente, cuando los datos procedentes de $k \geq 3$ muestras aleatorias independientes son ordinales, o cuando se tiene duda respecto a los supuestos de normalidad y de varianzas iguales, la prueba de Kruskal-Wallis se constituye en un procedimiento estadístico alternativo que permite determinar si las poblaciones son idénticas. El estadístico para la prueba Kruskal-Wallis es la siguiente:

$$W = \left[\frac{12}{n_T(n_T + 1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} \right] - 3(n_T + 1)$$

donde k es la cantidad de poblaciones; n_i es la cantidad de elementos en la muestra i ; $n_T = \sum n_i$ es la cantidad total de elementos en todas las muestras; R_i es la suma de los rangos en la muestra i .

2.2.8 PCA (Análisis de componentes principales) (Pla. Laura, 1986)

Este es uno de los métodos de análisis más difundidos, que permite la estructuración de un conjunto de datos multivariados obtenidos de una población, cuya distribución de probabilidades no necesita ser conocida. Sus objetivos principales son (i) generar nuevas variables que puedan expresar la información contenida en el conjunto original de datos, (ii) reducir la dimensionalidad del problema que se está estudiando, como paso previo para futuros análisis, y (iii) eliminar, cuando sea posible, algunas de las variables originales si ellas aportan poca información.

Las nuevas variables generadas se denominan *componentes principales* y poseen algunas características estadísticas deseables, tales como independencia (cuando se asume multinormalidad y en todos los casos no correlación). Esto significa que si las variables originales no están correlacionadas, el análisis por componentes principales no ofrece ventaja alguna.

Dicho análisis se aplica, cuando se dispone de un conjunto de datos multivariados y no se puede postular, sobre la base de conocimientos previos del universo en estudio, una estructura particular de las variables. Cuando se conoce la existencia de una (o varias) variables independientes y, por lo tanto, otro conjunto de variable dependientes, pueden aplicarse las técnicas de regresión múltiple o las de regresión multivariada. Si se sabe que no existe ninguna relación entre las variables, habrá que abstenerse de buscar una explicación de la "relación" entre las variables, o entre los individuos a partir de dichas variables en forma conjunta.

El análisis por componentes principales deberá ser aplicado cuando se desee conocer la relación entre los elementos de una población y se sospeche que en

dicha relación influye de manera desconocida un conjunto de variables o propiedades de los elementos.

Los componentes principales tienen ciertas características que son “deseables”, (i) los componentes principales no están correlacionados y si, además, puede suponerse multinormalidad en los datos originales, son independientes; (ii) cada componente principal sintetiza la máxima variabilidad residual contenida en los datos.

Al estudiar un conjunto de n individuos mediante n -variables es posible encontrar nuevas variables denominadas $Y(k)$, $k=1, \dots, n$ que sean combinaciones lineales de las variables originales $X(j)$, e imponer a este sistema ciertas condiciones que permitan satisfacer los objetivos del análisis por componentes principales.

Esto implica encontrar ($n \times n$) constantes tales que:

$$Y(k) = \sum_{j=1}^n L(jk)X(j), \quad k = 1, \dots, n$$

donde $L(jk)$ es cada una de estas constantes, obsérvese que debido a la sumatoria, en cada nueva variable $Y(k)$ intervienen todos los valores de las variables originales $X(j)$. El valor numérico de $L(jk)$ indicará el grado de contribución que cada variable original aporta a la nueva variable definida por la transformación lineal. Es posible $L(jk)$ tenga en algún caso particular el valor cero, lo cual indica que esa variable no influye en el valor de la nueva variable $Y(k)$.

2.3 Cadenas de Markov (Wai-ki C y Ng. M, 2006)

Las cadenas de Markov son una herramienta para analizar el comportamiento y el gobierno de determinados tipos de procesos estocásticos, esto es, procesos que evolucionan de forma no determinística a lo largo del tiempo en torno a un conjunto de estados.

Una cadena de Markov, por tanto, representa un sistema que varía su estado a lo largo del tiempo, siendo cada cambio una transición del sistema. Dichos cambios no están predeterminados, aunque sí lo está la probabilidad del próximo estado en función de los estados anteriores, probabilidad que es constante a lo largo del tiempo (sistema homogéneo en el tiempo). Eventualmente, en una transición, el nuevo estado puede ser el mismo que el anterior y es posible que exista la posibilidad de influir en las probabilidades de transición actuando adecuadamente sobre el sistema (decisión). Formalmente, para definir una cadena de Markov finita hace falta determinar por lo tanto los siguientes elementos: (i) un conjunto de estados del sistema (ii) la definición de transición, (iii) una ley de probabilidad condicional, que defina la probabilidad del nuevo estado en función de los anteriores.

Los estados son una caracterización de la situación en que se encuentra el sistema en un instante dado. Dicha caracterización puede ser tanto cuantitativa como cualitativa. Explícitamente, el estado de un sistema en un instante t es una variable cuyos valores sólo pueden pertenecer al conjunto de estados del sistema. El sistema simulado por la cadena, por lo tanto, es una variable que cambia de valor en el tiempo, cambio al que se llama *transición*.

Dicho de otro modo, se trata de una colección indexada de variables E_t , donde t denota intervalos temporales significativos para el fenómeno estudiado. Los posibles valores de E_t se toman de un conjunto de categorías mutuamente excluyentes, denominadas *estados* del sistema. Por ser el sistema estocástico, no se conocerá con certeza el estado del sistema en un determinado instante, sino tan sólo la probabilidad asociada a cada uno de los estados. Este hecho puede expresarse en términos de probabilidad condicional:

$$p\{E_t = j | E_{t-1} = i, E_{t-2} = e_{t-2}, E_{t-3} = e_{t-3}, \dots, E_0 = e_0\} = p\{E_t = j | E_{t-1} = i, E_{t-2} = e_{t-2}, E_{t-3} = e_{t-3}, \dots, E_{t-k} = e_{t-k}\}$$

donde i, j, e_t pertenecen al conjunto de estados posibles del sistema.

Para el caso particular de una cadena de Markov de orden 1, tenemos:

$$p\{E_t = j | E_{t-1} = i, E_{t-2} = e_{t-2}, E_{t-3} = e_{t-3}, \dots, E_0 = e_0\} = p\{E_t = j | E_{t-1} = i\} = p_{ij}$$

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

En una cadena de Markov de orden 1, el estado del sistema en el futuro j sólo depende del estado presente i .

2.4 Simulaciones de Montecarlo (Evans, 2000)

El método de Montecarlo ha sido utilizado en una gran variedad de problemas altamente dimensionales de tipo estocástico o determinista en diferentes campos del conocimiento que van desde la física hasta las finanzas.

La idea básica subyacente a la simulación es muy simple: en lugar de ensimismarse en la formulación de un escenario analítico, se elabora un fenómeno aleatorio y artificial mediante un determinado procedimiento organizado.

Naturalmente se pretende que el fenómeno aleatorio artificial pueda reproducir de forma tan fiel como sea posible la aleatoriedad de un sistema real que interesa estudiar y controlar. Sólo de este modo el fenómeno aleatorio artificial servirá para simular el comportamiento del sistema real.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se hace referencia a los materiales y/o programas utilizados para el desarrollo de este trabajo de grado, así como la descripción de las metodologías desarrolladas para alcanzar el objetivo general del mismo.

3.1 Zona de estudio

La zona seleccionada para el desarrollo de este proyecto es la cuenca El Salitre por presentar una diversidad elevada de pendientes y diferentes usos del suelo. La información con la que se contaba pertenece a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá y fue proporcionada en el marco del Contrato Administrativo No. 9-07-25100-0763-2010, celebrado con la Pontificia Universidad Javeriana.

3.1.1 Historia del alcantarillado en Bogotá (Rodríguez, 2003).

El sistema actual de alcantarillado es el producto de una serie de evoluciones tanto en su funcionamiento como en la ampliación de estructuras hidráulicas. A continuación se presenta un breve resumen de su historia hasta el 2003.

Durante la segunda década del siglo XIX, contar con el servicio de agua era un privilegio y quienes tenían la oportunidad de tenerla presentaban innumerables quejas ya que por espacios de 6 u 8 meses carecían de ella. Esta escasez se generaba por la obstrucción en los conductos de repartición del líquido, con cualquier tipo de elemento, pero debieron pasar muchos años para que se emprendieran obras de envergaduras encaminadas a dotar a la ciudad de un adecuado servicio de acueducto y alcantarillado, pero solo hasta 1880, el problema de la escasez de agua en la ciudad y los medios para dotarla de un buen acueducto pasó a ser preocupación del Gobierno Nacional, por lo que éste dona \$30.000 anuales durante 10 años para la construcción de los acueductos y cañerías públicas. Así en 1886 llegan a Bogotá las tuberías de hierro para el acueducto, y se piensa en cambiar el estudio del alcantarillado, para en 1887 dar inicio a las obras del acueducto de tubería de hierro. El progreso en el aspecto de la provisión de agua a la ciudad motivó paralelamente la reflexión sobre un aspecto complementario: la evacuación de las aguas lluvias y de las aguas negras.

Una de las causas del descuido de las calles de Bogotá es la carencia de un caudal de aguas suficiente para arrastrar las basuras que se vertían a las alcantarillas o que arrojaban los habitantes en los lechos secos de los ríos, y también la falta de letrinas públicas, por lo que en 1890 se plantean cuatro posibles soluciones ante el deterioro de los ríos San Francisco y San Agustín, las cuales fueron: (i) Dotar con un mayor caudal de aguas el San Francisco y el San Agustín, trayendo sobre sus cauces el agua del Tunjuelo o de algún río cercano a la ciudad; (ii) canalizar los ríos, aumentar el agua de irrigación de las alcantarillas; (iii) llevar a los ríos, por medio de dos o más colectores afluentes, los productos de

las alcantarillas; (iv) Destinar únicamente para las aguas caseras o excrementos líquidos, las alcantarillas y utilizar en pro de la agricultura, los excrementos sólidos estableciendo un sistema de letrinas. En este mismo año se reglamentó la conducción de algunas aguas lluvias en Bogotá, disponiendo mediante acuerdo que en las nuevas edificaciones no podrá ejecutarse obras con el objeto de recoger y arrojar las aguas lluvias a los pavimentos en las vías públicas, cuando en estas vías existan alcantarillas o caños públicos de desagüe. También menciona que las aguas lluvias se llevarán a dichos caños o alcantarillas por medio de obras adecuadas que no impidan el tránsito.

En 1900, el concejo ordena la conducción de las aguas lluvias o, manifestando que es de estricta obligación el ejecutar las obras necesarias con el objeto de recoger las aguas lluvias en canales y bajarlas por tubos colocados en los muros.

Para 1950, las deficiencias de alcantarillado eran inmensas: Solamente una tercera parte del área de la ciudad definida por el Plan Piloto para Bogotá, contaba con alcantarillado y un 40 % del alcantarillado del centro de la ciudad se encontraba en condiciones que lo hacían prácticamente inservible.

Para 1952, el problema del manejo de las aguas negras era de gran magnitud, los peligros para la higiene eran evidentes y existía conciencia sobre la contaminación que se estaba causando al río Bogotá, lo cual exigía un adecuado tratamiento de las aguas negras, y en general, un completo y bien planeado sistema de alcantarillado. Se proponen las siguientes obras para el proyecto de alcantarillado.

- (i) Red de colectores dentro del área urbana. El 30 % del total del área construida de Bogotá carece de servicio de alcantarillado.
- (ii) Colectores emisarios hasta la planta de tratamiento. Las aguas lluvias pueden continuar corriendo por canales abiertos, al ser estos mucho más económicos, pero construyendo los dispositivos de separación para los líquidos cloacales y las aguas lluvias.
- (iii) Planta de tratamiento final, estaciones de bombeo y conductos para llevar el afluente hasta el río, en el sitio convenientemente escogido.

En 1955 la Empresa de Acueducto, mediante el acuerdo No. 105, también lo es de Alcantarillado. Para ese momento, no se contaba con un estudio serio y detallado del sistema ni se conocía su extensión ni condiciones. Apenas se tenía un estudio preliminar que esbozaba una propuesta de alcantarillado.

A finales de 1958, con un aporte de \$6.660.000 del distrito, en dos cuotas, se habían adelantado las siguientes obras.

- (i) Canal del río Salitre o Arzobispo y colectores interceptores desde la carrera 19 por avenida 39 hasta la calle 50 con la carrera 27, interceptor oriental hasta la calle 54 por avenida Ciudad de Quito y colector de la calle 54, por un valor aproximado de \$1.800.000 (trabajo prácticamente terminado).

- (ii) Parte del alcantarillado de los barrios San Fernando y Simón Bolívar, por un valor de \$296.731,07.
- (iii) Colector de la calle 76 y alcantarillado del barrio La Providencia, por un valor de \$131.592,28.
- (iv) Parte del alcantarillado barrios Fátima y Carmen, por un valor de \$143.551,57.
- (v) Desagüe del barrio Boyacá, por un valor de \$143.355.

En 1962 se entrega el "Plan Maestro de Alcantarillado". Algunos de los principales puntos tratados en el estudio que diseñó el plan inicialmente fueron: *(i)* Adoptar en las nuevas urbanizaciones de la ciudad un sistema de evacuación en el que se condujeran separadamente las aguas negras y las aguas lluvias. *(ii)* Fijar un distrito sanitario de 20.000 hectáreas aproximadamente en el que se instalarían las redes de desagüe, con una densidad media de 300 personas por hectárea, que cobijaría una población de 6.000.000 de personas. *(iii)* Para la conducción de las aguas lluvias se propuso la utilización de canales cubiertos, pero debido al costo se optó por los descubiertos.

En diciembre de 1986 se inició la construcción del interceptor del río Tunjuelo, la obra de alcantarillado más grande realizada en la historia de la ciudad, con una inversión cercana a los 1.600 millones de pesos. Consistió en la instalación de 7,7 km de tubería de gran tamaño, ubicada en la margen izquierda del río Tunjuelo para captar las aguas negras de su zona media. El interceptor está conformado por 3.000 tubos de 2,45 m de diámetro y 15 toneladas de peso, con uniones de caucho y cemento.

En 1993 se hizo un apretado resumen de los principales problemas que aquejaban a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, resaltándose el déficit en la extensión de redes, colectores y canales de drenaje, que ocasiona problemas con el sistema de evacuación de aguas lluvias, los asentamientos en zonas situadas por debajo de los niveles de aguas de ríos y humedales y la falta de regulación hidráulica del Río Bogotá.

En 1997 se inicia la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), comenzando su operación en el 2000. Entre los años 1998 y 2002 se acometieron en total 1.522 obras, la mayoría de alcantarillado sanitario y pluvial, en localidades que tradicionalmente han sufrido de inundaciones.

En la actualidad se está trabajando en el programa de descontaminación del río Bogotá (PDRB), construcción de obras para la expansión y rehabilitación de las redes de alcantarillado, así como en el mejoramiento de las obras ya existentes.

Por otro lado se cuenta con una cobertura del 100 % en agua potable y quedan unas 450.000 personas sin alcantarillado sanitario y 1.000.000 de personas todavía carecen de alcantarillado pluvial, tema en el que hoy en día se centran los esfuerzos del Acueducto de Bogotá.

3.1.2 Descripción de la Cuenca. (Alcaldía Mayor de Bogotá, Universidad militar, 2008)

La cuenca hidrográfica del río Salitre se encuentra ubicada en la parte media de la gran cuenca del río Bogotá, en el sector centro norte de la ciudad. Limita por el norte con la cuenca del río Torca – Guaymaral y el humedal La Conejera, por el occidente con el río Bogotá y el humedal Jaboque, al oriente con los municipios de La Calera y Choachí, y por el sur con la cuenca del río Fucha.

Esta cuenca tiene aproximadamente 13.200 Ha. Su divisoria de aguas la conforma la cuchilla del cerro de Monserrate. Su eje principal, el río Salitre, nace en los cerros Orientales bajo el nombre de río Arzobispo, que al ingresar a la ciudad es canalizado por el Parque Nacional hasta la carrera 97, entre las localidades de Chapinero y Santafé, atraviesa las localidades de Teusaquillo y Barrios Unidos, sirviendo de límite natural entre las localidades de Engativá y Suba, donde cambia su nombre al de río Juan Amarillo, desembocando en el río Bogotá, en inmediaciones de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Salitre (PTAR).

La cuenca del río Salitre está conformada administrativamente por las localidades de Usaquén, Chapinero, Santafé, Engativá, Suba, Barrios Unidos y Teusaquillo, como se ve en la tabla 1, así como el área total de cada localidad dentro de la cuenca.

Tabla 1. Localidades en la Cuenca Salitre

LOCALIDAD (N°)	AREA TOTAL DE LA LOCALIDAD	AREA DENTRO DE LA CUENCA					
		RURAL (HA)	AREA TOTAL (%)	URBANA (HA)	AREA TOTAL (%)	TOTAL (HA)	AREA TOTAL (%)
Usaquén (1)	6.531,22	882,24	6,66	1.762,66	13,30	2.644,90	19,96
Chapinero (2)	3.898,96	1.522,45	11,49	1.308,33	9,87	2.830,78	21,36
Santafé (3)	4.487,74	213,59	1,61	153,26	1,16	366,85	2,77
Engativá (10)	3.556,30	0,00	0,00	1.629,40	12,30	1.629,40	12,30
Suba (11)	10.055,98	0,00	0,00	4.105,91	30,98	4.105,90	30,98
Barrios Unidos (12)	1,189,52	0,00	0,00	1.173,78	8,86	1.173,78	8,86
Teusaquillo (13)	1.421,03	0,00	0,00	498,56	3,76	498,56	3,76
TOTAL	31.140,75	2618,28	19,76	10.631,9	80,23	13.250,18	100

Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá et al, 2008.

La figura 1 muestra la división de la cuenca y las localidades que la conforman, así como los canales y quebradas que posee. Adicionalmente muestra las vías principales, el perímetro urbano así como su hidrografía.

Esta cuenca constituye uno de los tres principales sistemas de drenaje de la ciudad de Bogotá, junto con los ríos Fucha y Tunjuelo, captando un área que se extiende desde los cerros orientales de la ciudad hasta el río Bogotá y desde las calles 26 y 80 hasta las calles 147 y 170 al norte de la ciudad.

Al ser de carácter esencialmente urbano, es el eje de un sistema de alcantarillado, tanto sanitario como pluvial, que a través de tuberías, canales y otras estructuras conduce las corrientes naturales de los cerros orientales y las aguas lluvias hasta el río Bogotá.

Los drenajes de la cuenca del río Salitre se desarrollan en sentido surorientenorooccidente, desde la parte alta de los Cerros Orientales hacia la parte baja en el río Bogotá, siendo captados por el canal Salitre en la parte plana de la Sabana de Bogotá.

En los más de 11 km de longitud que tiene el canal Salitre, recoge numerosos drenajes, entre los que se destacan los sistemas que transportan las quebradas de los cerros orientales, siendo el río Arzobispo la corriente que da origen al canal Salitre en la calle 49 con carrera 30.

A su vez la cuenca Salitre está subdividida en 14 subcuencas que se mencionan a continuación:

Bonanza, Chico Norte, Colsubsidio, Juan Amarillo, Las Delicias, La Vieja, Los Pinos, Rionegro, Rionuevo, Salitre, San Marcos, Subcuenca 59, Tabora, Río Bogotá.

En cuanto al sistema de drenaje de la cuenca, la red sanitaria comprende una infraestructura existente conformada por interceptores derecho e izquierdo de los canales Salitre, Rionegro, Los Molinos, Contador, Callejas del Norte, Córdoba, Britalia y del Cedro, Interceptor Río Nuevo, Interceptor Río Bogotá-Torca Salitre, que descargan en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Por otro lado, el eje del sistema pluvial posee una infraestructura existente de canales afluentes como lo son: Rionegro, El Arzobispo, Los Molinos, Contador, Callejas, del Norte y Córdoba que entrega al cauce natural del río Salitre y tiene una descarga final en el río Bogotá.

En cuanto a la disposición del sistema de alcantarillado sanitario y pluvial, comprende redes primarias y secundarias, cuya distribución de longitud de redes por localidad y total se presentan en las tablas 2 y 3.

Tabla 2. Longitud de Redes Alcantarillado Sanitario Cuenca Salitre

Localidad	Longitud de Redes Primarias Alcantarillado Sanitario (m)	Longitud de Redes Secundario Alcantarillado Sanitario (m)
Usaquén	57.899	410.312
Chapinero	12.572	203.183
Santafé	9.674	130.212
Engativá	55.440	437.818
Suba	71.177	541.435
Barrios Unidos	23.503	373.226
Teusaquillo	29.643	193.023
TOTAL	259.908	2.289.209

Fuente: EAAB-ESP, 2008.

Tabla 3. Longitud de Redes Alcantarillado Pluvial Cuenca Salitre

Localidad	Longitud de Redes Primarias Alcantarillado Pluvial (m)	Longitud de Redes Secundario Alcantarillado Pluvial (m)
Usaquén	60.65	240.39
Chapinero	15.09	24.92
Santafé	7.18	733.00
Engativá	58.33	243.89
Suba	103.07	268.85
Barrios Unidos	23.18	41.28
Teusaquillo	26.34	63.93
TOTAL	293.87	883.98

Fuente: EAAB-ESP, 2008

Durante los últimos años, se han realizado estudios referentes a la calidad y gestión del agua de la cuenca Salitre, así como del deterioro presentado en las redes de alcantarillado presentes en la zona, con el fin de determinar posibles fallas en el sistema y a su vez proponer alternativas para la programación del mantenimiento de las tuberías, estimando un ahorro anual si son tomadas las medidas necesarias para evitar que el sistema colapse si se hace un mantenimiento preventivo. Entre estos estudios se encuentra la valoración preliminar de la influencia de la precipitación de la cuenca Salitre, en la operación de bombeo de la Planta de tratamiento de aguas residuales Salitre (PTAR) (*Rada, Torres, 2011*); Escenario de utilidad para el soporte proactivo del mantenimiento en sistemas de drenaje urbano (*Rodríguez, 2011*) y Estrategias de mantenimiento en alcantarillados pluviales utilizando estimaciones de confiabilidad operativa (*Navarro, Sandoval, 2011*).

3.1.3 Información existente de la zona de estudio.

En el desarrollo de este trabajo de grado se contó con información proporcionada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá mediante el marco del Contrato administrativo No. 9-07-25100-0763-2010, celebrado con la Pontificia Universidad Javeriana.

La información aportada se encuentra dividida en dos bases de datos. La primera contiene un reporte de llamadas de los tipos de daños que se presentaron en la zona en un periodo de 7 años (2003-2009), dentro de la cual se encuentran los datos del usuario (nombre, teléfono y dirección del dueño del predio donde se presenta la queja), el tipo de daño presentado, la fecha y hora en que se atendió el reporte y el tiempo que tardó la Empresa en solucionar el problema ocasionado desde el momento en que se atendió la llamada. La figura 2 presenta gráficamente la localización de los daños en la cuenca el Salitre y la tabla 4 las características de cada reporte.

Figura 2. Localización reporte de tipos de daños cuenca El Salitre

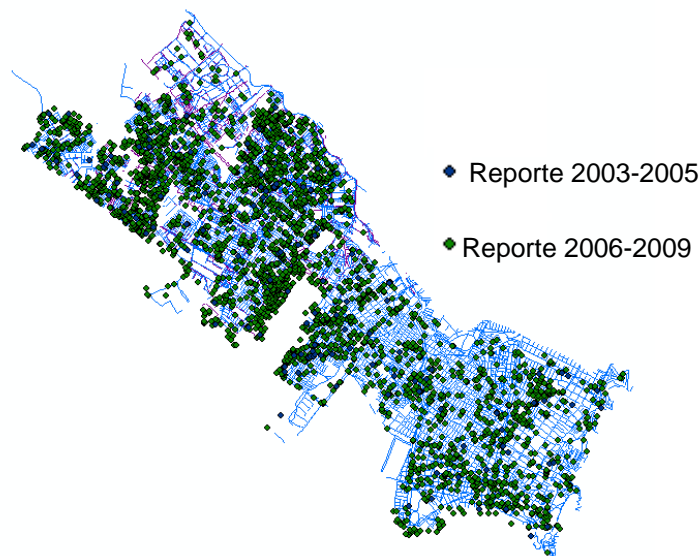


Tabla 4. Datos reporte del daño en la cuenca El Salitre

F	Aviso	Nombre	Nro Tele	Barrio	Texto brev	descripcion	CX	CY	MES	AÑO	FechaCrea	Horaci
1	200010873	MIGUEL CUAN	5868722		Pozo limpieza	DG 55 3 06 ESTE NT 1 Pozo Limpiar	102679.939	104612.716	AGOSTO	2004	18/08/2004	12.00.00 a
1	200013087				Otros daños alcantarillado atendidos	DG 55 3 06 ESTE Bombeo	102679.939	104612.716	NOVIEMBRE	2004	19/11/2004	12.00.00 a
2	200018975				Sobrantes alcantarillado atendidos	DG 57 4B 32 ESTE Limpieza de quebrada	102686.889	104706.605	OCTUBRE	2005	30/10/2005	12.00.00 a
3	200001286				Red obstruida	DG 58 Este 4A 53 TUBERIA LIMPIAR PRINCP	102612.193	104794.263	MAYO	2003	12/05/2003	12.00.00 a
4	200018818				Tapa circular instalada	CL 59 4B 2SESTE Tapa circ inst	102697.55	104948.443	OCTUBRE	2005	23/10/2005	12.00.00 a
5	200015201	GLADYS ZORRO	5452430	BOSQUE CALDERON/CHAPINERO	No existe daño	CL 59 4B ESTE 10 No hay Daño Visible	102697.04	104965.6	MARZO	2005	29/03/2005	12.00.00 a
6	200014844				Daño de Otras Entidades	DG 57 1 60 ESTE Investig. filtración	102288.143	105012.713	MARZO	2005	03/03/2005	12.00.00 a
7	200018621	CONST CMINO DEL CAST CONS	5400717	EL CASTILLO/CHAPINERO	No existe daño	TV 1 ESTE 57 16 No Hay Daños Visibles	102288.143	105012.713	JUNIO	2005	16/06/2005	12.00.00 a
8	200011012				Investigaciones de alcantarillado	TV 1 57 80 ESTEInvestga alcant	102214.426	105040.593	AGOSTO	2004	25/08/2004	12.00.00 a
9	200003117				Desconocida	AV CIRCUNVALAR 60 11 DOMICILIARIA SONDEA	102523.432	105083.684	NOVIEMBRE	2003	10/11/2003	12.00.00 a
1	200018273	DANILO CASTELLANOS	2116421		Sumidero limpieza	KR 28 53 11 Sumidero Limpiar	100020.347	105116.535	AGOSTO	2005	27/09/2005	12.00.00 a
1	200018276	GLORIA CAPUTO	2485273	GALERIAS/TEUSAQUILLO	Repetido	KR 28 53 11 Rep. Aviso 2000182735	100020.347	105116.535	SEPTIEMBRE	2005	27/09/2005	12.00.00 a
1	200018518	GLORIA CAPUTO	2485273	GALERIAS/TEUSAQUILLO	Repetido	KR 28 53 11 Aviso Rep. 20000188236	100020.347	105116.535	OCTUBRE	2005	07/10/2005	12.00.00 a
1	200019937	CRISTINA TRIANA	5779783		Sumidero limpieza	KR 28 53 32 Sumidero Reconstruir	100037.46	105123.532	DICIEMBRE	2005	23/12/2005	12.00.00 a
1	200018823				Repetido	KR 28 53 36 Sumidero Reconstruir	100037.701	105125.28	OCTUBRE	2005	23/10/2005	12.00.00 a
1	200017879	MARTHA CASTILLO	2875793		Repetido	TV 1 58 50 Rejilla Sumidero Instalar	102278.044	105126.058	SEPTIEMBRE	2005	05/09/2005	12.00.00 a
1	200019130	MARILUZ RUIZ	2878936		Sumidero reconstruido	TV 1 58 50 Sumidero Reconstruir	102278.044	105126.058	NOVIEMBRE	2005	08/11/2005	12.00.00 a
1	200017003	ELSA GONZALEZ	2499812		No existe daño	KR 28A 53 11 Tapa Circular Instalar	99922.009	105131.454	JULIO	2005	11/07/2005	12.00.00 a
1	200012732	AURA DE RODRIGUEZ	3483572		Rejilla sumidero instalada	CL 53A 27A 31 TAPAS Y SUMIDEROS	100091.887	105137.076	NOVIEMBRE	2004	04/11/2004	12.00.00 a
1	200016200	MERLINDA ZOLANO	3454415		Ya atendido	CL 53A 27B 21 Sumidero Limpiar VACTOR	100049.613	105147.864	MAYO	2005	22/05/2005	12.00.00 a
2	200017922	AURORA MOSQUERA	2487407		Sumidero limpieza	CL 53A 27B 21 Tapa Sumidero Instalar	100049.613	105147.864	SEPTIEMBRE	2005	07/09/2005	12.00.00 a
2	200012811	LILIANA MARTINEZ	5495223		Investigaciones de alcantarillado	CL 53 A 28 27 DAÑO DOMIC	99993.487	105154.585	NOVIEMBRE	2004	08/11/2004	12.00.00 a
2	200016696	ALFREDO GALVES	2487770		No existe daño	CL 53A 28 27 SG Investigar Sistema Al	99993.487	105154.585	JUNIO	2005	21/06/2005	12.00.00 a
2	200001156				Red colapsada	AK 30 # 53-14 SONDEO DOMICILIARIA	98685.29	105155.471	ABRIL	2003	19/04/2003	12.00.00 a
2	200001157				Red obstruida	AK 30 # 53-14 SONPRINCIPAL Y DOMICILIA	98685.29	105155.471	ABRIL	2003	19/04/2003	12.00.00 a
2	200001158				Sumidero taado u obstruido	AK 30 # 53-14 RECOJER SOBRIANES	98685.29	105155.471	ABRIL	2003	19/04/2003	12.00.00 a

La segunda base cuenta con la red de tuberías pluviales y sanitarias existentes en la zona de estudio, cada una de estas cuenta con la información propia de cada tubería, tales como el ID otorgado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado, pendiente, fecha de instalación, material, fecha de inspección, área mojada, volumen, caudal, diámetro, cotas, longitud y tipo de cada una de las tuberías pertenecientes a la cuenca. En la figura 3 se presenta la localización de las tuberías en la cuenca El Salitre y en la tabla 5 la base de datos donde presenta la información de las mismas.

Figura 3. Localización tuberías cuenca El Salitre

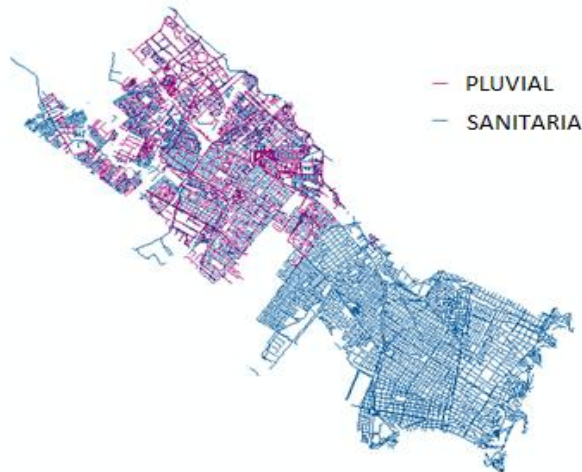


Tabla 5. Base de datos redes de tuberías cuenca El Salitre

#	PENDIENTE	FECHAINSTA	MATERIAL1	OBSERVACIO	AREAMOJADA	VOLUMEN	CAUDAL	DIAMETRO	ALTURA2	COTACLAVEI	COTACLAVEF	COTARASANT	COTARASA 1	SUULONGITU	SHAPE	Lenq
1	0.005406	01/01/1975	2		0.950334	87.893675	0	1.1	0	2550.878	2550.873	2551.908	2551.903	0.092487	92.487141	
1	0.441335	01/01/1975	0		0.282744	20.501015	0.321	0.6	0	2580.32	2580	2581.81	2581.51	0.072507	72.507338	
1	1.414799	01/01/1975	3		0.031416	1.378727	0.039	0.2	0	2622.83	2622.21	2626.33	2625.6	0.043822	43.822483	
1	1.105888	01/01/1975	1		0.041548	2.479527	0.05	0.23	0	2580.46	2579.8	2581.73	2581.23	0.059881	59.880553	
1	0	15/03/2004	0		3.463814	52.738751	0	2.1	0	2549.27	2549.27	2551.06	2551.9	0.015226	15.225932	
1	0.407909	15/03/2004	0		0.13635	3.369596	0.241	0.5	0	2582.65	2582.58	2583.37	2583.37	0.017161	17.160711	
1	0.282578	15/03/2004	1		0.096212	11.578243	0.078	0.35	0	2582.97	2582.63	2584.49	2583.37	0.120321	120.32078	
1	3.045504	01/01/1975	2		2.010624	56.292096	0	1.6	0	2579.542	2578.68934	2583.152	2580.973	0.027997	27.997321	
1	5.488931	01/01/1975	3		0.125664	15.590867	0.488	0.4	0	2618.81	2612	2622.03	2613.3	0.124068	124.067885	
1	0.300586	15/03/2004	0		3.463814	23.045764	9.506	2.1	0	2549.27	2549.25	2551.9	2551.41	0.006654	6.653676	
1	0	15/03/2004	0		4.90875	68.850569	0	2.5	0	0	0	0	0	0.014026	14.02609	
1	0	15/03/2004	0	TRAMO CON POZOS	4.714364	94.118562	0	2.45	0	0	0	0	0	0.019964	19.96379	
1	12.99935	15/03/2004	0		0.041548	0.415487	0.172	0.23	0	2660.8	2659.5	2664	2661	0.01	10.0005	
1	2.460796	30/04/2000	0		0.13635	9.415712	0.592	0.5	0	2605.89	2604.71	2606.97	2606.37	0.047954	47.853716	
1	0.038129	30/04/2000	2		0.636174	66.738681	0.179	0.9	0	2579.29	2579.25	2581.42	2581.43	0.104906	104.906332	
1	0	30/04/2000	0	TRAMO CON POZOS	4.714364	72.795711	0	2.45	0	0	0	0	0	0.015441	15.44126	
1	0.403906	30/04/2000	3		0.070686	4.900172	0.061	0.3	0	2582	2581.72	2583.44	2582.97	0.069323	69.323084	
1	6.747416	30/04/2000	1		0.031416	0.218832	0.085	0.2	0	2580.2	2579.73	2581.32	2581.32	0.006966	6.96563	
1	0	30/04/2000	0	TRAMO CON POZOS	4.714364	72.795711	0	2.45	0	0	0	0	0	0.015441	15.44126	
1	5.812585	30/04/2000	3		0.070686	3.672578	0.233	0.3	0	2670.02	2667	2670.81	2668.5	0.051956	51.956232	
1	0	30/04/2000	1		0.031416	0.699215	0	0.2	0	0	0	0	0	0.021302	21.301723	
1	0	15/03/2004	0		3.463814	22.020115	0	2.1	0	2549.25	0	2551.41	0	0.009358	6.357555	
1	0.948978	15/03/2004	0		0.159044	10.918554	0.277	0.45	0	2582.96	2582.31	2584.53	2583.58	0.069639	69.63942	
1	0.038129	15/03/2004	2		0.636174	66.738681	0.179	0.9	0	2579.29	2579.25	2581.42	2581.43	0.104906	104.906332	
1	0	15/03/2004	0	TRAMO CON POZOS	4.714364	67.868824	0	2.45	0	0	0	0	0	0.014396	14.396201	
1	0.428663	15/03/2004	1		0.070686	7.952238	0.063	0.3	0	2591.38	2590.9	2592.32	2591.56	0.112501	112.500889	
1	0	15/03/2004	3		0.070686	7.921507	0	0.3	0	0	2590.79	2593.85	2591.56	0.112066	112.066141	

Para el desarrollo de este trabajo, se tomó de la primera base el daño presentado, la cual contenía 40 tipos de daños, de los cuales se seleccionaron tan sólo 5, que son los que tienen relación directa con las características propias de la tubería.

Una vez conocida la localización del daño, éste se asocia a una tubería según el criterio de mínima distancia. A continuación se genera una nueva base de datos integrando los atributos de la tubería (material, diámetro, longitud, pendiente, fecha de instalación y tipo de tubería, obtenidos de la segunda base de datos) con los daños presentados en dicha tubería.

3.2 Herramientas computacionales

A continuación se presentan las herramientas computacionales utilizadas para el desarrollo del presente trabajo, las cuales permitieron la evaluación y análisis de los datos obtenidos.

3.2.1 ArcGIS

ArcGIS es un software GIS para visualizar, crear, manipular y gestionar información geográfica, correspondiente a lugares, direcciones, posiciones en terreno, áreas urbanas y rurales, regiones y cualquier tipo de ubicaciones en terrenos determinados. Esta información es trabajada de manera sistémica, lo que representa una diferencia sustancial a lo relacionado al trabajo con información de planos y mapas, permitiendo explorar, ver y analizar los datos según parámetros, relaciones y tendencias que presenta la información, teniendo como resultado nuevas capas de información, mapas y nuevas bases de datos.

Con esta herramienta se pueden construir mapas dinámicos que permiten visualizar patrones, tendencias y singularidades en los datos, al incluir formas para levantar mapas, formatos predefinidos de mapas y una librería de elementos extensa, que permite la elaboración de mapas. Los mapas terminados se pueden guardar, imprimir, exportar y ubicar en otros documentos.

Adicionalmente este programa tiene la capacidad de realizar geoprocursos que permiten desarrollar ajustes dinámicos de la información, adaptándola a los requerimientos de análisis del usuario, con lo que se tiene la capacidad de construir procesos analíticos y flujos de trabajo.

Para el desarrollo de este trabajo de grado, se utilizó ArcGIS para la obtención de la información perteneciente a cada una de las tuberías existentes que posteriormente permitieron la elaboración de mapas para una mejor apreciación de los resultados.

3.2.2 Programa R (R Development Core Team 2011)

R es un lenguaje y un entorno para computación y gráficos estadísticos que ofrece una gran variedad de escenarios lineales y no lineales, pruebas estadísticas clásicas, análisis de series temporales, clasificación, agrupación y técnicas gráficas. Al ser un conjunto integrado de servicios de software para la manipulación de datos incluye:

- Un manejo de datos efectivo.
- Un conjunto de operadores para el cálculo de series, en particular, matrices.
- Una colección amplia, coherente e integrada de herramientas para el análisis de datos intermedios.
- Facilidades gráficas para el análisis y visualización de datos.
- Condicionales, bucles y funciones recursivas definidas por el usuario.

A continuación se reportan las librerías de R que se utilizaron en la realización de este proyecto.

Tabla 6. Librerías de R usadas en el proyecto.

LIBRERÍA	DESCRIPCION
Ade4	Este paquete fue desarrollado en el Biometry and Evolutionary Biology Lab (UMR 5558) –University Lyon. Contiene funciones de análisis de datos para analizar información ecológica y ambiental en el marco de métodos exploratorios Euclidianos. Esta librería se caracteriza por: (i) La implementación de funciones estadísticas y gráficas; (ii) La disponibilidad de datos numéricos; (iii) La inclusión de referencias bibliográficas.

Fuente: R Development Core Team (2011)

La siguiente tabla muestra las funciones que se emplearon para la realización de este proyecto.

Tabla 7. Funciones de R usadas en el proyecto.

FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
bartlett.test	Realiza la prueba de Bartlett para homogeneidad de varianza.
Boxplot	Elabora boxplots de los valores agrupados.
Cbind	Toma una secuencia de vectores, matrices, datos y argumentos que se combinan por columnas.
Rbind	Toma una secuencia de vectores, matrices, datos y argumentos que se combinan por filas.
dudi.pca	Lleva a cabo un análisis de componentes principales de una trama de datos.
kruskal.test	Realiza la prueba de suma de rangos de Kruskal Wallis.
paired.t.test	Calcula comparaciones pareadas entre grupos.
Quantile	Produce percentiles de la muestra correspondiente a las probabilidades dadas.
rowSums	Calcula sumas de las columnas en las filas de una matriz numérica, como objeto para cada nivel de una variable de agrupación.
Simple	Busca valores aleatorios de una muestra, a partir de un número dado de elementos ya sea con o sin reemplazo.
shapiro.test	Ejecuta la prueba de Shapiro-Wilk para normalidad.
Sort	Ordena un vector o factor de forma ascendente o descendente.
Summary	Genera datos resumen de múltiples resultados.

Fuente: R Development Core Team (2011)

3.3 Metodología empleada para estimar la Condición Actual de una red de alcantarillado.

Para determinar la condición actual de las tuberías del sistema de alcantarillado en la cuenca El Salitre, se partió de la base de datos proporcionada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - ESP, mediante el Contrato Administrativo N° 9-07-25100-0763-2010

De la anterior base de datos se obtuvo la información correspondiente de todas las tuberías que presentaron daños, así como los atributos que fueron tenidos en cuenta para la realización de este estudio.

Dentro de la base de datos se encontraron 40 tipos de daños existentes en la zona de estudio, pero para este trabajo de grado se usaron tan sólo cinco al considerar que éstos están directamente relacionados a las tuberías principales de alcantarillado, sin considerar accesorios, pozos, sumideros, entre otros. La tabla 8 presenta los 40 tipos de daños existentes en la zona de estudio.

Tabla 8. Daños existentes en la zona de estudio

No.	Nombre del Daño	No.	Nombre del Daño
1	Accesorios deteriorados	21	Pozo nivelado
2	Cargue reconstruido	22	Pozo reconstruido
3	Daño acueducto	23	Pozo tapado u obstruido
4	Daño interno	24	Red Colapsada
5	Desconocida	25	Red Desplazada
6	Dirección errada	26	Red obstruida
7	Domiciliaria reconstruida	27	Redes no oficiales
8	Domiciliaria sin descubrir	28	Rejilla sumidero instalada
9	Domiciliaria sin descubrir	29	Rellenos alcantarillado atendido
10	Domiciliaria sondeada	30	Sobrantes alcantarillado atendidos
11	Drenaje normal	31	Sumidero averiado
12	Empradizado	32	Sumidero construido
13	Filtraciones aguas negras atendidas	33	Sumidero limpieza
14	Investigaciones de alcantarillado	34	Sumidero reconstruido
15	No existe daño	35	Sumidero tapado u obstruido
16	Otros inefectivos alcantarillado	36	Tapa circular instalada
17	Para mantenimiento preventivo	37	Tapas concreto sumidero instalada
18	Pozo destruido	38	Tubería inspeccionada
19	Pozo hundido	39	Tubería reparada
20	Pozo de limpieza	40	Tubería Sondeada

La Tabla 9 se presenta los cinco daños seleccionados para realizar el estudio de la cuenca que serán denominados de ahora en adelante “Daños propios de las tuberías”.

Tabla 9. Clasificación de los daños propios de las tuberías

No.	Nombre del daño
1	Domiciliaria Reconstruida
2	Tubería Reparada
3	Red Obstruida
4	Red Desplazada
5	Red Colapsada

Cabe mencionar que estos daños se encuentran en orden ascendente según el nivel de criticidad del mismo.

En la Tabla 10 se presentan los atributos escogidos para el desarrollo de este trabajo de grado. Estos fueron seleccionados por ser considerados parámetros propios una tubería y que no pueden ser cambiados al ser una característica de la tubería. Cabe mencionar que se podrían utilizar otras características propias de las tuberías como la profundidad, el tipo de suelo, la presencia de árboles en la

cercanía de la tubería, etc., pero que dada la información disponible y/o la metodología propuesta no fueron consideradas en el presente trabajo.

Tabla 10. Atributos de las tuberías

No.	Nombre del atributo
1	Edad
2	Material
3	Diámetro
4	Longitud
5	Pendiente
6	Tipo de tubería

Con esta información (daños y características) se obtuvo una nueva base de datos que se convierte en la base primaria para el desarrollo de este trabajo. La Tabla 11 presenta un ejemplo de las características encontradas en la base de datos para algunas tuberías. Esta base se puede ver más detallada en el Anexo 1.

Tabla 11. Muestra base de datos inicial

TIPO TUBERÍA	PENDIENTE (%)	EDAD (s)	MATERIAL	DIÁMETRO (m)	LONGITUD (m)	DAÑO
Sanitaria	0,44	1245628800	Gres	0,20	82,12	Tubería Sondeada
Sanitaria	0,44	2541024000	PVC	0,35	45,57	Dom. Sin descubrir
Sanitaria	0,69	1135296000	Concreto	0,25	52,02	Dom. Sondeada
Sanitaria	0,00	2541024000	Gres	0,35	12,17	Dom. Sondeada
Sanitaria	0,00	2541024000	PVC	0,25	40,03	Dom. Sondeada
Sanitaria	0,30	1245456000	Gres	0,60	98,01	Tubería Sondeada
Sanitaria	0,30	1245456000	Ladrillo	0,60	98,01	Tubería Sondeada
Sanitaria	1,20	1245628800	PVC	0,30	100,04	Dom. Reconstruida

La anterior base permitió clasificar los atributos por medio de percentiles, escogiendo el 33 y 67 como límites para clasificar cada atributo en rangos (por ejemplo “Bajo”, “Medio”, “Nueva”, etc.)

La clasificación definitiva que se obtuvo es la siguiente:

- (i) Pendiente (S): Baja si S es menor a 0.14 %, Media si S está entre 0.14 y 0.49 %, Alta si es mayor a 0.49 %
- (ii) Edad (E): Antigua si E fue instalada antes del 30-06-1958, Media si E fue instalada entre el 30-06-1958 y 01-01-1975, y Nueva si fue instalada después del 01-09-2008;
- (iii) Diámetro (D): Pequeño si D es menor 0.2 m, Medio si D está entre 0.2 y 0.4 m, Grande si D es mayor a 0.4 m;
- (iv) Longitud (L): Corta si L es menor 52.07 m, Media si L está entre 52.07 y 82.58 m, Larga si L es mayor a 82.58 m.

Inicialmente se pretendía establecer un orden jerárquico entre la clasificación dada a los atributos según el tiempo de reparación de la falla presentada. Para esto se realizaron dos pruebas que se diferencian por las variables consideradas. La primera prueba, se realizó tomando el tipo de tubería y relacionando el tiempo de reparación con los atributos y los daños presentados. Para la segunda prueba se tomó el tipo de daño, relacionando los atributos y el tipo de tubería con el tiempo de reparación de cada daño.

Lo anterior se realizó con el fin de caracterizar el tipo o la importancia del daño (representado por el tiempo de reparación) en función de las características físicas de las tuberías (diámetro, edad, longitud, material y pendiente) y el tipo de tubería (sanitaria o pluvial). El propósito final era llegar a una generalización que facilitara la toma de decisiones para realizar un mantenimiento preventivo en las tuberías.

Para esto se procedió a analizar la base primaria de datos a partir de ANOVA. En este método se parte inicialmente de la prueba de Bartlett donde se obtiene un valor p que de ser menor a 0,05 se establece que las varianzas de las variables consideradas (por partes) no son homogéneas. Posterior a esta prueba se realiza la de Shapiro Wilk que arroja un valor p que si es menor a 0,05 indica que los datos no se distribuyen normalmente. ANOVA sólo se puede utilizar si se cumple homogeneidad de varianza y normalidad. En caso de que alguno de estos supuestos no se cumpla, se procede a realizar el análisis mediante Kruskal-Wallis.

La prueba de Kruskal-Wallis arroja como resultado un valor p para cada variable independiente: si éste es menor a 0,05 se puede concluir que existe una influencia significativa de dicha variable sobre la variable independiente. Una vez identificada la variable independiente que presenta una influencia significativa sobre la dependiente, se intentó poner en evidencia tendencias que pudieran ser generalizadas: por ejemplo, si se identifica mediante la prueba de Kruskal-Wallis que el diámetro presentaba una influencia significativa sobre el tiempo de reparación, se quería determinar si para diámetros altos se presentaban tiempos de reparación altos o viceversa. Lo anterior se realizó mediante pruebas t con ajuste de Bonferroni.

Posteriormente se hizo el mismo análisis sin tener en cuenta el tiempo de reparación, pero relacionando esta vez los daños presentados y los atributos, con el fin de poder establecer una jerarquización de los mismos.

Luego, se quiso establecer una relación directa entre los daños presentados y los atributos con el fin de determinar combinaciones que permitieran sugerir una clasificación que señalara la vulnerabilidad que presentarían estos daños. Para realizar este estudio, se usó el PCA en el programa R.

Posteriormente, se procedió al análisis de los datos teniendo en cuenta la clasificación dada a los atributos y el daño que presentó cada tubería con el fin de obtener una probabilidad de existencia de falla en cada una de las combinaciones presentadas. Con esta probabilidad de existencia y la criticidad del daño

presentado, se estableció un puntaje para cada daño, correspondiente a su nivel de criticidad definido anteriormente, es decir (i) daño 1 con calificación 1; (ii) daño 2 con calificación 2; (iii) daño 3 con calificación 3; (iv) daño 4 con calificación 4; (v) daño 5 con calificación 5; y suponiendo su máxima probabilidad de ocurrencia para cada combinación de daños. A esta máxima probabilidad de ocurrencia se le asignó la calificación correspondiente al daño de mayor ocurrencia. La Tabla 12 muestra un ejemplo del método propuesto. (Ver tabla completa en Anexo 2).

Tabla 12. Combinación de daños y su condición respectiva.

Daño 1	Daño 2	Daño 3	Daño 4	Daño 5	Calificación de máxima probabilidad	SUMA	Condición
1	2	3	4	5	5	20	C0
1	2	3	4	5	4	19	C0
1	2	3	4	5	3	18	C0
1	2	3	4	5	2	17	C0
1	2	3	4	5	1	16	C1
0	0	3	4	5	3	15	C1
1	0	3	4	5	1	14	C1
1	2	0	4	5	1	13	C1
1	2	3	0	5	1	12	C2
1	2	3	4	0	1	11	C2
1	2	0	0	5	2	10	C2
1	2	0	0	5	1	9	C2
1	2	3	0	0	2	8	C3
1	2	3	0	0	1	7	C3
1	0	0	4	0	1	6	C3
1	0	3	0	0	1	5	C3
1	2	0	0	0	1	4	C4
1	0	0	0	0	1	2	C4

La anterior tabla muestra las posibles combinaciones de daños que puede tener una tubería, independientemente de las encontradas en la base de datos de quejas de la cuenca El Salitre y la calificación que le corresponde. Sin embargo, la condición 5 (C5) no se presenta en la tabla puesto que se considera óptima y por lo tanto no presenta daños.

A partir de estas calificaciones se realizó una sumatoria por combinación de daños más la calificación de máxima probabilidad, la cual genera resultados entre 2 y 20. La finalidad de este procedimiento es dar una calificación que tiene en cuenta la criticidad absoluta para cada combinación de daños.

Con la anterior sumatoria se procede a asignar condiciones a las tuberías, por medio de seis diferentes tipos de condiciones, con base en la metodología propuesta por Ruwanpura J. et al. (2004) en la Ciudad de Edmonton (Canadá)

para los sistemas de alcantarillado, de la cual radica el origen de este trabajo de grado.

Las condiciones propuestas están entre C0 y C5, donde la condición 0 (C0) se clasifica como la peor condición que se puede tener en una tubería por múltiples y críticos daños de ocurrencia en ella misma, hasta la condición 5 (C5) que es la condición óptima, donde no se presenta ningún tipo de daño.

Las condiciones obtenidas que se emplearon en la red de alcantarillado son el resultado de dividir la sumatoria máxima obtenida (20) entre el número de condiciones adoptadas (6), consiguiendo rangos que son calificados para dichas condiciones donde (i) la sumatoria 20-17 es condición C0, (ii) la sumatoria 15-13 es condición C1; (iii) la sumatoria 12-9 es condición C2; (iv) la sumatoria 8-5 es condición C3; (v) la sumatoria 4-2 es condición C4 y la condición C5 cuando dicha sumatoria da 0.

Una vez obtenidas las especificaciones establecidas para cada condición se remontó a la base de datos del Anexo 1, y se calificó cada combinación de atributos de las tuberías existentes a partir de los daños encontrados, conociendo su máxima probabilidad de ocurrencia.

Esta base de datos se convierte en el punto de referencia para calificar o estimar la condición actual de una tubería, conociendo sus atributos.

3.4 Metodología para estimar la Condición Futura de una red de alcantarillado

Para la predicción de la condición futura, se hizo uso de la base de datos inicial (Anexo 1).

Con la anterior base se creó una nueva donde se discrimina el daño encontrado por cada año de inspección (2003-2009), y se calificó la condición de acuerdo con la metodología desarrollada en el ítem 3.3, en la que se encontró la condición para cada combinación de atributos por año (Ver anexo 8).

La discriminación de estos años es clave para empezar la aplicación de cadenas de Markov, la cual predice la condición futura a partir del primer año tomado. Para ello se toman las tuberías y se ordenan con respecto a la condición establecida (C0 a C5) para cada año la calificación año a año (2003-2009).

Con el fin de tener un amplio rango de escenarios de predicciones para llegar al más acertado, se hacen una serie de agrupaciones de años con los cuales se va a regir las predicciones con cadenas de Markov como se observa en la Tabla 11, los cuales se llamarán de aquí en adelante "Escenarios ". Estos escenarios se tendrán en cuenta desde el año 2003 al 2007, siendo los años 2008 y 2009 los que servirán para la comprobación lo cual se utilizó para la escogencia del mejor escenario, como se explicará más adelante.

Tabla 13. Escenarios propuestos

Escenario 1	Escenario 2003-2004
Escenario 2	Escenario 2004-2005
Escenario 3	Escenario 2005-2006
Escenario 4	Escenario 2006-2007
Escenario 5	Escenario 2003-2004-2005
Escenario 6	Escenario 2004-2005-2006
Escenario 7	Escenario 2005-2006-2007
Escenario 8	Escenario 2003-2004-2005-2006
Escenario 9	Escenario 2004-2005-2006-2007
Escenario 10	Escenario 2003-2004-2005-2006-2007

Cada escenario se realizó con base en los datos correspondientes a periodos de tiempo (en años) particulares. Estos periodos de tiempo se especifican en la tabla 11 para cada escenario. Para los escenarios 1 a 4, el periodo considerado fue un año; los escenarios 5 a 7 de dos años; los escenarios 8 y 9 de tres años y por último el escenario 10, con un periodo de cuatro años.

Para cada uno de los anteriores escenarios, se crea una matriz que relaciona el número de tuberías que pasan de una condición a otra, según el período de proyección en el que se encuentre. En consecuencia se realizó un seguimiento de la evolución de todas las tuberías año tras año según lo establecido en los escenarios utilizados con la teoría de cadenas markovianas hasta el año 2009.

Con base en las predicciones de todos los escenarios se hace necesario el uso de la aplicación de las simulaciones de Montecarlo para los años proyectados de cada escenario hasta el 2009. Lo anterior se realizó con el fin de establecer una condición particular para cada tubería. En efecto, los escenarios de Markov otorgan probabilidades de que una tubería con cierta condición en un año, pase a cierta condición en un año proyectado. Estas probabilidades pueden ser transformadas a un número de tuberías para una base de datos particular. Sin embargo en este punto, no es posible establecer la condición proyectada para cada tubería. Al no contar con un método formal para realizar lo anterior, se decidió utilizar el método de Montecarlo de la siguiente forma: sí un escenario particular de Markov establece que 185 tuberías que se encontraban en la condición 0 (C0) en el año inicial debieran encontrarse en condición 4 (C4) en el año de proyección, se seleccionan aleatoriamente 185 tuberías sobre el total de tuberías en condición 0 (C0) en el año inicial para asignarles la condición 4 (C4) para el año de proyección. Lo anterior se realizó 1000 veces. Este número de simulaciones se estableció a partir de un método explicado más adelante.

El método definitivo combina cadenas de Markov y simulaciones de Montecarlo permitió establecer la condición proyectada más probable para cada tubería.

Con el propósito de evaluar la predictibilidad de cada escenario, y seleccionar el mejor (aquel con mayor capacidad de predicción) se realizó lo siguiente: como se observa en la tabla 11 y como fue explicado anteriormente; cada escenario se basa en datos obtenidos de la base de datos para ciertos años (2003-2004 para el Escenario 1, 2004-2005 para el Escenario 2, 2005-2006 para el Escenario 3,...). Cada escenario serviría para establecer condiciones de las tuberías en años posteriores (2005 en adelante para el Escenario 1, 2006 en adelante para el Escenario 2, 2007 en adelante para el Escenario 3,...). Al haberse establecido con anterioridad las condiciones para cada tubería para el 2003 y 2009 (años de extensión de la base de datos), éstas se pueden comparar con los resultados de las simulaciones para cada escenario. Se propuso realizar estas comparaciones en términos de aciertos (un acierto se refiere a la coincidencia entre la condición establecida en la base de datos y la condición simulada mediante el escenario para un año de proyección) y desaciertos. Con base en la teoría de la máxima entropía de la información (Phillips, et al, 2004) se decidió utilizar los siguientes indicadores: Verdaderos Positivos (VP) para los aciertos dados en porcentaje y Falsos Positivos (FP) para los desaciertos dados en porcentaje. Para cada año de proyección y para cada combinación de condiciones (número de tuberías que se encontraban en condición 0 (C0) para el año inicial del escenario respecto al número de tuberías en condición 0 (C0) a condición 5 (C5) respectivamente para los años proyectados) a un escenario se le puede asignar un valor de VP y FP promedio. Con el propósito de calificar la predictibilidad de cada escenario se utilizó la relación $VP_{promedio}/FP_{promedio}$: entre mayor sea esta calificación, mayor predictibilidad tendrá el escenario.

Para la escogencia del mejor escenario se hace un análisis de la confiabilidad de las predicciones de cada escenario, teniendo en cuenta un alto valor de VP/FP y que este valor sea alto en la mayoría de las predicciones (año proyectado) para dicho escenario. Con estas premisas se llega al escenario escogido que servirá como base para las proyecciones de los años que no se tienen registros, es decir del año 2010 en adelante.

A este escenario se aplica nuevamente la teoría de las cadenas de Markov, hasta el año de convergencia que llega dicha matriz: ésta diagnostica el número de tuberías que se encontrarán en una condición por cada predicción para cada escenario, pero no muestra cuáles son esas tuberías.

4 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al aplicar las metodologías explicadas en el capítulo 3. Para el análisis de éstos, se presentan tablas y gráficas que facilitan su comprensión para llegar al establecimiento de la condición futura de las tuberías.

4.1 Condición actual de una red de alcantarillado

Para establecer la condición actual de las tuberías, se realizaron varias pruebas estadísticas con el fin de encontrar relaciones entre los atributos de las tuberías y el tiempo de reparación y/o tipo de daño presentado. Se pretendía establecer qué atributos influían de manera más importante sobre el tipo y la criticidad del daño.

Siendo ésta la hipótesis inicial del proyecto, se emplearon tres diferentes métodos; (i) análisis de varianza (ANOVA) para establecer una relación entre los atributos; (ii) ANOVA para encontrar la relación existente entre los daños y los atributos; (iii) análisis de componentes principales (PCA), para establecer el grado de pertenencia de los atributos respecto a tipo de daño que se relacione. Debido a que con las anteriores pruebas no se logró obtener ningún resultado generalizable, se optó por utilizar un método basado en probabilidades a partir del estudio de las combinaciones de los atributos existentes en la base de datos en función de los daños presentados. Este método se encuentra explicado en detalle en el numeral 4.1.2, y de manera ampliada en el Anexo 7.

4.1.1 Pruebas Preliminares.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las pruebas para la hipótesis inicial mencionada anteriormente.

- a. Pruebas estadísticas iniciales, con el tiempo de reparación como variable dependiente.
 - Análisis por tipo de tubería: El resultado obtenido para ANOVA, muestra que no existe homogeneidad en la varianza de datos ni normalidad, por lo que se procedió a usar la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis como se presenta a continuación. El resultado se presenta de manera independiente para tuberías sanitarias y pluviales.

Tabla 14. Kruskal-Wallis, tuberías sanitarias

FACTOR	Valor p
PENDIENTE	0,10
EDAD	0,89
MATERIAL	0,62
DIAMETRO	0,39
LONGITUD	0,82
DAÑO	1,04E-10

Tabla 15. Kruskal-Wallis, tuberías pluviales

FACTOR	Valor p
PENDIENTE	0,80
EDAD	0,72
MATERIAL	0,51
DIAMETRO	0,63
LONGITUD	0,06
DAÑO	0,13

Como se puede ver en la Tabla 14, en las tuberías sanitarias el daño es la única variable que tiene una influencia significativa (al tener un valor p menor a 0,05) sobre el tiempo de reparación. Lo anterior sugiere que podrían existir tiempos de reparación diferentes y características para cada daño, lo cual se quiso explorar más adelante, con el propósito de asignar criticidades propias a cada daño. En la tabla 15 se observa que para las tuberías pluviales el resultado del valor p indica que ninguna de las variables tienen influencia significativa sobre el tiempo de reparación.

En la Tabla 16 se presenta la prueba t para la variable que muestra influencia significativa en las tuberías sanitarias (daño) en la prueba de Kruskal-Wallis. Esta prueba se realizó con el propósito de evaluar si los tiempos de reparación (asociados a la criticidad de daño asociado) eran estadísticamente distintos para cada daño.

Tabla 16. Prueba t , Relación entre daños

TDAÑO	Dom Recons	Tub Rep	Red Colap	Red Desp
Tub Rep	1	NA	NA	NA
Red Colap	1	1	NA	NA
Red Desp	1	0,04	1	NA
Red Obst	1	1	1	1

La Tabla 16 muestra valores p que indican que la única diferencia significativa con respecto a los tiempos de reparación se presenta para los daños Red Desplazada y Tubería Reparada, lo cual se puede afirmar con una confiabilidad de más de 95 % (para $p < 0,05$)

En el Anexo 3 se presentan los resultados de las pruebas t para los atributos que no mostraron una influencia significativa sobre el tiempo de reparación según la prueba de Kruskal-Wallis.

- Análisis por tipo de daño presentado: En esta prueba se realizó el mismo procedimiento y se tomaron en cuenta los mismos criterios que se tomaron para el análisis por tipo de tubería, prueba que fue explicada anteriormente.

Para este nuevo criterio de comparación (tipo de daño presentado), se presentan los resultados obtenidos para el daño “Domiciliaria Reconstruida”. (Para ver los resultados de los otros daños, ver Anexo No. 4)

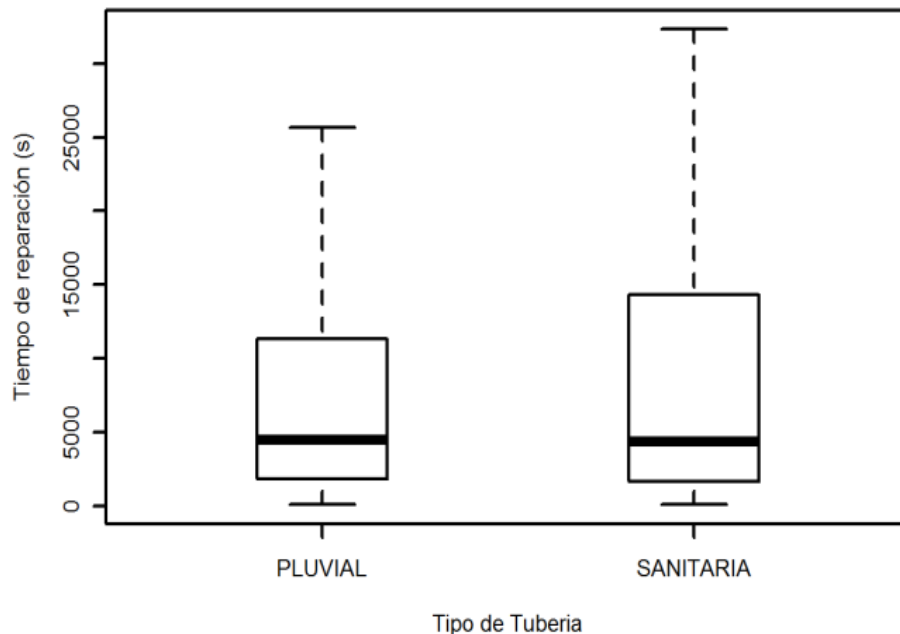
Tabla 17. Kruskal-Wallis Domiciliaria Reconstruida

FACTOR	Pvalue
TIPO_TUBERIA	0,04
PENDIENTE	0,20
EDAD	0,87
MATERIAL	0,93
DIAMETRO	0,35
LONGITUD	0,89

Como se observa en la Tabla 17, únicamente la variable “tipo de tubería” presenta una influencia significativa sobre el daño considerado (Domiciliaria Reconstruida). Al realizar la prueba t para la variable tipo de tubería muestra un valor p igual a 0,04 que indica su diferencia significativa entre los dos tipos de tubería para este tipo de daño.

Lo anterior se puede observar con mayor claridad en la gráfica 1: el tiempo de reparación máximo en las tuberías sanitarias es mayor que en las pluviales.

Gráfica 1. Boxplot del Tiempo de reparación para el daño Domiciliaria Reconstruida para cada tipo de tubería



El anterior método trabajado desde dos puntos de vista (separando por tipo de tubería y por tipo de daño) con la misma variable dependiente (tiempo de

reparación) permite concluir que el tiempo de reparación (criticidad de la falla) no sirve de criterio para generar reglas de calificación basadas en los atributos de las tuberías.

- b. Pruebas estadísticas iniciales con variable dependiente los atributos y el tipo de tubería, tomando como variable independiente el tipo de daño.

Para esta prueba se tomaron los mismos criterios de evaluación del apartado a. Cabe mencionar que en esta prueba no se toma en cuenta la variable “tiempo de reparación”.

Tabla 18. Kruskal-Wallis con variable dependiente el tipo de daño

FACTOR	Valor p
DIAMETRO	0,15
EDAD	0,42
LONGITUD	0,02
MATERIAL	0,69
PENDIENTE	0,49
TIPO_TUB	0,02

La tabla 18 muestra que la longitud y el tipo de tubería son las únicas variables que tienen una influencia significativa respecto al tipo de daño, al mostrar un valor p menor a 0,05.

Tabla 19. Prueba t. Relación de daños con el tipo de tuberías.

TTIPO_TUB	Dom Recons	Tub Rep	Red Obst	Red Desp
Tub Rep	1	NA	NA	NA
Red Obst	1	1	NA	NA
Red Desp	1	1	1	NA
Red Colap	0,16	0,28	0,07	0,58

La Tabla 19, muestra los resultados obtenidos de la prueba t para el tipo de tubería que fue una de las variables que tuvo influencia significativa en la prueba de Kruskal-Wallis. Como resultado de esta prueba no se observa una diferencia significativa entre los tipos de daños presentados y el tipo de tubería.

Tabla 20. Prueba t. Relación daños con longitud

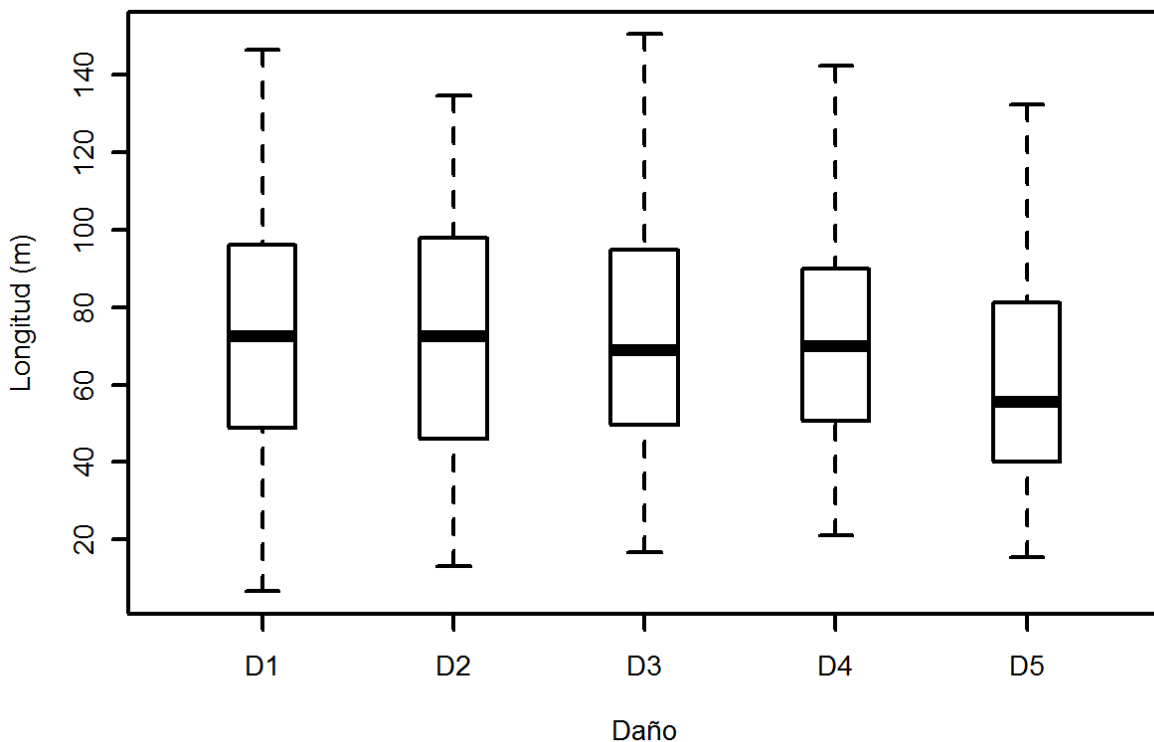
TLONGITUD	Dom Recons	Tub Rep	Red Obst	Red Desp
Tub Rep	1	NA	NA	NA
Red Obst	1	1	NA	NA
Red Desp	1	1	1	NA
Red Colap	0,06	1	0,02	0,96

La Tabla 20 muestra los resultados obtenidos en la prueba t para la longitud que es otra de las variables que tiene influencia significativa sobre el tipo de daño

según la prueba de Kruskal-Wallis. Esta prueba muestra un valor p que indica que la única diferencia significativa con respecto al tipo de daño, se presenta para los daños Red Colapsada y Red Obstruida, lo cual se puede afirmar con una confiabilidad de más de 95 % (valor $p < 0,05$)

En la gráfica 2 los daños están representados por la letra D seguido del número del daño indicando el tipo de daño (D1. Domiciliaria Reconstruida, D2. Tubería Reemplazada, D3. Red Obstruida, D4. Red Desplazada y D5. Red Colapsada). En ésta, se observa que para D5 hay una diferencia significativa con respecto a D4, como se mostró anteriormente en la tabla 18.

Gráfica 2. Boxplot de la longitud respecto cada tipo de daño



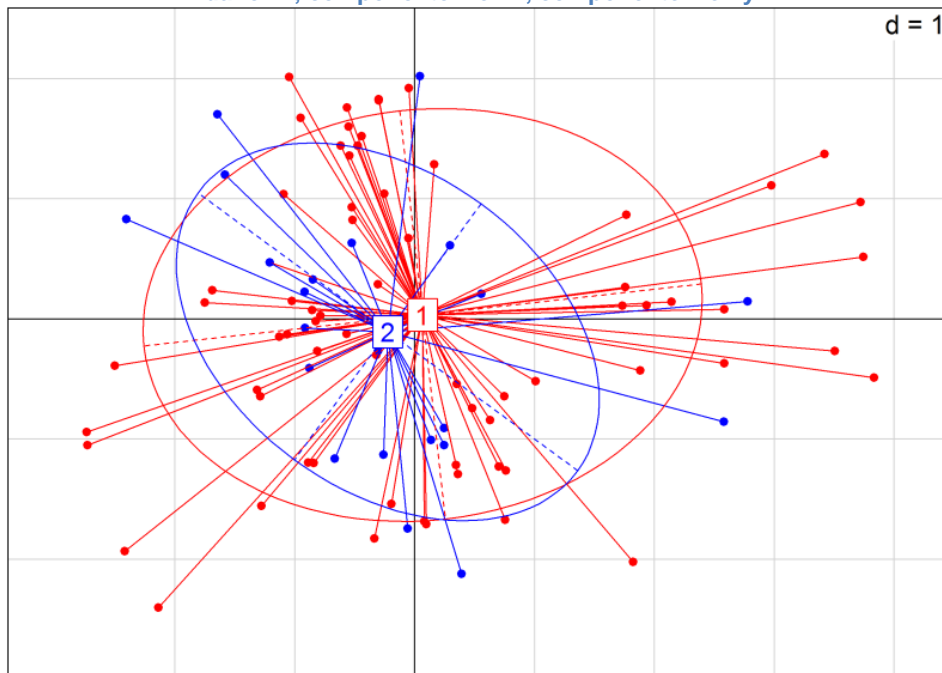
Sin embargo, este resultado no es suficiente para generar una clasificación del tipo de daño basada en los atributos de las tuberías, puesto que tan sólo hay un atributo (longitud) que presenta una alta importancia sobre el tipo de daño, dejando a un lado los demás atributos (pendiente, edad, diámetro y material) los cuales muestran no tener influencia sobre la variabilidad respecto al tipo de daño. Por lo anterior se decidió no tener en cuenta los resultados presentados.

Para ver los resultados de los otros daños, ver Anexo No. 5

c. Análisis por componentes principales (PCA)

Con el uso de esta herramienta, se puede observar gráficamente y de manera cualitativa la relación existente entre los atributos de las tuberías y los daños presentados. Este procedimiento se realizó para todos los daños con el fin de establecer una relación directa entre las componentes, realizando un análisis global de las combinaciones que presentan dichos daños. En este documento se mostrarán únicamente los resultados obtenidos al comparar el daño 1 (Domiciliaria Reconstruida) representada en la Gráfica 3 con color rojo y el daño 2 (Tubería Reparada) mostrada en color azul.

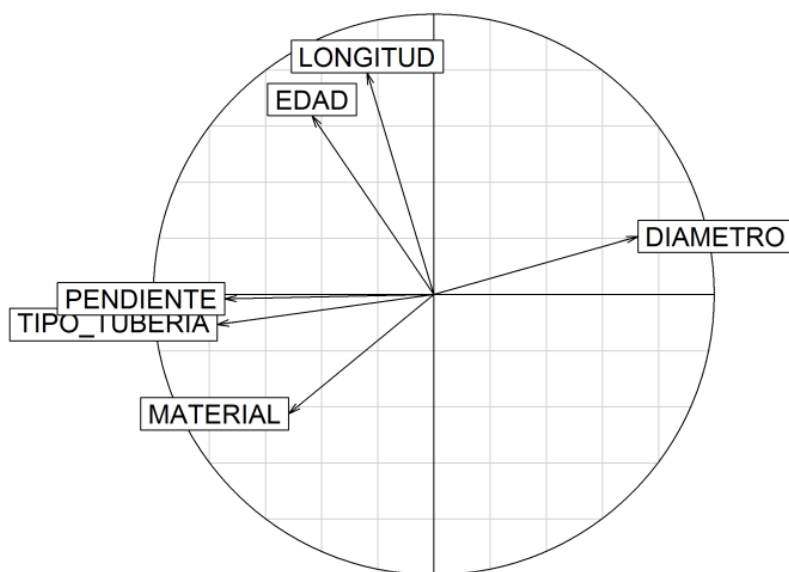
Gráfica 3. Representación de PCA con variable de separación tipo de daño: "daño 1" con respecto al "daño 2"; componente 1 en x, componente 2 en y.



En la Gráfica 3 se observan las tuberías que presentaron el daño 1 (Domiciliaria Reconstruida) en azul y el daño 2 (Tubería reparada) en rojo representadas por puntos. Lo que diferencia a estos dos grupos de tuberías es la distancia de la que se encuentran respecto al componente 1 (eje x), siendo que a menor distancia que se encuentran estos puntos de los ejes, mayor será la influencia que tendrán en los mismos.

En la Gráfica 4, se observa el grado de pertenencia de cada variable sobre cada componente principal (1 (eje x) y 2 (eje y)). Cada una de las variables está representada por un vector que parte desde el origen. Según este esquema, los vectores más cercanos y con mayor magnitud proyectada sobre cualquiera de los ejes son los que representan un mayor grado de pertenencia sobre la componente correspondiente. Para este caso, se puede ver que las variables más representadas por la componente 1 son la pendiente y el tipo de tubería por su proximidad y magnitud proyectada sobre él.

Gráfica 4. Representación del grado de pertenencia de cada variable por los componentes principales 1 (en x) y 2 (en y)



Este análisis se realizó para los cinco daños contemplados (ver Anexo 6) y, al igual que para los daños 1 y 2, no se encontró una relación que pudiera explotarse posteriormente entre los daños y los atributos de las tuberías.

4.1.2 Probabilidad de existencia

Una vez se tuvo el conteo de las tuberías en las combinaciones existentes que presentan daño, se procedió a calcular la probabilidad de existencia de falla para cada combinación, y se aplicó la metodología explicada en el ítem 3.3., para la calificación de la condición actual.

Un ejemplo de los resultados obtenidos se presenta en la Tabla 21 para un número reducido de tuberías; siendo PEF, la probabilidad de existencia de que una combinación presente daños, valor que se obtiene a partir de la relación entre la sumatoria de las tuberías que presentaron un daño en una combinación determinada respecto al total de tuberías que se encuentran en dicha combinación. La tabla completa se encuentra en el Anexo 7.

Tabla 21. Probabilidad de existencia de falla

Pendiente	Material	Edad	Diámetro	Longitud	Tipo tubería	No. Tuberías	Total	PEF	Condición
ALTA	CONCRETO	MEDIA	MEDIO	LARGA	SANITARIA	14	140	0,100	C0
ALTA	CONCRETO	MEDIA	MEDIO	MEDIA	SANITARIA	6	249	0,024	C1
ALTA	CONCRETO	MEDIA	PEQUEÑO	LARGA	SANITARIA	6	66	0,091	C1
ALTA	CONCRETO	ANTIGUA	MEDIO	LARGA	SANITARIA	6	182	0,033	C2
ALTA	CONCRETO	ANTIGUA	MEDIO	MEDIA	SANITARIA	9	268	0,034	C1
ALTA	CONCRETO	NUEVA	PEQUEÑO	CORTA	SANITARIA	3	399	0,008	C2
ALTA	CONCRETO	MEDIA	PEQUEÑO	MEDIA	SANITARIA	2	115	0,017	C2
ALTA	CONCRETO	NUEVA	PEQUEÑO	LARGA	SANITARIA	3	42	0,071	C0
ALTA	CONCRETO	MEDIA	PEQUEÑO	CORTA	SANITARIA	6	356	0,017	C0
ALTA	CONCRETO	ANTIGUA	GRANDE	MEDIA	SANITARIA	4	143	0,028	C1
ALTA	CONCRETO	NUEVA	MEDIO	CORTA	SANITARIA	8	266	0,030	C1
ALTA	GRES	MEDIA	MEDIO	LARGA	SANITARIA	4	64	0,063	C2
ALTA	GRES	MEDIA	PEQUEÑO	MEDIA	SANITARIA	10	279	0,036	C0
ALTA	GRES	NUEVA	MEDIO	CORTA	SANITARIA	2	108	0,019	C2
ALTA	GRES	NUEVA	PEQUEÑO	LARGA	SANITARIA	3	71	0,042	C2
ALTA	GRES	NUEVA	PEQUEÑO	CORTA	SANITARIA	4	321	0,012	C1
ALTA	GRES	MEDIA	PEQUEÑO	LARGA	SANITARIA	7	110	0,064	C1
ALTA	GRES	MEDIA	PEQUEÑO	CORTA	SANITARIA	11	639	0,017	C0
ALTA	GRES	ANTIGUA	GRANDE	LARGA	SANITARIA	6	77	0,078	C1
ALTA	GRES	ANTIGUA	MEDIO	LARGA	SANITARIA	6	59	0,102	C2
ALTA	GRES	ANTIGUA	PEQUEÑO	MEDIA	SANITARIA	2	42	0,048	C2

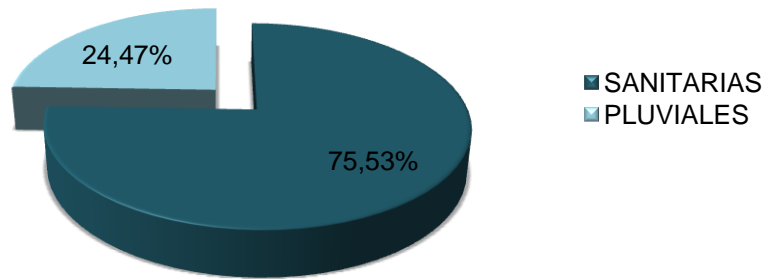
4.2 Clasificación de tuberías.

La clasificación anterior permite establecer la condición en que se encuentran las tuberías al 1 de enero de 2010, tomando los datos obtenidos de la base de datos inicial para el periodo comprendido entre los años 2003 y 2009 de las tuberías que conforman la red de alcantarillado de la cuenca El Salitre.

Las combinaciones calificadas que se presentan a manera ilustrativa en la tabla 21, se constituyeron en la base de datos que se introduce en el primer programa desarrollado. Este programa se utilizó como herramienta aplicativa para diagnosticar el estado actual de las tuberías (Programa elaborado con la herramienta computacional R, ver código del programa en Anexo 11).

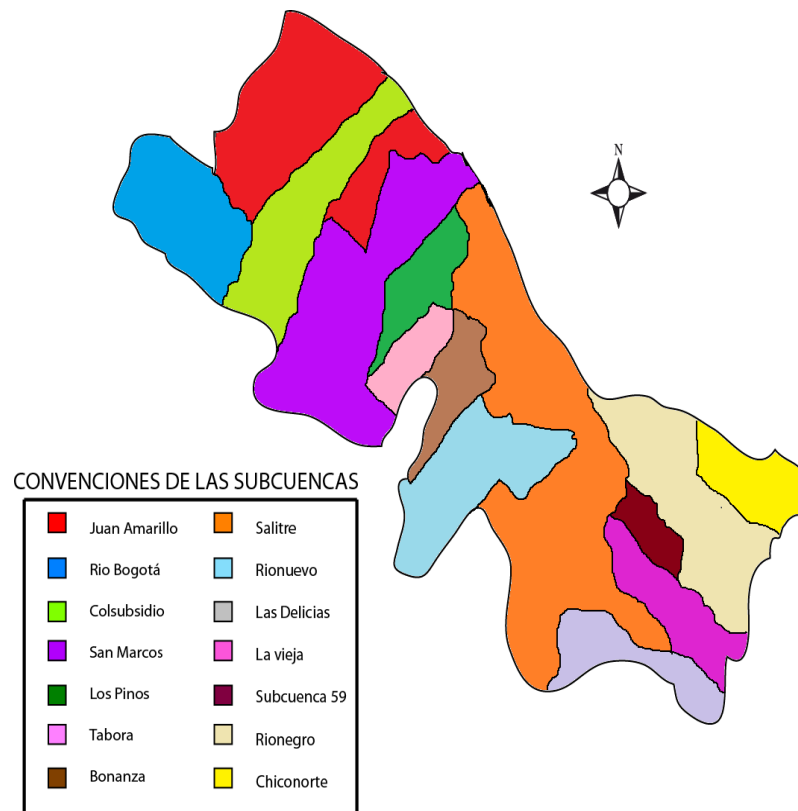
La red de alcantarillado de esta cuenca comprende 21.266 tuberías que se encuentran distribuidas en 16.063 tuberías sanitarias y combinadas (75,53 % sobre el total) y 5.203 tuberías pluviales (24,47 % sobre el total), distribución que se muestra en la gráfica 5.

Gráfica 5. Distribución tipo de tuberías en la red



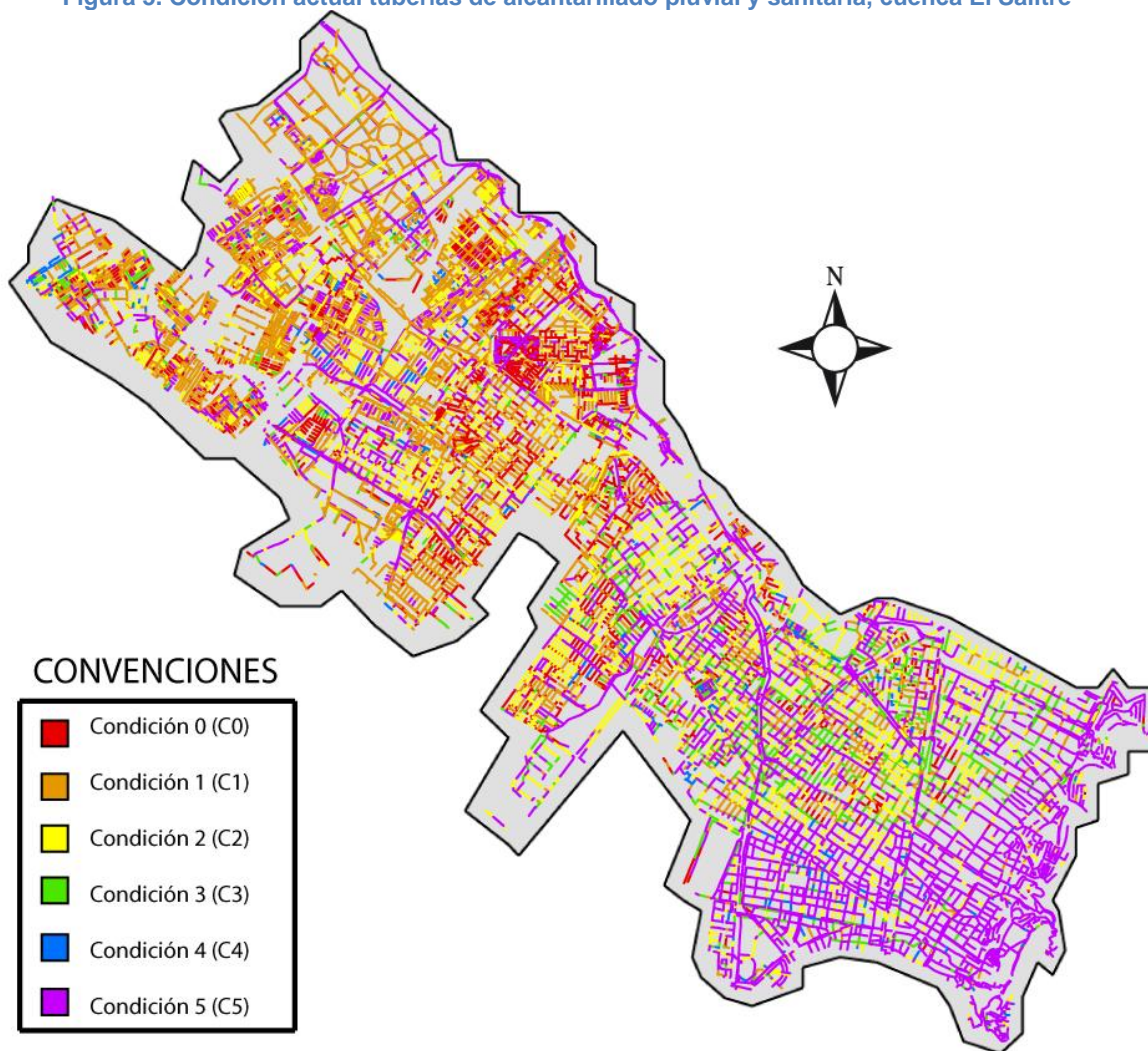
En la Figura 4 se ilustra la ubicación de las subcuencas de la cuenca El Salitre, con el fin de facilitar el posterior análisis de los resultados para la condición actual de las tuberías.

Figura 4. Subcuencas de la cuenca El Salitre



En la Figura 5, se presenta la condición de las 21.266 tuberías, que componen la red de alcantarillado de la cuenca El Salitre, para el 1 de enero del 2010, condición que se denominará de ahora en adelante como “Condición actual”.

Figura 5. Condición actual tuberías de alcantarillado pluvial y sanitaria, cuenca El Salitre



La Figura 5 muestra la totalidad de la red de alcantarillado de la cuenca El Salitre, así como la ubicación de las diferentes condiciones dentro de ella, sea el caso de la condición 5 que se encuentra presente a lo largo de toda la misma, predominando en las subcuencas Las Delicias, La Vieja, Rionegro, Chiconorte y parte suroccidental de la subcuenca Salitre. Por otro lado, se observa que la parte más crítica (condición C0 y C1) se encuentra en las subcuencas Los Pinos, norte de la subcuenca Salitre y parte nororiental de la subcuenca Salitre.

Adicionalmente se puede ver que la condición 1 y la condición 5 son las que predominan en la caracterización en esta zona al tener cada una más de un 30 % de presencia respecto al total de tuberías.

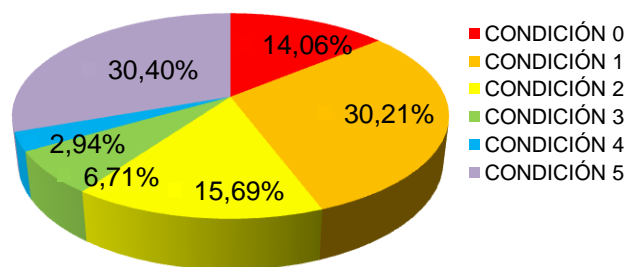
Con el fin de observar con mayor facilidad la presencia de cada condición en la cuenca, en la Tabla 22 se presenta el número exacto de tuberías existentes para cada condición, así como una representación mediante un diagrama de torta (gráfica 6) que muestra la contribución de cada una respecto al total.

En comparación con los resultados obtenidos en el trabajo de grado presentado por Navarro y Sandoval (2011), se observa que la zona crítica no coincide con la identificada en el presente trabajo: Navarro y Sandoval (2011) encontraron que la zona con confiabilidad de inundación más baja era la subcuenca Rionegro. Esto podría deberse a que en dicho trabajo de grado se analizaron únicamente las tuberías pluviales.

Tabla 22. Total tuberías por condición

CONDICIÓN	No. Tub
CONDICIÓN 0	2.989
CONDICIÓN 1	6.425
CONDICIÓN 2	3.336
CONDICIÓN 3	1.426
CONDICIÓN 4	626
CONDICIÓN 5	6.464
TOTAL	21.266

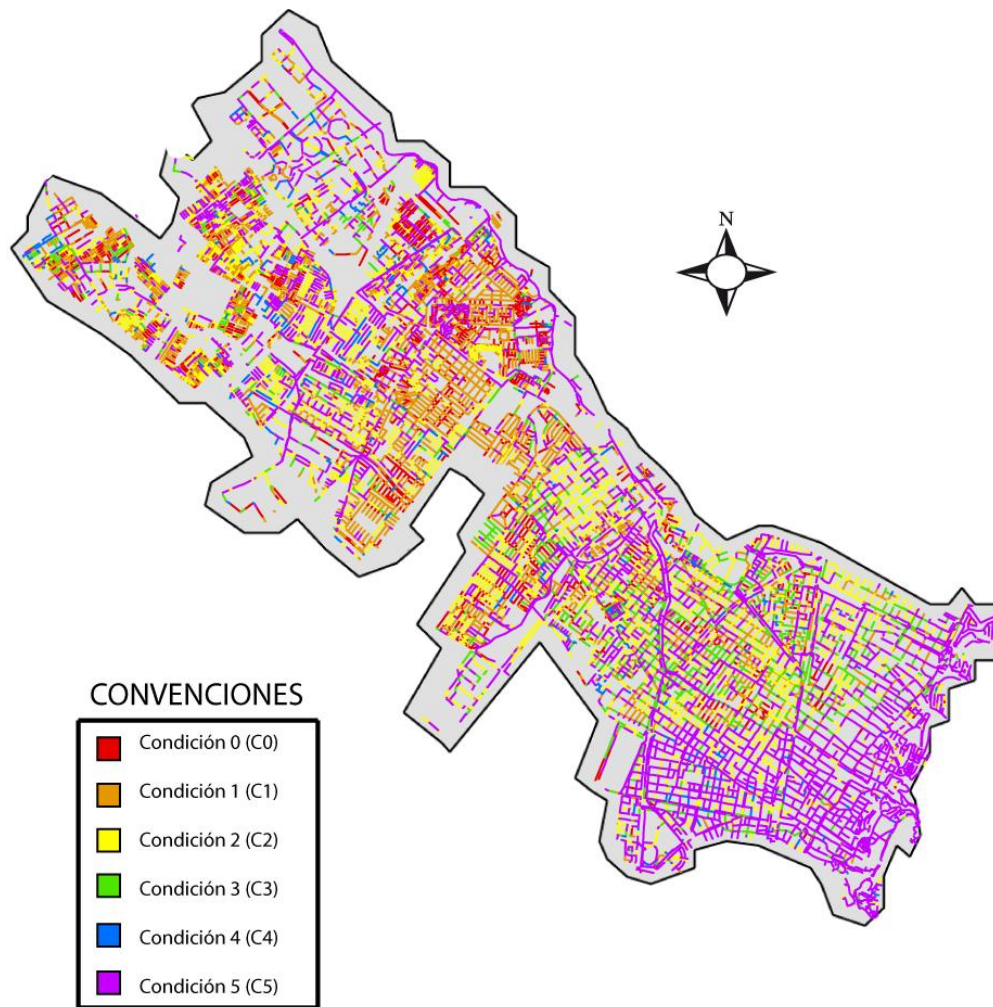
Gráfica 6. Representación de las condiciones presentadas en la cuenca El Salitre.



Como se observa en la gráfica 6, las condiciones más críticas (condición 0, condición 1 y 2) son las que más se encuentran en la zona, al tener una presencia conjunta cercana al 60 % sobre el total de tuberías.

Con las figuras 6 y 7 se presenta la distribución de las diferentes combinaciones existentes para cada tipo de tuberías con el fin de conocer el estado de criticidad de los alcantarillados sanitarios (figura 6) y pluviales (figura 7).

Figura 6. Condición actual tuberías de alcantarillado sanitarias. Cuenca Salitre



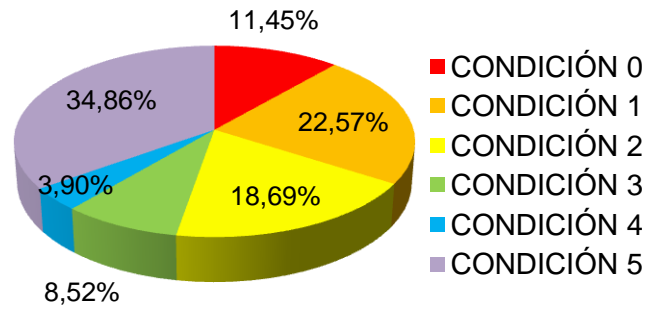
La Figura 6 muestra que las tuberías sanitarias, al sumar el 74,63 % del total de tuberías, se encuentran presentes en las 14 subcuencas de la cuenca El Salitre. Así mismo se observa que la ubicación de las condiciones se conservan (La condición 5 predomina en las tuberías ubicadas en las subcuencas Las Delicias, La Vieja, Rionegro, Chiconorte y parte suroccidental de la subcuenca Salitre; y las condiciones más críticas 0 y 1 predominan en las subcuencas Los Pinos, norte de la subcuenca Salitre y parte nororiental de la subcuenca Salitre).

Adicionalmente se observa que la condición 5 sigue predominando en toda la cuenca, al tener un 34,86 % de presencia respecto a las demás condiciones, como se verá en la tabla 23 y en la gráfica 7.

Tabla 23. Condición tuberías Sanitarias

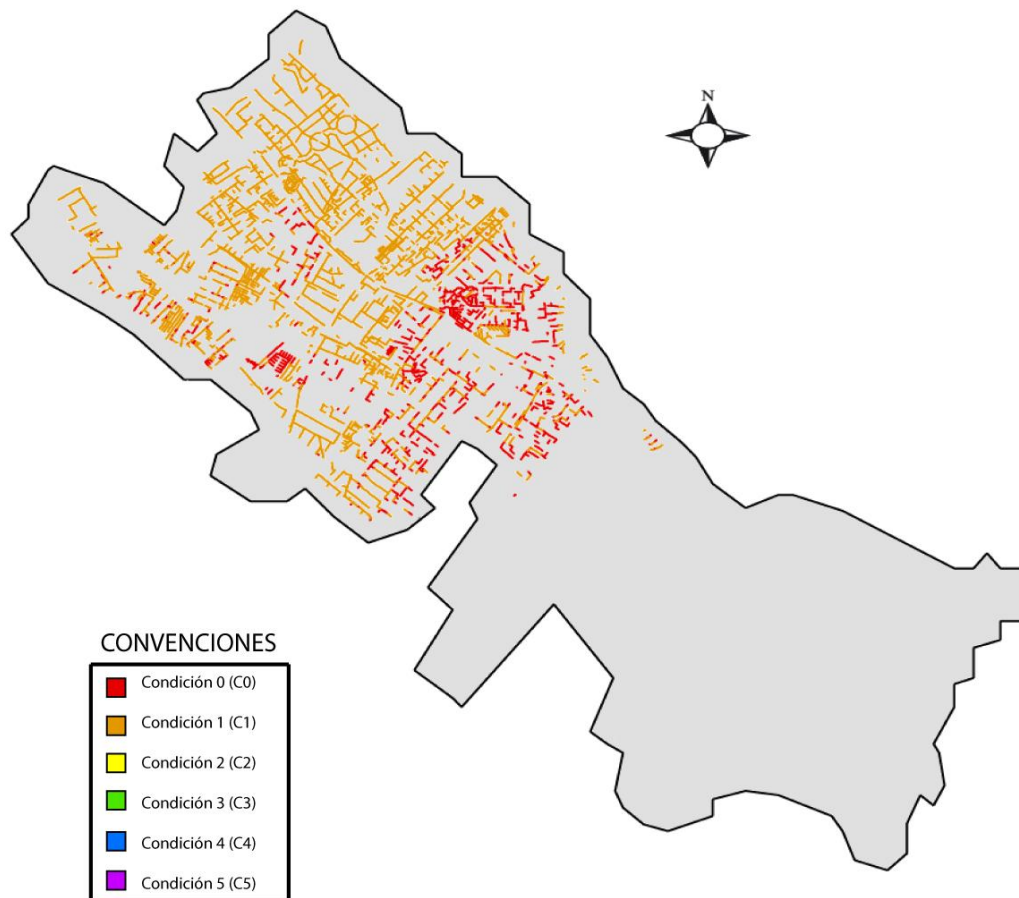
CONDICIÓN	No. Tub
CONDICIÓN 0	1.840
CONDICIÓN 1	3.626
CONDICIÓN 2	3.002
CONDICIÓN 3	1.369
CONDICIÓN 4	626
CONDICIÓN 5	5.600
TOTAL	16.063

Gráfica 7. Representación condiciones tuberías sanitarias



En la figura 7 se muestran las condiciones establecidas para las tuberías pluviales existentes en la cuenca.

Figura 7. Condición actual tuberías de alcantarillado pluvial. Cuenca Salitre



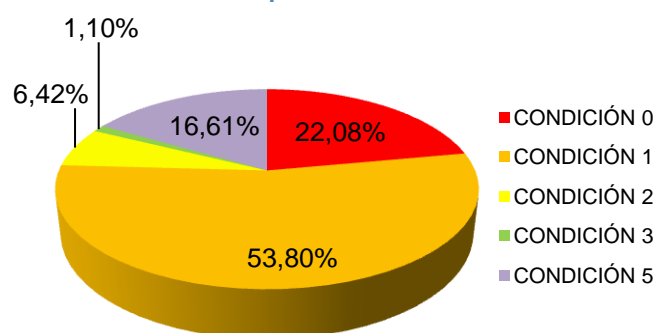
Como se observa en la figura 7, las tuberías pluviales representan tan sólo un 25 % sobre el total de tuberías. Esto se debe a que las tuberías que sirven como drenaje en el resto de la cuenca son tuberías combinadas, las cuales se tomaron junto con las tuberías sanitarias para el análisis. Las tuberías pluviales se encuentran ubicadas en siete (Juan Amarillo, Río Bogotá, Colsubsidio, San Marcos, Los Pinos, Tabora y parte Norte de la subcuenca Salitre) de las 14 subcuencas que tiene la cuenca El salitre.

Para este tipo de tuberías, la condición que mayor presencia tiene es la 1, al estar distribuida en todo el sistema pluvial. Llama la atención el hecho de que la condición 4 no se presenta, por lo que se deduce que los daños 1 y 2 no se presentaron en una misma tubería, sino que estuvieron acompañados de los otros daños durante el periodo comprendido entre el 2003 y el 2009.

Tabla 24. Condición tuberías Pluviales

CONDICIÓN	No. Tub
CONDICIÓN 0	1.149
CONDICIÓN 1	2.799
CONDICIÓN 2	334
CONDICIÓN 3	57
CONDICIÓN 5	864
TOTAL	5.203

Gráfica 8. Representación condiciones tuberías pluviales



La Gráfica 8 presenta con mayor claridad la presencia de cada una de las condiciones existentes para las tuberías pluviales, mostrando que el 53,80 % se encuentran en condición 1, mientras que la condición con menos presencia es la 3, al estar representada únicamente por un 1,10 % de las tuberías que conforman este tipo de alcantarillado.

Con la Figura 6 y 7 y la Gráfica 7 y 8 correspondientes a la red de alcantarillado sanitario y pluvial respectivamente, se puede establecer una comparación del estado actual de cada tipo de alcantarillado, ya que al observar con detenimiento la presencia de las diferentes condiciones dentro de los dos tipos, se observan notables diferencias en cuanto a los porcentajes de existencia de las condiciones para cada tipo de sistema.

Para las condiciones 0 y 1, las tuberías de alcantarillado sanitarias son la mitad de las que se presentan en el alcantarillado pluvial. Contrario a lo anterior, la presencia de tuberías en condición 2 muestra que el porcentaje de existencia de las tuberías sanitarias es tres veces mayor que el porcentaje de existencia en las tuberías pluviales.

Para la condición 3, se observa un aumento en las tuberías sanitarias de ocho veces más con respecto a las tuberías pluviales en dicha condición. De igual forma ocurre en las tuberías con condición 5 (C5) donde las tuberías sanitarias son el doble de las tuberías pluviales.

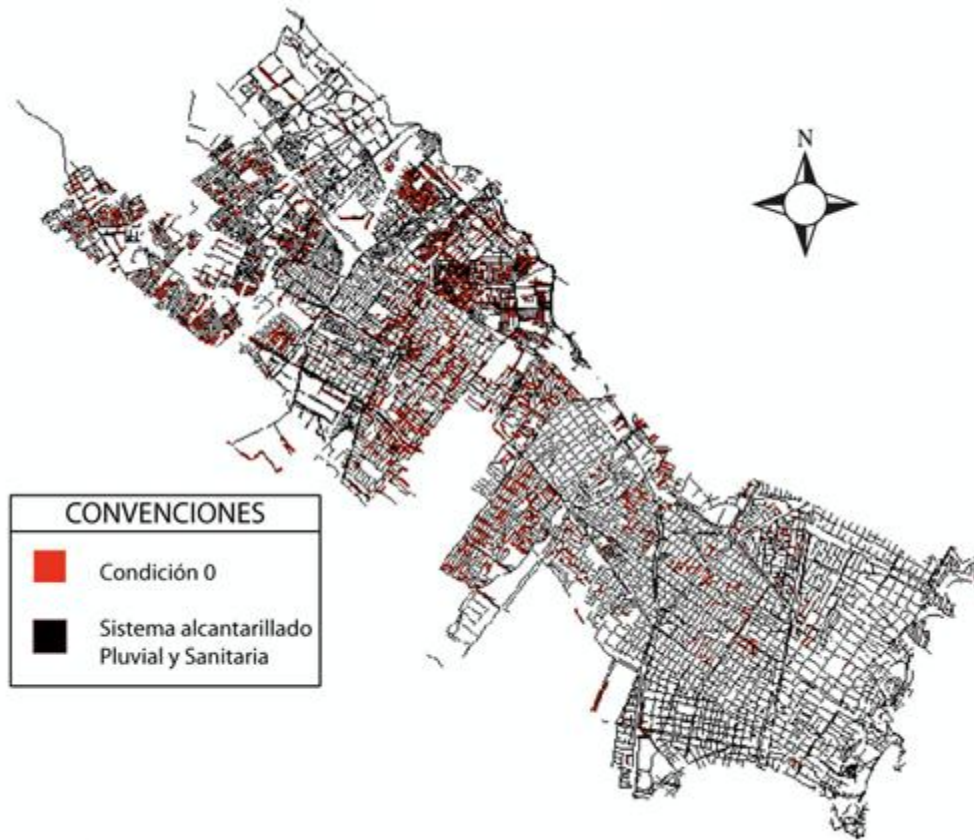
Cabe anotar que las zonas más críticas (condición 0 (C0) y condición 1 (C1) son las mismas para los dos sistemas de alcantarillado (sanitaria y pluvial), es decir en las subcuencas Salitre-norte, San Marcos, Colsubsidio y en la Juan Amarillo-sur) coincide en los dos tipos de redes.

En las figuras 8 a 13, se muestra de manera independiente la ubicación de cada tubería existente en la cuenca con su condición determinada en el sistema general de alcantarillado, donde se puede apreciar mejor la presencia de cada condición con respecto a las demás condiciones existentes en la zona de estudio.

Con las tablas 25 a 30; y las gráficas 9 a 14 se muestra un resumen general del porcentaje de existencia de estas condiciones en la zona.

Lo anterior se realiza con el fin de observar con mayor claridad las zonas de la cuenca donde las diferentes condiciones se presentan y así dimensionar la importancia de cada una para el caso de estudio.

Figura 8. Tuberías con Condición 0 actual



En la Figura 8 se observa que la condición 0 (C0) está presente en la parte norte de la cuenca, en las subcuencas Juan Amarillo, Rio Bogotá, Colsubsidio, San Marcos, Los Pinos, Tabora y en el norte de la subcuenca Salitre; con una leve presencia en la zona media-sur de la cuenca (Subcuenca Rio nuevo, Bonanza y la otra parte de la subcuenca Salitre.)

Tabla 25. Tuberías en Condición 0

No. de tuberías	Tipo tubería
1840	Sanitaria
1149	Pluvial
2989	Total

Gráfica 9. Representación tuberías en Condición 0

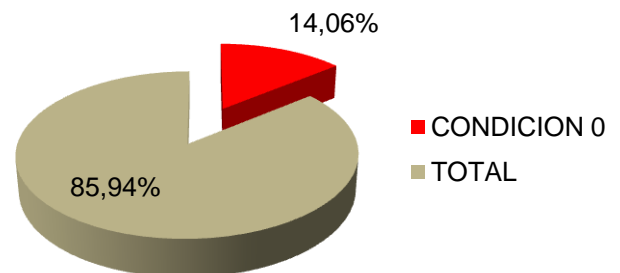
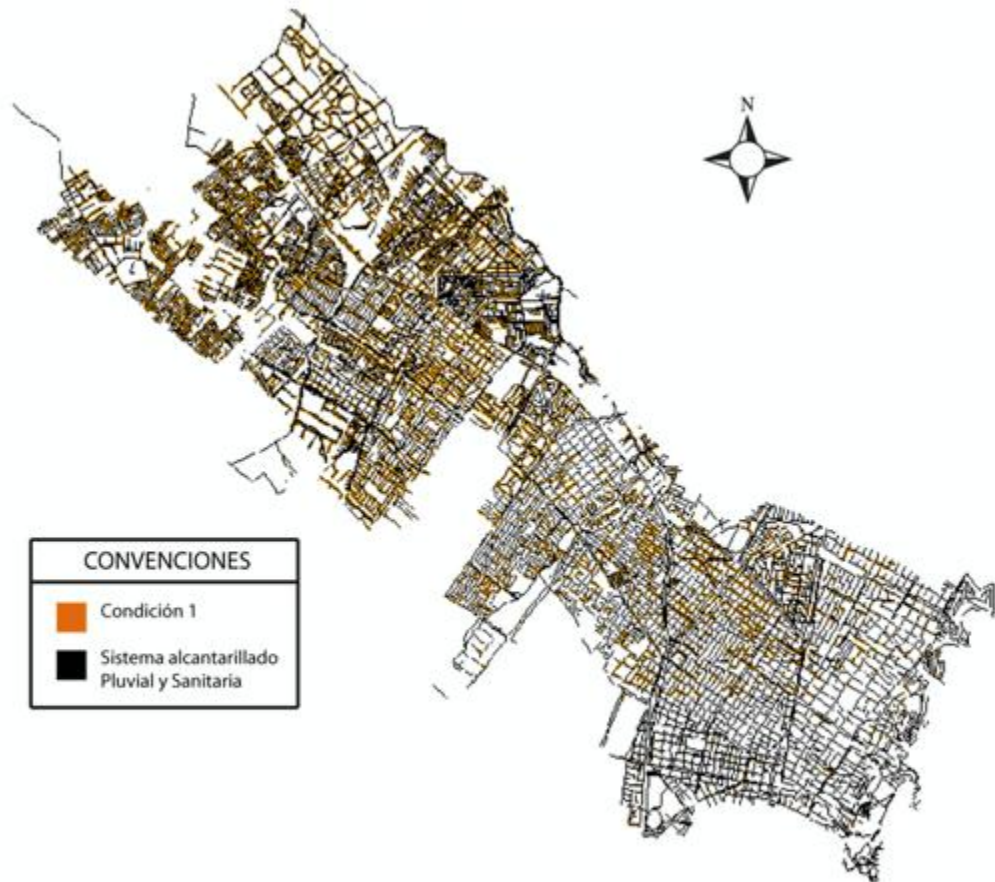


Figura 9. Tuberías con Condición 1 actual



En la Figura 9, se observa que las tuberías que se encuentran en condición 1 (C1) están ubicadas en la misma zona que aquellas en condición 0 (C0), difiriendo en el número de tuberías para cada condición; ya que el porcentaje de las tuberías que presentan la condición 1 (C1) son el doble de las tuberías que presentan la condición 0 (C0).

Tabla 26. Tuberías en Condición 1

No. de tuberías	Tipo tubería
3626	Sanitarias
2799	Pluviales
6425	Total

Gráfica 10. Representación tuberías en Condición 1

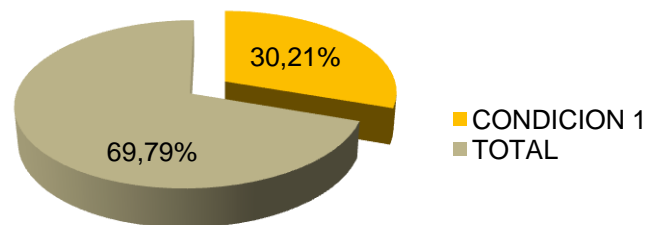


Figura 10. Tuberías con Condición 2 actual



En la Figura 10 se observa que la condición 2 (C2) se encuentra ubicada en las subcuencas que están en el centro de la cuenca (Los Pinos, Salitre, Tabora, Bonanza y Rionuevo). Al comparar con las anteriores condiciones, se logra ver que hacia el sur de la cuenca se encontrarán tuberías de alcantarillado en mejores condiciones.

Tabla 27. Tuberías en condición 2

No. de tuberías	Tipo tubería
3002	Sanitarias
334	Pluviales
3336	Total

Gráfica 11. Representación gráfica tuberías en Condición 2

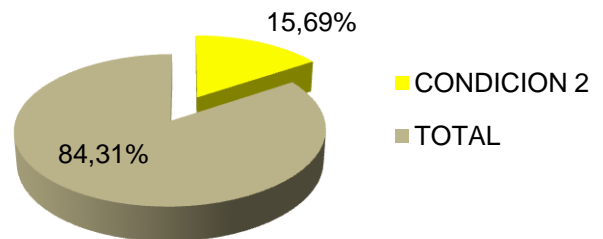


Figura 11. Tuberías con Condición 3 actual



La Figura 11 presenta las tuberías en condición 3 (C3) donde es notoria la disminución de esta condición respecto a la condición 1 (C1) y 2 (C2). Adicionalmente se sigue presentando la tendencia a que las mejores condiciones se encuentran en la zona sur de la cuenca; para esta condición, la mayoría se encuentra en la subcuenca Salitre, Subcuenca 59 y La Vieja, sin dejar de mencionar que en la zona norte-oeste de la cuenca existe una leve presencia de tuberías con esta condición

Tabla 28. Tuberías en Condición 3

No. de tuberías	Tipo tubería
1369	Sanitarias
57	Pluviales
1426	Total

Gráfica 12. Representación gráfica tuberías en Condición 3

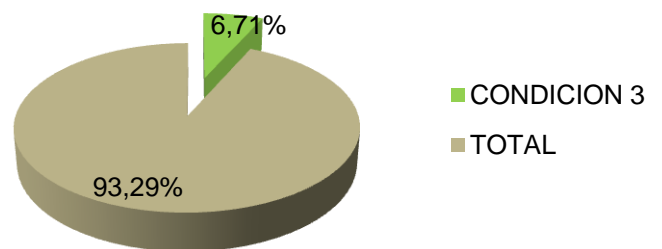
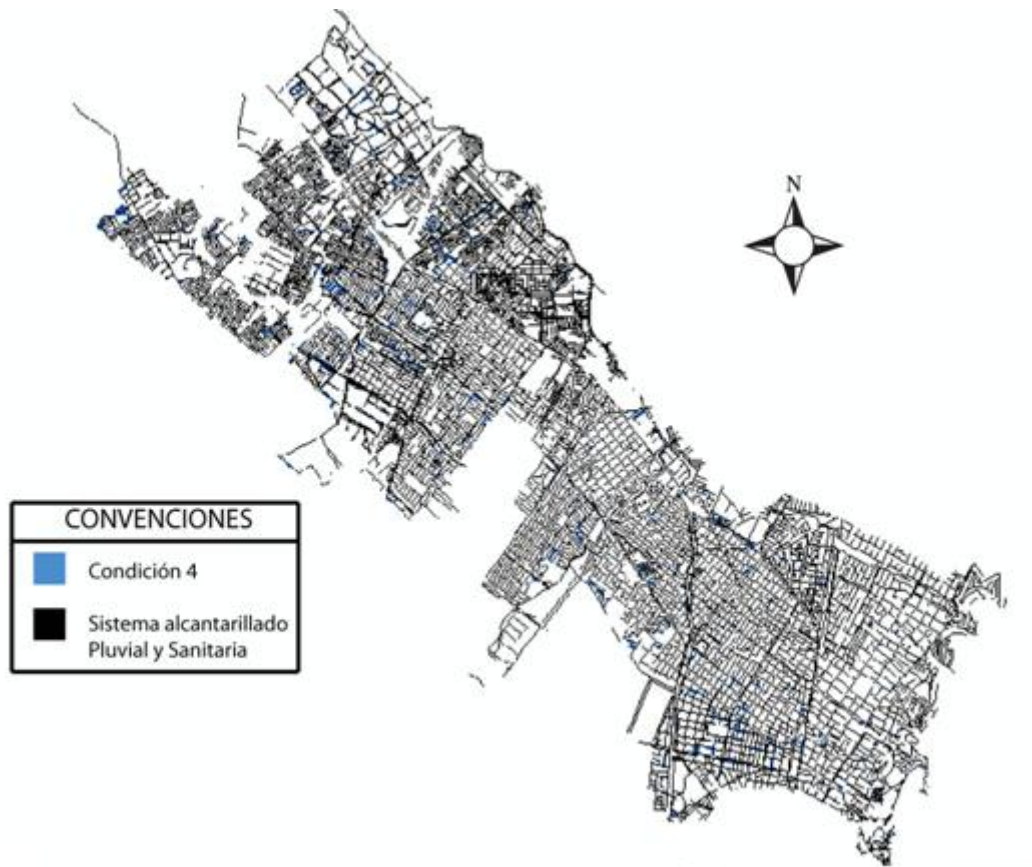


Figura 12. Tuberías con Condición 4 actual



En la Figura 12 se presentan las tuberías con condición 4 en el sistema de alcantarillado de la cuenca El Salitre. En esta se observa que aunque las tuberías que presentan esta condición se encuentran distribuidas a lo largo de la cuenca, se zonifican en las subcuencas de San Marcos, Salitre-sur y Las Delicias, que son subcuencas en donde predomina la condición 1 (C1) y la condición 2 (C2) respectivamente. Cabe mencionar que en esta condición no existen tuberías pluviales, razón por la cual su porcentaje es bajo, como se observa en el gráfico 14.

Tabla 29. Tuberías en Condición 4

No. de tuberías	Tipo tubería
626	Sanitarias
0	Pluviales
626	Total

Gráfica 13. Representación gráfica tuberías en Condición 4

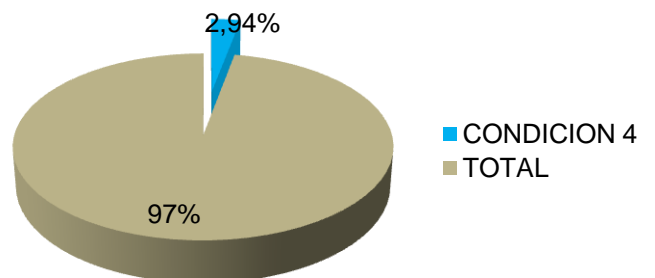


Figura 13. Tuberías con Condición 5 actual

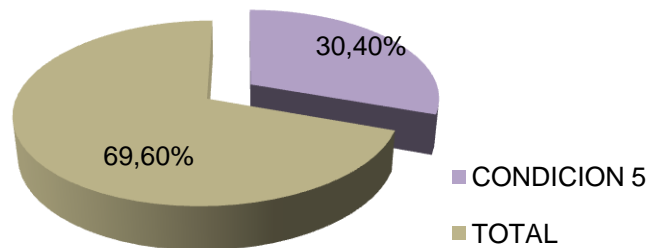


En la Figura 13, se presentan las tuberías con condición 5 (C5) que se encuentran localizadas en toda la cuenca, indicando así la presencia de esta condición en todas las subcuencas que la conforman. En esta figura se observa además que en la zona sur de la cuenca (comprendida por las subcuencas Salitre-sur, Las Delicias, La Vieja, Rio negro y Chico Norte) la gran mayoría de tuberías existentes están en condición 5 (C5).

Tabla 30. Tuberías en condición 5

No. de tuberías	Tipo tubería
5600	Sanitarias
864	Pluviales
6464	Total

Gráfica 14. Representación gráfica tuberías en Condición 5



4.3 Predicción de la condición futura de una red de alcantarillado

A continuación se presentan los resultados obtenidos para la predicción de la condición futura de las tuberías existentes en la cuenca El Salitre. Primero se mostrarán los resultados mediante mapas para la condición existente año a año, según la base de datos suministrada. Posteriormente, se muestra el resultado al aplicar los escenarios propuestos (Tabla 13) los cuales generan la predicción de la condición futura. En este ítem también se explica el segundo programa desarrollado (elaborado con la herramienta computacional R), que permite predecir la condición futura de las tuberías de la red de alcantarillado.

Finalmente, se compara los resultados obtenidos mediante el programa desarrollado del escenario escogido, con los resultados generados de los otros escenarios propuestos, para confirmar su resultado.

4.3.1 Condición año a año

Con el fin de establecer la condición futura, se presenta la condición existente año tras año, para el periodo comprendido entre el 2003 y el 2009. Para esto se muestran las figuras 14 a 20, donde se podrá observar con detalle la ubicación de las tuberías existentes para cada condición por año (2003 al 2009).

Adicionalmente, por medio de las tablas 32 a 38 se muestra el número de tuberías que se presentan para cada condición. Por otro lado, por medio de las gráficas 15 a 21, se representa el porcentaje de participación de cada condición sobre el total de tuberías para cada año del periodo referenciado anteriormente.

En consecuencia, se puede comparar año tras año el estado del sistema, permitiendo observar su evolución con el transcurso de los años. Para esto es necesario conocer los daños que se presentan en cada año, ya que su calificación depende de éstos, como se explicó en el ítem 3.3. En la tabla 31 se presenta la relación de daños existentes en la base de datos proporcionada para cada año.

Tabla 31. Daños presentados en cada año

AÑO	DAÑOS
2003	5, 4, 3, 2, 1
2004	5, 4, 3, 2, 1
2005	2 y 1
2006	3, 2 y 1
2007	1 y 2
2008	1 y 2
2009	1 y 2

En la anterior tabla se observa que para los años 2007 al 2009 no se presentan los daños más críticos, situación que se refleja en la condición de las tuberías para

cada año; por el contrario para los años 2003 y 2004 se muestra un sistema más vulnerable a decaer en su funcionamiento debido a la criticidad de los daños que se presentan.

Figura 14. Condición actual tuberías año 2003

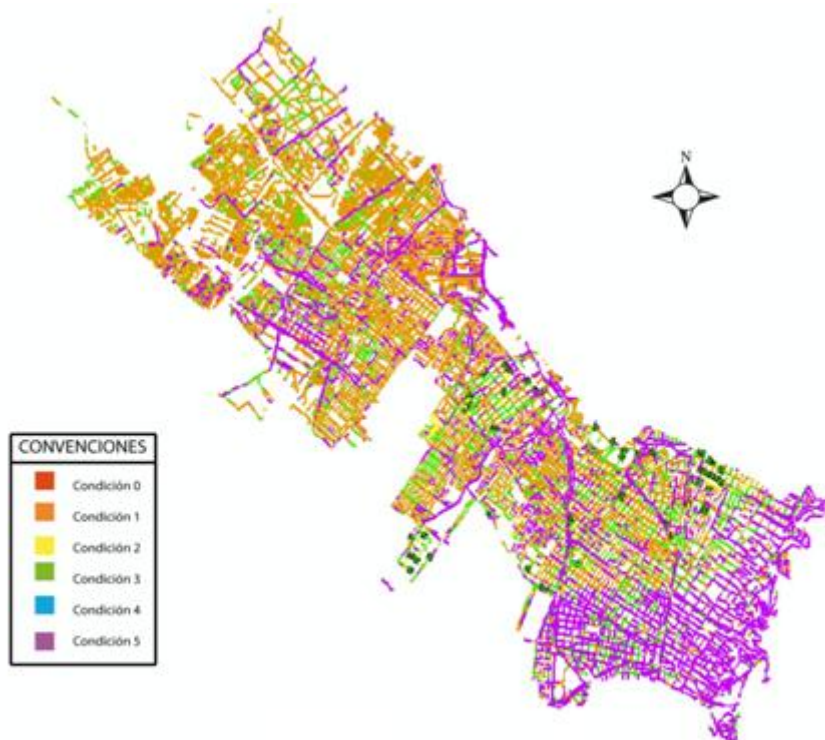
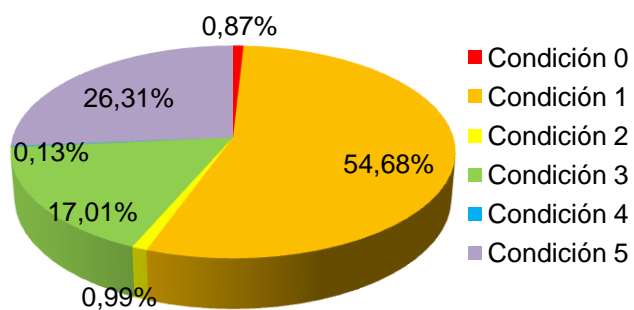


Tabla 32. Condiciones año 2003

CONDICIÓN	No. Tuberías
Condición 0	185
Condición 1	11629
Condición 2	210
Condición 3	3618
Condición 4	28
Condición 5	5596
TOTAL	21266

Gráfica 15. Representación gráfica Condición año 2003



Para el año 2003 se puede apreciar que la condición que predomina es la condición 1 con un 54,68 % de presencia respecto al total de las tuberías, seguida de la condición 5 con un 26,31 %. Por lo anterior, se puede afirmar que este año fue crítico para el sistema debido a la presencia de todos los daños en las tuberías, ya que como mínimo, se presentaron dos de los daños más críticos en cada tubería.

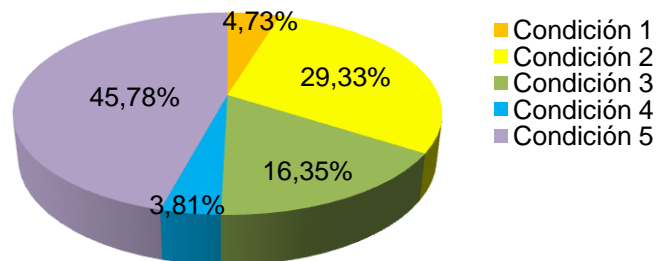
Figura 15. Condición actual tuberías año 2004



Tabla 33. Condición tuberías año 2004

CONDICIÓN	No. Tuberías
Condición 0	0
Condición 1	1006
Condición 2	6238
Condición 3	3476
Condición 4	810
Condición 5	9736
TOTAL	21266

Gráfica 16. Representación gráfica tuberías año 2004



Para el año 2004, se observa que no hay presencia de tuberías en condición 0 y una notable disminución de tuberías en condición 1 reduciendo su porcentaje de existencia en la zona en un 49,95 %, indicando una disminución en la presencia de daños críticos en este año respecto al año 2003.

Figura 16. Condición actual tuberías año 2005

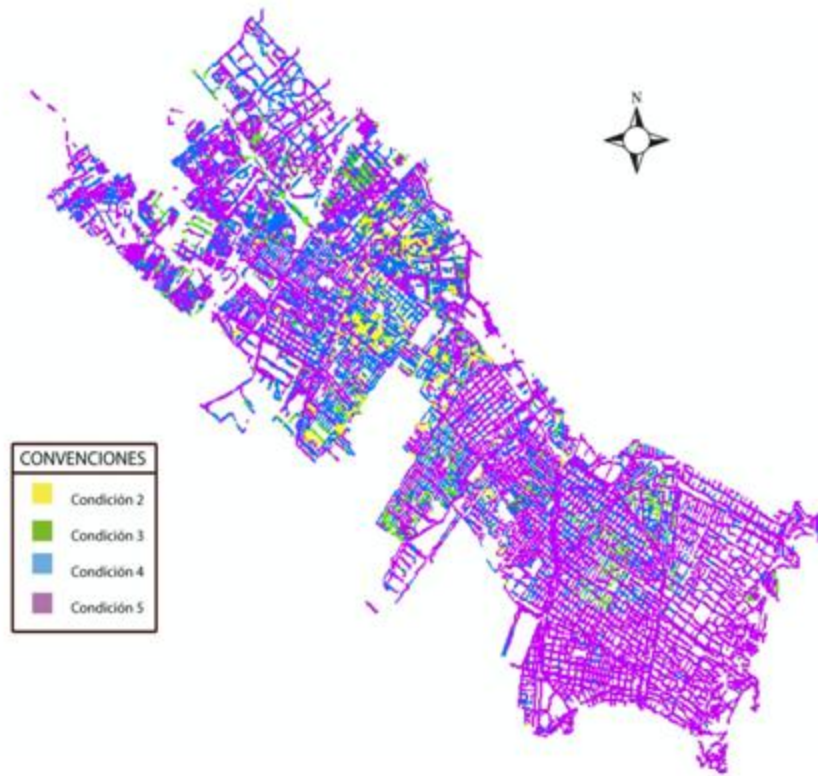
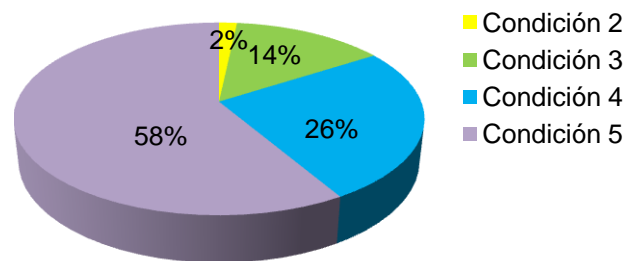


Tabla 34. Condición tuberías año 2005

CONDICIÓN	No. Tuberías
Condición 0	0
Condición 1	0
Condición 2	358
Condición 3	3022
Condición 4	5454
Condición 5	12432
TOTAL	21266

Gráfica 17. Representación gráfica tuberías año 2005



Para el año 2005, se observa nuevamente la disminución de las condiciones más críticas, al no presentarse las condiciones 0 y 1. Adicionalmente para este año, el sistema se encuentra en buenas condiciones de funcionamiento, puesto que más la mitad de las tuberías están en condición 5, indicando la desaparición de los daños con mayor puntaje de criticidad y la cantidad de fallas dentro de cada tubería.

Figura 17. Condición actual tuberías año 2006

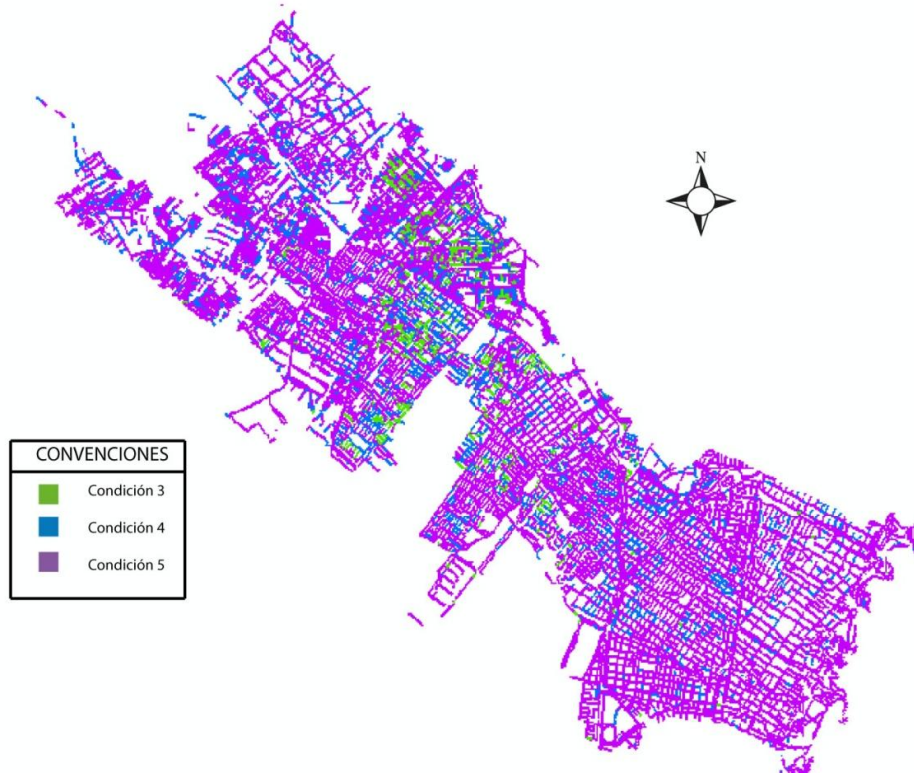
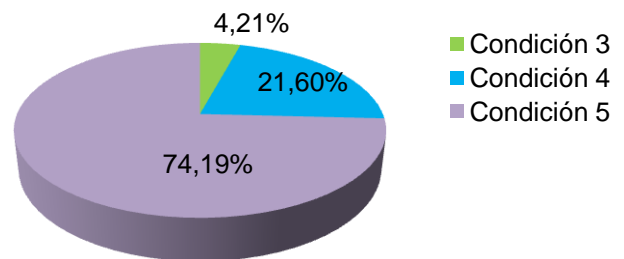


Tabla 35. Condiciones tuberías año 2006

CONDICIÓN	No. Tuberías
Condición 0	0
Condición 1	0
Condición 2	0
Condición 3	895
Condición 4	4594
Condición 5	15777
TOTAL	21266

Gráfica 18. Representación gráfica tuberías año 2006



Para el año 2006, la condición del sistema se puede considerar como óptima, ya que el 74,19 % de las tuberías están en condición 5. También se observa que no hay presencia de las condiciones críticas.

Figura 18. Condición actual tuberías año 2007

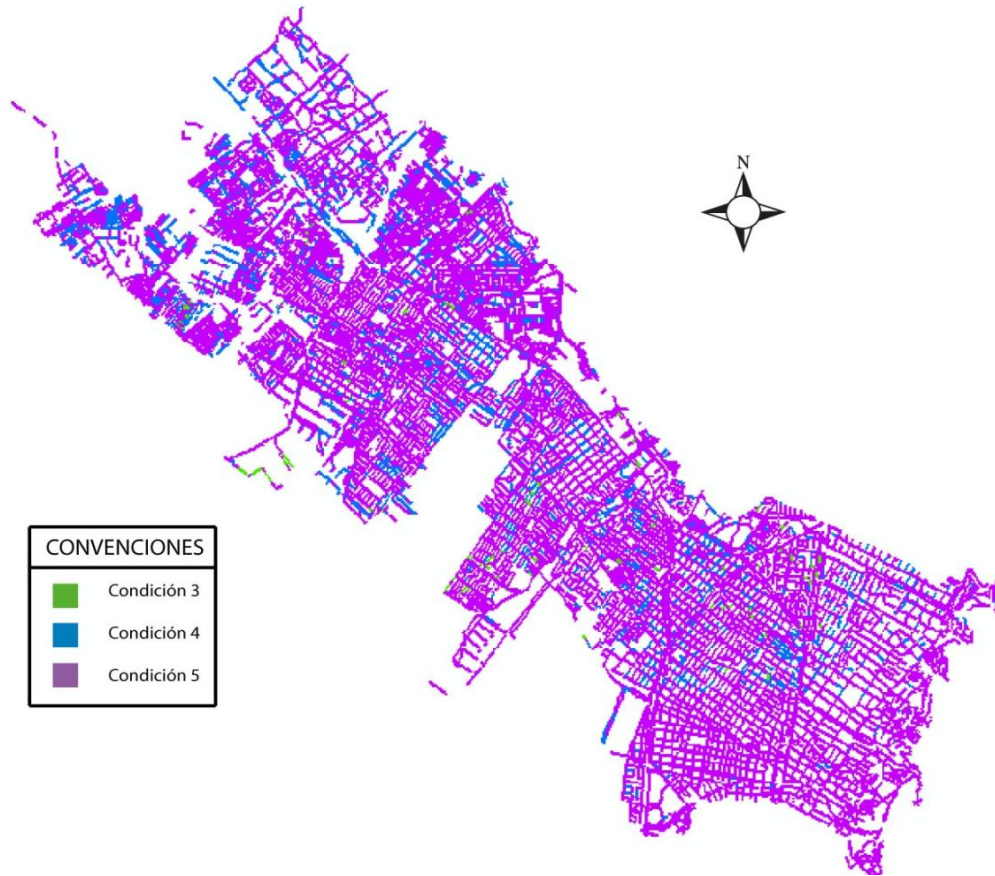
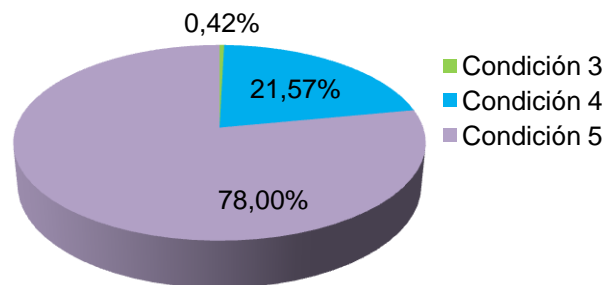


Tabla 36. Condiciones tuberías año 2007

CONDICIÓN	No. Tuberías
Condición 0	0
Condición 1	0
Condición 2	0
Condición 3	90
Condición 4	4588
Condición 5	16588
TOTAL	21266

Gráfica 19. Representación gráfica tuberías año 2007



Para el año 2007, se nota una leve mejoría del sistema, aunque no hay cambios significativos con respecto al año anterior, ya que la variación en los porcentajes no representa una variación brusca entre ellos. Es notable como la condición 3 disminuye su porcentaje de aparición.

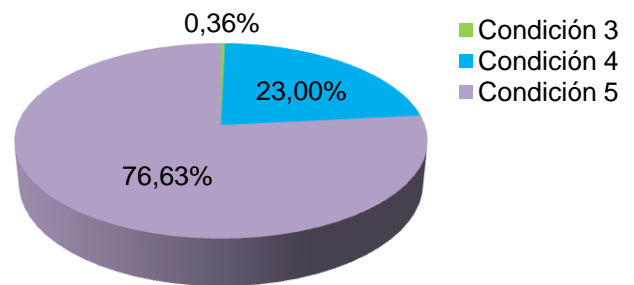
Figura 19. Condición actual tuberías año 2008



Tabla 37. Condiciones tuberías año 2008

CONDICIÓN	No. Tuberías
Condición 0	0
Condición 1	0
Condición 2	0
Condición 3	77
Condición 4	4892
Condición 5	16297
TOTAL	21266

Gráfica 20. Representación gráfica tuberías año 2008



Para el año 2008, el porcentaje de existencia de la condición 5 (C5) disminuye un 1.37 % aumentando las tuberías con condición 4 (C4). A pesar de esta situación el sistema conserva la tendencia a encontrarse en condición 5 (C5).

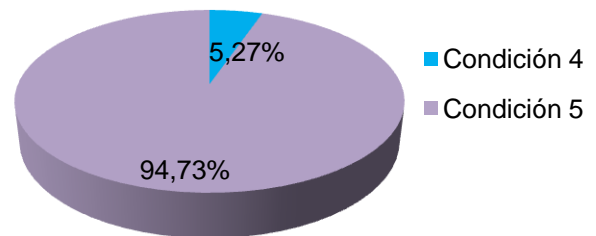
Figura 20. Condición actual tuberías año 2009



Tabla 38. Condición tuberías año 2009

CONDICIÓN	No. Tuberías
Condición 0	0
Condición 1	0
Condición 2	0
Condición 3	0
Condición 4	1120
Condición 5	20146
TOTAL	21266

Gráfica 21. Representación gráfica tuberías año 2009



Para el año 2009, la condición del sistema es óptima para el funcionamiento de la red de alcantarillado, ya que aproximadamente 95 % de las tuberías se encuentran en condición 5 (C5), estado que indica que para este año pocos daños se presentaron, y los que se presentaron tienen un bajo porcentaje de criticidad, al ser únicamente los daños 1 y 2, los presentados en las 1.120 tuberías que se encuentran en esta condición.

4.3.2 Proyección condición año a año

A continuación se presenta el resultado obtenido del escenario seleccionado después de proyectar todos los escenarios propuestos con cadenas markovianas y simulaciones de Montecarlo como se explicó en el ítem 3.4.

Para obtener estos resultados se utilizó el segundo programa mencionado al inicio del capítulo 4.3, para el cual se hizo necesario tener una base de datos con la clasificación de las tuberías existentes año por año.

El programa consta de tres subprogramas: (i) el primero de estos tiene un código que permite la realización de las cadenas de Markov, donde sus entradas son la base de datos antes mencionada y los resultados de salida son las matrices de que relacionan el número de tuberías que estaban en una condición en un año inicial y pasan a otra en el año que se desea proyectar; (ii) el segundo subprograma toma los resultados del primero (matrices de Markov) y la base de datos de la clasificación de las tuberías año por año como parámetros de entrada, comparándolos por medio de la metodología de las simulaciones de Montecarlo para estimar la confiabilidad de los resultados de la predicción (matrices de Markov), siendo su variable de salida el valor VP y FP general por proyección; (iii) finalmente el tercer subprograma toma como parámetros de entrada las matrices markovianas y su resultado es la calificación de cada tubería para el año de proyección, el cual también se obtuvo con el uso de la metodología de las simulaciones de Montecarlo, como se explicó en el ítem 3.4. (Ver código de este programa en el Anexo 11)

Al ejecutar el anterior programa en los diez escenarios mencionados en el ítem 3.4., se llegó a que el escenario escogido es el escenario No. 5 “Escenario 2003-2004-2005”, al considerar que éste presenta una mayor confiabilidad de los datos presentados, por lo que a continuación se presentan los resultados obtenidos que llevaron a la escogencia de este escenario, y los resultados escenario No. 5.

La matriz inicial de Markov que relaciona el paso de las tuberías existentes de una condición a otra (tomados de la base de datos de la calificación de las tuberías año por año) es la que se muestra en la tabla 39. A partir de esta matriz se inicia la proyección del estado para los siguientes años

Tabla 39. Matriz de relación tuberías existentes escenario 2003-2004-2005

	C0	C1	C2	C3	C4	C5
C0	0	0	0	0	185	0
C1	0	0	358	3022	4226	4023
C2	0	0	0	0	0	210
C3	0	0	0	0	1043	2575
C4	0	0	0	0	0	28
C5	0	0	0	0	0	5596

Con las tablas 40 y 41 se muestra la matriz de relación de las tuberías proyectadas para los años 2008 y 2009 respectivamente mediante cadenas de Markov. Las matrices de relación de las tuberías de los otros años de proyección de este escenario y de los demás, se puede ver en el anexo 8.

Tabla 40. Proyección No. tuberías al 2008

	C0	C1	C2	C3	C4	C5
C0	0	0	0	0	185	0
C1	0	0	0	0	0	11629
C2	0	0	0	0	0	210
C3	0	0	0	0	0	3618
C4	0	0	0	0	0	28
C5	0	0	0	0	0	5596

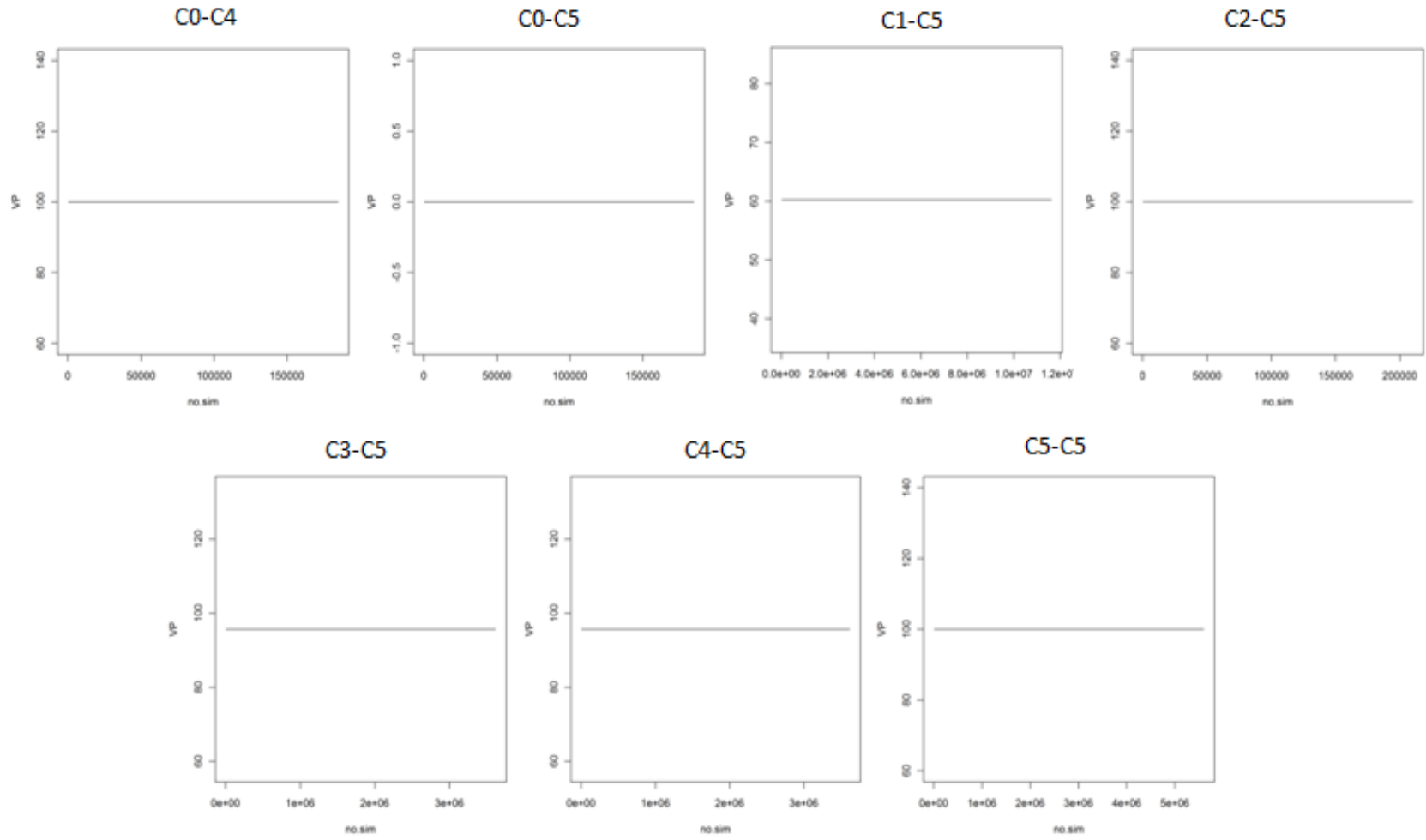
Tabla 41. Proyección No. tuberías al 2009

	C0	C1	C2	C3	C4	C5
C0	0	0	0	0	185	0
C1	0	0	0	0	0	11629
C2	0	0	0	0	0	210
C3	0	0	0	0	0	3618
C4	0	0	0	0	0	28
C5	0	0	0	0	0	5596

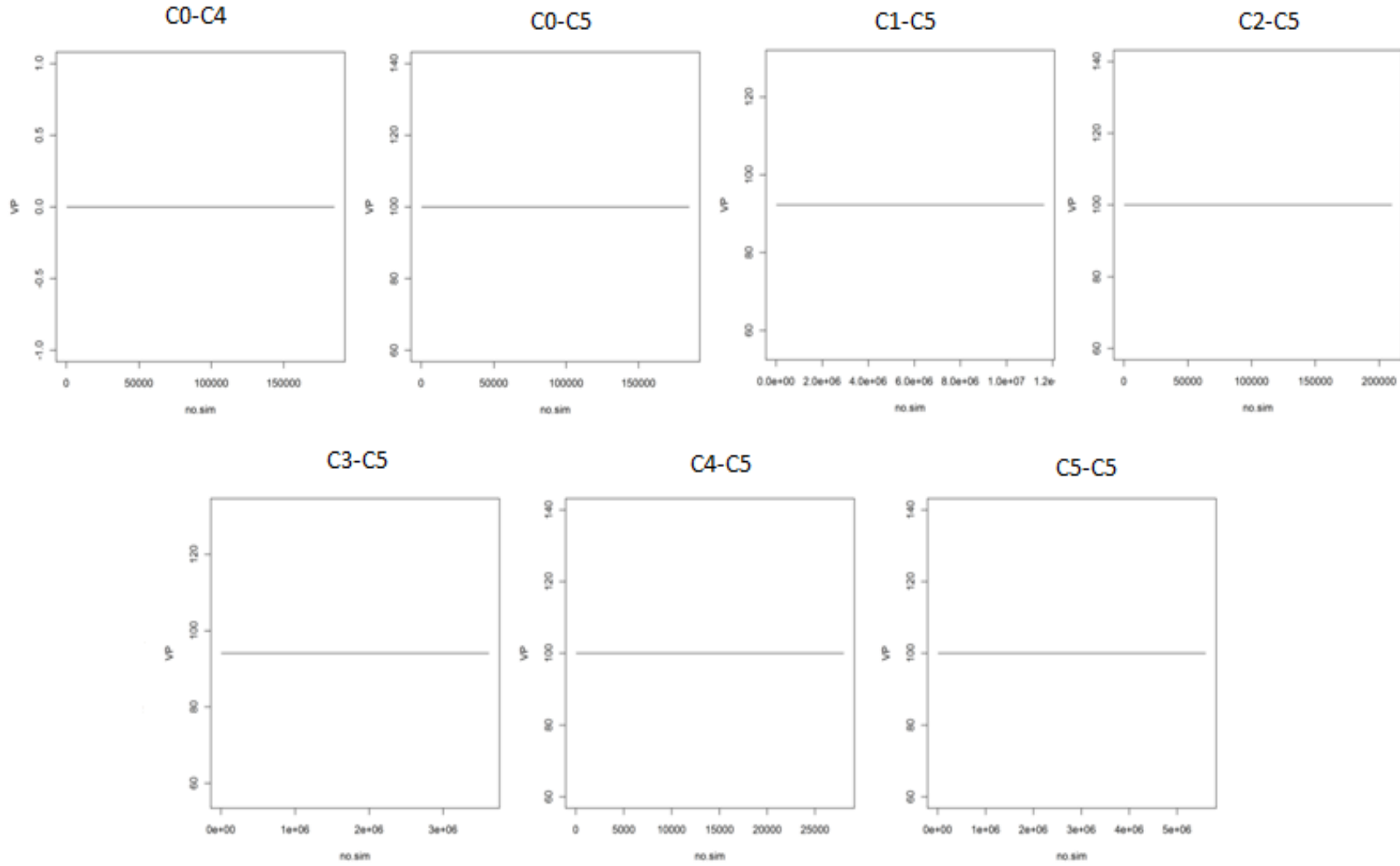
En la comparación de las tuberías existentes para cada combinación de condiciones y las tuberías proyectadas, se utilizaron las simulaciones de Montecarlo, las cuales arrojan como resultado los valores de los criterios de Verdaderos Positivos (VP) y Falsos positivos (FP), valores que se calcularon para cada año proyectado y cada combinación de condiciones.

En las gráficas 22 y 23 se ilustra los valores de Verdadero Positivos (VP) obtenidos de cada simulación vs el número de simulaciones para cada combinación de condiciones en los años 2008 y 2009 respectivamente. Ver gráficas de los demás años y escenarios en el Anexo 8.

Gráfica 22. VP vs No. Simulaciones para el año 2008



Gráfica 23. VP vs No. Simulaciones para el 2009



Con el resultado de Verdaderos Positivos (VP) y Falsos Positivos (FP) para cada relación de condiciones se hizo un promedio por proyección con el fin de tener un valor de VP y FP general. Luego estos valores se relacionan (VP/FP) y se compararon como se observa en la tabla 42.

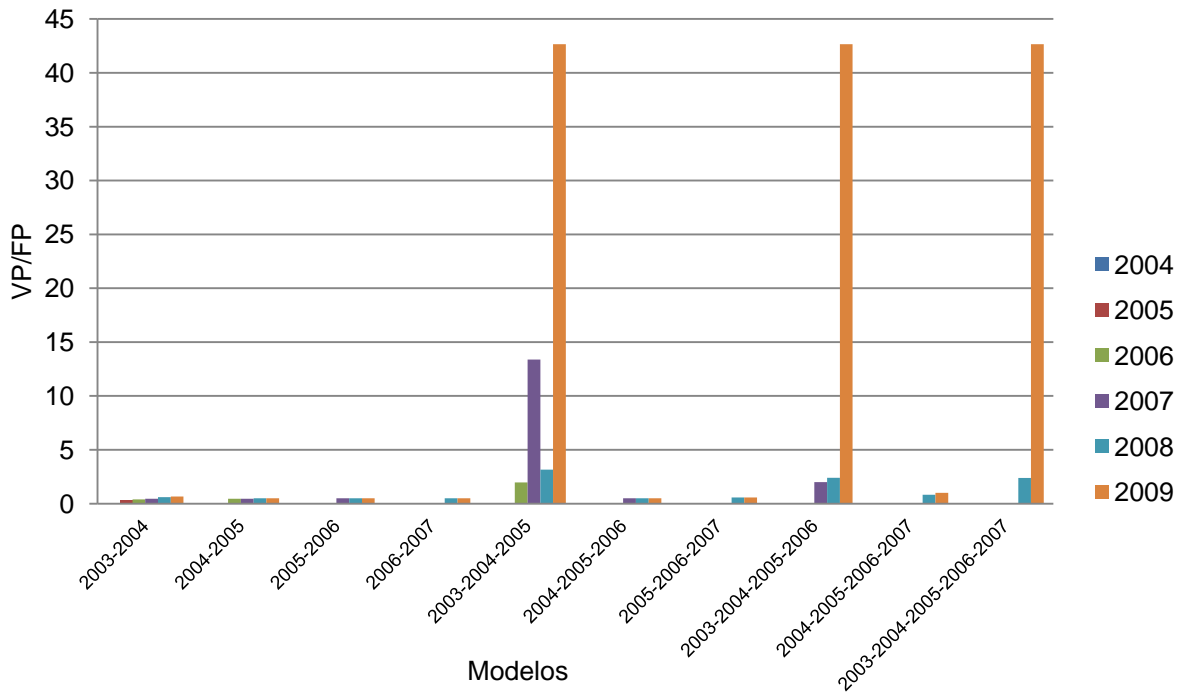
Tabla 42. Relación VP/FP, para cada escenario propuesto según año proyectado

ESCENARIO	2004	2005	2006	2007	2008	2009	PROMEDIO
2003-2004		0,33	0,40	0,46	0,60	0,67	0,49
2004-2005			0,46	0,46	0,50	0,50	0,48
2005-2006				0,50	0,50	0,50	0,50
2006-2007					0,50	0,50	0,50
2003-2004-2005			1,97	13,38	3,16	42,66	15,29
2004-2005-2006				0,50	0,50	0,50	0,50
2005-2006-2007					0,57	0,57	0,57
2003-2004-2005-2006				2,00	2,40	42,66	15,69
2004-2005-2006-2007					0,83	1,00	0,92
2003-2004-2005-2006-2007					2,39	42,66	22,52

La comparación de la tabla 42, se presenta de forma más clara en la gráfica 24, donde se observa que el escenario que cumple con las condiciones mencionadas en el ítem 3.4 para la elección del mejor escenario es el escenario No. 5 “Escenario 2003-2004-2005”, escenario para el cual los VP superan los FP en cada año presentado, en especial para los años 2007 y 2009 en comparación a los otros escenarios.

Es importante mencionar que aunque los escenarios 2003-2004-2005-2006 y 2003-2004-2005-2006-2007 presentan un mayor promedio de VP/FP en el año 2009, el escenario seleccionado presenta mayor número de años de comparación (2006 a 2009 para el escenario seleccionado; 2007 a 2009 para los escenarios no seleccionados) para las proyecciones realizadas.

Gráfica 24. Variación VP/FP por escenarios



Este escenario se proyecta por medio de cadenas de Markov hasta el año de convergencia, es decir hasta que las proyecciones año tras año empiecen a presentar estabilidad en sus resultados, el cual es el año 2007, indicando el número de tuberías que pasan de la condición en que se encontraban en el año inicial (2003) a la condición del año presentado (2007), como se observa en la tabla 43. Conociendo el año de convergencia de este escenario se procede a realizar las predicciones hasta el año de convergencia de los demás, con el fin de comparar el comportamiento de los resultados de cada uno de los escenarios presentados (Ver proyecciones de todos los escenarios y su convergencia en Anexo 8).

Tabla 43. Proyección No. tuberías al 2007

	C0	C1	C2	C3	C4	C5
C0	0	0	0	0	0	185
C1	0	0	0	0	0	11629
C2	0	0	0	0	0	210
C3	0	0	0	0	0	3618
C4	0	0	0	0	0	28
C5	0	0	0	0	0	5596

La anterior tabla indica el número de tuberías que van a pertenecer a una condición determinada, mas no la condición particular en la que se va encontrar cada tubería, por lo que se procede a ejecutar el tercer subprograma del programa desarrollado para esta fase, que por medio de las simulaciones de Montecarlo

permite calcular las probabilidades en las que cada tubería presentará una condición específica para cada año de proyección y su año de convergencia. Estas probabilidades se pueden observar en la tabla 44, que es una pequeña porción de la que se puede ver en el anexo 8 para el escenario escogido en su año de convergencia.

Tabla 44. Probabilidad de condición para cada tubería de la red, en el año 2007 - Escenario escogido

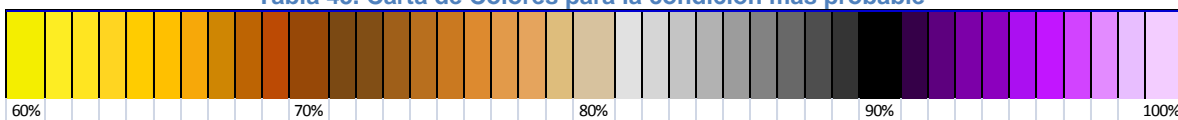
Id. Tuberías	C0	C1	C2	C3	C4	C5
P_0001	0	0	0	0	0	1
P_0002	0	0	0	0	0	1
P_0003	0	0	0	0	0	1
P_0004	0	0	0	0	0	1
P_0005	0	0	0	0	0	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
S_00001	0	0	0	0	0	1
S_00002	0	0	0	0	0	1
S_00003	0	0	0	0	0	1
S_00004	0	0	0	0	0	1
S_00005	0	0	0	0	0	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

La probabilidad de que una tubería se encuentre en cada una de las condiciones por año predicción de este escenario hasta su año de convergencia así como la demás modelos, se muestran en el Anexo 9.

Para el escenario seleccionado, se presentan las figuras 21, 23, 25 y 27 de la condición más probable en la que las tuberías se encontrarán en los años 2006 al 2009 respectivamente.

En las figuras 22, 24, 26 y 28 se muestran los mapas con el valor de la probabilidad de la condición más probable de ocurrencia para cada tubería, que está representada por la siguiente carta de colores que se muestra en la tabla 45.

Tabla 45. Carta de Colores para la condición más probable



(i) Escenario 2003-2004-2005 proyectado al 2006

Figura 21. Condición más probable de las tuberías para el año 2006

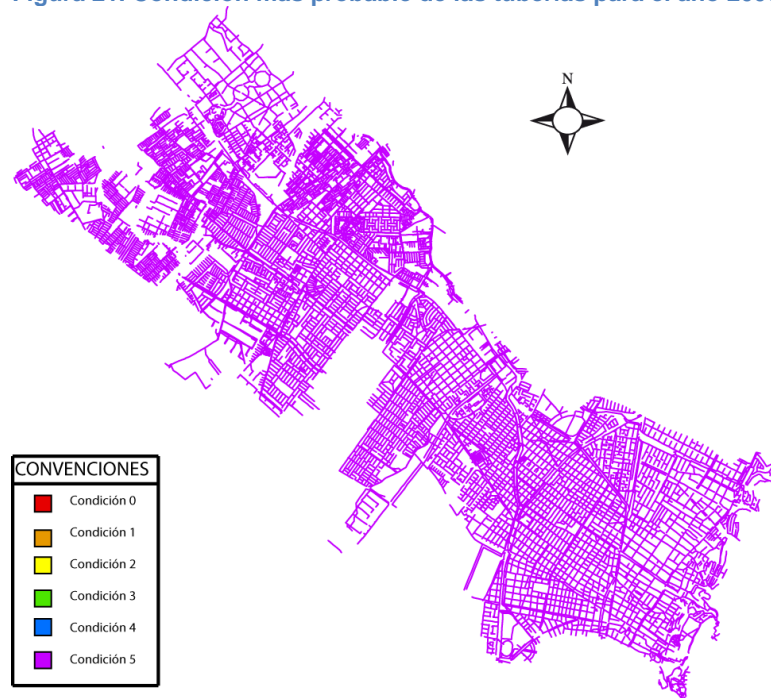
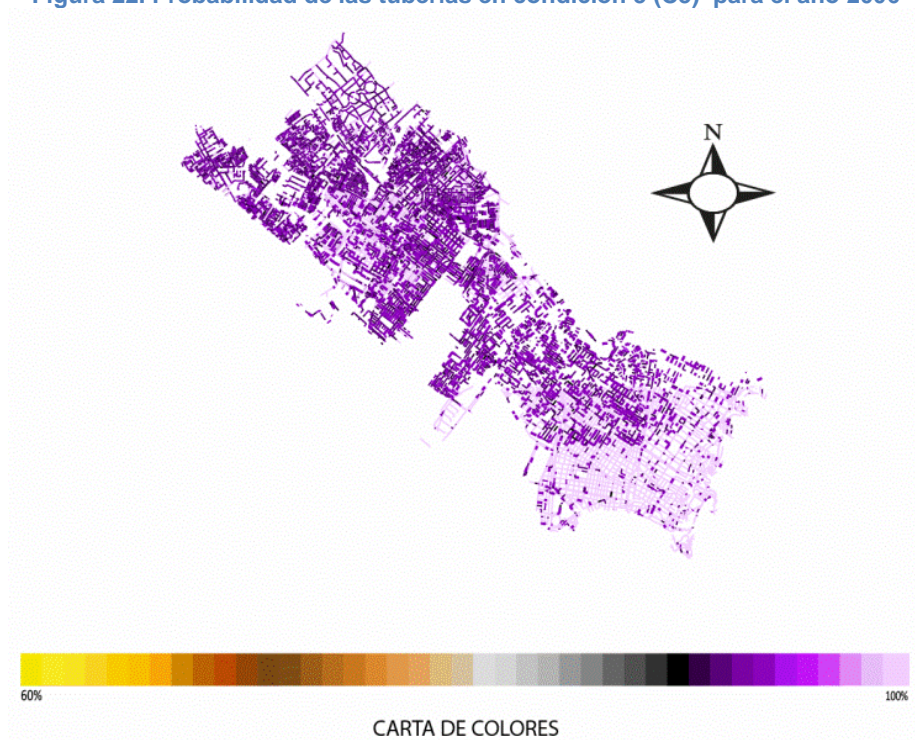


Figura 22. Probabilidad de las tuberías en condición 5 (C5) para el año 2006



(ii) Escenario 2003-2004-2005 proyectado al 2007

Figura 23. Condición más probable de las tuberías para el año 2007

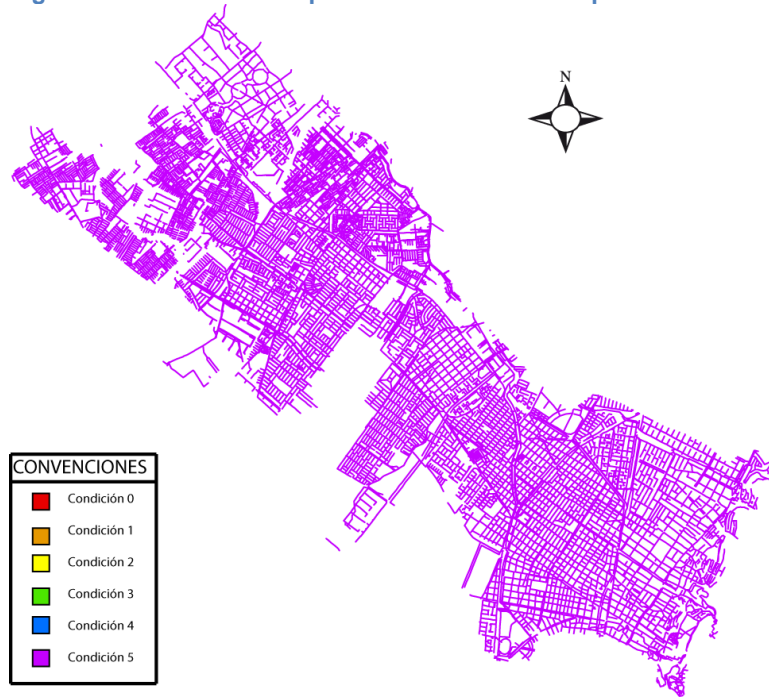
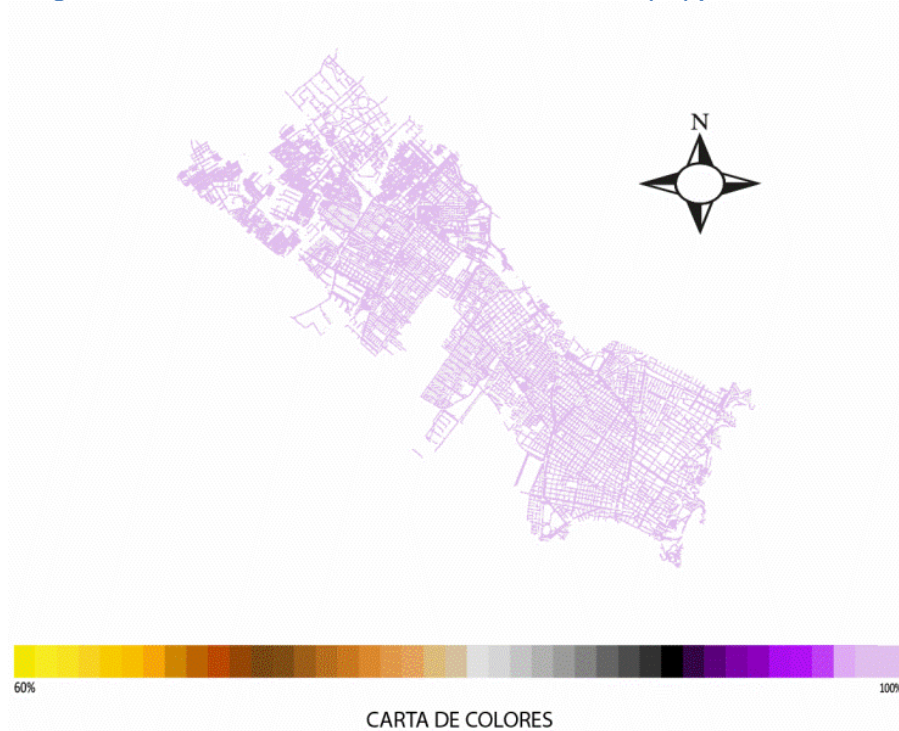


Figura 24. Probabilidad en la tuberías en condición 5 (C5) para el año 2007



(iii) Escenario 2003-2004-2005 proyectado al 2008

Figura 25. Condición más probable para el año 2008

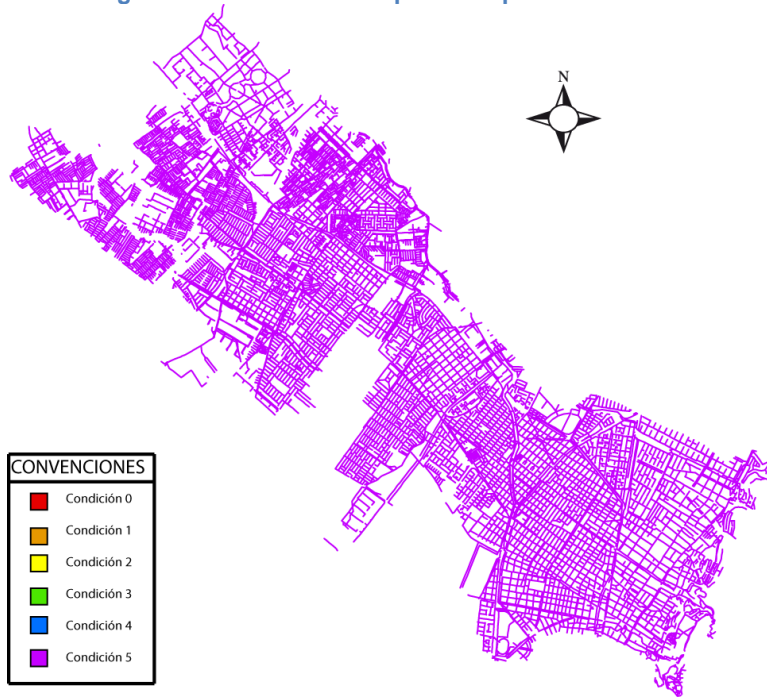
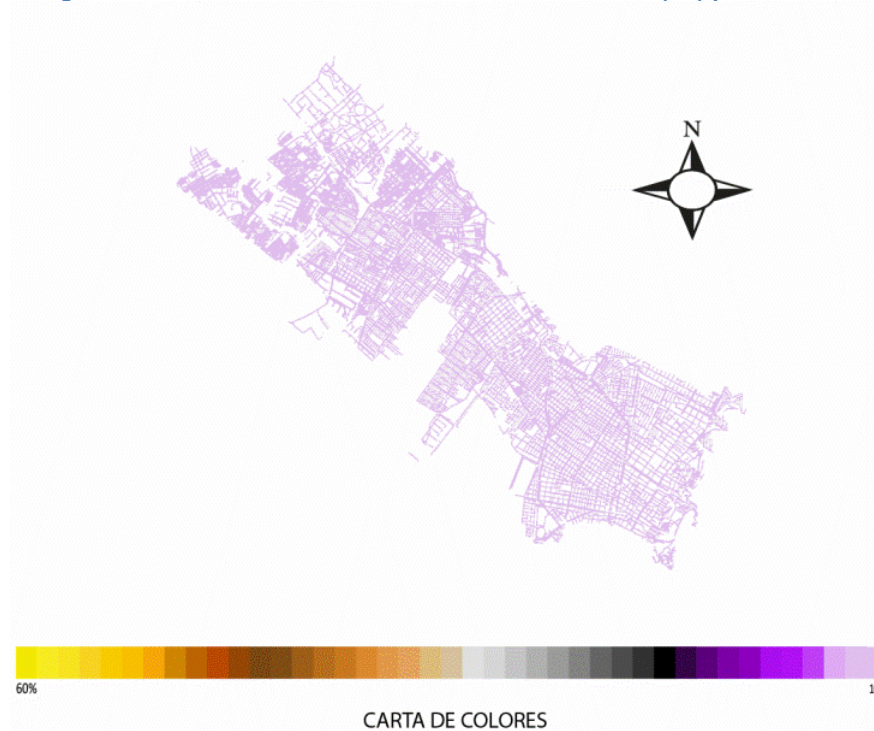


Figura 26. Probabilidad de las tuberías en condición 5 (C5) para el 2008



(iv) Escenario 2003-2004-2005 proyectado al 2009

Figura 27. Condición más probable para el año 2009

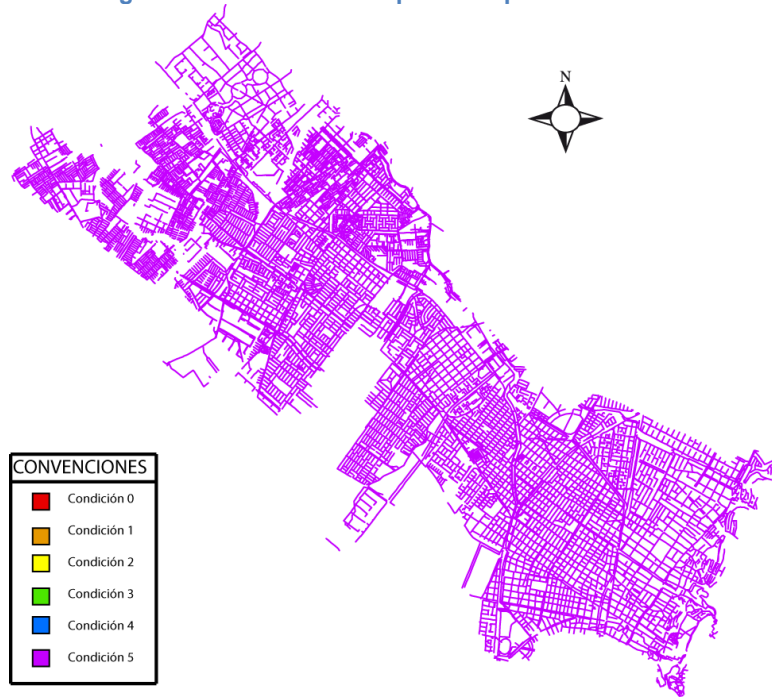
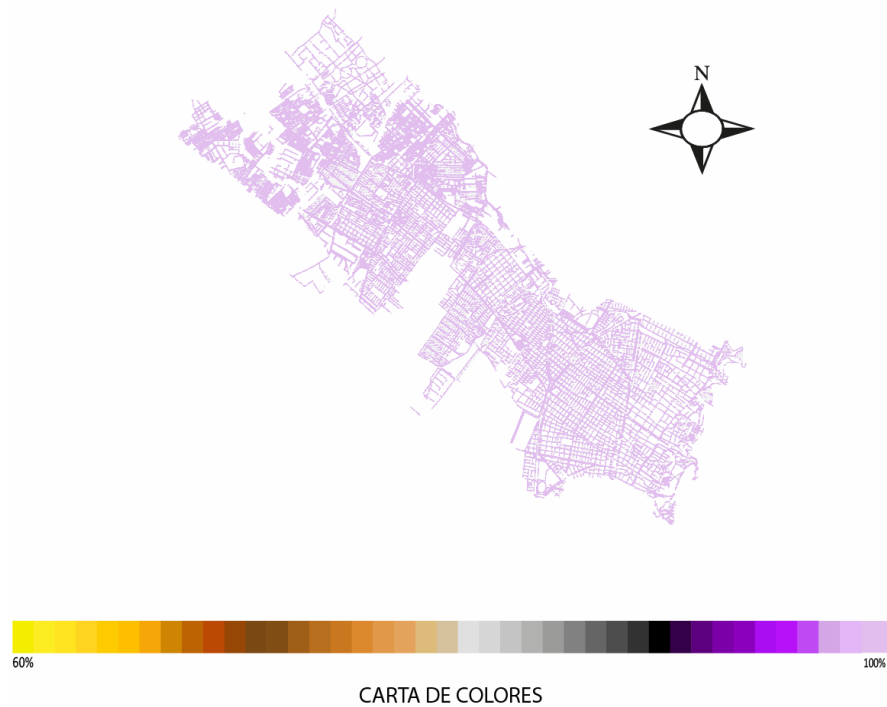


Figura 28. Probabilidad de las tuberías en condición 5 (C5) para el año 2009



Las anteriores figuras muestran la tendencia de las tuberías a permanecer en condición 5 (C5) con un porcentaje de confiabilidad del 100 % en el año de convergencia (2007), así como su acercamiento a este porcentaje en la condición 5 (C5) para el año 2006. Al comparar con los otros escenarios se muestran porcentajes por encima del 50 % que en el año 2008, 2009 y año de convergencia estarán en condición 5 (C5). Como se observa en la figura 29, la condición más probable del escenario No. 5 “Escenario 2007-2008” para el año 2008 es la condición 5 (C5); este escenario es el que presenta el menor porcentaje de probabilidad (60 %) de esta condición.

Figura 29. Condición más probable para el año 2008-Escenario No 5

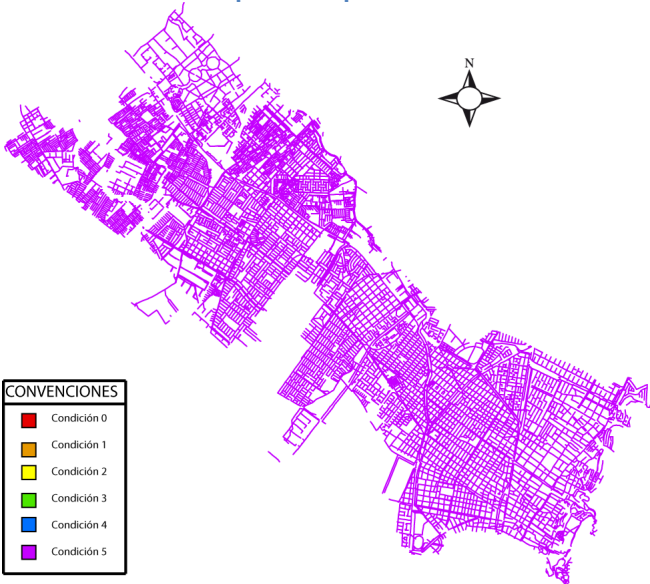
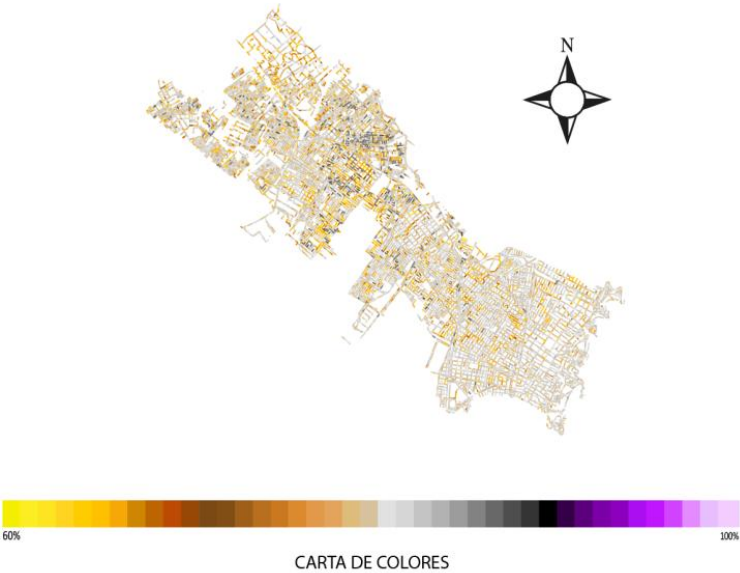


Figura 30. Probabilidad de la condición 5 (C5) para el año 2008-Escenario No 5



Para observar los mapas de condición más probable que tiene cada tubería y sus mapas de probabilidades para los años 2008, 2009 y año de convergencia de los demás escenarios, ver Anexo 9.

Con el fin de analizar mejor estos resultados se procedió a encontrar la segunda condición más probable en la que cada tubería se encontrará en el año 2008, 2009 y año de convergencia de cada escenario. Para el escenario escogido, tan sólo la predicción del año 2006 tiene segunda condición más probable, la cual se encuentra en la condición 4 (C4), y la probabilidad en esta condición varía entre el 1 % y el 11%) para el año 2006. Como se ilustra en las figuras 29 y 30 se puede observar la segunda condición más probable y su probabilidad de ocurrencia para el año 2006 en el escenario escogido.

Tabla 46. Carta de colores para la segunda condición más probable



En la tabla 46, se presenta la carta de color utilizada para representar la segunda condición más probable de que una tubería se encuentre en una condición.

Figura 31. Segunda condición más probable para el año 2006 - Escenario escogido

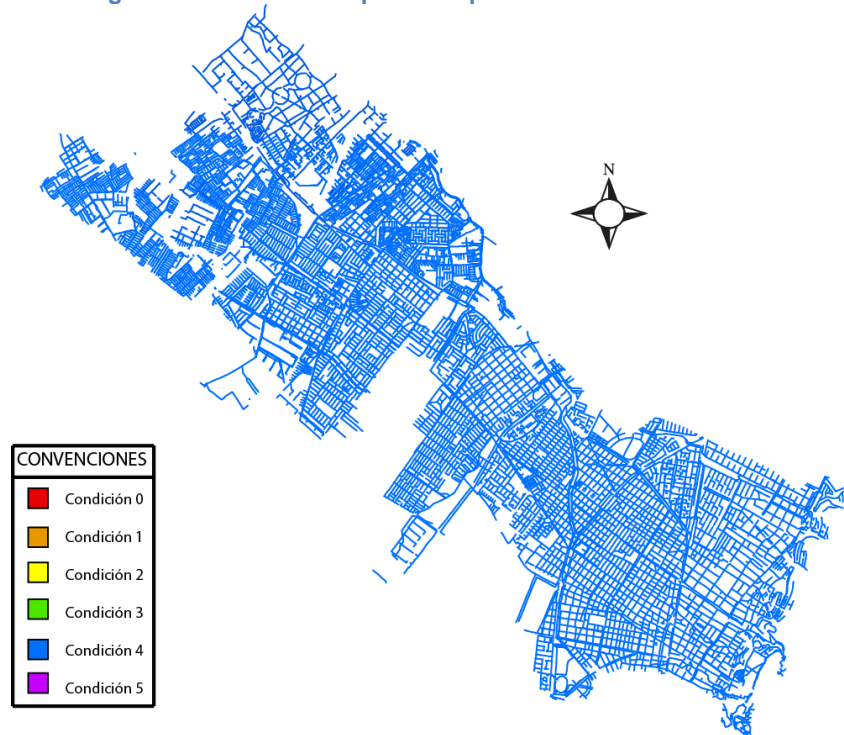
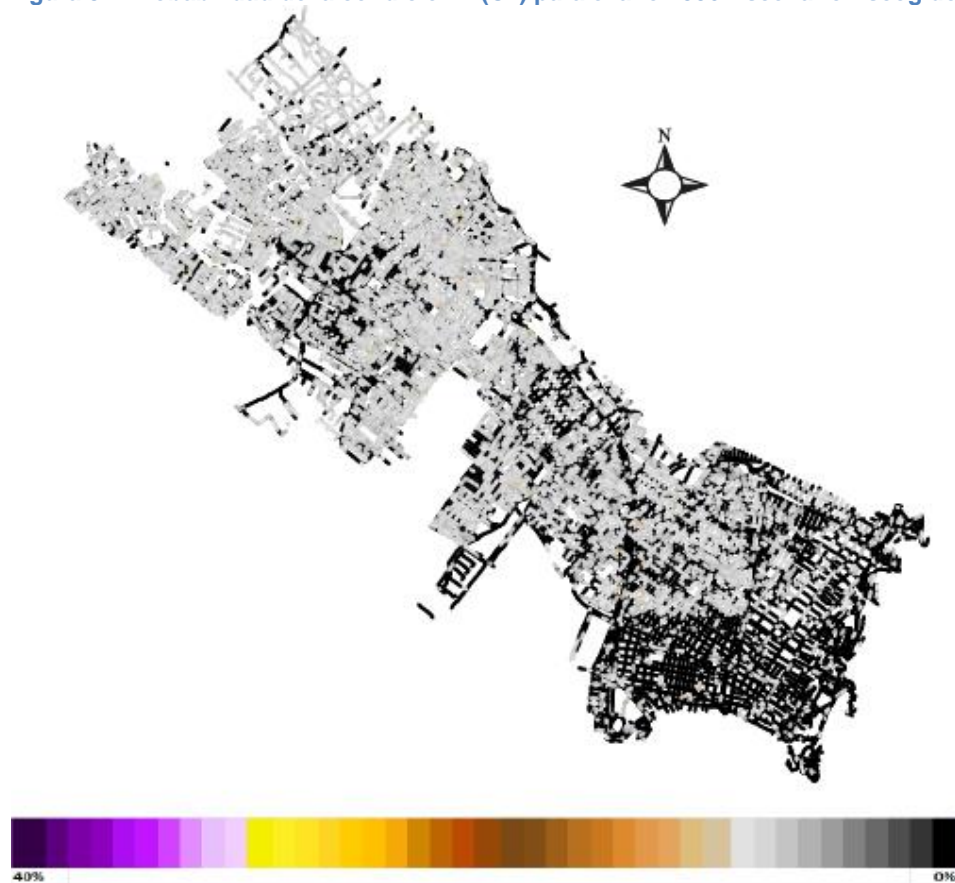
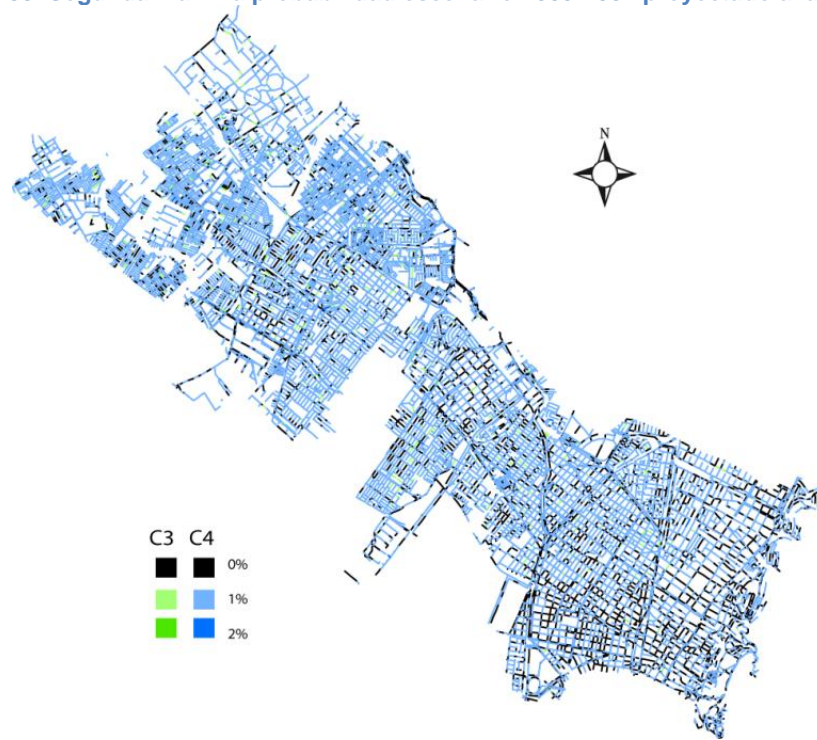


Figura 32. Probabilidad de la condición 4 (C4) para el año 2006-Escenario Escogido



La segunda condición más probable en los demás escenarios es la condición (C4) que varía entre 1 % y 40 % de ocurrencia, con excepción del escenario No. 1 “2003-2004” para el cual su segunda condición más probable la comparte con la condición 3 para los años 2008 y 2009, con probabilidades que varían entre 1 % y 11 %, distribuidas como se muestra en la Figura 33.

Figura 33. Segunda máxima probabilidad escenario 2003-2004 proyectado al año 2008



Para observar los mapas de la segunda condición más probable que tiene cada tubería y sus mapas de probabilidades para los años 2008, 2009 y año de convergencia de los demás escenarios, ver Anexo 10.

5 CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo de grado, se presentan las siguientes conclusiones:

Se descartó la hipótesis inicial, respecto a dar un orden de importancia a los atributos de las tuberías según la criticidad (tiempo de reparación de la falla) y/o el tipo de daño que presentaron, ya que en los resultados obtenidos de las pruebas preliminares (Anova y PCA), no se muestra significancia alguna entre ellos, deduciendo que el tiempo de reparación es un factor que está determinado en mayor medida por la eficiencia en el sistema de atención de emergencias y mantenimiento de la EAAB - ESP en atender la queja reportada por el usuario. A su vez, se evidencia que los atributos no determinan el tipo de daño que se presenta en la tubería.

Se logró establecer una relación directa entre las posibles combinaciones de los atributos existentes en una red de alcantarillado y los daños y/o combinación de ellos que se presenten, lo cual permite dar una calificación por medio de condiciones que indican el estado actual de las tuberías. Bajo la hipótesis que la cuenca El Salitre es representativa de Bogotá D.C. en su totalidad, la metodología desarrollada en este trabajo para establecer la condición actual de la red de alcantarillado, basada en los reportes de quejas podría utilizarse en todo el sistema de alcantarillado de la ciudad.

En cuanto a los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta para encontrar la condición actual de la red de alcantarillado de la cuenca El Salitre, éstas indican que la red se encuentra deteriorada, ya que aunque la condición que predomina es la número 5 (presente en un 30% de la red estudiada), las condiciones críticas están presentes en un 60 % de las tuberías existentes, evidenciando que más de la mitad del sistema no se encuentra en condiciones favorables. Por otro lado, al analizar cada sistema por separado, se observó que para el caso del sistema pluvial el 82 % de las tuberías pluviales están en condiciones críticas, al igual que para las tuberías sanitarias donde este porcentaje es de 53 %. Aunque la red de alcantarillado pluvial corresponde tan sólo al 25 % del sistema total de alcantarillado en la cuenca El Salitre, es probable que éste no responda de manera adecuada ante eventos o periodos extremos de lluvia, ya que la mayoría de las tuberías que la conforman se encuentran en condición crítica.

Así mismo, en los resultados obtenidos para el estado actual de la red de alcantarillado de la cuenca El Salitre, se observa que las tuberías con mejores condiciones se encuentran ubicadas al sur de la cuenca, predominando la condición 5 (C5) en las subcuencas Salitre-sur, Rionegro, Las Delicias, Chiconorte y La Vieja; y las tuberías que se encuentran en condiciones críticas están ubicadas al norte de la cuenca prevaleciendo la condición 0 (C0) en las

subcuencas Juan Amarillo, Río Bogotá, Colsubsidio, San Marcos, Los Pinos, Tabora y Salitre-norte. Lo anterior conlleva a suponer la existencia de un factor externo que está relacionado con la ubicación de las tuberías dentro de la cuenca, el cual podría ser el uso y tipo del suelo en estas zonas, factor que no fue considerado en este estudio ya que únicamente se tuvieron en cuenta los parámetros característicos de las tuberías.

Es importante aclarar, que aunque la situación actual de la red de alcantarillado no es favorable, año tras año se disminuye el número de daños reportado en el sistema de quejas, en especial el de los daños más críticos, lo que implica que las proyecciones realizadas por medio del método de cadenas de Markov presenten la tendencia de mejorar de condición año a año, ya que este método se basa en el comportamiento del primer registro que se tiene, razón por la cual durante la predicción de la condición futura los escenarios presentan una alta probabilidad de encontrarse en óptimas condiciones, al tender a la condición 5 (C5). Sin embargo, los resultados obtenidos se basaron en la base de datos de quejas por parte de los usuarios y no en inspecciones directas de las tuberías, lo que disminuye la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Al encontrar la segunda condición más probable, es de suma importancia tener en cuenta que esta condición es la 4 (C4), lo cual garantiza que el estado de las tuberías para el año de convergencia tenderá a estar en buenas condiciones, ya que los daños que se pueden presentar para llegar a esta condición son los menos críticos.

Cabe mencionar, que los resultados obtenidos al aplicar las dos metodologías desarrolladas para el diagnóstico de la condición actual y futura de las tuberías de la red de alcantarillado de la cuenca El Salitre, se ven afectados ante la falta de una buena base de datos, ya que se encontraron tuberías con datos erróneos y/o incompletos, por lo que debieron dejarse de lado varias tuberías que podrían alterar los resultados anteriormente mencionados, situación que se refleja en la condición actual establecida donde se diagnostica un deterioro en la red de alcantarillado, mientras la condición futura diagnostica una condición óptima de funcionamiento.

6 RECOMENDACIONES

Para el desarrollo de futuros trabajos de grado, recomendamos tener en cuenta las siguientes observaciones:

Incluir otras variables en el estudio como el tipo del suelo, la profundidad a la que está instalada la tubería, la vegetación presente en la zona, el uso del suelo, la topografía etc., con el fin de realizar un análisis más profundo que permita establecer con mayor claridad las causas por las que una tubería falla.

Proponer un proyecto investigativo que involucre la relación beneficio/costo en cuanto a la operación, rehabilitación y mantenimiento de las redes de alcantarillado al aplicar esta metodología, y que esté dirigido a los administradores del servicio público de alcantarillado.

Actualizar las bases de datos de las tuberías, incluyendo la información obtenida por las imágenes capturadas mediante inspecciones CCTV, con el fin de tener una inspección visual de los daños presentados y poder caracterizar de manera directa el estado de cada tubería. Adicionalmente la base de datos de reporte de llamadas, debería identificar la tubería que presenta el daño (por ejemplo mediante coordenadas –GPS– de pozos iniciales y finales asociados), mas no la dirección del predio del cual se reportó la queja.

Se recomienda utilizar la metodología propuesta en otra ciudad de Colombia, con el fin de establecer a mayor escala su aplicabilidad.

Al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Javeriana, se recomienda profundizar en la enseñanza de diferentes programas y nuevos software de uso generalizado tanto en la consultoría como en la construcción en ingeniería civil, ya que en el actual plan de estudios, el estudiante tiene la oportunidad de profundizar únicamente en los diferentes programas especializados relacionados con su énfasis.

7 REFERENCIAS

1. Alcaldía Mayor de Bogotá – Secretaría Distrital de Ambiente, Universidad Militar, 2008, *Formulación del Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Salitre en el perímetro urbano del Distrito Capital*.
2. Anderson D, Sweeney D, Williams T, 2004, *Estadística para Administración y Economía*, International Thomson Editores, págs. 810-811
3. Anna, E. Jr. & Bauwens, W., 2007. SEWER NETWORK ASSET MANAGEMENT DECISION-SUPPORT TOOLS: A Review. En International Symposium on New Directions in Urban Water Management. Paris: UNESCO, págs. 1-8.
4. Berenson M, Krehbiel T, Levine D, 2006, *Estadística para Administración*, Pearson Prentice Hall, págs. 711-712
5. Caballero Sánchez Rafael, 2003, *Infraestructura en Red y liberación de servicios públicos*, Ministerio de administraciones públicas, Madrid, págs. 24-25
6. Ching W, Ng M, 2006, *Markov Chains, Models, Algorithms and Applications*, Springer Science+Business Media, Inc, págs. 1-2.
7. EAAB, 2006, *Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado*.
8. EAAB-ESP, 2001, Norma Técnica de Servicio NS-061: Aspectos técnicos para la rehabilitación de redes y estructuras de alcantarillado, EAAB-Norma Técnica.
9. EAAB-ESP, 2006, Norma Técnica de Servicio NS-073: Instalación y condiciones de redes de alcantarillado, EAAB-Norma Técnica
10. EAAB-ESP, 2010, Norma Técnica de Servicio NS-058: Aspectos técnicos para inspección y mantenimiento de redes y estructuras de alcantarillado, EAAB-Norma Técnica.
11. Evans, Michael John, 2000, *Approximating integrals via Monte Carlo and deterministic methods*. Oxford,, USA, Oxford University Press, págs. 10-11
12. G. De Gueldre et al., 2007. Hydroplan-EU: An integrated approach for sewerasset management. En SEWERAGE INFRASTRUCTURE: FUZZY TECHNIQUES TO MANAGE. Lyon, Francia: NOVATECH, págs. 1-8.
13. Hanwen Zhang, Gutiérrez Hugo, 2010, *Teoría estadística: aplicaciones y métodos*, Universidad Santo Tomas, pág. 401.

14. Johansen N.B. et al., 2007. Risk assessment of Sewer Systems. En Sustainable techniques and strategies in urban water management. Lyon, Francia: NOVATECH, págs. 1-8.
15. Lind, Marchal, Mason, 2004, Estadística para Administración y Economía, Alfaomega, págs. 419, 421-422
16. Mesa interlocal de la Cuenca del Río Salitre, Recuperado el 1 de Octubre del 2011, <http://riosalitre.files.wordpress.com/2008/10/uso.jpg>
17. Ministerio de Desarrollo Económico, Reglamento técnico de agua potable y saneamiento básico Ras 2000, Título D. Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales doméstico y pluvial. Bogotá, 2000.
18. Musandji Fuamba, Schadrac Ibrango & Tew-Fik Mahdi, 2007. Hydraulic performance degradation of a conduit section: case study of an ageing drainage system in Montreal. En Sustainable techniques and strategies in urban water. Lyon, Francia: NOVATECH, págs. 1-8
19. Navarro K, Sandoval S, 2010, Estrategias de mantenimiento en alcantarillados pluviales utilizando estimaciones de confiabilidad operativa.
20. Phillips S J, Avenue P, and Park F, 2004, A Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modelling, págs. 655-662.
21. Pla. Laura E, 1986, *Análisis multivariado: método de componentes principales*, Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, págs. 15-17.
22. R Development Core Team (2011). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
23. Rada A, Torres A, Preliminary Assessment of the Influence of Salitre Basin Rainfall on the Pumping Operation of Salitre Wastewater Treatment Plant (Bogotá), 12th Conferencia Internacional de Drenaje Urbano, Porto Alegre/Brazil, 11-16 de septiembre de 2011.
24. Rodriguez J, Diaz-Granados M et al, 2011, *A serviceability model for supporting proactive maintenance in urban drainage systems*, 12th Conferencia Internacional de Drenaje Urbano, Porto Alegre/Brazil, 11-16 de septiembre de 2011.
25. Rodríguez Juan Camilo, 2003, *El agua en la historia de Bogotá*, Villegas editores, págs 233-537 Tomo I, págs. 1-71 Tomo II.

26. Ruwampura J., Ariatnam S., and Ei-Assaly A., 2004, Prediction models for sewer infrastructure utilizing rule-based simulation. Edmonton, Canadá, págs. 1-18.
27. Tran, D. H. (2007). Investigation of deterioration models for stormwater pipe systems. PhD Thesis Victoria University, Australia, pág 3.
28. Torres A, Pérez MA, Perdomo MC, 2011, *Gestión Patrimonial de Alcantarillados urbanos*, Editorial Académica Española.
29. Ugarelli Rita, Di Federico Vittorio & Sægrov Sveinung, 2007. Risk based asset management for wastewater systems. En Sustainable techniques and strategies in urban water management. Lyon, Francia: NOVATECH.
30. Yehuda Kleiner, Balvant Rajani & Rehan Sadiq, 2007. *Sewerage Infrastructure: Fuzzy Techniques to Manage Failures*, págs 241-252.