

**METODOLOGÍA PARA LA REHABILITACIÓN DE TUBERÍAS EN REDES DE
DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE EN EL DISTRITO DE MORRO Y
CENTRO, MEDIANTE LA UNIFORMIZACIÓN DEL PLANO DE PRESIONES
CON BASE EN EL ÍNDICE DE RESILIENCIA Y EMPLEANDO CURVAS DE
SUPERVIVENCIA**

ELIZABETH LONDOÑO GUTIÉRREZ

NICOLAS BUSTAMANTE BARBOSA

SAMIR BARBOSA MARTINEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2012

**METODOLOGÍA PARA LA REHABILITACIÓN DE TUBERÍAS EN REDES DE
DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE EN EL DISTRITO DE MORRO Y
CENTRO, MEDIANTE LA UNIFORMIZACIÓN DEL PLANO DE PRESIONES
CON BASE EN EL ÍNDICE DE RESILIENCIA Y EMPLEANDO CURVAS DE
SUPERVIVENCIA**

**ELIZABETH LONDOÑO GUTIÉRREZ
NICOLAS BUSTAMANTE BARBOSA
SAMIR BARBOSA MARTÍNEZ**

**Trabajo de Grado modalidad de investigación para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director:
LUIS FERNANDO CASTAÑEDA GALVIS
Ingeniero Civil, M.sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2012**

A mis papás ORLANDO BUSTAMANTE y ELSA LEONORA BARBOSA, pilares importantes en mi proceso de formación académica y personal, fieles colaboradores y admiradores número uno de este proyecto que hoy termina y del comienzo de una nueva etapa de mi vida,

A mis hermanos Stefany Bustamante y Yesid Bustamante, quienes quiero mucho y quienes me apoyaron en todo momento.

A mi familia, cuyos buenos deseos y colaboración siempre estuvieron de mi lado.

A mis compañeros de grado y amigos Eliza Londoño y Samir Barbosa por el voto de confianza dado en el momento de la realización de este proyecto y por la tolerancia, responsabilidad y respeto que siempre demostraron conmigo y con el proyecto.

A los buenos amigos hechos durante este proceso que hoy finaliza, siempre estarán en mis pensamientos no importa que tan lejos estén, deseo éxitos para todos.

NICOLAS BUSTAMANTE BARBOSA

A Dios por las Bendiciones que le ha regalado a mi vida.

A mis padres EDGAR BARBOSA CORZO y MARIA CLAUDIA MARTINEZ LIZARAZO, por su incondicional compromiso y apoyo en mi proceso de educación,

A mi hermano Michael Barbosa y abuela Aliria Corzo, a quienes quiero mucho por estar conmigo brindándome su compañía.

A mi familia, quienes con sus mensajes y consejos me brindaron ideas cuando las he necesitado.

A mis amigos que siempre han estado a mi lado en esos momentos de dificultad y alegría vividos en este proceso de educación y que seguirán compartiendo buenos momentos.

SAMIR BARBOSA MARTINEZ

A Dios por esta maravillosa oportunidad y porque ha sido mi sustento en este trasegar.

A mis LG a quienes amo profundamente.

A todos aquellos que todo el tiempo fueron un apoyo incondicional, HY, LM, NB, SB, MA, JS, CB, ZL, FA, a mis IAJ.

A todos mis colegas y amigos que hicieron de esta etapa de mi vida algo realmente especial.

ELIZA LONDOÑO GUTIÉRREZ

AGRADECIMIENTOS

A Dios por guiar nuestros pasos durante el tiempo que ha durado este proceso el cual nos llevo a cumplir con nuestros objetivos.

Al Ingeniero LUIS FERNANDO CASTAÑEDA GALVIS, Director de nuestro proyecto, por dedicar su tiempo y conocimiento al desarrollo de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander y en especial al personal Docente de la Escuela de Ingeniería Civil por la formación brindada y que sirvió de eslabón para llegar a este logro.

A nuestras familias por su apoyo y la confianza brindada.

A nuestros amigos y compañeros por su compañía y aportes brindados.

CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCION	20
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	21
2. OBJETIVOS	22
2.1 Objetivo General.....	22
2.2 Objetivos específicos.....	22
3. MARCO DE REFERENCIA.....	23
3.1 INFORMACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN.....	23
3.1.1 Localización del sector:	23
3.1.2 Información del Catastro:	23
3.2 FACTORES DE COMPORTAMIENTO UTILIZADOS PARA LA OPTIMIZACIÓN OPERACIONAL DE REDES DE DISTRIBUCIÓN	25
3.2.1 índice de Resiliencia (I_r)	25
3.2.2 Coeficiente de uniformidad de presiones (CU).....	29
3.2.3 Desviación estándar de presiones (DESV)	30
3.3 ANALISIS DE SUPERVIVENCIA.....	31
3.3.1 Función de Supervivencia	32
3.3.2 Función de Densidad de Supervivencia	33
3.3.3 Función Tasa de Falla.....	33
3.4 DISTRIBUCION DE HERZ	34
3.4.1Función de supervivencia.....	35
3.4.2 Función de densidad de supervivencia	36
3.4.3 Función de rehabilitación o tasa de falla	36
3.4.4 Edad promedio de transición	37
3.4.5 Calibración parámetros de envejecimiento.....	37
3.5 PLANO ÓPTIMO DE PRESIONES.....	40

3.6 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	40
3.7 DISEÑO METODOLÓGICO.....	42
3.7.1 EPANET 2.0	42
3.7.2 Calibra	43
3.7.3 Resiliencia	44
4. METODOLOGÍA PARA LA PRIORIZACIÓN DE LA REHABILITACIÓN DE LAS TUBERÍAS POR INDICE DE RESILIENCIA	47
4.1 METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN.....	47
4.2 INDICE DE RESILENCIA	50
4.2.1 Análisis de importancia de IR Y CU.....	52
5. METODOLOGÍA PARA LA PRIORIZACIÓN POR CURVAS DE SUPERVIVENCIA.....	64
5.1 ESTADOS DE CLASE.....	64
5.2 PARAMETROS DE ENVEJECIMIENTO	65
5.3 CURVAS DE SUPERVIVENCIA.....	66
6. CUADRO DE COMPARACION DE METODOLOGIAS DE PRIORIZACION DE LA RED DE ESTUDIO	74
CONCLUSIONES	75
BIBLIOGRAFIA.....	78
ANEXOS.....	80

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Clasificación de tubería por material y rugosidades.....	23
Tabla 2. Cantidad de tuberías de material por diámetros comerciales.	24
Tabla 3. Distribución de importancia de parámetros para grupos de cambios.	51
Tabla 4. Listado de tubería a remplazar para un grupo de 100 cambio IR = 20%.	60
Tabla 5. Estados de condición.....	64
Tabla 6. Parámetros de condición para el envejecimiento.....	65
Tabla 7. Datos curvas de supervivencia por material.	66

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Proporción de tuberías por material en la red de distribución.....	24
Figura 2. Curva de supervivencia típica.....	33
Figura 3. Interface inicial de Calibra.....	43
Figura 4. Interface inicial de Resiliencia.....	46
Figura 5. Modelo en Epanet con distribución de presiones en distritos de Morro y Centro	49
Figura 6. Índice de resiliencia para 100 cambios.....	53
Figura 7. Coeficiente de uniformidad para 100 cambios.....	53
Figura 8. Índice de resiliencia en grupo de cambios importancia 20% en un día. .	54
Figura 9. Coeficiente uniformidad grupo de cambios importancia 80% un día. ...	54
Figura 10. Incremento por grupos para importancia de IR=20%	55
Figura 11. Índice de resiliencia versus número de cambios.	56
Figura 12. Coeficiente de uniformidad versus número de cambios.	56
Figura 13. Costo acumulado de renovación versus número de cambios.....	57
Figura 14. Costo de agua fugada en un año versus número de cambios.....	58
Figura 15. Porcentaje de fugas versus número de cambios.	58
Figura 16. Rango de presión versus número de cambios.....	59
Figura 17. Presión promedio versus número de cambios.	59
Figura 18. Plano de presiones.	62
Figura 19. Diagrama de Metodología de Evaluación de IR.....	63
Figura 20. Función de supervivencia para estados de clase.	69
Figura 21. Función densidad de supervivencia para estados de clase.....	70
Figura 22. Tasa de falla para estados de clase.	70
Figura 23. Mapa de distribución de tuberías en rangos de probabilidad de falla. ...	72
Figura 24. Diagrama Metodología Curvas de Supervivencia	73

LISTA DE ANEXOS

	Pag.
ANEXO A. Escenario de calibración optimo	80
ANEXO B. Estado inicial y calibrado de presiones en la red de distribución.	83
ANEXO C. Datos de vida de las tuberías. Fuente AMB.....	87

RESUMEN

TITULO: METODOLOGÍA PARA LA REHABILITACIÓN DE TUBERÍAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE EN EL DISTRITO DE MORRO Y CENTRO, MEDIANTE LA UNIFORMIZACIÓN DEL PLANO DE PRESIONES CON BASE EN EL ÍNDICE DE RESILIENCIA Y EMPLEANDO CURVAS DE SUPERVIVENCIA

AUTORES: BARBOSA MARTÍNEZ SAMIR
BUSTAMANTE BARBOSA NICOLÁS
LONDOÑO GUTIÉRREZ ELIZABETH

PALABRAS CLAVE: Rehabilitación, Calibración, Índice de Resiliencia, Coeficiente de Uniformidad, Plano Óptimo, Estado de Clase, Curva de Supervivencia.

CONTENIDO

Con los cambios constantes en el medio en el que las tuberías se desempeñan y el desgaste inevitable, debido al tiempo de funcionamiento, en las redes de distribución de agua, se necesita el cambio de tuberías que permitan el normal funcionamiento del sistema y garanticen la entrega de agua a los usuarios. Debido a esta situación, el proyecto establece dos metodologías que se generan a raíz de la necesidad de establecer un procedimiento que permita solucionar los problemas generales de la red antes de que se presenten daños considerables en el sistema.

Inicialmente, se genera un modelo de la red de distribución, esperando que este reproduzca el comportamiento normal del sistema, se establece un proceso de calibración del modelo a base de la generación de Escenarios, situaciones hipotéticas del estado real de las tuberías, comparando éstos con datos medidos en campo en sitios distribuidos a lo largo del sector, y así se escoge el más parecido al comportamiento encontrado de los datos medidos.

Seguidamente, se establece la primera metodología, Índice de Resiliencia, y gracias al algoritmo numérico llamado Resiliencia, se evalúa el Índice general de la red, el cual genera cambios de tuberías, trabajando con una función objetivo que tiene en cuenta una importancia de predominio para el índice con respecto al coeficiente de uniformidad. Partiendo del funcionamiento del algoritmo utilizado, se establecen grupos de cambios de entes de tuberías, relacionando el número de cambios solicitados con diferentes distribuciones de importancia para ambos factores evaluados, con los resultados arrojados, se elige el porcentaje de importancia ideal dado para el Índice de Resiliencia y el Coeficiente de Uniformidad, en donde se busca mejorar estos dos simultáneamente. Finalmente, se establece el número ideal de cambios que mejoren considerablemente la red, estos deben ser económicamente viables para el responsable del funcionamiento del sistema.

*Proyecto de Grado

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil UIS. Director: Luís Fernando Castañeda Galvis

ABSTRACT

TITLE: METHODOLOGY FOR PIPES DISTRIBUTION NETWORK REHABILITATION OF WATER IN MORRO DISTRICT AND CENTRAL DISTRICT, THROUGH STANDARDIZING OF PLANE OF PRESSURES BASED ON THE INDEX OF RESILIENCE AND USING CURVES OF SURVIVAL

AUTHORS: BARBOSA MARTÍNEZ SAMIR
BUSTAMANTE BARBOSA NICOLÁS
LONDOÑO GUTIERREZ ELIZABETH

KEYWORDS: Rehabilitation, Calibration, Index of Resilience, Uniformity Coefficient, Optimal Plane, Class Condition, Curve of Survival.

CONTENT

With the constant changes in the environment in which the pipes are working and the unavoidable weakening, due to the time of operation, in the water distribution networks, it requires the change of pipes that allow the normal system operation and ensure the water delivery to users. In view of that situation, the project provides two methodologies that are generated due to the need of establishing a procedure to solve the general network problems before significant damages take place in the system.

Initially, it generates a model of the distribution network, hoping that this reproduces the normal behavior of the system, establishing a calibration model based on the generation of case scenarios, hypothetical situations of the real state of the pipes, comparing all these with measured data in field in places throughout the sector, and then the closest to the behavior of the measured data is chosen.

Afterwards, it is established the first methodology, Index of Resilience, and thanks to the numerical algorithm called Resiliencia the methodology evaluates the general Index of the network, which generates changes of pipelines, working with a target function that takes into account the importance of prevail for the index with regard to the uniformity coefficient. Beginning with the functioning of the used algorithm, groups of changes of entities of pipelines are established, relating the number of changes requested with different distributions of importance for both evaluated factors, with the results, it is chosen the ideal importance percentage given for Index of Resilience and the Uniformity Coefficient, it seeks to improve these two factors simultaneously. Finally, it is established the ideal number of changes that improve the network considerably, those changes should be economically viable for the person in charge of the functioning of the system.

*Grade Project

**Faculty of Engineerings Physicomechanical. School of Civil Engineering UIS. Director: Luis Fernando Castañeda Galvis

INTRODUCCION

El servicio de acueducto es primordial en el desarrollo de la sociedad, por eso se hace necesario buscar herramientas que garanticen la buena prestación del servicio a los usuarios finales, reduciendo las posibilidades de falla.

El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga AMB en su búsqueda de mejorar la prestación del servicio ha implementado diferentes actividades con el fin de optimizar el plano de presiones en la red de distribución, ya que cuando se presentan altas presiones en los nodos con el paso del tiempo se generan daños y deterioros en la tubería que se traducen en un mal uso de los recursos del sistema y altos costos de funcionamiento disminuyendo la confiabilidad en la red.

En este proyecto se implementaron dos metodologías de priorización de rehabilitación en las tuberías en el sector de Morro Alto y Centro, que buscan uniformizar la presión en la red bajo las teorías de Índice de Resiliencia y Curvas de Supervivencia, estableciendo un parámetro para la rehabilitación.

En primera instancia se recopilaron datos en campo que condujeron a la creación de un modelo hidráulico en EPANET 2.0, a partir de estos se crearon escenarios en easyCal que permitieron calibrar el modelo hidráulico para que este modelo fuera lo más próximo a la realidad y trabajarlo como modelo base.

Con un modelo ya calibrado se procedió a evaluar el índice de resiliencia de la red y de esta forma encontrar un plano óptimo de presiones, además se generaron curvas de supervivencia para diferentes estados de clase.

Finalmente se determinó la prioridad de las tuberías a rehabilitar respectivamente para cada metodología.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La rehabilitación en una red de distribución de agua potable constantemente se convierte en un factor que obstaculiza la prestación del servicio a los usuarios finales, debido a la importancia que tiene el suministro de agua potable en la comunidad es de gran utilidad establecer una metodología que permita priorizar los cambios necesarios en la tubería reduciendo los inconvenientes producidos en este proceso, además de crear un orden y controlar los efectos en el resto de la red.

Al rehabilitar la red, el Índice de Resiliencia del sistema mejora sustancialmente permitiendo la uniformización de las presiones en el distrito evaluado, lo cual se visualiza en una distribución de energía más equitativa.

Existen métodos probabilísticos que estiman la condición de un tubo, definido como una probabilidad de falla, estas probabilidades están ligadas a estados de clase, los cuales permiten clasificar la tubería de acuerdo a diferentes características, por ejemplo, el material, el diámetro del tubo, la vida útil, el tiempo de servicio, entre otros; basado en un análisis estadístico de las variables históricas de las tuberías que se ha utilizado para evaluar la probabilidad de supervivencia de la infraestructura¹, como lo es el método de curvas de supervivencia, entonces, teniendo en cuenta los estados de clase, establecer un criterio de cambios de tubos en la red, garantizando el buen funcionamiento del sistema .

¹ Tomado de: North American Society for Trenchless Technology (NASTT) NO-DIG 2005. EVALUATING PIPELINE REINVESTMENT NEEDS & GASB 34. Orlando, Florida, April 24-27, 2005

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología para priorizar la rehabilitación de tuberías en redes de distribución en el distrito de Morro y Centro, uniformizando el plano de presiones, con el propósito de aumentar la resiliencia en los nodos de la red, y utilizando curvas de supervivencia.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar un modelo de la red de distribución del distrito Morro y Centro, utilizando el software EPANET 2.0.
- Calibrar las variables que afectan la red de distribución de los distritos de Morro y Centro, de manera que los valores medidos se asemejen a los valores en el modelo.
- Evaluar el índice de resiliencia de la red de distribución en el sector de estudio.
- Determinar la prioridad con que se debe rehabilitar las tuberías, con el propósito de uniformizar el plano de presiones en la red de distribución.
- Establecer intervalos de clases para el estado actual de las tuberías del distrito de Morro y Centro.
- Elaborar las curvas de supervivencia del sistema de red de distribución en el distrito de Morro y Centro.
- Crear un cuadro comparativo de las tuberías a rehabilitar por los métodos de índice de resiliencia y curvas de supervivencia.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1 INFORMACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN

3.1.1 Localización del sector:

La red de distribución tomada como objeto de análisis, está dividida en dos distritos, denominados por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga como Distrito de Morro y Distrito Centro, ubicados en el municipio de Bucaramanga el primero de estos al nororiente de la ciudad conformado en su mayoría por unidades residenciales, el segundo al centro de la ciudad y parte de la zona occidente, conformado por unidades residenciales y gran parte de establecimientos comerciales.

3.1.2 Información del Catastro:

Cantidad de tuberías por material:

Tabla 1. Clasificación de tubería por material y rugosidades.

MATERIAL	RUGOSIDAD	CANTIDAD
PVC	0.0015	2896
Asbesto Cemento	0.03	693
Hierro Galvanizado	0.15	398
Hierro Dúctil	0.25	182
Hierro Fundido	0.26	1269
UNIDADES TOTALES		5439

Fuente. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.

Figura 1. Proporción de tuberías por material en la red de distribución.

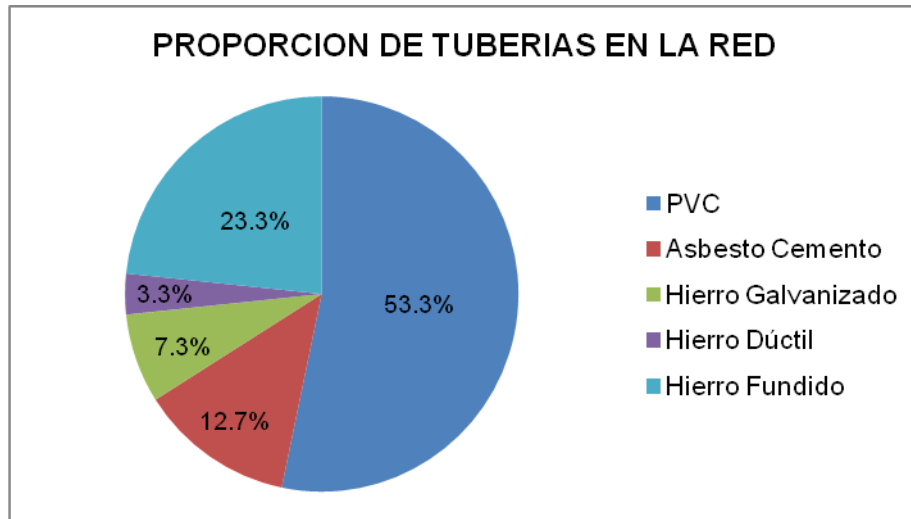


Tabla 2. Cantidad de tuberías de material por diámetros comerciales.

DIAMETRO [in]	MATERIAL				
	PVC	AC	HG	HD	HF
0.5	8	-	-	-	-
1	11	-	22	-	17
1.5	40	-	35	-	29
2	397	33	314	-	469
2.5	743	-	6	-	7
3	346	295	13	-	384
4	1100	117	6	1	124
6	242	139	2	34	163
8	7	43	-	44	31
10	2	35	-	57	18
12	-	19	-	25	11
14	-	-	-	2	1
16	-	1	-	8	10
20	-	11	-	12	5

Como información adicional: Numero de tanques: 2

Numero de válvulas: 2

3.2 FACTORES DE COMPORTAMIENTO UTILIZADOS PARA LA OPTIMIZACIÓN OPERACIONAL DE REDES DE DISTRIBUCIÓN

El nivel de satisfacción de los usuarios beneficiados con el suministro de agua potable, es el principal indicador para definir el grado de funcionamiento del sistema de distribución actual, este funcionamiento está sujeto a la efectividad y confiabilidad de ciertos indicadores de comportamiento del sistema como tal. De esta forma, la implementación de medidas de funcionamiento como herramientas de control garantiza que el estado de servicio de distribución en la red sea la mejor posible. (Araque, 2004).

Los parámetros que miden el estado del servicio en forma general son la presión y el caudal demandado en cada uno de los nodos de consumo. Debido que el caudal demandado se mantiene constante en los nodos de consumo, la presión es el factor en la red que debe de ser controlado.

Los factores utilizados en el estudio se definieron de tal manera que representaran de la mejor manera el comportamiento del sistema de distribución con el objetivo de tomar la decisión más conveniente de ¿Cuál? y ¿Cuándo? cambiar una tubería del sistema para lograr aumentar la uniformidad de presiones en la red. A continuación se describen los factores utilizados:

3.2.1 índice de Resiliencia (I_r)

Las pérdidas de presión ocasionadas por la fricción en las tuberías hacen que la confiabilidad del sistema disminuyan. El I_r es un indicador de la vulnerabilidad de la red frente a la posibilidad de dejar ciertos nodos del sistema sin servicio en caso de la ocurrencia una de una falla. Se fundamenta en la relación existente entre la resiliencia de un sistema y la cantidad de energía que éste disipa.

A menor energía disipada, mayor será la capacidad de respuesta del mismo debido a la cantidad de energía disponible.²

Todini (2000) propuso el índice de resiliencia, basado en el concepto que la potencia por unidad de peso de entrada (P_{ent}) en una red de distribución de agua es igual a la potencia por unidad de peso de operación del sistema (P_{int}), ocasionada por los efectos de la fricción en las tuberías y la presencia de fugas en el mismo, más la potencia por unidad de peso entregada (P_{sal}) en los nodos de consumo (ver Ecuación 3-1).

$$P_{ent} = P_{int} + P_{sal}$$

Ecuación 3-1

Donde,

P_{ent} : Potencia por unidad de peso de entrada (W).

P_{int} : Potencia por unidad de peso de operación del sistema ocasionada por los efectos de la fricción en las tuberías y la presencia de fugas en el mismo (W/Kg).

P_{sal} : Potencia por unidad de peso entregada en los nodos de consumo (W/Kg).

La potencia por unidad de peso total de entrada incluye la potencia por unidad de peso suministrada por una bomba más la suministrada por los embalses (ver Ecuación 3-2).

$$P_{ent} = \sum_{i=1}^{n_g} (Q_g H_g)_i + \sum_{i=1}^{n_{pu}} P_i$$

Ecuación 3-2

²Tomado de: XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Rehabilitación Priorizada de Redes de Distribución Utilizando Potencia Disipada. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Bogotá, 2008

Donde,

Qe: Caudal suministrado por el embalse

He: Cabeza de entrada suministrado por el embalse

Pi: Potencia por unidad de peso suministrada por la bomba i

Npu: Numero de bombas en la red

La potencia por unidad de peso entregada en los nodos en términos de presión de servicio y caudal demandado (P_{sal}) puede clasificarse de dos formas. La potencia por unidad de peso de entrega óptima (P_{sal}^{max}), debida a una presión de servicio mínima en los nodos de consumo, y la potencia por unidad de peso de entrega real (P_{sal}^{real}), debida a las presiones de entrega del servicio a partir de una configuración de tuberías. La Ecuación 3-3 presenta la expresión para la (P_{sal}^{max}) y la Ecuación 3-4 para la (P_{sal}^{real}).

$$(P_{sal}^{max}) = \sum_{j=1}^{n_n} Q_j H_j^*$$

Ecuación 3-3

$$(P_{sal}^{real}) = \sum_{j=1}^{n_n} Q_j H_j$$

Ecuación 3-4

Donde,

Q_j: Demanda en el nodo j

H_j^{*}: Presión mínima requerida en cada uno de los nodos de consumo

H_j: Presión con la cual se satisface la demanda Q_j

n_n : Numero de nodos de toda la red

Por lo tanto, a partir de la Ecuación 3-1 es posible establecer la expresión para la potencia por unidad de peso de operación del sistema de distribución, la cual corresponde a la diferencia entre la potencia por unidad de peso de entrada y la potencia por unidad de peso de entrega en los nodos de consumo (ver Ecuación 3-5).

$$P_{int} = P_{ent} - P_{sal}$$

Ecuación 3-5

Sin embargo como se mencionó anteriormente, la potencia por unidad de peso de entrega se clasifica en una entrega óptima y en una de entrega real del servicio a partir de las cuales es posible definir las potencias por unidad de peso de operación óptima (Ecuación 3-6) y de operación real (Ecuación 3-7) de la red.

$$P_{int}^{max} = P_{ent} - P_{sal}^{max}$$

Ecuación 3-6

$$P_{int}^{real} = P_{ent} - P_{sal}^{real}$$

Ecuación 3-7

Por lo tanto es posible integrar los conceptos mencionados en un factor que relacione la potencia por unidad de peso de operación real y la potencia por unidad de peso de operación óptima del sistema de distribución con el fin de establecer el grado de eficiencia de entrega del servicio dada una configuración de tuberías. El índice de resiliencia de la red define la relación entre las potencias mencionadas y por lo tanto es posible establecer el nivel de conservación de potencia presente en el sistema (ver Ecuación 3-8) .

$$I_r = 1 - \frac{P_{sal}^{real}}{P_{sal}^{max}}$$

Ecuación 3-8

Al sustituir los valores apropiados se encuentra la expresión general para el índice de resiliencia de la red (ver Ecuación 3-9). (Todini 2004).

$$I_r = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^{n_e} (Q_e H_e)_i + \sum_{i=1}^{n_{pu}} P_i \right] - \sum_{j=1}^{n_n} Q_j H_j}{\left[\sum_{i=1}^{n_e} (Q_e H_e)_i + \sum_{i=1}^{n_{pu}} P_i \right] - \sum_{j=1}^{n_n} Q_j H_j^*} = \frac{\sum_{j=1}^{n_n} Q_j (H_j - H_j^*)}{\left[\sum_{i=1}^{n_e} (Q_e H_e)_i + \sum_{i=1}^{n_{pu}} P_i \right] - \sum_{j=1}^{n_n} Q_j H_j^*}$$

Ecuación 3-9

Donde,

Q_j : Demanda en el nodo j .

Q_j : Demanda en el embalse.

H_e : Presión con la cual se satisface la demanda Q_e .

H_j^* : Presión mínima requerida en cada uno de los nodos de consumo.

H_j : Presión con la cual se satisface la demanda Q_j .

n_n : Numero de nodos de toda la red.

3.2.2 Coeficiente de uniformidad de presiones (CU)

Al aumentar el índice de resiliencia de la red, que representa la relación entre la potencia por unidad de peso de operación real del sistema con una configuración de tuberías dada respecto a la potencia por unidad de peso máxima de trabajo suministrada por las fuentes del recurso, se logra un uniformizar el estado de presiones. La definición de potencia por unidad de peso máxima de trabajo hace parte del problema y busca la definición de qué tanta potencia por unidad de peso el sistema requiere para realizar la óptima distribución del servicio.

El factor utilizado para analizar el grado de uniformidad del estado de presiones en la red es el coeficiente de uniformidad (CU), definido en la Ecuación 3-10, el cual relaciona la presión sobre todos los nodos con la máxima presión encontrada en la red de distribución de agua potable.

$$CU = \frac{\sum_{j=1}^{n_n} H_j}{n_n \max \{H_j\}}$$

Ecuación 3-10

Donde,

H_j : Presión con la cual se satisface la demanda Q_j

n_n : Numero de nodos de toda la red

3.2.3 Desviación estándar de presiones (DESV)

La desviación estándar es una medida estadística del promedio de las diferencias entre un conjunto de valores respecto al promedio del mismo. Estas diferencias pueden ser positivas, cuando el valor se encuentra por encima del promedio, y negativas, cuando el valor se encuentra por debajo del promedio.

Con lo cual para efectos de la investigación se debe garantizar que en ningún momento se tengan valores menores a la mínima permitida en los nodos de consumo, en este caso H^* . La Ecuación 2-11, muestra la manera como se calculará la desviación estándar del estado de presiones, a partir de las presiones en los nodos de consumo de la red de distribución.

$$DES\bar{V} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_n} (H_j - \bar{H})^2}{n_n - 1}}$$

Ecuación 3-11

3.3 ANALISIS DE SUPERVIVENCIA

La Supervivencia es la probabilidad que tienen al nacer los individuos de una población con características en común, de alcanzar una determinada edad. Usando datos de mortalidad y fertilidad, se determinan probabilidades de envejecimiento de la población estudiada, la cual decrece desde 1, para los individuos nacidos vivos, hasta hacerse 0, a la edad máxima de la especie. Al representar gráficamente el valor de supervivencia frente al tiempo (edad que alcanza) se obtiene la curva de supervivencia para esa población.

De una forma análoga, este modelo de supervivencia puede ser utilizado para predecir el deterioro de las tuberías de una red de agua potable basándose en su edad y en características estadísticamente descriptivas del daño, dado por la relación existente entre los ciclos de vida humanos y el de los elementos de infraestructuras.

En ese orden de ideas, en la red distribución de agua para el consumo humano, la supervivencia es *“la probabilidad de que una tubería realice su función bajo determinadas condiciones de funcionamiento, durante un periodo de tiempo establecido”*, orientado a los tiempos hasta el fallo de la tubería, con el fin de predecir la probable ocurrencia de daños, rapidez con la que ocurren y el instante del suceso.

Este análisis incorpora el hecho de que, mientras algunas tuberías fallan por envejecimiento o por alguna causa externa, otras no, toda esta recopilación de datos es de vital importancia y gran impacto en el procesamiento de los fallos de la red, pues las tuberías pueden fallar en muchas ocasiones durante su vida útil, lo cual requiere de intervención inmediata de la red. Este análisis es generalmente útil cuando los registros de los fallos se han conservado en buena proporción, en relación al historial de daños y rupturas de la red.

Se ha demostrado que el patrón de ruptura depende del número de rupturas previas que las tuberías han sufrido en el pasado, y que este factor es a menudo reportado como el más importante para predecir futuros fallos (Andreou et al. 1987; Eisenbis 1994; Guftafson Clancy 1999).

La Supervivencia, reúne técnicas empleadas para el análisis de la variable *Tiempo*, que transcurre desde el instante de instalación definido, hasta la ocurrencia del suceso de falla, Klein y Moeschberger (1997).

3.3.1 Función de Supervivencia

La función de supervivencia proporciona la probabilidad de que el *tiempo de supervivencia* sea mayor que t , es decir, la probabilidad de que una tubería tarde en romperse superando un instante t .

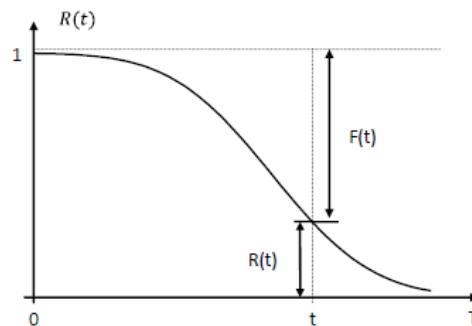
En otros términos, es usada para la cuantificación del grado de seguridad del funcionamiento de una tubería, la capacidad que tiene para cumplir con éxito la función por la cual fue instalado.

Esta probabilidad generalmente se expresaría de la siguiente forma en donde la tubería dure más allá del instante t .

$$R(t) = P(T > t) \quad \text{donde} \quad 0 \leq t < \infty$$

De tal forma, la función de supervivencia da la probabilidad complementaria de la habitual función de distribución acumulativa $F(t) = 1 - R(t)$ Kalbfleisch (1980) y Crowder et al. (1991). Función monótona, decreciente, continua por la izquierda donde $R(0) = 1$ y $\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$

Figura 2. Curva de supervivencia típica.



3.3.2 Función de Densidad de Supervivencia

La función densidad de supervivencia $f(t)$, se define como una función que permite calcular la probabilidad de que la variable tome valores en un intervalo a través de la fórmula:

$$P(a < T < b) = \int_a^b f(t) dt \quad \text{donde} \quad 0 < t < \infty$$

3.3.3 Función Tasa de Falla

La *función de riesgo* o *tasa de fallo* $h(t)$ es utilizada, para expresar porcentualmente el riesgo o tasa de falla de una unidad de la red en un instante de tiempo t , condicionando que la tubería no ha fallado y por tanto ha sobrevivido hasta ese instante. Es decir, mide la variación relativa del número de supervivientes en el instante y se relaciona con el número de fallos por unidad de tiempo; se define también como *la velocidad de extinción o degradación del dispositivo*; es la intensidad, *la fuerza con que se presentan los fallos en el*

dispositivo, justo en el instante Representa la evolución de la probabilidad de falla en relación con la edad de los individuos.

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{P(t \leq T \leq t + \Delta t / T \geq t)}{\Delta t} \right) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Ecuación 3-12

3.4 DISTRIBUCION DE HERZ

La distribución estadística de Herz, fue desarrollado por el profesor Raimund Herz (1996, 1997, 1998) de la Universidad Tecnológica de Dresden, Alemania. En donde dedujo ecuaciones y distribuciones de probabilidad para simular el envejecimiento de las tuberías, para que en el modelo la red se dividiera en cohortes de supervivencia de tuberías, los cuales son grupos de tuberías instaladas el mismo año, del mismo material y demás características comunes que afectan a su rendimiento con el paso del tiempo.

La distribución Herz fue desarrollada específicamente para valorar el envejecimiento de los distintos elementos básicos de la infraestructura de una red (conductos, válvulas, tanques de almacenamiento y estaciones de bombeo).

Los parámetros con los que cuenta esta distribución, se basan en tasas históricas de renovación y no en tasas de roturas. Las tasas de renovación reflejan tanto las políticas de rehabilitación del pasado como las condiciones técnicas y económicas de la época.

En este modelo, se simula el proceso de deterioro como una transición sucesiva de condiciones de la tubería, del mejor (nuevo) estado al peor estado (intervención), (*Baur y Kropp 2003*), datos obtenidos de acuerdo a inspecciones de campo y normativa de evaluación local.

La distribución Herz (1996), está caracterizada por las siguientes funciones dependientes de la edad que están matemáticamente relacionadas:

3.4.1 Función de supervivencia

La función de supervivencia proviene de una distribución acumulada en donde la variable aleatoria es la permanencia de una tubería en una condición dada. Dicha función es (Hörold y Baur 2000):

$$R(t) = 1 - F(t) = \frac{A + 1}{A + e^{B(t-C)}} \quad \text{si } t > C$$

Ecuación 3-13

Donde:

$R(t)$ = Probabilidad que una tubería se encuentre en una condición igual o mejor que i a una edad t .

$F(t)$ = Probabilidad que una tubería haya cambiado a una clase inferior a la clase i a una edad t .

A = Factor de envejecimiento (-), parámetro empírico que afecta la velocidad inicial con la que una tubería se deteriora. A un mayor valor de a menor es la velocidad de deterioro de la tubería. Si $a = 0$ la distribución de Herz se convierte en una distribución exponencial con ratios de fallo constantes a lo largo del tiempo.

B = Factor de falla (año⁻¹), parámetro que afecta la tasa a la que una tubería se envejece y cambia a un estado inferior a i . A un mayor valor de B es más rápido el proceso de deterioro.

t = Edad de la tubería en años.

C = Tiempo de resistencia en una condición dada (años). Este valor corresponde a la edad a la cual la primera tubería del cohorte falla. Para edades menores de C la función de supervivencia tiene un valor de 1.

3.4.2 Función de densidad de supervivencia

Representa la proporción esperada de tuberías que cambian a un estado inferior en cada año (*Mehel, Keefe y Wrase 2001*). Obtenida de la primera derivada de la función de supervivencia, se muestra de la siguiente forma:

$$f(t) = \frac{(A+1)e^{B(t-C)}}{[A+e^{B(t-C)}]^2} \quad \text{si } t > C$$

Ecuación 3-14

3.4.3 Función de rehabilitación o tasa de falla

La función representa la proporción de tuberías para una clase inicial y edad t a una clase inferior con relación a las tuberías que se encuentran en una clase igual o mejor que la clase inicial a la edad t . El modelo de Herz tiene la característica que la tasa de falla o rehabilitación, aumenta con la edad cada vez más, antes que en forma gradual, tendiendo asintóticamente a un valor frontera. La función de rehabilitación se expresa de la siguiente forma:

$$Z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{Be^{B(t-C)}}{A + e^{B(t-C)}}$$

Ecuación 3-15

Donde:

$f(t)$: Función de densidad de supervivencia.

$R(t)$: Función de supervivencia de Herz.

Para obtener la función de tasa de falla, se observa que se divide la función de densidad de supervivencia con respecto a la función de supervivencia de Herz.

3.4.4 Edad promedio de transición

Es la permanencia promedio de una tubería en una clase, la cual es posible obtener despejando el tiempo para el cual la mitad de tuberías están en una condición igual o mejor que la condición inicial.

$$t = \frac{1}{B} \ln(A + 2) + C \quad \text{con } R = 0,5$$

Ecuación 3-16

3.4.5 Calibración parámetros de envejecimiento

Los parámetros de envejecimiento, definen la resistencia al deterioro y la velocidad de ocurrencia desde el mismo momento en que inicia el proceso. Para esto existen tres métodos que facilitan la calibración de los parámetros y ayudan a

localizar la función de distribución de Herz en una posición más acertada y cerca a la realidad de la red.

3.4.5.1 Mínimos cuadrados

Comúnmente usado cuando se poseen muestras estadísticamente representativas de inspecciones; minimiza la suma acumulada de los cuadrados de la diferencia entre el valor observado y el calculado.

$$\text{Min} \left(\sum_{K=1}^n (y(t) - X(t))^2 \right)$$

Ecuación 3-17

Donde

y_i = proporción de tubos en condición igual o mejor a la clase i .

X_i = proporción de tubos en condición igual o mejor a la clase i según las inspecciones de las tuberías.

3.5.4.2 Información de edad media

$$C = t_{50} - 2s \geq 0$$

Ecuación 3-18

Donde

t_{50} = Edad media de la tubería.

s = Desviación estándar de la información.

P = Proporción de tubos que se esperan lleguen a la edad media.

$$A = Exp \left(\frac{2 \ln(2) \left(\frac{t_{50}-C}{s}\right)^2 + \sqrt{\left(2 \ln(2) \left(\frac{t_{50}-C}{s}\right)^2\right)^2 + 2P^2 \left(\frac{t_{50}-C}{s}\right)^2}}{2} \right)$$

Ecuación 3-19

$$B = \frac{\ln(A)}{t_{50} - C}$$

Ecuación 3-20

3.5.4.3 Estimación del deterioro

Valora los parámetros a partir de la edad en la que el 100%, 50% y 10% de tuberías están en condición igual o mejor a la clase a calibrar.

$$C = X_{i100}$$

Ecuación 3-21

$$\frac{\ln(9A + 10)}{\ln(A + 2)} = \frac{X_{i10} - C}{X_{i50} - C}$$

Ecuación 3-22

$$B = \frac{\ln(A + 2)}{X_{i50} - C}$$

Ecuación 3-23

3.5 PLANO ÓPTIMO DE PRESIONES

El plano óptimo de presiones se define como la magnitud absoluta de la presión del agua a la entrada de un sector, sub-sector, distrito o zona de la red de distribución de agua potable (aguas debajo de una válvula controladora o reductora de presión), tal que el caudal por pérdidas totales debidas a fugas no visibles, a daños (roturas de tubos, explosiones causados por terceros, etc.) es minimizado sino que se afecte en forma apreciable el volumen total de agua facturado ni se dejen cumplir los niveles de presión máxima mínima en una red establecidos por la normatividad colombiana referente al sector de agua potable y saneamiento básico.³

3.6 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

El suministro de agua potable a lo largo de la historia se ha convertido en una enorme y compleja estructura la cual con el paso del tiempo se deteriora y sufre daños que tienen un alto costo tanto económico como en el servicio; en la actualidad se cuenta con algunos modelos que buscan priorizar la rehabilitación de tuberías entre los que se destacan según Alonso (2010) en su proyecto de tesis doctoral titulada “Modelo híbrido para la toma de decisiones en programas de rehabilitación de tuberías para sistemas de abastecimiento de agua: Aplicación a la ciudad de Celaya, Gto (México)”:

- Modelos basados en la previsión de fallos que describen el envejecimiento de la red por la estimación de los fallos futuros a partir de datos vinculados a la tubería y a su medio ambiente. Estos datos son tomados en consideración con la ayuda de variables explicativas con el fin de medir su influencia sobre el proceso de deterioro de las tuberías.

³ Efecto del índice de agua no contabilizada en las tarifas para acueductos medianos y pequeños en Colombia. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Mayo 2004. Susana Lara

- Modelos por cadenas de Markov, que describen el fenómeno de deterioro estructural de tuberías.
- Gofre et al. (2000) considera grupos de tuberías homogéneas (el mismo diámetro, los materiales, año de instalación, etcétera) en las que se aplica una regresión de Poisson, que permite identificar la influencia de las variables explicativas (endógenas y exógenas a la tubería) de la aparición de fallos.
- Modelos de Proceso de Poisson no homogéneo: Rostum (2000) aplica esta aproximación sobre la red de Trondheim (Noruega), considerando que la aparición del fallo sigue un proceso de Poisson no homogéneo, el índice de fallo es una función del tiempo y de un conjunto de variables explicativas tomadas en consideración por determinada covariable y por parámetros de regresión adecuados para describir el fenómeno de deterioro.
- Modelos basados en análisis multicriterio, que han sido utilizados para establecer prioridades de las necesidades en renovación (Gauffre et al., 2002a). La aproximación se basa en la noción de clasificación (Roy, 1996) y utiliza el método ELECTRE-TRI (Mousseau et al., 2001). Este método procura determinar clases con arreglo a criterios precisos, para la problemática de renovación; estas clases van representadas en las tuberías prioritarias para trabajos de renovación, basándose en criterios e indicadores de realización definidos (Gauffre et al., 2002b).
- El modelo propuesto por Shamir y Howard (1979), que es considerado como modelo de referencia y considerado como uno de los primeros modelos para la renovación, se apoya en una regresión exponencial que describe el crecimiento de índice de fallo por km/año en función del tiempo. En este caso, la hipótesis subyacente es que el fenómeno de aparición del fallo sigue un proceso de Poisson, aunque puede seguir otros modelos.

En Colombia se han venido creando algunos modelos que buscan priorizar la rehabilitación de tuberías, entre los cuales encontramos:

- El modelo propuesto por el CIACUA (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá) utiliza un algoritmo de selección de tubos a remplazar con base en el concepto de potencia unitaria, simple y corto, por lo que su tiempo de ejecución es pequeño.

3.7 DISEÑO METODOLÓGICO

3.7.1 EPANET 2.0

Es un programa que sirve para analizar el comportamiento hidráulico en la red de distribución e agua. El programa simula el comportamiento hidráulico en periodos prolongados. Una red puede estar constituida por tuberías, nodos, bombas, válvulas y depósitos de almacenamiento embalses, EPANET 2.0 realiza un seguimiento de los caudales en las tuberías, las presiones en los nodos, los niveles en los tanques, a lo largo del periodo de simulación discretizado en múltiples intervalos de tiempo.

EPANET 2.0 permite la edición de los datos de entrada a la red y brinda resultados en diferentes formatos, entre éstos se incluyen mapas en la red, codificados por colores, tablas numéricas, graficas de evolución y mapas de isolíneas.⁴

Con la ayuda de EPANET se realizo el modelo hidráulico del sector de Morro y Centro, al cual se le asignaron curvas y parámetros de modulación tanto de caudal como de presión, después de su ejecución se obtuvo medidas de caudal y de presión en los nodos de la red.

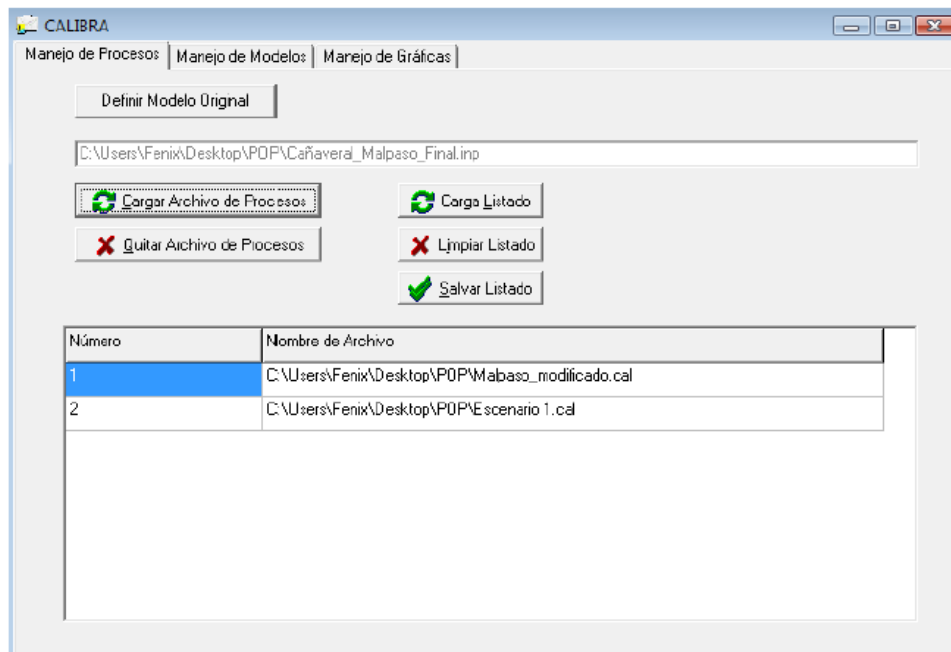
⁴ EPANET 2.0, Manual de Usuario en Español, traducido por Fernando Martínez Alzamora, Universidad Politécnica de Valencia, España

3.7.2 Calibra⁵

Es un programa de ingeniería desarrollado por la Universidad de los Andes que facilita el proceso de calibración por ensayo y error de modelos de tuberías a presión. El software permite generar escenarios en los que se evalúan distintas hipótesis que son aplicadas al modelo para después compararlos entre sí y con los datos de medición de campo, tanto de caudal como de energía, mediante una poderosa interfaz gráfica que contiene una serie de útiles herramientas estadísticas.

La creación del programa surgió como una necesidad para mejorar y optimizar el proceso de calibración de redes de acueducto.

Figura 3. Interface inicial de Calibra



⁵ CALIBRA 2006, Manual de Usuario, Centro de investigaciones en Acueductos y Alcantarillados, Universidad de los Andes, Colombia.

3.7.3 Resiliencia

La resiliencia de la red, es posible calcularla con la ayuda de un algoritmo desarrollado en el módulo de Visual Basic, producido para la ejecución de un trabajo de grado en la Universidad Industrial de Santander; algoritmo el cual permite evaluar el Índice de Resiliencia para una red cualquiera.

Una de las ventajas significativas del programa, es la opción como dato de entrada presentada en la interface de ingreso de datos, que permite generar una cantidad de cambios de tuberías en la red distribución según como el usuario lo requiera, con el cual el programa evalúa las mas adecuadas para ser cambiadas que produzca aumento del índice en la red, según la cantidad que se halla establecido, este cambia las unidades de tubería a su diámetro comercial inmediatamente superior y evalúa el Índice de Resiliencia de los tubos remplazados.

3.7.3.1 Función objetivo

Como método para la ejecución de la función objetivo, el algoritmo hace uso del Método de Suma Ponderada Exponencial usando como función objetivo:

$$FO = (e^{p*w_1} - 1)e^{p*IR} + (e^{p*w_2} - 1)e^{p*CU}$$

Ecuación 3-17

Donde:

IR: Índice de resiliencia de la red

CU: Coeficiente de uniformidad

W1: Importancia que se da al *IR*, debe ser mayor a 0

W2: Importancia que se da al *CU*, debe ser mayor a 0

$W1+W2 = 1$

P: Parámetro del método

Para evitar caer en errores de desbordamiento numérico, el valor máximo que podrá tomar P debe ser aproximadamente 350. Este valor está deducido teniendo en cuenta el tipo de dato numérico que puede albergar mayores cantidades (tipo double) para Visual Basic⁶.

3.7.3.2 Datos de entrada

Diámetro máximo: restricción a la optimización de cambio, es el valor más alto que puede llegar a tomar la unidad de tubería reemplazada, en milímetros.

Rugosidad: del material de las nuevas tuberías implementadas, en milímetros.

Presión mínima: restricción a la optimización de cambio, en metros de columna de agua.

K_{COSTO} y n_{COSTO} : parámetros de la función de Gutiérrez de costo.

Costo del agua: valor del agua en pesos por cada metro cubico.

Parámetro P: es un parámetro propio del método, para evitar desbordamiento numérico.

A continuación, se presenta la interface de entrada de datos del algoritmo:

⁶ Optimización del índice de resiliencia y uniformización de la presión como criterios para renovar tuberías en redes de distribución de acueductos. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. Agosto de 2011. Sergio Andrés Torres Martínez.

Figura 4. Interface inicial de Resiliencia.

Datos de Entrada

Variables Hidráulicas

Diámetro Máximo mm

Rugosidad mm si usa D-W

Presión Mínima mca

Emisores para estimar fugas

Asignar parámetros $Q_j = C P^a$

C a

Dejar parámetros por defecto

C= 0.001 LPS/(mca^{1.15})

a= 1.15

Variables del costo

Kcosto \$ m mm

nCost

$C_j = K_{costo} L_j (D_j)^{n_{costo}}$

Costo de construcción. Ecuación aproximada

Costo del Agua [\$/m3]

Variables del Método

Importancia para In [%]

Parámetro P (máx 350)

Número de Cambios (Red con 5439 tubos)

Calcular

4. METODOLOGÍA PARA LA PRIORIZACIÓN DE LA REHABILITACIÓN DE LAS TUBERÍAS POR ÍNDICE DE RESILIENCIA

4.1 METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN

En el sistema de redes de funcionamiento de agua potable, las tuberías y sus respectivas conexiones están expuestas a ciertas condiciones que dependen de diferentes factores, como lo son los antrópicos, los propios del sistema, condiciones del terreno en que se encuentran ubicadas, y ciertamente el efecto que produce sobre ellas el paso del tiempo. Con la ayuda de software que representan modelos hidráulicos del sistema real de redes, se pretende acercar dichos modelos lo más posible a la red de estudio, su funcionamiento y las condiciones en las que se encuentran, tal proceso es conocido como calibración.

La calibración de redes, es la base para establecer la metodología de rehabilitación de tuberías, motivo de estudio del presente proyecto. Un modelo matemático de la red correctamente calibrado permite investigar la calidad de la operación, medir la fidelidad de los instrumentos de medición, detectar zonas problemáticas de la red, encontrar zonas con altas fugas, ubicar parámetros de pérdidas de energía y masa y realizar cálculos precisos de modelación hidráulica.⁷

Las condiciones tomadas como motivo de estudio para la red de distribución en los distritos de Morro y Centro son los siguientes:

Variables hidráulicas: variables físicas, dependientes del comportamiento de la fricción y su distribución, y pérdidas de masa y energía.

⁷Calibración de redes de distribución de agua potable bajo un ambiente de fugas. Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de Recursos Hídricos. Universidad de Los Andes. Saldrarriaga, J.G. y Salas, D.E.

Emisores: tomados en primer lugar, siendo estas simulaciones de fugas en la tubería, fueron establecidos dependiendo de la distribución de presiones en el modelo simulado con EPANET, siendo esta distribución dada en unidades de metros de columna de agua (m.c.a) clasificada como:

Presión Muy Baja	entre 0_25
Presión Baja	entre 25_50
Presión Media	entre 50_75
Presión Alta	entre 75_100
Presión Muy Alta	desde 100

Estableciendo para cada rango de presión el siguiente coeficiente:

Presión Baja	0.003
Presión Media	0.003
Presión Alta	0.004
Presión Muy Alta	0.004 – 0.0045

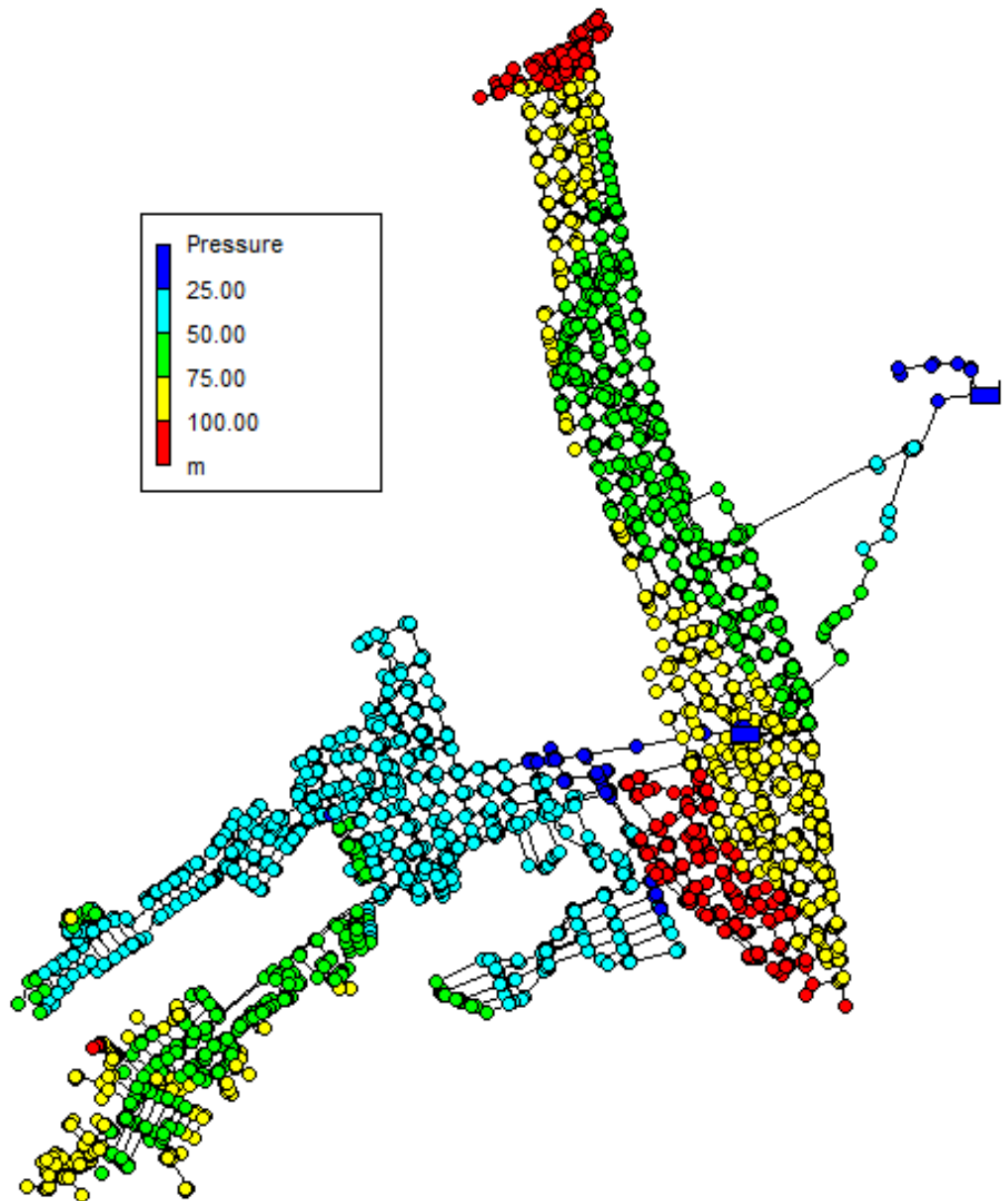
No se determinó un coeficiente para rango de presión muy baja debido a que este no influía de manera significativa sobre el modelo debido a la poca cantidad de nodos encontrados con esta característica.

Nodo estrato: por otro lado, otro factor incluido en las variables hidráulicas, es la localización catastral del nodo, para este tópico, fue tomado en cuenta la creación de escenarios, en donde se muestran subconjuntos de datos que caracterizan las condiciones actuales de la red.

En ese orden de ideas, en los nodos de estratos más bajos, el valor multiplicador era más bajo que en el resto de nodos de otros estratos, debido a la ubicación de estos en donde se presentan demandas desconocidas, gracias a que estos se

encuentran en gran cantidad en sectores comerciales, también por la probabilidad de que se presenten conexiones ilegales más que en otros estratos de rango medio.

Figura 5. Modelo en Epanet con distribución de presiones en distritos de Morro y Centro



Fuente. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

Variables topológicas: variables que solo dependen de las propiedades físicas de la tubería; de estas variables fueron tomadas según el material, diámetro y edad. El uso de las variables topológicas en la calibración de la red fue incluido, al igual que el estrato, por medio de la creación de escenarios.

La formación de los escenarios, como en muchas metodologías para la calibración, fue a partir de pruebas a base de ensayo y error, teniendo en cuenta, como principio fundamental el comportamiento de las tuberías según sus características; de tal manera, tuberías de materiales menos resistentes presentaran factores multiplicadores más bajos, al igual que con las tuberías de diámetros grandes. Además, tomando en cuenta que la rugosidad de la tubería con el paso del tiempo varia, las tuberías de mayor edad presentaran factores multiplicadores de rugosidad más bajos que las tuberías que tengan menos tiempo desde su instalación.

De manera específica se presenta en la tabla anexo No. 4-1 el escenario más representativo de la red de distribución real, además en las graficas anexas se muestran el estado inicial de la red y el estado final después del proceso de calibración.

4.2 INDICE DE RESILENCIA

Para la priorización por índice de resiliencia, se realizaron doce pruebas teniendo en cuenta dos restricciones, el número de cambios y la importancia del índice de resiliencia con respecto al coeficiente de uniformidad. Tal como se describe en la siguiente tabla:

Tabla 3. Distribución de importancia de parámetros para grupos de cambios.

# Cambios	IMPORTANCIA					
	IR [%]	CU [%]	IR [%]	CU [%]	IR [%]	CU [%]
50	20	80	50	50	75	25
100	20	80	50	50	75	25
150	20	80	50	50	75	25
200	20	80	50	50	75	25

Para este caso se determinó que las unidades de tubería a reemplazar se realizaran por material de PVC, esto se especifica con la rugosidad presentada en el valor de entrada de la interface de inicio del programa, de tal manera; los parámetros de entrada que se utilizaron en el algoritmo de resiliencia se describen a continuación:

Diámetro máximo = 250 [mm]

Rugosidad = 0.0015 [mm]

Presión mínima = 15 [mca]

$K_{COSTO} = \$ 1'158112$

$N_{COSTO} = 1.0138$

$P = 350$

Una presión mínima de 15 [mca], está basada en la reglamentación del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, el cual, garantiza tal magnitud de metros de columna de agua de llegada al contador de la unidad que se encuentre supliendo. Por otro lado, los valores de **C** y **a**, no son relevantes en el procesamiento del

algoritmo, ya que, el modelo con el que se trabajó la red ya se encontraba previamente calibrado (sección 4.1)

4.2.1 Análisis de importancia de IR Y CU

Comportamiento de la red de distribución:

En la figura 5, es posible determinar que el índice de resiliencia mejora considerablemente para un IR = 50% y 75% (líneas que se superponen en la figura), con respecto una condición de cero cambios, aun así, para un IR = 20%, se presentan cambios favorables en la resiliencia en la red.

Sin embargo, la figura 6 para el coeficiente de uniformidad, los resultado de IR = 50% y 75%, representan un cambio que afecta al CU de forma negativa, siendo IR = 20% la condición que más favorece a la red.

En ese orden de ideas, a manera de no empeorar uno de los componentes (IR, CU), con el objetivo de optimizar uno de ellos, la condición más apropiada para la red de distribución es IR = 20%, con la cual se logra el objetivo principal de mejorar el índice de resiliencia de la red sin tener que afectar el estado de uniformidad de la misma.

Figura 6. Índice de resiliencia para 100 cambios.

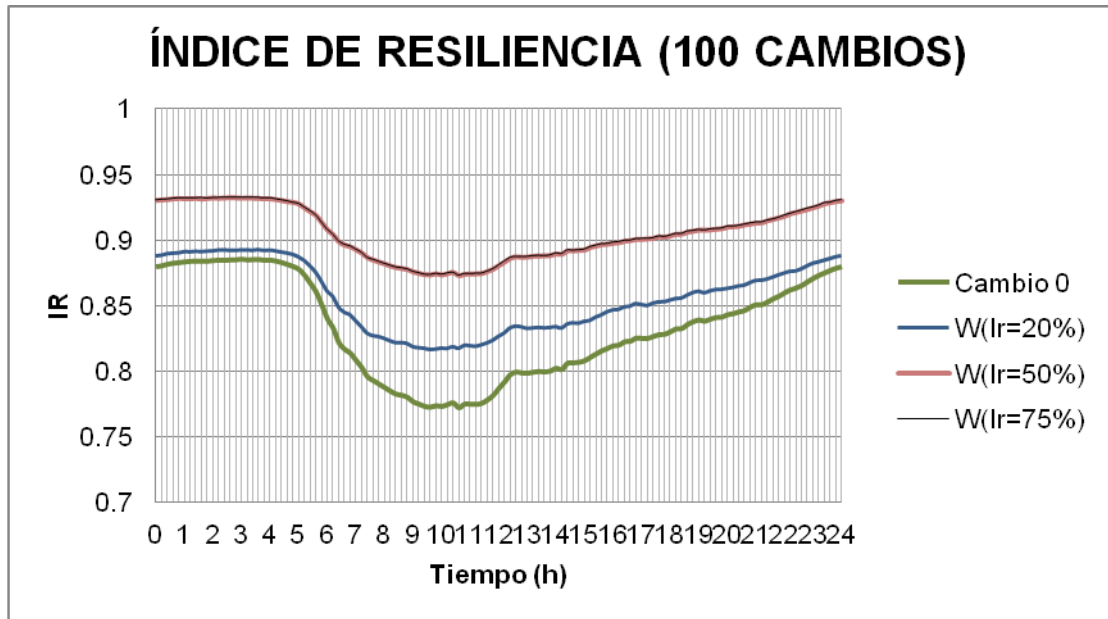
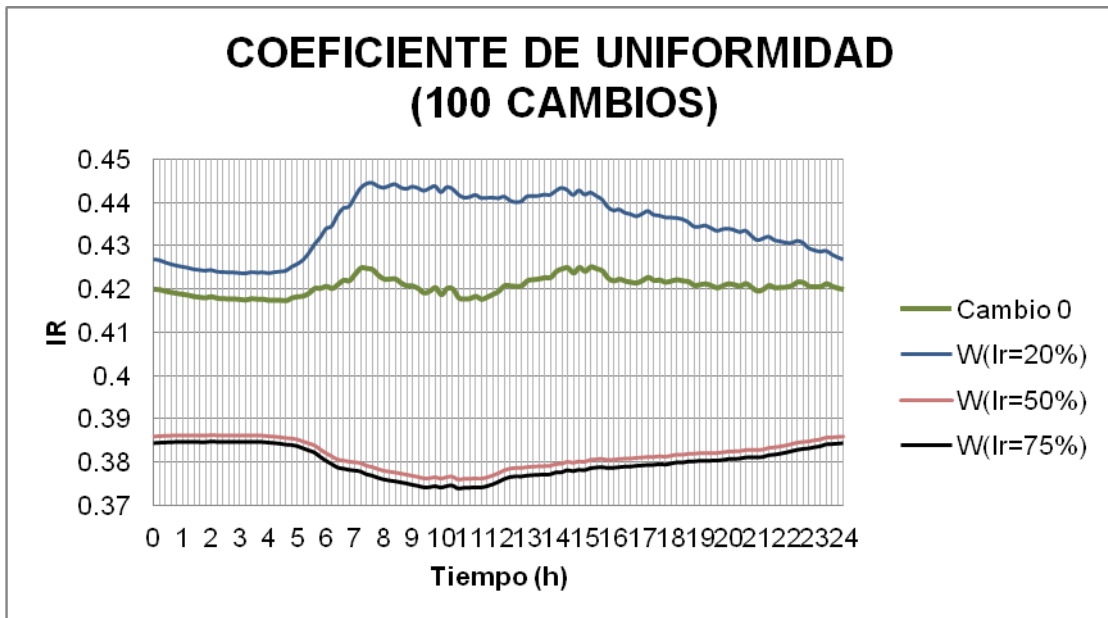


Figura 7. Coeficiente de uniformidad para 100 cambios.



Con una importancia para el IR = 20% el comportamiento de la resiliencia de la red a lo largo del día para cada grupo de cambios propuestos al igual que el comportamiento del CU, se muestran en las figuras 8 y 9:

Figura 8. Índice de resiliencia en grupo de cambios importancia 20% en un día.

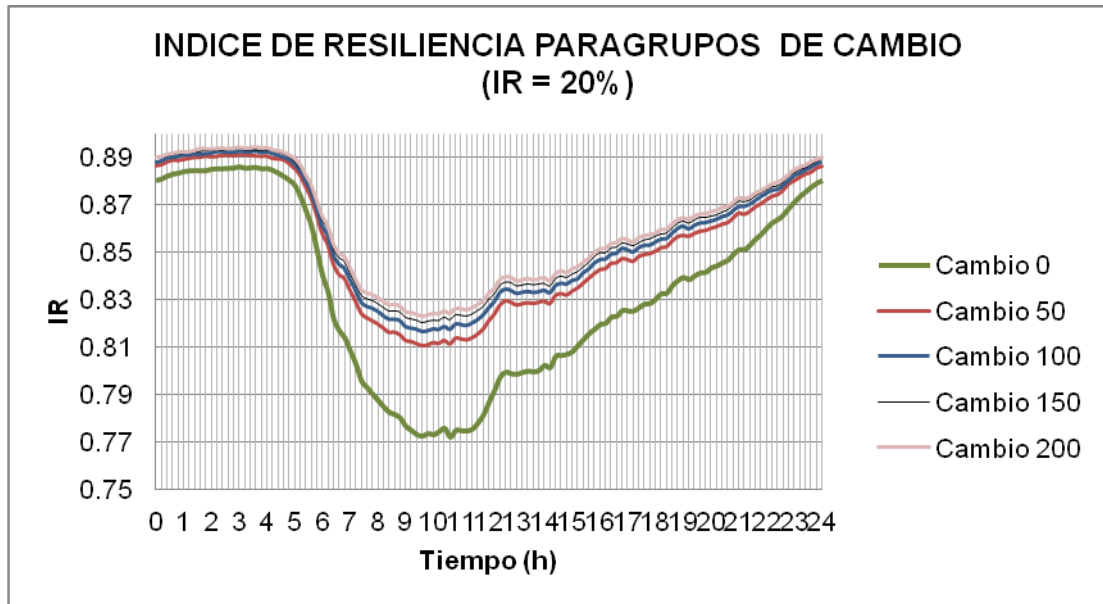
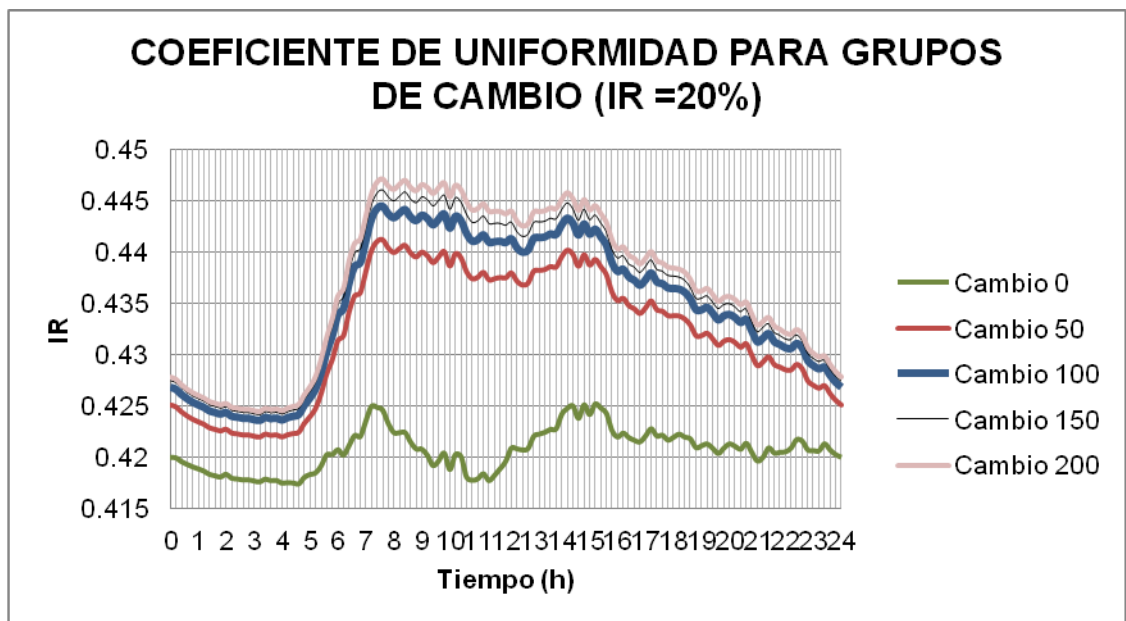
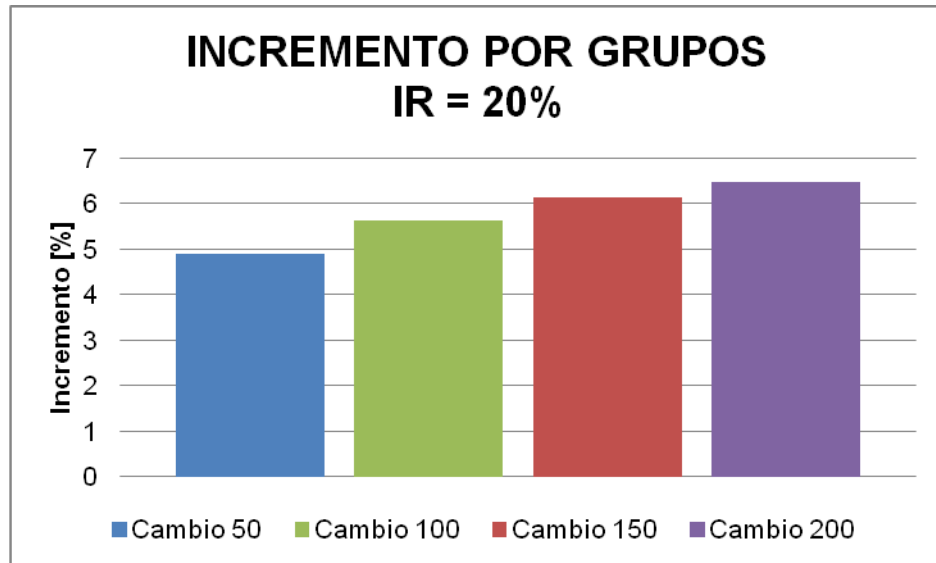


Figura 9. Coeficiente de uniformidad en grupo de cambios importancia 80% en un día.



En la figura 10 se establecen los incrementos porcentuales de cada grupo de cambios con respecto a la condición inicial de cero cambios.

Figura 10. Incremento por grupos para importancia de IR=20%



En relación con lo observado en las figuras anteriores, en el incremento de número de cambios, la tasa de cambio del Índice de Resiliencia en la red tiende a estabilizarse, es decir, a medida que se aumentan las tuberías a remplazar en la red, la variación del índice de resiliencia de cierto número de cambios de tubos con respecto al número de cambios inmediatamente anterior va disminuyendo, tendiendo esta variación a uniformizarse cada vez más, siendo así, hay un punto de la situación en donde no importa cuánto se aumente el número de cambios de entes de tuberías, el índice no va a variar de forma considerable.

Para observar el comportamiento de la red con respecto al número de cambios, y determinar en base a los beneficios y los costos cual debe ser la propuesta de rehabilitación más efectiva para nuestro caso de estudio se muestran a continuación las siguientes graficas:

Figura 11. Índice de resiliencia versus número de cambios.

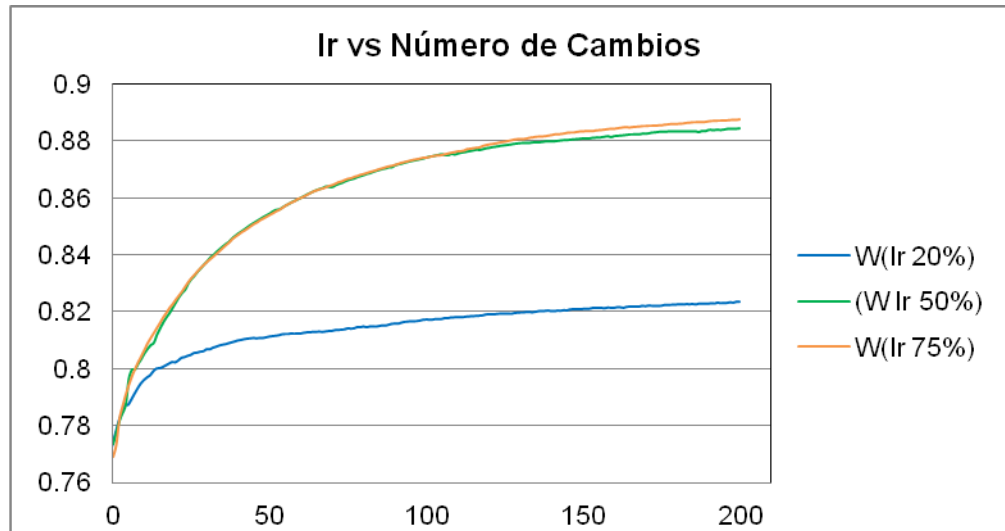
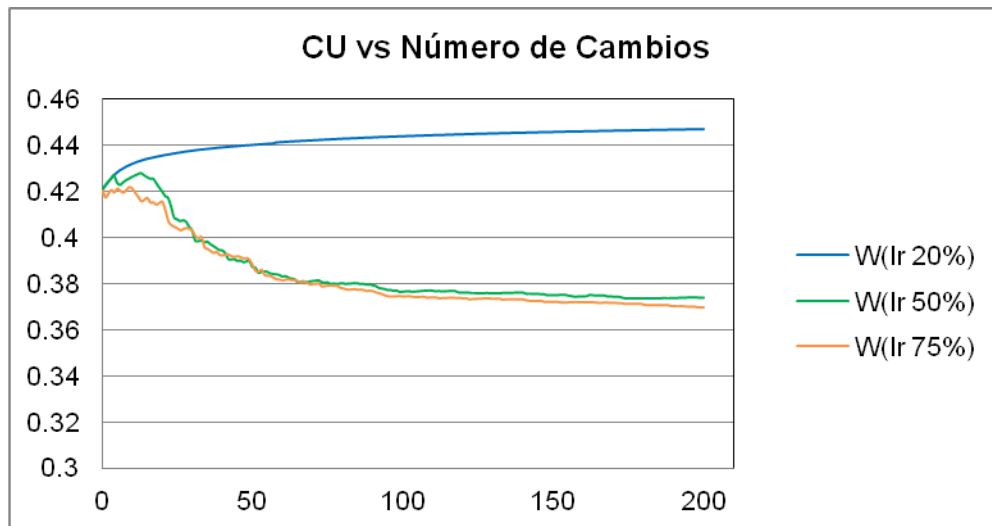
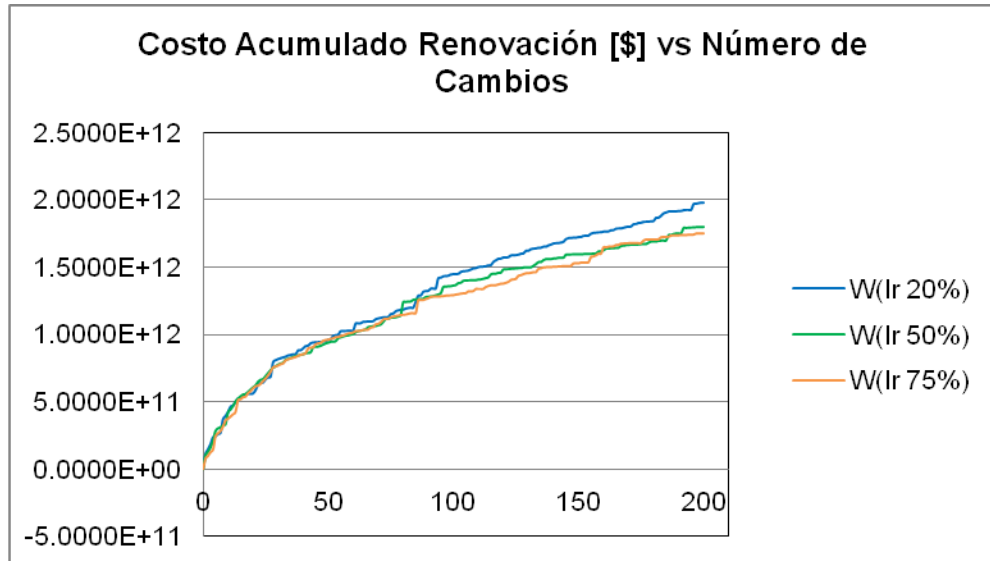


Figura 12. Coeficiente de uniformidad versus número de cambios.



Con base a las figuras 11 y 12, se puede observar que se obtiene una mejora considerable en el IR y en el CU en el rango de cero a cincuenta, y se estabiliza en los puntos cercanos a cien cambios, además, se confirma que para una importancia del IR del 20% se obtienen mejores resultados ya que el índice de resiliencia de la red se incrementa y el CU mejora sustancialmente.

Figura 13. Costo acumulado de renovación versus número de cambios.



Teniendo en cuenta la figura 13, los costos de renovación, es posible observar, en el punto para los cien cambios se presenta una diferencia de tendencia de las gráficas según la importancia, en donde la condición de importancia IR = 20% (elegida como la más eficiente en análisis anteriores) representa mayores costos que las otras condiciones analizadas, es allí donde se da un punto de equilibrio de evaluación de los beneficios hidráulicos y los costos de rehabilitación, considerándose aceptable los cien números de cambios y estableciéndolo como el límite de renovación de tuberías.

Figura 14. Costo de agua fugada en un año versus número de cambios.

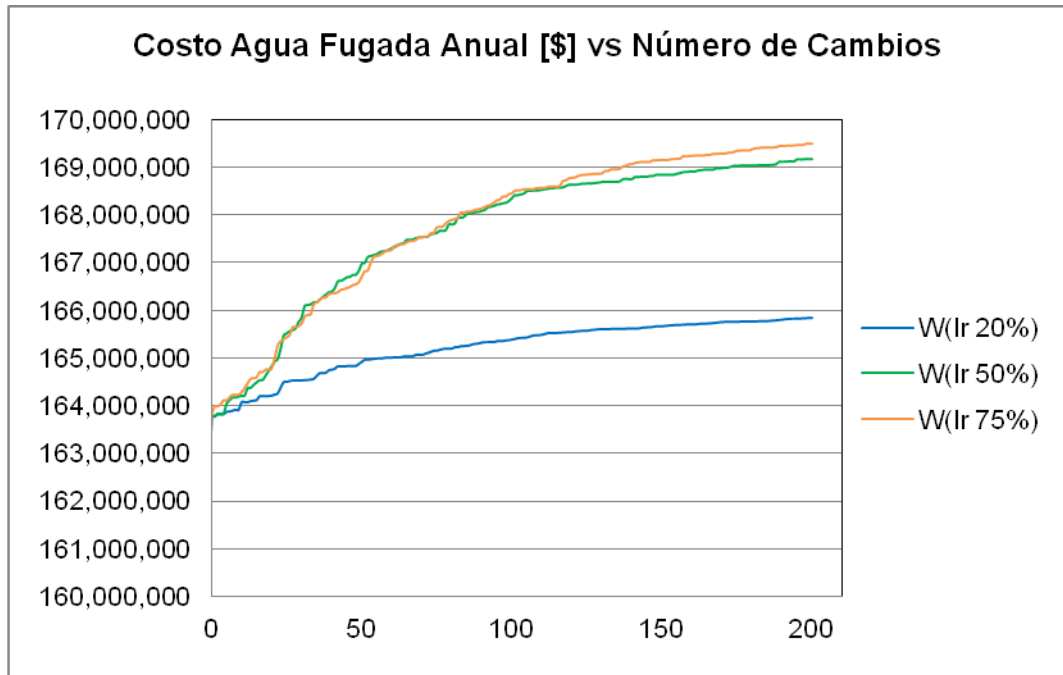
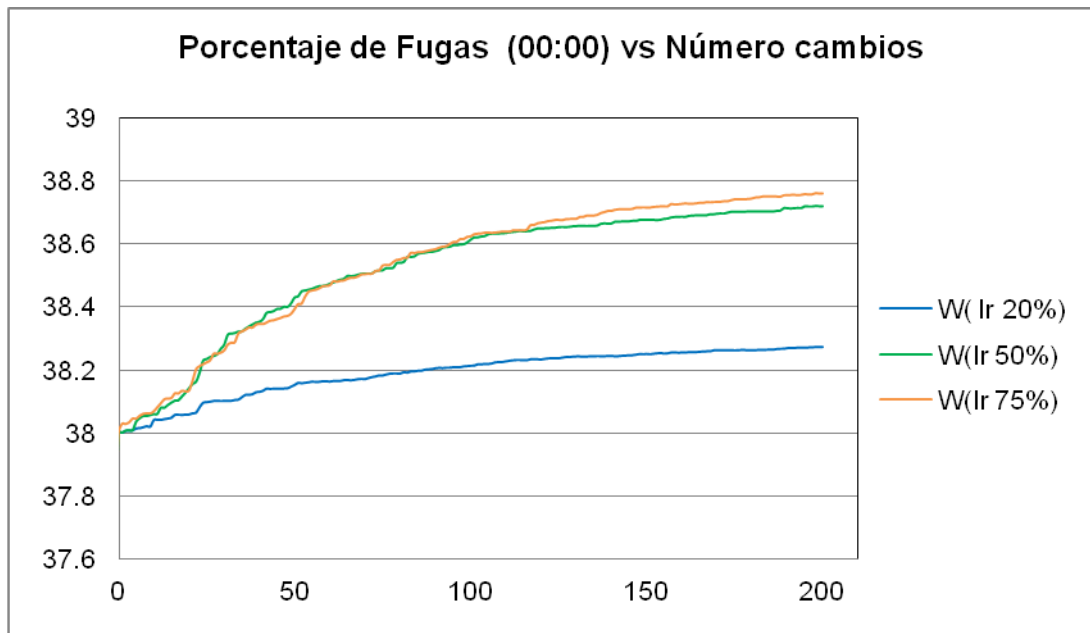


Figura 15. Porcentaje de fugas versus número de cambios.



Por otra parte, si se analiza el costo de las fugas y el porcentaje de estas, representado en las figuras 14 y 15, se observa que el comportamiento para un $W(Ir=20\%)$ se obtienen mejores resultados, ya que existe menos porcentajes de fugas y por ende menos costos debidos a ellas, en comparación con $W(Ir=50\%)$ y $W(Ir=75\%)$, corroborando que la condición elegida es la más apropiada para la rehabilitación de la red de estudio.

Figura 16. Rango de presión versus número de cambios.

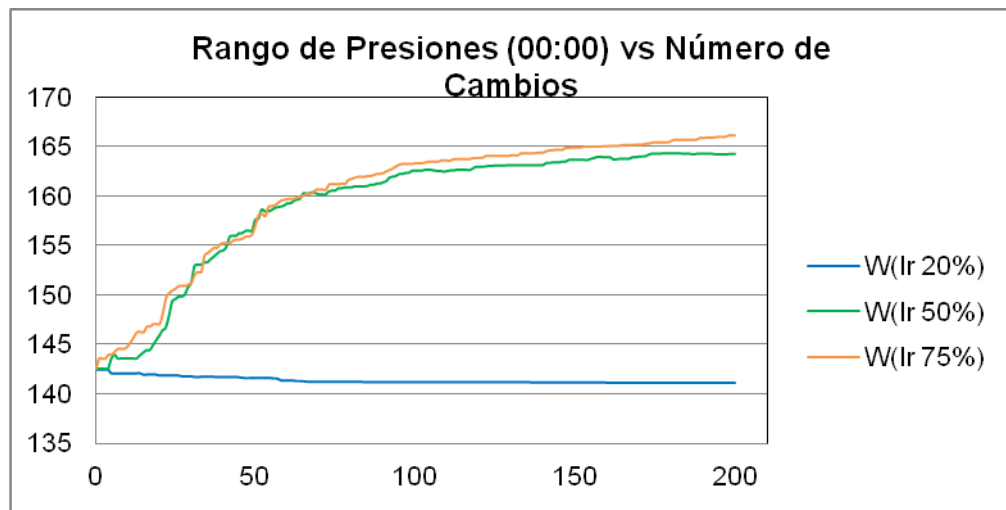
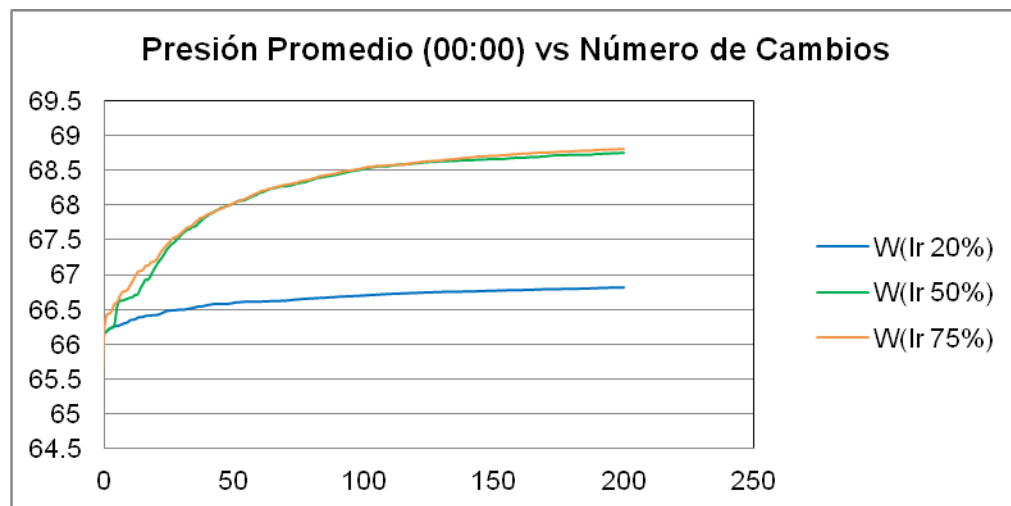


Figura 17. Presión promedio versus número de cambios.



Finalmente, en la figuras 16 y 17, en el incremento de las presiones en la red, es posible determinar con respecto a un porcentaje de importancia de IR = 20% que la red tendrá un mejor comportamiento en el momento de rehabilitar los entes de tubería, debido al bajo rango de presión en tubería que se obtienen, lo cual es posible observar en la figura donde la línea representativa de la importancia más adecuada, ya que esta presenta poca pendiente y la tendencia es la misma a lo largo del aumento de los cambios.

Tabla 4. Listado de tubería a remplazar para un grupo de 100 cambio IR = 20%.

Cambio	ID Tubo	Nuevo Diámetro [mm]	Ir	CU	Costo Agua Fugada anual [\$]	Costo Renovar Acumulado [\$]	Porcentaje de Fugas (00:00)	Rango Presiones (00:00) [mca]	Promedio Presiones (00:00) [mca]
0			0.7735	0.4204	163769015	0	38.002	142.494	66.158
1	52133	250	0.7912	0.4299	163900971	2.36405E+11	38.021	142.104	66.292
2	4588	250	0.7970	0.4324	164079048	4.0571E+11	38.042	142.104	66.354
3	52104	250	0.8002	0.4337	164111861	4.58299E+11	38.048	142.115	66.394
4	49743	250	0.8012	0.4346	164205031	4.85553E+11	38.059	141.985	66.413
5	28969	100	0.8058	0.4370	164535481	6.00936E+11	38.103	141.821	66.488
6	32925	200	0.8070	0.4376	164539489	7.1618E+11	38.103	141.816	66.498
7	30153	250	0.8074	0.4379	164549188	7.27596E+11	38.104	141.754	66.507
8	53892	200	0.8080	0.4380	164556223	7.31937E+11	38.105	141.757	66.515
9	54059	250	0.8091	0.4386	164695212	7.71778E+11	38.123	141.753	66.544
10	32053	200	0.8092	0.4387	164696997	7.72077E+11	38.123	141.752	66.547
11	56920	200	0.8100	0.4390	164764452	7.85533E+11	38.132	141.752	66.563
12	18091	75	0.8106	0.4394	164833893	8.2059E+11	38.141	141.712	66.578
13	27440	75	0.8105	0.4395	164836715	8.21142E+11	38.141	141.674	66.577
14	18316	75	0.8105	0.4396	164840445	8.21879E+11	38.142	141.631	66.577
15	52132	250	0.8108	0.4397	164843948	8.26977E+11	38.143	141.631	66.579
16	34596	200	0.8110	0.4398	164842895	8.31351E+11	38.142	141.631	66.580
17	4225	100	0.8111	0.4399	164883886	8.32558E+11	38.148	141.631	66.587
18	16247	100	0.8116	0.4401	164974502	8.44854E+11	38.160	141.631	66.602
19	34595	150	0.8117	0.4402	164975493	8.66991E+11	38.160	141.632	66.603
20	50659	200	0.8119	0.4403	164983241	8.71754E+11	38.161	141.631	66.605
21	50655	150	0.8121	0.4404	164991526	8.75669E+11	38.162	141.632	66.608
22	50489	150	0.8122	0.4405	164999472	8.97912E+11	38.162	141.631	66.610
23	18092	100	0.8124	0.4406	165002474	8.98934E+11	38.163	141.601	66.610
24	18090	75	0.8122	0.4412	165018162	9.01673E+11	38.165	141.376	66.609

25	16697	200	0.8125	0.4413	165019450	9.02563E+11	38.165	141.376	66.611
26	39160	200	0.8127	0.4413	165024862	9.47961E+11	38.166	141.374	66.614
27	4587	150	0.8128	0.4414	165025824	9.49002E+11	38.167	141.374	66.615
28	27441	75	0.8129	0.4415	165025330	9.50172E+11	38.166	141.344	66.615
29	4647	250	0.8131	0.4416	165044098	9.59166E+11	38.169	141.344	66.619
30	18093	100	0.8130	0.4416	165045619	9.59728E+11	38.168	141.317	66.619
31	27442	100	0.8129	0.4417	165046051	9.61744E+11	38.168	141.287	66.619
32	18315	100	0.8129	0.4418	165048528	9.62263E+11	38.169	141.261	66.619
33	4218	100	0.8131	0.4418	165075562	9.63661E+11	38.172	141.260	66.623
34	34532	200	0.8133	0.4420	165076356	9.81248E+11	38.173	141.260	66.625
35	16535	150	0.8134	0.4420	165092288	9.96799E+11	38.176	141.261	66.629
36	32934	100	0.8141	0.4423	165179528	1.00653E+12	38.187	141.260	66.646
37	34469	150	0.8144	0.4424	165178807	1.02534E+12	38.185	141.261	66.647
38	16214	250	0.8145	0.4425	165200905	1.03187E+12	38.190	141.260	66.652
39	52200	150	0.8147	0.4426	165206824	1.03736E+12	38.190	141.261	66.654
40	33018	200	0.8147	0.4426	165208359	1.04104E+12	38.190	141.260	66.655
41	16700	200	0.8147	0.4427	165209950	1.04191E+12	38.191	141.261	66.656
42	33133	150	0.8149	0.4428	165232823	1.04461E+12	38.193	141.261	66.660
43	16595	150	0.8149	0.4428	165260072	1.0521E+12	38.197	141.260	66.664
44	V_5850	75	0.8151	0.4429	165261051	1.0522E+12	38.196	141.238	66.664
45	4224	75	0.8151	0.4429	165286774	1.05292E+12	38.200	141.239	66.668
46	4150	100	0.8152	0.4430	165305415	1.05413E+12	38.203	141.239	66.672
47	32759	200	0.8154	0.4431	165312771	1.09287E+12	38.205	141.239	66.674
48	32947	200	0.8155	0.4431	165320278	1.13229E+12	38.205	141.239	66.676
49	52128	250	0.8156	0.4432	165321453	1.198E+12	38.205	141.239	66.677
50	52139	200	0.8158	0.4432	165328491	1.22225E+12	38.206	141.239	66.679
51	29477	150	0.8158	0.4433	165336526	1.23711E+12	38.207	141.238	66.682
52	32791	200	0.8161	0.4433	165346275	1.24202E+12	38.209	141.239	66.684
53	16699	200	0.8162	0.4434	165346182	1.24278E+12	38.208	141.239	66.685
54	33091	75	0.8166	0.4434	165346350	1.24297E+12	38.208	141.239	66.686
55	34457	75	0.8167	0.4435	165364448	1.24703E+12	38.210	141.239	66.689
56	34473	150	0.8168	0.4435	165364829	1.25637E+12	38.211	141.238	66.690
57	50656	150	0.8169	0.4436	165368639	1.25791E+12	38.210	141.238	66.691
58	34601	200	0.8170	0.4436	165368631	1.26215E+12	38.211	141.238	66.692
59	16707	250	0.8170	0.4437	165373236	1.26977E+12	38.212	141.238	66.693
60	32943	150	0.8172	0.4437	165386124	1.27231E+12	38.212	141.238	66.696

Figura 18. Plano de presiones.

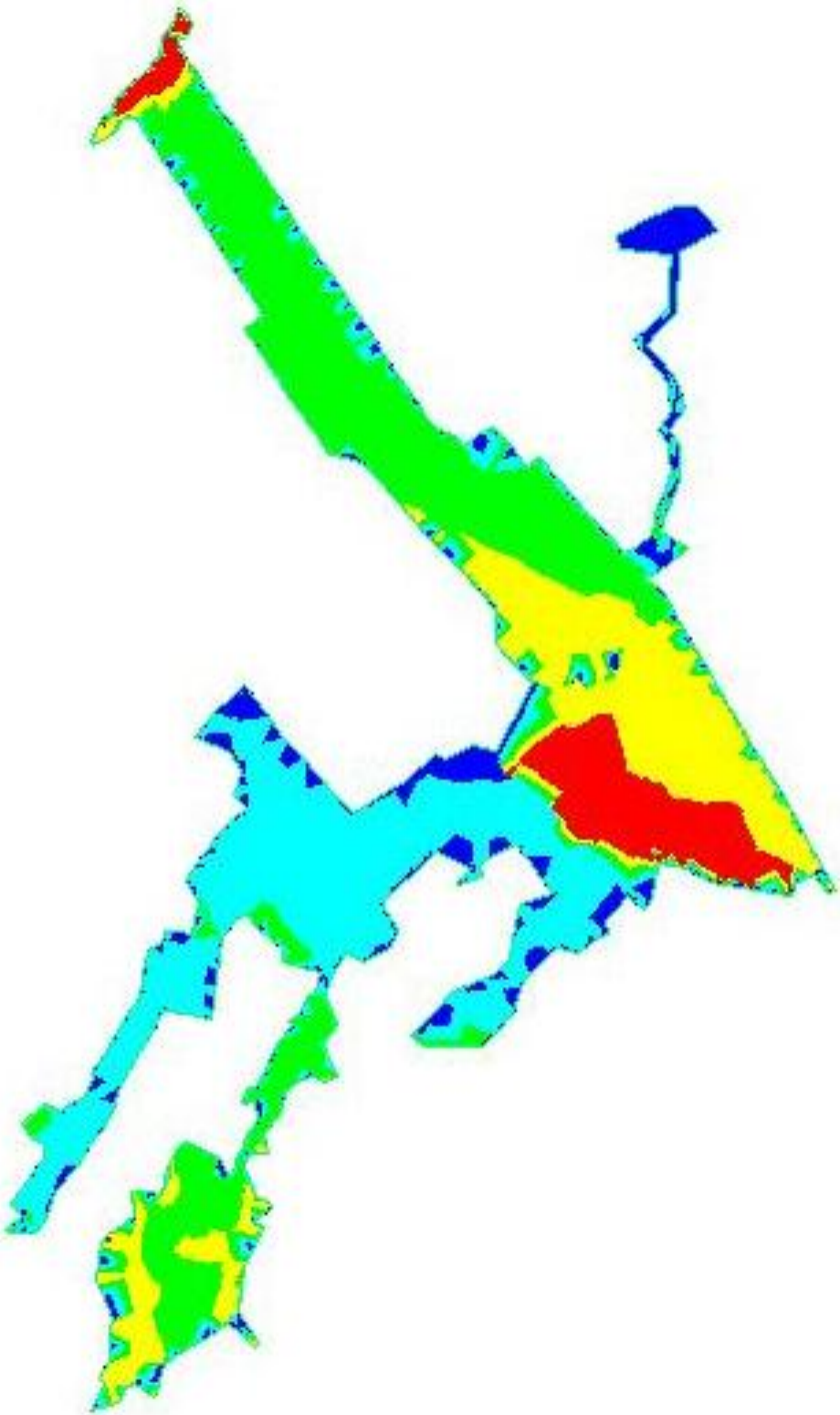
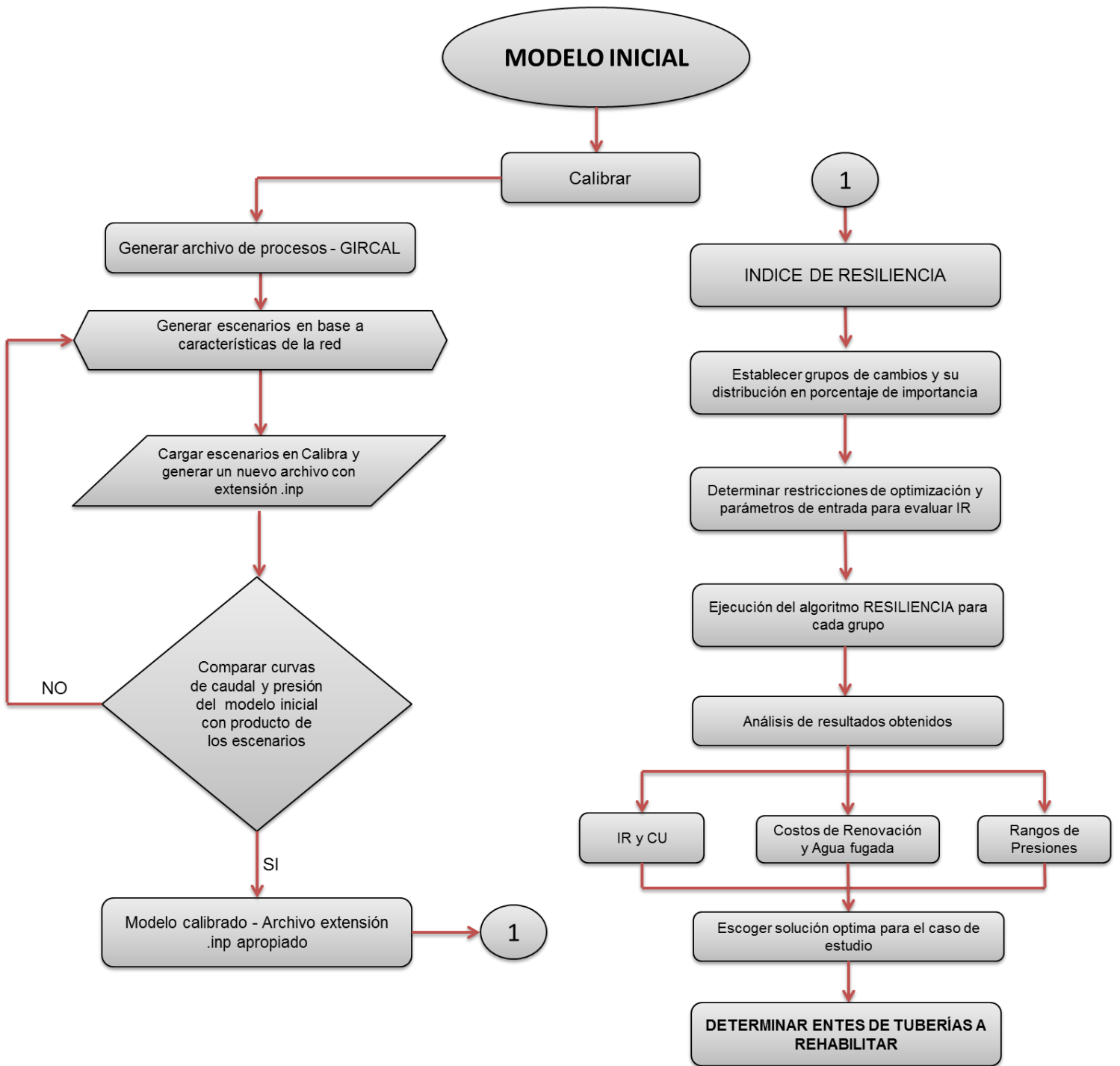


Figura 19. Diagrama de Metodología de Evaluación de IR



5. METODOLOGÍA PARA LA PRIORIZACIÓN POR CURVAS DE SUPERVIVENCIA

En una red de distribución intervienen diferentes factores, algunos de ellos característicos de sus propiedades, otros, factores externos que se relacionan con el medio donde la tubería se encuentra, algunos de estos son actividades antrópicas propias de la dinámica diaria del sector en el que se localizan, el tipo de tráfico de la zona, o las labores de reparación o adecuación que se realicen a la red misma.

En el caso de estudio, se idealizó la red de distribución asumiendo que ésta se encuentra en condiciones adecuadas en donde los factores externos no intervienen en el comportamiento de las tuberías, sino que los causales de daños son el desgaste natural de la red a lo largo de su vida útil y las presiones a las cuales se encuentra sometida la tubería.

5.1 ESTADOS DE CLASE

Teniendo en cuenta los aspectos anteriormente mencionados, para el análisis de supervivencia, se escogieron estados de clase de acuerdo a la gama de materiales disponibles en la red de distribución, tal como se muestra en las tablas 1 y 2; esta información se recopiló del catastro del AMB.

Tabla 5. Estados de condición.

ESTADO	CONDICION
1	Tuberías de Hierro Galvanizado expuestos a presiones altas
2	Tuberías de Hierro Fundido y Dúctil expuestos a presiones altas
3	Tuberías de Asbesto Cemento expuestos a presiones altas
4	Tuberías de PVC expuestos a presiones altas

5.2 PARAMETROS DE ENVEJECIMIENTO

De acuerdo a información suministrada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, fue posible determinar fechas de instalaciones de tuberías en los distritos analizados (Morro y Centro), al igual que la información de los daños presentados en esta red a lo largo de los años 2005 al 2011 (años con información más detallada y completa), que permitieron cuantificar los parámetros de Herz de las curvas de supervivencia para las cuatro estados de clase propuestos.

Para establecer los estados de clase anteriormente expuestos, se tomo como punto de partida, los materiales que se encontraron en el catastro de los distritos estudiados, y se estableció que aquellos tubos que se encontraran a una presión de 75 m.c.a. o mayores, se establecerían como las unidades más vulnerables a los daños.

Como no se cuenta con una muestra estadística representativa de inspecciones de la red de estudio, el método de calibración utilizado para la obtención de parámetros de envejecimiento fue el método de calibración por información de edad media. Estos parámetros se especifican en la siguiente tabla:

Tabla 6. Parámetros de condición para el envejecimiento.

Condición	Edad Media	s	C	P	A	B
1	53.46	17.9	17.66	0.67	299.650	0.159
2	51.32	20.4	10.52	0.4	271.048	0.137
3	47.77	21.67	10	0.75	81.892	0.117
4	58.63	22.74	13.15	0.66	297.622	0.125

s = Desviación estándar de la información.

P = Proporción de tubos que se esperan lleguen a la edad media.

A = Factor de envejecimiento

B = Factor de falla

C = Tiempo de resistencia en una condición dada (años).

5.3 CURVAS DE SUPERVIVENCIA

Determinados los parámetros de Herz influyentes en las funciones de supervivencia, se obtienen las graficas de las curvas de supervivencias para cada estado de clase.

Tabla 7. Datos curvas de supervivencia por material.

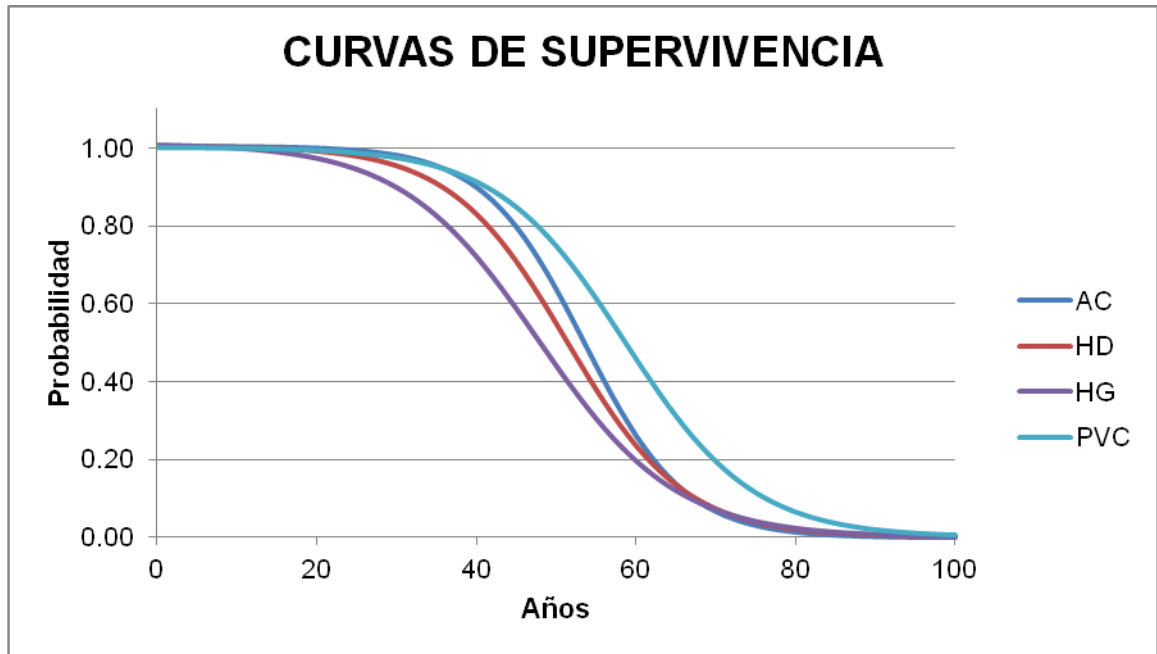
FUCION DE SUPERVIVENCIA				
t	F(t) AC	F(t)HD	F(t)HG	F(t) PVC
0	1.00	1.00	1.00	1.00
1	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1.00	1.00	1.00
3	1.00	1.00	1.00	1.00
4	1.00	1.00	1.00	1.00
5	1.00	1.00	1.00	1.00
6	1.00	1.00	1.00	1.00
7	1.00	1.00	1.00	1.00
8	1.00	1.00	1.00	1.00
9	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.00	1.00	1.00	1.00
11	1.00	1.00	1.00	1.00
12	1.00	1.00	1.00	1.00
13	1.00	1.00	0.99	1.00
14	1.00	1.00	0.99	1.00
15	1.00	1.00	0.99	1.00
16	1.00	1.00	0.99	1.00
17	1.00	0.99	0.98	1.00
18	1.00	0.99	0.98	1.00
19	1.00	0.99	0.98	1.00
20	1.00	0.99	0.97	1.00
21	1.00	0.99	0.97	0.99
22	1.00	0.99	0.96	0.99
23	1.00	0.98	0.96	0.99
24	0.99	0.98	0.95	0.99
25	0.99	0.98	0.95	0.99
26	0.99	0.97	0.94	0.99
27	0.99	0.97	0.93	0.98
28	0.99	0.96	0.92	0.98

29	0.98	0.96	0.91	0.98
30	0.98	0.95	0.90	0.98
31	0.98	0.95	0.89	0.97
32	0.97	0.94	0.87	0.97
33	0.97	0.93	0.86	0.96
34	0.96	0.92	0.84	0.96
35	0.95	0.91	0.83	0.95
36	0.94	0.89	0.81	0.95
37	0.94	0.88	0.79	0.94
38	0.92	0.86	0.77	0.93
39	0.91	0.85	0.74	0.92
40	0.90	0.83	0.72	0.91
41	0.88	0.81	0.70	0.90
42	0.86	0.79	0.67	0.89
43	0.84	0.76	0.64	0.88
44	0.82	0.73	0.62	0.86
45	0.80	0.71	0.59	0.85
46	0.77	0.68	0.56	0.83
47	0.74	0.65	0.53	0.81
48	0.71	0.61	0.50	0.79
49	0.67	0.58	0.47	0.77
50	0.64	0.55	0.44	0.75
51	0.60	0.51	0.41	0.72
52	0.56	0.48	0.38	0.70
53	0.52	0.44	0.36	0.67
54	0.48	0.41	0.33	0.64
55	0.44	0.38	0.30	0.61
56	0.40	0.35	0.28	0.58
57	0.36	0.32	0.26	0.55
58	0.33	0.29	0.24	0.52
59	0.29	0.26	0.22	0.49
60	0.26	0.23	0.20	0.46
61	0.23	0.21	0.18	0.43
62	0.20	0.19	0.16	0.40
63	0.18	0.17	0.15	0.37
64	0.16	0.15	0.13	0.34
65	0.14	0.13	0.12	0.31
66	0.12	0.12	0.11	0.29
67	0.10	0.10	0.10	0.26
68	0.09	0.09	0.09	0.24

69	0.08	0.08	0.08	0.22
70	0.07	0.07	0.07	0.19
71	0.06	0.06	0.06	0.18
72	0.05	0.06	0.06	0.16
73	0.04	0.05	0.05	0.14
74	0.04	0.04	0.05	0.13
75	0.03	0.04	0.04	0.11
76	0.03	0.03	0.04	0.10
77	0.02	0.03	0.03	0.09
78	0.02	0.03	0.03	0.08
79	0.02	0.02	0.03	0.07
80	0.01	0.02	0.02	0.06
81	0.01	0.02	0.02	0.06
82	0.01	0.01	0.02	0.05
83	0.01	0.01	0.02	0.05
84	0.01	0.01	0.01	0.04
85	0.01	0.01	0.01	0.04
86	0.01	0.01	0.01	0.03
87	0.00	0.01	0.01	0.03
88	0.00	0.01	0.01	0.02
89	0.00	0.01	0.01	0.02
90	0.00	0.00	0.01	0.02
91	0.00	0.00	0.01	0.02
92	0.00	0.00	0.01	0.02
93	0.00	0.00	0.01	0.01
94	0.00	0.00	0.00	0.01
95	0.00	0.00	0.00	0.01
96	0.00	0.00	0.00	0.01
97	0.00	0.00	0.00	0.01
98	0.00	0.00	0.00	0.01
99	0.00	0.00	0.00	0.01
100	0.00	0.00	0.00	0.01

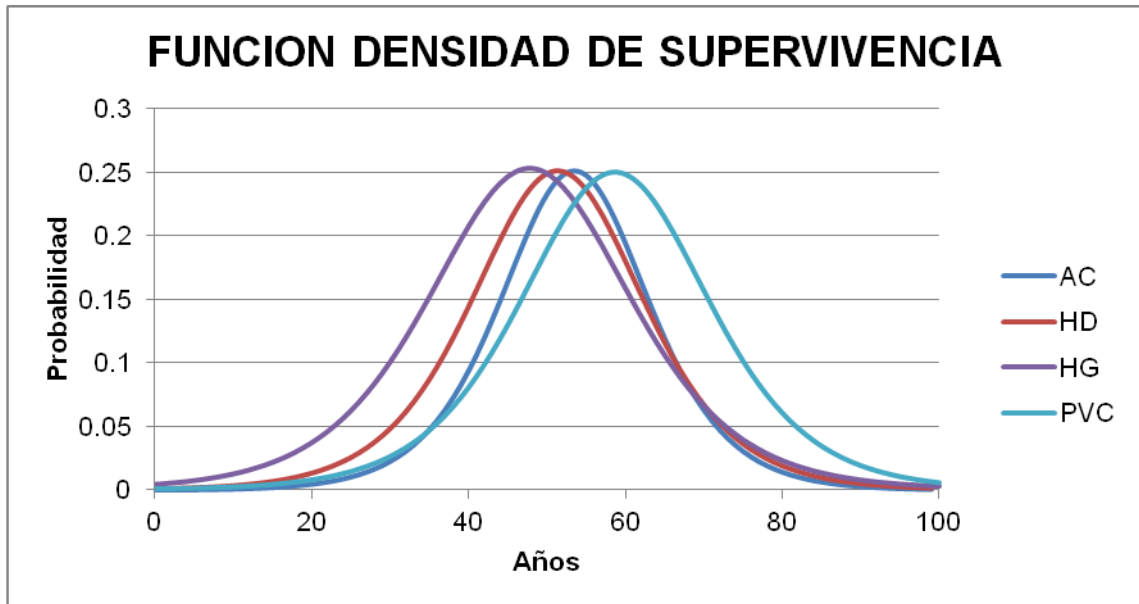
Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

Figura 20. Función de supervivencia para estados de clase.



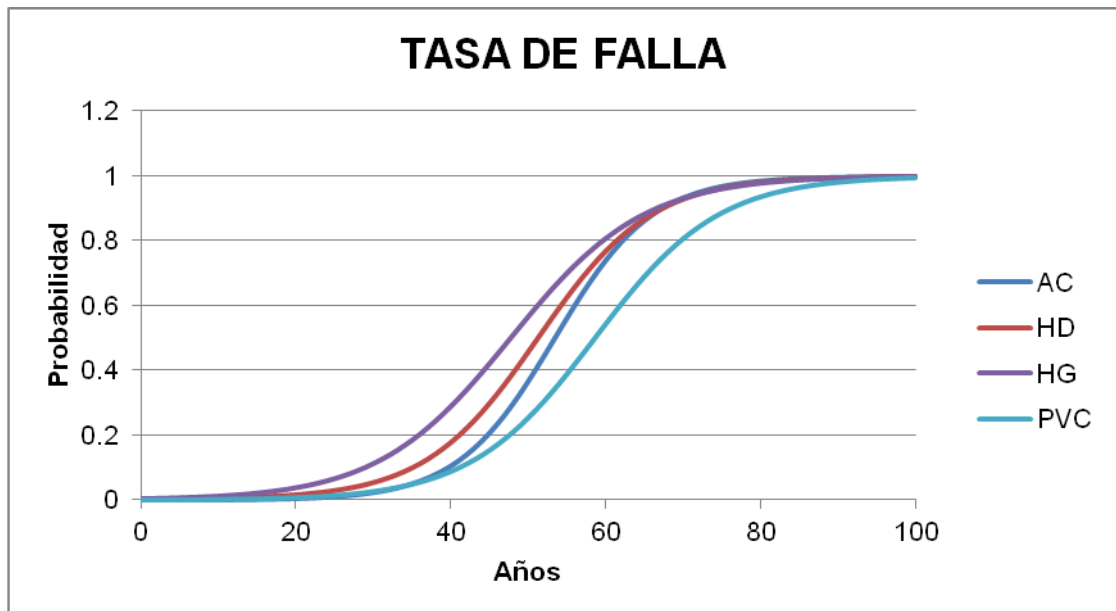
Tal como es posible observar en la *figura 20*, las gráficas de supervivencia describen un comportamiento exponencial, en donde de una forma coherente es determinable el deterioro de las tuberías según sus propiedades; tal cual, se describe que luego de algún tiempo de resistencia, los factores intervinientes en los mecanismos de falla actúan, afectando la condición inicial de la tubería y por supuesto la de toda la red en general.

Figura 21. Función densidad de supervivencia para estados de clase.



En la *figura 21*, se observa que las curvas de densidad de supervivencia, se asimilan a la forma de la campana de Gauss, en donde generalmente la mayor proporción de tuberías que se espera cambien su condición se presenta a la mitad de su edad de funcionamiento.

Figura 22. Tasa de falla para estados de clase.



Las curvas de supervivencia como se dice en el capítulo 3, permiten encontrar la probabilidad de supervivencia que existe para un estado de clase en un tiempo determinado, para este caso de estudio se clasificaron los entes de tubería por su material y la vida de servicio que tienen al presente año, sometidos a altas presiones como se muestra en el modelo calibrado, datos suministrados por el AMB, y de esta forma a cada ente se le asignó una probabilidad de supervivencia.

Posteriormente, se establecieron rangos de probabilidad con la intención de determinar la prioridad de los tubos a rehabilitar, se creó una tabla con los respectivos rangos de probabilidad y un mapa de la red con los resultados de la priorización encontrados.

El mapa, muestra una distribución de la tubería a lo largo del distrito, donde cada color especifica la cantidad de tubos que comparten el mismo rango de probabilidad de falla, tal mapa se muestra en la siguiente figura:

Figura 23. Mapa de distribución de tuberías en rangos de probabilidad de falla.

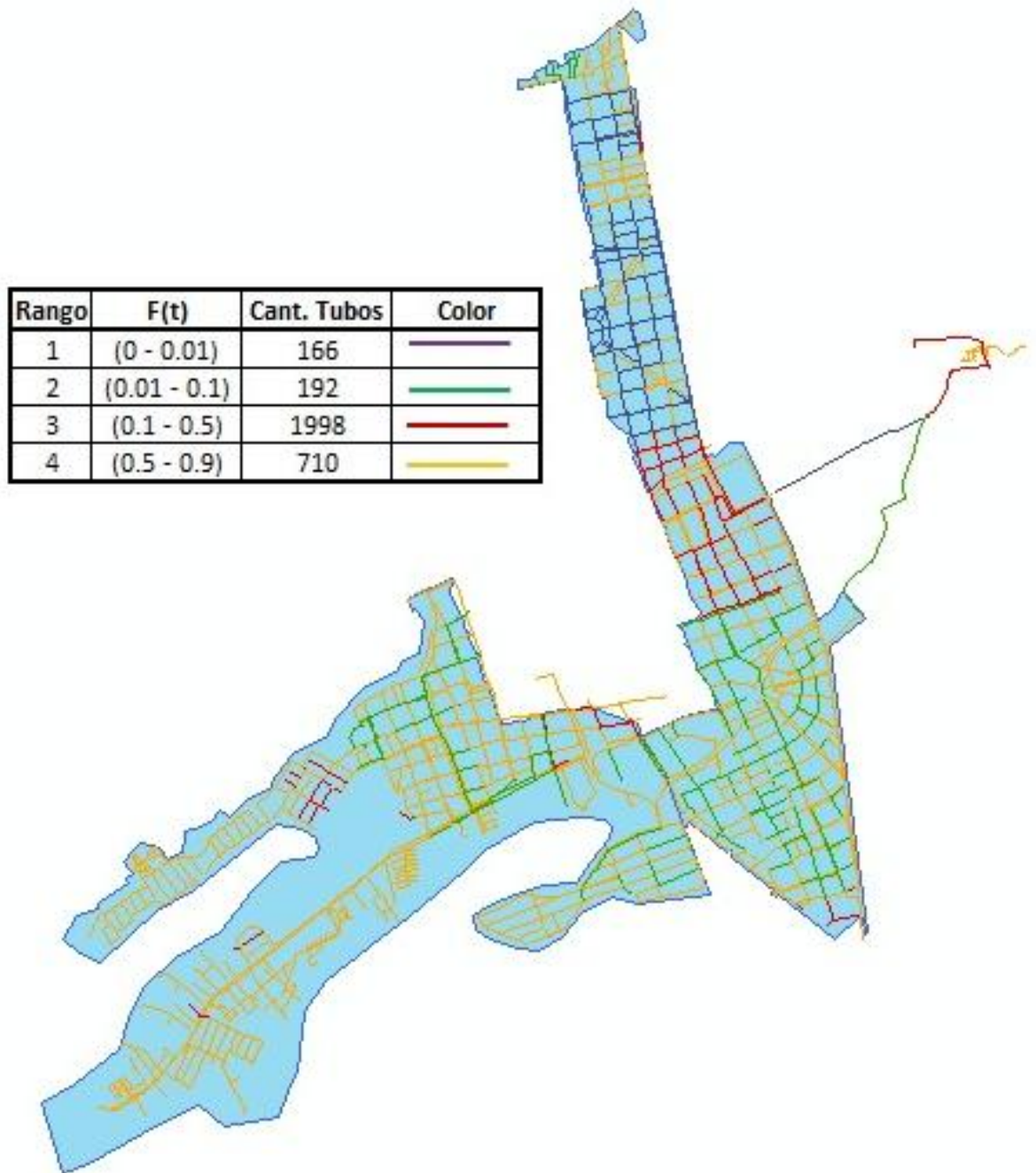
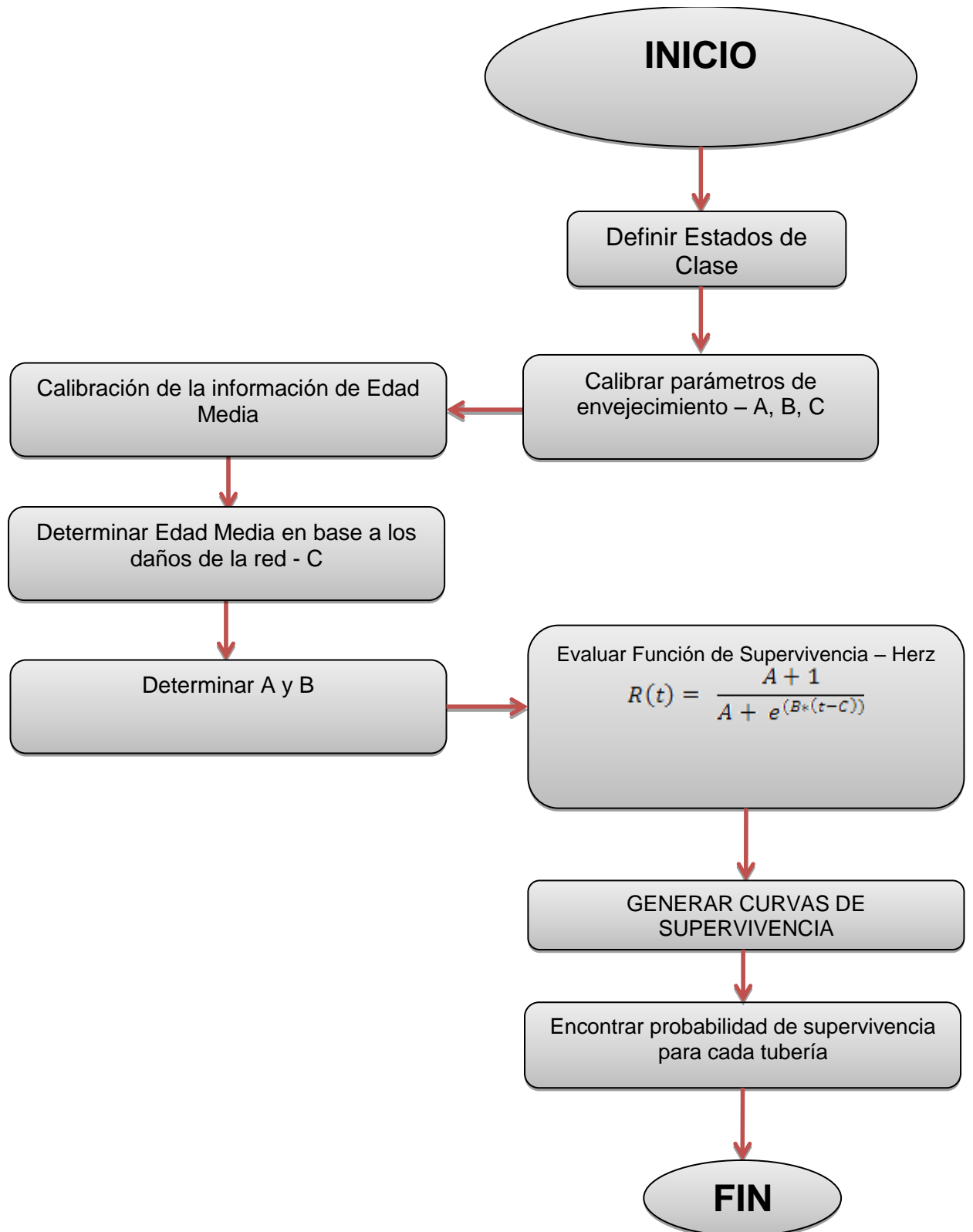


Figura 24. Diagrama Metodología Curvas de Supervivencia



6. CUADRO DE COMPARACION DE METODOLOGIAS DE PRIORIZACION DE LA RED DE ESTUDIO

	ÍNDICE DE RESILIENCIA	CURVAS DE SUPERVIVENCIA
CARACTERÍSTICAS GENERALES	<ul style="list-style-type: none"> • Método matemático basado en principios hidráulicos definido por Todini en el 2000 	<ul style="list-style-type: none"> • Método gráfico basado en principios estadísticos definidos por Herz en 1995
ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene en cuenta datos del estado actual de la red y un modelo hidráulico del mismo 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene en cuenta datos actuales e históricos y un catastro de la red
VARIABLES	<ul style="list-style-type: none"> • Caudal y Presión 	<ul style="list-style-type: none"> • Edad media, daños y material
REQUISITOS	<ul style="list-style-type: none"> • Calibración de la red 	<ul style="list-style-type: none"> • Calibración de las variables
RESULTADOS	<ul style="list-style-type: none"> • Entes de tubería a rehabilitar • Nuevos diámetros de tubería • Mejora en las características hidráulicas de la red • Plano óptimo de presiones de la red 	<ul style="list-style-type: none"> • Entes de tubería a rehabilitar • Curvas de Supervivencia • Probabilidad de supervivencia y probabilidad de falla • Plano de la red con distribución de rangos de probabilidad

CONCLUSIONES

- Para la obtención de un modelo hidráulico que se asemeje lo más posible a la realidad de la situación presentada, es necesario contar con información clasificada y confiable para alcanzar una calibración adecuada para la red de distribución.
- Un modelo calibrado permite obtener resultados más confiables en los procesos de mejoramiento hidráulico de la red, y así poder realizar los respectivos análisis y estudios que se requieran en la red de distribución calibrada.
- El Índice de Resiliencia (IR) al igual que el Coeficiente de uniformidad (CU) en la red, mejoran sustancialmente con el cambio de algunos entes de tubería a diámetros mayores cuando la importancia que se le da al CU es mayor al 50% en la función multiobjetivo utilizada en el análisis de la información suministrada.

Para este caso en particular se determinó que para el caso en el que se tienen 60 cambios y una importancia para el IR del 20% es el más adecuado para la red de distribución, siendo los 60 cambios mencionados un 1% del total de tuberías presentadas en los distritos de análisis, y con tan solo esta proporción de tuberías reemplazadas, el índice de resiliencia, y el coeficiente de uniformidad, mejoran aproximadamente un 5% con respecto a la condición inicial.

- El tipo de material de un ente de tubería es un factor preponderante que permite clasificar la red y así determinar la probabilidad que esta tenga a fallar teniendo en cuenta un estado de condiciones ideales para la red de distribución, debido a las propiedades del material que componen la tubería, la vida de servicio varia una con respecto a otra, ayudando así registros históricos a determinar los parámetros de envejecimientos de cada uno respectivamente y posibilitando la obtención de probabilidades de supervivencia de las unidades de tubería que componen la red de distribución de agua de los sectores en estudio.
- A pesar de que se busca priorizar la rehabilitación de tuberías en una misma red de distribución, al utilizar las metodologías planteadas a lo largo de este proyecto, el resultado de entes a cambiar no coinciden; y esto se debe al fin por el cual se quiere hacer el cambio; el índice de resiliencia busca optimizar la red mejorando las variables hidráulicas, en cambio, curvas de supervivencia establece una probabilidad de falla por servicio de la tubería.

RECOMENDACIONES

- En el uso del análisis de curvas de supervivencia, contar con más información de la red, en donde se pueda determinar un estado más específico de la condición en la que se encuentran durante su funcionamiento, para así poder hacer una mejor clasificación de la información y asegurar la obtención de resultados con mayor grado de confiabilidad.
- Con los resultados obtenidos en base a ambas metodologías estudiadas a lo largo del proyecto, la información contenida y su clasificación, el uso de la metodología de Índice de Resiliencia, ya que esta metodología, nos especifica una menor cantidad de entes de tubería a cambiar, lo cual resulta económicamente más factible, también contando con el hecho de que esta metodología se puede considerar como un método de mantenimiento preventivo evitando posibles daños y de mejorando sustancialmente el estado de la red y sus propiedades hidráulicas.

BIBLIOGRAFIA

ARAQUE, Diego. Optimización de redes de acueducto con el fin de unificar el estado de presiones. Bogotá, 2006, 53p. Trabajo de grado (maestría en ingeniería). Universidad de los Andes.

ARDILA, Fenix y BOHORQUEZ, Yurani. Propuesta metodología para la calibración de redes de distribución del distrito Malpaso – Cañanveral del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga y estimación del Índice del agua no contabilizada. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. Agosto de 2011.

CALIBRA 2006, Manual de Usuario, Centro de investigaciones en Acueductos y Alcantarillados, Universidad de los Andes, Colombia.

EPANET 2.0, Manual de Usuario en Español, traducido por Fernando Martínez Alzamora, Universidad Politécnica de Valencia, España.

LARA, Susana. Efecto del índice de agua no contabilizada en las tarifas para acueductos medianos y pequeños en Colombia. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Mayo 2004.

North American Society for Trenchless Technology (NASTT) NO-DIG 2005. EVALUATING PIPELINE REINVESTMENT NEEDS & GASB 34. Orlando, Florida, April 24-27, 2005.

POSADA, John. Método para priorizar la inspección de redes de alcantarillado. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil. Bogotá 2007.

SALDARRIAGA, Juan. Esqueletización en redes de distribución utilizando los conceptos de resiliencia y potencia unitaria. Bogotá, 2010, 13p. Ponencia XIX Seminario nacional de hidráulica e hidrología. Universidad de los Andes.

SALDRARRIAGA, J.G. y SALAS, D.E. Calibración de redes de distribución de agua potable bajo un ambiente de fugas. Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de Recursos Hídricos. Universidad de Los Andes.

SOLANO, Hernando. Análisis de supervivencia en fiabilidad. Predicción en condiciones de alta censura y truncamiento: el caso de las redes de suministro de agua potable. Universidad Politécnica de Valencia, España. Departamento de Estadística e Investigación Operativa Aplicadas y Calidad. Valencia, Octubre de 2008.

TORRES, Sergio Andrés. Optimización del índice de resiliencia y uniformización de la presión como criterios para renovar tuberías en redes de distribución de acueductos. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. Agosto de 2011.

XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Rehabilitación Priorizada de Redes de Distribución Utilizando Potencia Disipada. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Bogotá, 2008.

ANEXOS

ANEXO A. Escenario de calibración óptimo

Tabla. ESCENARIO DE CALIBRACION OPTIMO			
GRUPO	PARAMETRO	ACCION	FACTOR
NodosEstrato_1	DEMANDA	MULTIPLICAR	0.6
NodosEstrato_2	DEMANDA	MULTIPLICAR	0.6
NodosEstrato_3	DEMANDA	MULTIPLICAR	0.7
NodosEstrato_4	DEMANDA	MULTIPLICAR	0.7
TuberiaAC_0.5	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaAC_1.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaAC_1.25	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaAC_1.5	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaAC_10	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaAC_12	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaAC_14	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaAC_16	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaAC_2.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaAC_2.5	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaAC_20	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaAC_3.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaAC_4.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaAC_6.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaAC_8.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
Tuberiadiametro_0.50	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
Tuberiadiametro_1.00	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
Tuberiadiametro_1.25	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
Tuberiadiametro_1.50	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
Tuberiadiametro_10.00	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
Tuberiadiametro_12.00	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.9
Tuberiadiametro_14.00	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
Tuberiadiametro_16.00	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
Tuberiadiametro_2.00	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.95
Tuberiadiametro_2.50	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.8
Tuberiadiametro_20.00	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.8
Tuberiadiametro_3.00	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.8
Tuberiadiametro_4.00	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.95
Tuberiadiametro_6.00	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.8

Tuberiadiametro_8.00	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.8
TuberiaEdad_1	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	0.75
TuberiaEdad_10	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	0.72
TuberiaEdad_12	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	0.72
TuberiaEdad_14	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	0.72
TuberiaEdad_16	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	0.65
TuberiaEdad_2	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	0.75
TuberiaEdad_20	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	0.65
TuberiaEdad_3	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	0.73
TuberiaEdad_4	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	0.73
TuberiaEdad_6	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	0.65
TuberiaEdad_8	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	0.65
TuberiaGRP_0.5	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.9
TuberiaGRP_1.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.9
TuberiaGRP_1.25	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.9
TuberiaGRP_1.5	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.9
TuberiaGRP_10	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.9
TuberiaGRP_12	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.9
TuberiaGRP_14	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.85
TuberiaGRP_16	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.85
TuberiaGRP_2.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.85
TuberiaGRP_2.5	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.85
TuberiaGRP_20	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaGRP_3.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaGRP_4.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.7
TuberiaGRP_6.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.7
TuberiaGRP_8.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.7
TuberiaHD_0.5	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.7
TuberiaHD_1.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHD_1.25	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHD_1.5	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHD_10	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHD_12	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHD_14	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHD_16	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHD_2.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHD_2.5	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHD_20	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHD_3.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHD_4.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1

TuberiaHD_6.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHD_8.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHF_0.5	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHF_1.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHF_1.25	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHF_1.5	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHF_10	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHF_12	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHF_14	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHF_16	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHF_2.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHF_2.5	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHF_20	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHF_3.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHF_4.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHF_6.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHF_8.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHG_0.5	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHG_1.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHG_1.25	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHG_1.5	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHG_10	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHG_12	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaHG_14	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.98
TuberiaHG_16	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.98
TuberiaHG_2.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.98
TuberiaHG_2.5	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.98
TuberiaHG_20	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.98
TuberiaHG_3.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.98
TuberiaHG_4.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.98
TuberiaHG_6.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.98
TuberiaHG_8.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.98
TuberiaPVC_0.5	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaPVC_1.0	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaPVC_1.25	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaPVC_1.5	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaPVC_10	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaPVC_12	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaPVC_14	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1
TuberiaPVC_16	DIAMETRO	MULTIPLICAR	1

Figura 1. Presión en nodo vf_11907

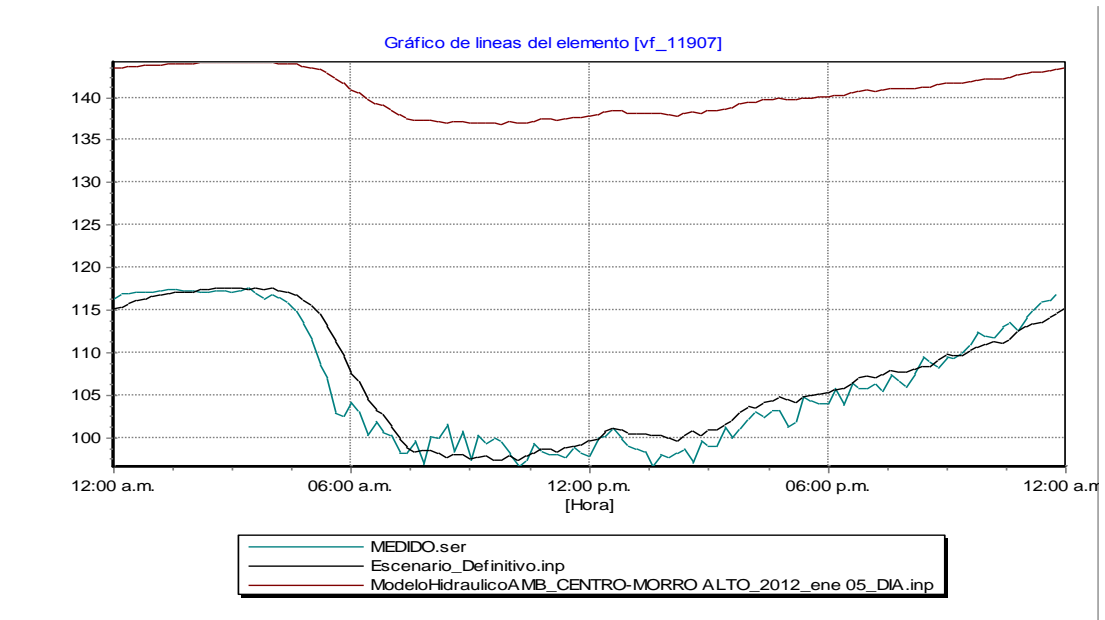


Figura 2. Presión en nodo vf_10285

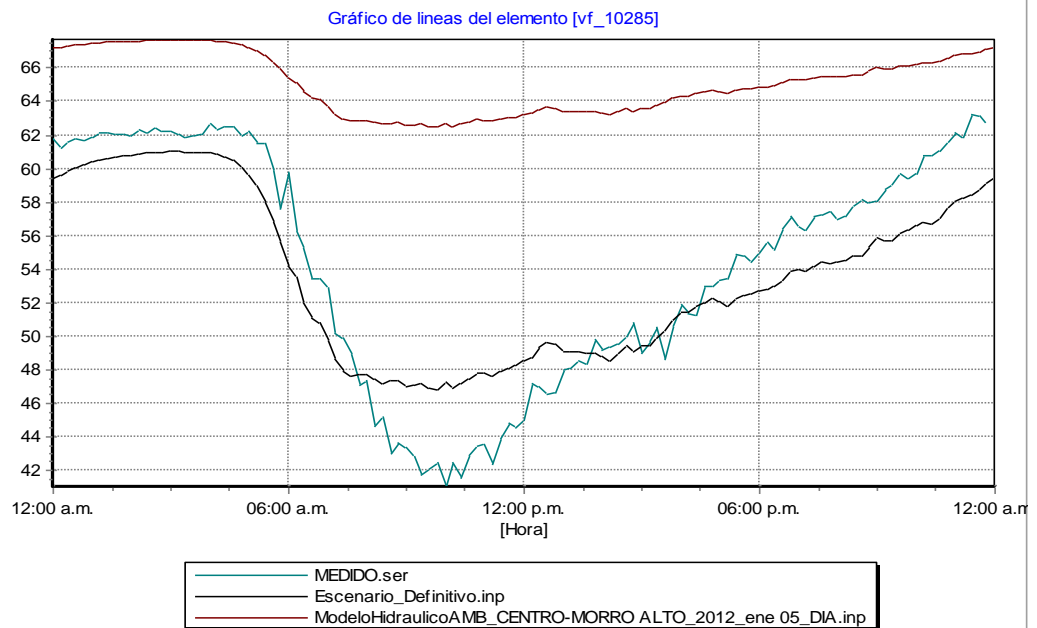


Figura 3. Presión en nodo vf_20019

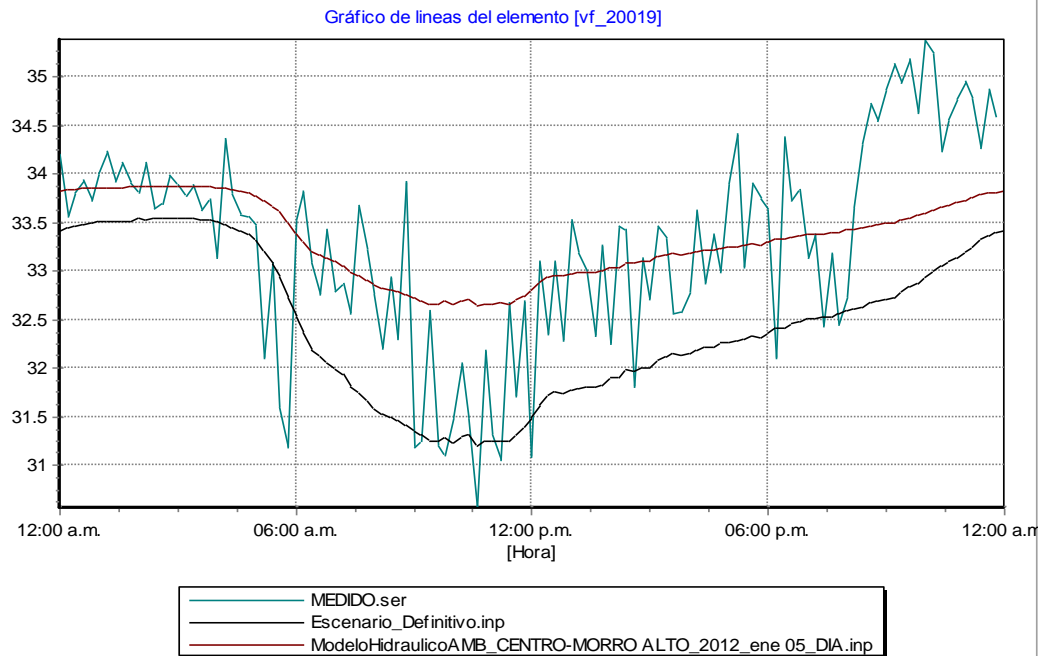


Figura 4. Presión en nodo vf_24617

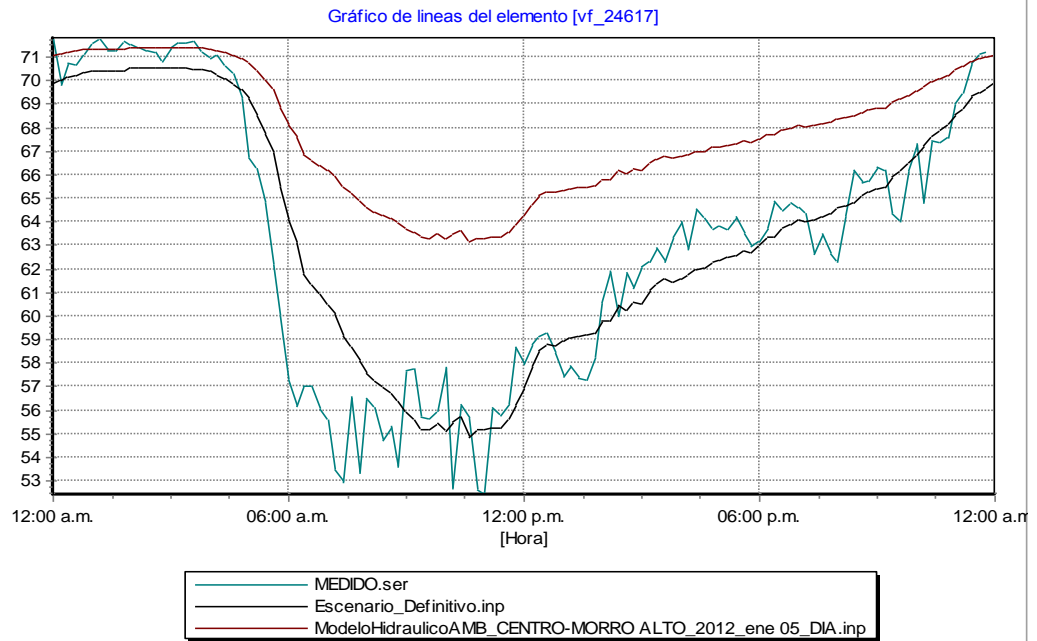


Figura 5. Presión en nodo 21958

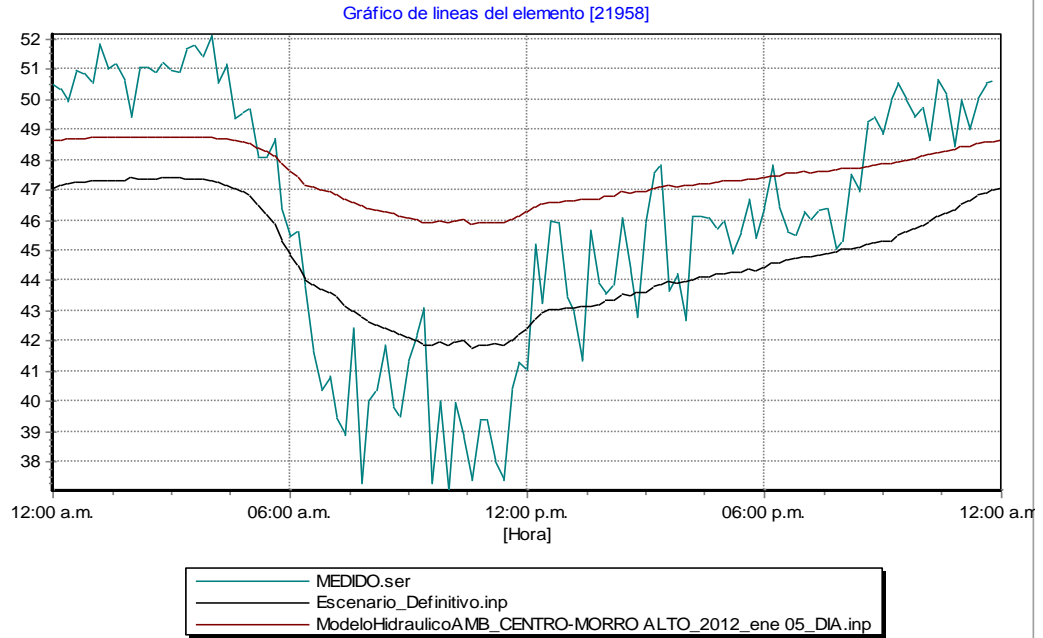


Figura 6. Presión en nodo vf_21958

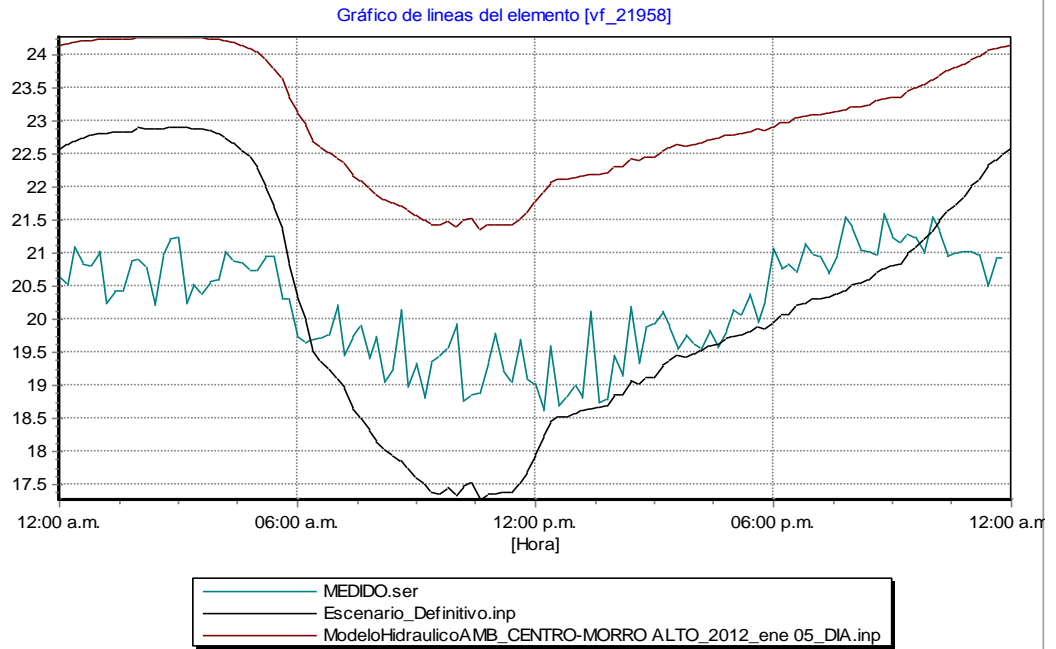


Figura 7. Presión en nodo 24790

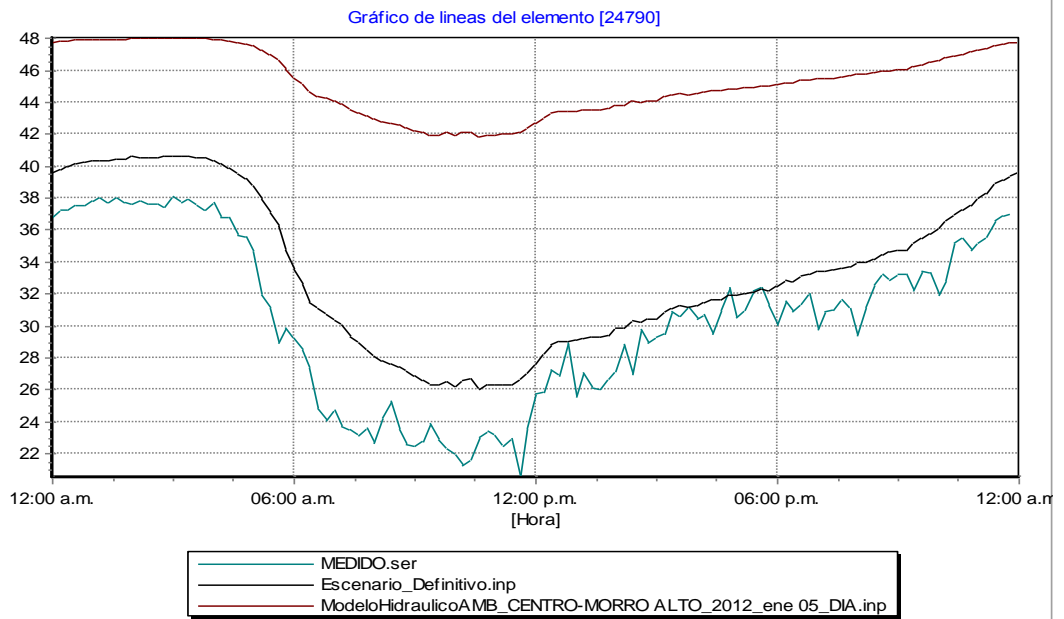
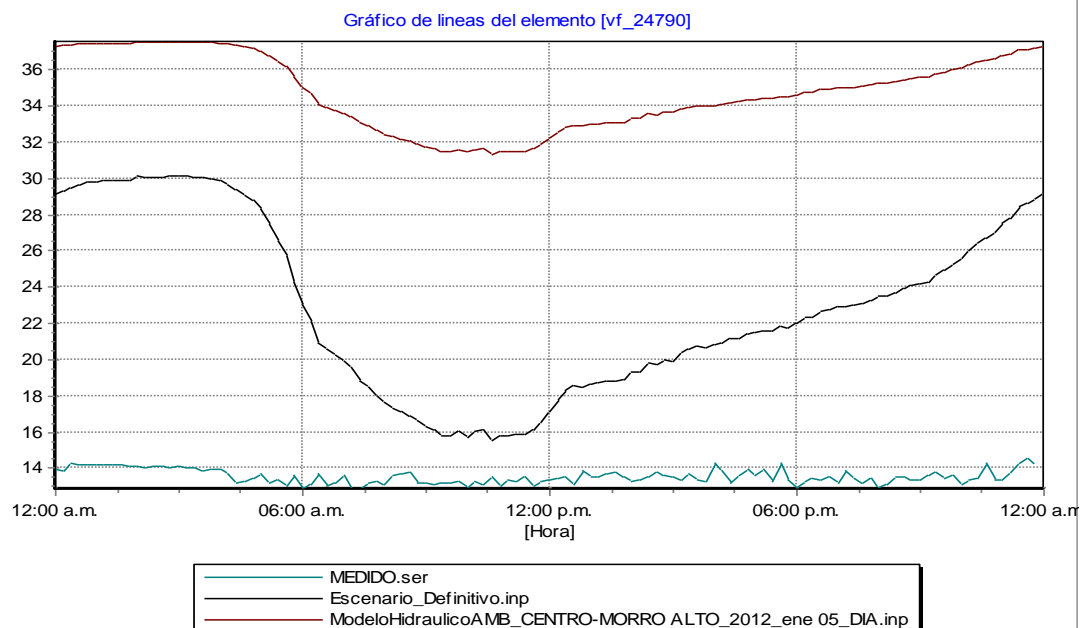


Figura 8. Presión en nodo vf_24790



ANEXO C. Datos de vida de las tuberías. Fuente AMB

Tabla 1. Hierro Galvanizado

ID_Tuberia	Fecha Inst.	Fecha Daño	Presión	Edad
28979	08/11/1939	09/01/2008	78.47	68.2
23239	18/04/1937	21/04/2008	80.44	71.1
19040	19/08/1952	03/02/2008	77.48	55.5
29789	02/08/1950	08/02/2008	96.02	57.6
30077	06/01/1950	24/07/2008	75.59	58.6
30260	02/08/1950	24/07/2008	110.51	58
30040	02/01/1968	07/10/2008	75.59	40.8
30042	06/01/1950	08/10/2008	75.67	58.8
26343	17/04/1939	09/12/2008	77.37	69.7
47913	06/06/1950	05/02/2009	94.38	58.7
34612	29/07/1965	12/02/2009	76.33	43.6
34612	29/07/1965	12/02/2009	76.33	43.6
31911	06/06/1950	27/02/2009	110.96	58.8
26217	18/04/1937	29/01/2009	77.37	71.8
29526	02/01/1968	24/01/2009	106.64	41.1
17408	02/08/1950	18/01/2009	107.65	58.5

17796	18/04/1937	20/02/2009	80.44	71.9
17796	18/04/1937	19/02/2009	80.44	71.9
29571	02/08/1950	16/02/2009	95.18	58.6
29571	02/08/1950	18/04/2009	95.18	58.8
28992	08/11/1939	13/05/2009	80.44	69.6
29705	02/08/1950	27/05/2009	99.01	58.9
30033	02/01/1968	02/05/2009	81.53	41.4
30033	02/01/1968	03/05/2009	81.53	41.4
30306	02/08/1950	12/05/2009	100.92	58.8
23374	18/04/1937	21/04/2009	80.44	72.1
26215	18/04/1937	01/05/2009	77.37	72.1
17408	02/08/1950	22/06/2009	107.65	58.9
23250	18/04/1937	21/07/2009	80.44	72.3
23388	14/01/1999	19/07/2009	80.44	10.5
26313	08/11/1939	01/07/2009	77.37	69.7
26209	02/01/1984	15/06/2009	77.37	25.5
30236	18/05/1999	08/06/2009	83.47	10.1
30306	02/08/1950	04/06/2009	100.92	58.9
38157	08/11/1939	03/06/2009	110.97	69.6
47943	02/08/1950	19/06/2009	102.91	58.9
47913	06/06/1950	01/12/2010	94.38	60.5
53152	28/01/1950	13/07/2010	77.36	60.5
32137	28/01/1950	29/06/2010	97.37	60.5
47913	06/06/1950	23/06/2010	94.38	60.1
34761	02/08/1950	06/05/2010	110.97	59.8
32137	28/01/1950	25/11/2010	97.37	60.9
34674	29/07/1965	18/11/2010	78.34	45.3
17719	17/04/1939	05/08/2010	80.44	71.4
30077	06/01/1950	28/08/2010	75.59	60.7
30260	02/08/1950	02/08/2010	110.51	60
52447	02/08/1950	23/08/2010	100.77	60.1
17325	06/01/1950	03/12/2010	90.35	60.9
17325	06/01/1950	04/12/2010	90.35	61
17325	06/01/1950	12/12/2010	90.35	61
26233	18/04/1937	02/03/2010	77.37	72.9
29705	02/08/1950	06/12/2010	99.01	60.4
29526	02/01/1968	19/07/2010	106.64	42.6
30044	02/01/1968	19/07/2010	84.43	42.6
47943	02/08/1950	06/07/2010	102.91	60
52434	02/08/1950	06/07/2010	94.93	60

19041	19/08/1952	28/06/2010	107.29	57.9
17303	02/01/1968	18/05/2010	75.77	42.4
28309	17/04/1939	22/05/2010	126.32	71.1
52434	02/08/1950	21/05/2010	94.93	59.8
28297	17/04/1939	01/11/2010	151.73	71.6
30044	02/01/1968	07/11/2010	84.43	42.9
19054	19/08/1952	14/09/2010	80.41	58.1
38346	08/10/2000	09/11/2010	110.97	10.1
17325	06/01/1950	06/09/2010	90.35	60.7
29705	02/08/1950	08/10/2010	99.01	60.2
29705	02/08/1950	20/10/2010	99.01	60.3
17303	02/01/1968	14/09/2010	75.77	42.7
26209	02/01/1984	04/09/2010	77.37	26.7
34778	02/01/1984	01/09/2010	110.97	26.7
49458	02/08/1950	12/09/2010	87.23	60.2
25730	07/09/1999	07/01/2011	77.37	11.3
38301	01/01/1999	27/04/2011	110.97	12.3
29705	02/08/1950	05/04/2011	99.01	60.7
29519	02/01/1968	31/05/2011	106.64	43.4
30077	06/01/1950	30/05/2011	75.59	61.4
29519	02/01/1968	31/05/2011	106.64	43.4
30077	06/01/1950	30/05/2011	75.59	61.4
17386	02/08/1950	11/07/2011	91.39	61
55025	19/08/1952	05/07/2011	107.64	58.9
22659	08/10/2000	15/11/2011	75.59	11.1
30021	08/10/2000	16/11/2011	75.59	11.1
29519	02/01/1968	31/05/2011	106.64	43.4
30077	06/01/1950	30/05/2011	75.59	61.4
29519	02/01/1968	31/05/2011	106.64	43.4
30077	06/01/1950	30/05/2011	75.59	61.4
17386	02/08/1950	11/07/2011	91.39	61
55025	19/08/1952	05/07/2011	107.64	58.9
22659	08/10/2000	15/11/2011	75.59	11.1
30021	08/10/2000	16/11/2011	75.59	11.1
30021	08/10/2000	16/11/2011	75.59	11.1
38392	10/01/2003	21/11/2011	110.97	8.9
29519	02/01/1968	31/05/2011	106.64	43.4
30077	06/01/1950	30/05/2011	75.59	61.4
17386	02/08/1950	11/07/2011	91.39	61
55025	19/08/1952	05/07/2011	107.64	58.9

56744	30/08/2004	06/07/2011	107.64	6.9
51469	30/01/2008	16/08/2011	91.39	3.5
56739	30/08/2004	02/08/2011	107.64	6.9
22659	08/10/2000	15/11/2011	75.59	11.1
30021	08/10/2000	16/11/2011	75.59	11.1
38392	10/01/2003	21/11/2011	110.97	8.9
30077	06/01/1950	30/05/2011	75.59	61.4
29519	02/01/1968	31/05/2011	106.64	43.4
30077	06/01/1950	30/05/2011	75.59	61.4
17386	02/08/1950	11/07/2011	91.39	61
55025	19/08/1952	05/07/2011	107.64	58.9
56744	30/08/2004	06/07/2011	107.64	6.9
51469	30/01/2008	16/08/2011	91.39	3.5
56739	30/08/2004	02/08/2011	107.64	6.9
22659	08/10/2000	15/11/2011	75.59	11.1
28131	18/04/1937	08/11/2011	80.44	74.6
30021	08/10/2000	16/11/2011	75.59	11.1
38392	10/01/2003	21/11/2011	110.97	8.9

Tabla 2. Hierro Dúctil y Hierro Fundido

ID_Tuberia	Fecha Inst.	Fecha Daño	Presión	Edad
52104	30/03/2008	15/07/2010	77.36	2.3
29598	02/08/1950	01/01/2008	105.66	57.5
29477	02/08/1950	13/02/2008	101.78	57.6
37864	08/10/2000	07/03/2008	110.97	7.4
30105	06/01/1950	22/08/2008	88.48	58.7
29460	04/12/1950	04/03/2009	80.44	58.3
29842	12/10/1950	05/03/2009	77.54	58.4
29460	04/12/1950	04/02/2009	80.44	58.2
29460	04/12/1950	02/02/2009	80.44	58.2
23505	08/10/2000	16/06/2009	105.41	8.7
49497	02/08/1950	13/05/2009	77.36	58.8
29598	02/08/1950	05/05/2009	105.66	58.8
29842	12/10/1950	14/05/2009	77.54	58.6
29477	02/08/1950	30/06/2009	101.78	59
30102	06/01/1950	27/07/2009	85.62	59.6
26283	18/04/1937	20/07/2010	77.37	73.3
29855	06/01/1950	03/05/2010	79.65	60.4
29855	06/01/1950	17/09/2010	79.65	60.7

30105	06/01/1950	09/09/2010	88.48	60.7
-------	------------	------------	-------	------

Tabla 3. Asbesto Cemento

ID_Tuberia	Fecha Daño	Fecha Inst.	Presión	Edad
32605	04/05/2008	28/01/1950	97.37	58.3
32121	16/06/2008	10/01/1950	97.37	58.5
32121	24/06/2008	10/01/1950	97.37	58.5
16688	23/07/2008	10/01/1950	97.37	58.6
33332	20/08/2008	24/01/1962	110.97	46.6
33327	28/12/2008	12/10/1999	110.97	9.2
31136	21/02/2008	02/08/1950	102.35	57.6
39272	10/02/2008	14/01/1960	110.97	48.1
28296	23/03/2008	17/04/1939	126.32	69
29734	25/06/2008	10/01/2003	75.59	5.5
29531	03/07/2008	02/01/1968	106.64	40.5
38389	23/08/2008	02/01/1968	110.97	40.7
29734	08/09/2008	10/01/2003	75.59	5.7
39272	09/09/2008	14/01/1960	110.97	48.7
39162	04/10/2008	06/01/1950	110.97	58.8
32376	14/01/2009	28/01/1950	97.37	59
32759	03/01/2009	28/01/1950	97.37	59
16688	29/04/2009	10/01/1950	97.37	59.3
49053	21/02/2009	24/01/1962	91.39	47.1
32080	30/04/2009	13/09/1952	97.37	56.7
32759	29/04/2009	28/01/1950	97.37	59.3
32759	01/05/2009	28/01/1950	97.37	59.3
33335	12/04/2009	24/01/1962	110.97	47.2
49026	01/06/2009	24/01/1962	77.36	47.4
32362	17/07/2009	03/01/1984	97.37	25.6
39272	19/01/2009	14/01/1960	110.97	49
23262	09/01/2009	18/04/1937	80.44	71.8
29734	28/03/2009	10/01/2003	75.59	6.2
30192	02/03/2009	02/08/1950	112.43	58.6
16769	20/02/2009	14/01/1960	101.32	49.1
49463	20/02/2009	02/08/1950	98.87	58.6
26041	28/04/2009	17/04/1939	77.37	70.1
29734	07/04/2009	10/01/2003	75.59	6.2
23494	12/06/2009	18/04/1937	80.44	72.2

23380	11/03/2009	08/11/1939	80.44	69.4
30304	24/03/2009	02/08/1950	98.86	58.7
29543	17/05/2009	02/01/1968	75.26	41.4
29585	18/05/2009	02/08/1950	99.11	58.8
30337	08/05/2009	02/01/1968	106.64	41.4
17323	12/05/2009	24/06/2001	106.7	7.9
23494	18/05/2009	18/04/1937	80.44	72.1
23494	19/05/2009	18/04/1937	80.44	72.1
26023	28/05/2009	18/04/1937	77.37	72.2
26066	17/05/2009	18/04/1937	77.37	72.1
28291	19/05/2009	31/10/2008	126.32	0.5
38401	04/05/2009	12/10/1950	110.97	58.6
39272	07/05/2009	14/01/1960	110.97	49.3
44353	21/05/2009	02/01/1968	110.97	41.4
39162	08/07/2009	06/01/1950	110.97	59.5
26081	03/07/2009	18/04/1937	77.37	72.3
29543	20/06/2009	02/01/1968	75.26	41.5
29971	02/06/2009	02/01/1968	75.75	41.4
29971	02/06/2009	02/01/1968	75.75	41.4
30152	10/06/2009	10/01/2003	75.56	6.4
49463	28/07/2009	02/08/1950	98.87	59
39162	02/06/2009	06/01/1950	110.97	59.4
30179	30/07/2009	12/10/1950	79.52	58.8
30179	27/07/2009	12/10/1950	79.52	58.8
32120	01/01/2010	10/01/1950	97.37	60
32376	01/03/2010	28/01/1950	97.37	60.1
32805	18/12/2010	28/01/1950	110.97	60.9
32220	24/07/2010	13/09/1952	97.37	57.9
33201	25/07/2010	24/01/1962	97.37	48.5
33335	03/07/2010	24/01/1962	110.97	48.5
33335	29/07/2010	24/01/1962	110.97	48.5
33342	29/07/2010	24/01/1962	110.97	48.5
16573	29/07/2010	24/01/1962	97.37	48.5
16573	29/07/2010	24/01/1962	97.37	48.5
16688	21/06/2010	10/01/1950	97.37	60.5
33198	27/05/2010	24/01/1962	97.37	48.4
33335	26/05/2010	24/01/1962	110.97	48.4
33299	14/10/2010	13/09/1952	97.37	58.1
30184	01/04/2010	02/08/1950	108.42	59.7
32026	08/04/2010	02/08/1950	100.12	59.7

29616	01/12/2010	02/01/1968	106.64	42.9
26225	27/08/2010	18/04/1937	77.37	73.4
51467	07/04/2010	30/07/2007	77.34	2.7
28972	30/08/2010	18/04/1937	78.47	73.4
28972	31/08/2010	18/04/1937	78.47	73.4
30184	16/08/2010	02/08/1950	108.42	60.1
37794	10/08/2010	18/04/1937	110.97	73.4
38401	30/08/2010	12/10/1950	110.97	59.9
39272	25/08/2010	14/01/1960	110.97	50.6
47933	08/08/2010	02/08/1950	97.37	60.1
53943	26/08/2010	04/12/1950	77.36	59.8
16769	01/10/2010	14/01/1960	101.32	50.7
29543	02/03/2010	02/01/1968	75.26	42.2
37783	29/12/2010	02/01/1984	110.97	27
28059	10/12/2010	17/04/1939	80.44	71.7
28296	02/12/2010	17/04/1939	126.32	71.7
28296	20/12/2010	17/04/1939	126.32	71.7
28296	07/12/2010	17/04/1939	126.32	71.7
52220	04/12/2010	02/01/1968	77.36	43
52769	03/12/2010	17/04/1939	77.36	71.7
52769	04/12/2010	17/04/1939	77.36	71.7
29554	23/12/2010	02/08/1950	110.51	60.4
29583	03/12/2010	02/01/1968	79.66	42.9
29703	07/12/2010	02/08/1950	97.08	60.4
32026	29/12/2010	02/08/1950	100.12	60.4
47933	03/12/2010	02/08/1950	97.37	60.4
49462	09/12/2010	02/08/1950	77.36	60.4
30192	02/01/2010	02/08/1950	112.43	59.5
39162	02/08/2010	06/01/1950	110.97	60.6
51377	02/05/2010	18/04/1937	77.36	73.1
30192	06/07/2010	02/08/1950	112.43	60
51542	09/07/2010	02/08/1950	77.36	60
52220	13/07/2010	02/01/1968	77.36	42.6
23494	14/06/2010	18/04/1937	80.44	73.2
26329	04/06/2010	17/04/1939	77.37	71.2
29585	15/06/2010	02/08/1950	99.11	59.9
30037	22/06/2010	06/01/1950	81.68	60.5
39162	21/06/2010	06/01/1950	110.97	60.5
39272	01/06/2010	14/01/1960	110.97	50.4
53943	01/06/2010	04/12/1950	77.36	59.5

30184	07/03/2010	02/08/1950	108.42	59.6
23398	19/05/2010	18/04/1937	80.44	73.1
47933	08/03/2010	02/08/1950	97.37	59.6
37783	25/05/2010	02/01/1984	110.97	26.4
39284	14/05/2010	02/08/1950	110.97	59.8
23237	06/11/2010	08/11/1939	80.44	71
25972	26/11/2010	02/01/1984	77.37	26.9
26225	10/11/2010	18/04/1937	77.37	73.6
28296	01/11/2010	17/04/1939	126.32	71.6
28296	14/11/2010	17/04/1939	126.32	71.6
29548	03/11/2010	02/01/1968	77.71	42.9
29703	29/11/2010	02/08/1950	97.08	60.4
30126	10/11/2010	02/08/1950	105.44	60.3
30184	29/11/2010	02/08/1950	108.42	60.4
28061	01/10/2010	17/04/1939	80.44	71.5
29521	28/10/2010	02/01/1968	106.64	42.8
19102	02/09/2010	18/04/1937	122.46	73.4
38401	16/11/2010	12/10/1950	110.97	60.1
52219	10/11/2010	02/01/1968	77.36	42.9
52220	03/11/2010	02/01/1968	77.36	42.9
19115	08/10/2010	02/01/1984	122.46	26.8
23237	27/10/2010	08/11/1939	80.44	71
26074	23/10/2010	18/04/1937	77.37	73.6
30192	17/10/2010	02/08/1950	112.43	60.2
37794	09/09/2010	18/04/1937	110.97	73.4
26041	13/01/2011	17/04/1939	77.37	71.8
38401	20/01/2011	12/10/1950	110.97	60.3
53852	01/02/2011	30/11/2009	76.53	1.2
26036	05/02/2011	17/04/1939	77.37	71.9
23494	27/03/2011	18/04/1937	80.44	74
16573	02/04/2011	24/01/1962	97.37	49.2
16574	24/04/2011	24/01/1962	97.37	49.3
29583	05/04/2011	02/01/1968	79.66	43.3
38399	11/04/2011	24/06/2001	110.97	9.8
49462	29/04/2011	02/08/1950	77.36	60.8
16568	27/05/2011	24/01/1962	97.37	49.4
33201	25/05/2011	24/01/1962	97.37	49.4
33335	30/05/2011	24/01/1962	110.97	49.4
30037	06/05/2011	06/01/1950	81.68	61.4
39162	03/05/2011	06/01/1950	110.97	61.4

16568	27/05/2011	24/01/1962	97.37	49.4
33201	25/05/2011	24/01/1962	97.37	49.4
33335	30/05/2011	24/01/1962	110.97	49.4
30037	06/05/2011	06/01/1950	81.68	61.4
39162	03/05/2011	06/01/1950	110.97	61.4
30192	15/07/2011	02/08/1950	112.43	61
30192	16/07/2011	02/08/1950	112.43	61
30192	29/07/2011	02/08/1950	112.43	61
30214	28/07/2011	18/05/1999	88.5	12.2
38401	27/07/2011	12/10/1950	110.97	60.8
19111	17/08/2011	02/01/1984	122.46	27.6
23494	27/08/2011	18/04/1937	80.44	74.4
23494	27/08/2011	18/04/1937	80.44	74.4
28988	15/08/2011	14/01/1999	80.44	12.6
37794	17/08/2011	18/04/1937	110.97	74.4
28316	03/11/2011	04/03/2003	151.73	8.7
39162	05/11/2011	06/01/1950	110.97	61.9

Tabla 4. PVC

ID_Tuberia	Fecha Daño	Fecha Inst.	Presión	Edad
26226	19/01/2011	18/04/1937	77.37	73.8
26228	29/01/2011	18/04/1937	77.37	73.8
26228	29/01/2010	18/04/1937	77.37	72.8
26230	07/01/2011	18/04/1937	77.37	73.8
28972	18/01/2011	18/04/1937	78.47	73.8
28972	25/01/2011	18/04/1937	78.47	73.8
29477	04/01/2011	02/08/1950	101.78	60.5
30105	02/01/2011	06/01/1950	88.48	61
30126	13/01/2011	02/08/1950	105.44	60.5
30126	15/01/2011	02/08/1950	105.44	60.5
32026	04/01/2011	02/08/1950	100.12	60.5
37783	03/01/2011	02/01/1984	110.97	27
26077	11/02/2011	18/04/1937	77.37	73.9
26077	10/02/2011	18/04/1937	77.37	73.9
26077	15/02/2011	18/04/1937	77.37	73.9
26077	16/02/2011	18/04/1937	77.37	73.9
29782	16/02/2011	12/10/1950	76.54	60.4
34778	03/02/2011	02/01/1984	110.97	27.1

37531	17/02/2011	17/04/1939	110.97	71.9
38154	03/02/2011	08/11/1939	110.97	71.3
37781	01/03/2011	18/04/1937	110.97	73.9
49462	24/03/2011	02/08/1950	77.36	60.7
26077	22/03/2011	18/04/1937	77.37	74
26077	24/03/2011	18/04/1937	77.37	74
26077	25/03/2011	18/04/1937	77.37	74
26077	26/03/2011	18/04/1937	77.37	74
26077	26/03/2011	18/04/1937	77.37	74
26077	29/03/2011	18/04/1937	77.37	74
26077	28/03/2011	18/04/1937	77.37	74
26077	26/03/2011	18/04/1937	77.37	74
26077	26/03/2011	18/04/1937	77.37	74
26077	30/03/2011	18/04/1937	77.37	74
26077	30/03/2011	18/04/1937	77.37	74
26077	30/03/2011	18/04/1937	77.37	74
26077	30/03/2011	18/04/1937	77.37	74
26077	25/03/2011	18/04/1937	77.37	74
30131	08/03/2011	02/08/1950	102.48	60.6
30131	28/03/2011	02/08/1950	102.48	60.7
51542	04/03/2011	02/08/1950	77.36	60.6
26007	12/04/2011	18/04/1937	77.37	74
26007	25/04/2011	18/04/1937	77.37	74.1
26077	01/04/2011	18/04/1937	77.37	74
26077	01/04/2011	18/04/1937	77.37	74
26077	06/04/2011	18/04/1937	77.37	74
26077	25/04/2011	18/04/1937	77.37	74.1
30126	08/04/2011	02/08/1950	105.44	60.7
32589	04/05/2011	10/01/1950	110.97	61.4
26041	11/05/2011	17/04/1939	77.37	72.1
26077	19/05/2011	18/04/1937	77.37	74.1
26209	02/05/2011	02/01/1984	77.37	27.3
26007	02/05/2011	18/04/1937	77.37	74.1
26007	02/05/2011	18/04/1937	77.37	74.1
26007	06/05/2011	18/04/1937	77.37	74.1
26007	13/05/2011	18/04/1937	77.37	74.1
26007	24/05/2011	18/04/1937	77.37	74.1
37526	28/05/2011	17/04/1939	110.97	72.2
49497	19/05/2011	02/08/1950	77.36	60.8
32589	04/05/2011	10/01/1950	110.97	61.4

26041	11/05/2011	17/04/1939	77.37	72.1
26077	19/05/2011	18/04/1937	77.37	74.1
26209	02/05/2011	02/01/1984	77.37	27.3
26007	02/05/2011	18/04/1937	77.37	74.1
26007	02/05/2011	18/04/1937	77.37	74.1
26007	06/05/2011	18/04/1937	77.37	74.1
26007	13/05/2011	18/04/1937	77.37	74.1
26007	24/05/2011	18/04/1937	77.37	74.1
37526	28/05/2011	17/04/1939	110.97	72.2
49497	19/05/2011	02/08/1950	77.36	60.8
32805	25/07/2011	28/01/1950	110.97	61.5
30126	24/07/2011	02/08/1950	105.44	61
26371	13/07/2011	18/04/1937	77.37	74.3
38401	28/07/2011	12/10/1950	110.97	60.8
42290	27/08/2011	02/01/1968	110.97	43.7
26316	10/08/2011	08/11/1939	77.37	71.8
26316	12/08/2011	08/11/1939	77.37	71.8
28972	28/11/2011	18/04/1937	78.47	74.7
28973	22/11/2011	17/04/1939	78.47	72.6
29477	22/11/2011	02/08/1950	101.78	61.3
26316	10/08/2011	08/11/1939	77.37	71.8
26316	12/08/2011	08/11/1939	77.37	71.8
28972	28/11/2011	18/04/1937	78.47	74.7
28973	22/11/2011	17/04/1939	78.47	72.6
29477	22/11/2011	02/08/1950	101.78	61.3
37526	28/05/2011	17/04/1939	110.97	72.2
49497	19/05/2011	02/08/1950	77.36	60.8
32749	18/07/2011	10/05/1999	110.97	12.2
32805	25/07/2011	28/01/1950	110.97	61.5
30126	24/07/2011	02/08/1950	105.44	61
26371	13/07/2011	18/04/1937	77.37	74.3
38401	28/07/2011	12/10/1950	110.97	60.8
52766	13/07/2011	01/01/1999	77.36	12.5
42290	27/08/2011	02/01/1968	110.97	43.7
25725	18/08/2011	07/09/1999	77.37	12
25726	19/08/2011	07/09/1999	77.37	12
26059	04/08/2011	14/01/1999	77.37	12.6
26059	24/08/2011	14/01/1999	77.37	12.6
26232	25/08/2011	14/01/1999	77.37	12.6
26316	10/08/2011	08/11/1939	77.37	71.8

26316	12/08/2011	08/11/1939	77.37	71.8
38303	21/11/2011	01/01/1999	110.97	12.9
26206	04/11/2011	01/01/1999	77.37	12.8
26206	09/11/2011	01/01/1999	77.37	12.9
26206	08/11/2011	01/01/1999	77.37	12.9
28972	28/11/2011	18/04/1937	78.47	74.7
28973	22/11/2011	17/04/1939	78.47	72.6
29477	22/11/2011	02/08/1950	101.78	61.3
38303	21/11/2011	01/01/1999	110.97	12.9
26206	04/11/2011	01/01/1999	77.37	12.8
26206	09/11/2011	01/01/1999	77.37	12.9
26206	08/11/2011	01/01/1999	77.37	12.9
28972	28/11/2011	18/04/1937	78.47	74.7
28973	22/11/2011	17/04/1939	78.47	72.6
29477	22/11/2011	02/08/1950	101.78	61.3
32920	02/11/2011	18/07/2000	110.97	11.3
38303	21/11/2011	01/01/1999	110.97	12.9
26206	04/11/2011	01/01/1999	77.37	12.8
26206	09/11/2011	01/01/1999	77.37	12.9