



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

Modelo de optimización para la estrategia de recambio de la red de agua potable de Aguas de Antofagasta S.A., mediante un análisis probabilístico de fallas históricas

Memoria de Título presentada por

Bastián Andrés Castro Vásquez

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesora Guía
Nieves Bastidas De Reyes

Profesor Correferente
Raúl Flores Audibert

AGOSTO, 2022



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TÍTULO DE LA TESIS:

Modelo de optimización para la estrategia de recambio de la red de agua potable de Aguas de Antofagasta S.A., mediante un análisis probabilístico de fallas históricas

AUTOR:

Bastián Andrés Castro Vásquez

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Raúl Flores Audibert:

Cristian Jiménez Paredes:

Valparaíso, Chile, Agosto del 2022

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA ESTRATEGIA DE RECAMBIO DE LA RED DE AGUA POTABLE DE AGUAS DE ANTOFAGASTA S.A., MEDIANTE UN ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE FALLAS HISTÓRICAS

Bastián Castro¹, Nieves Bastidas², Raúl Flores¹

1 Universidad Técnica Federico Santa María

2 Aguas de Antofagasta S.A.

Resumen

Esta memoria presenta un análisis requerido por la empresa Aguas de Antofagasta S.A., el cual ha permitido obtener el estado de las tuberías de la red de agua potable de la ciudad de Antofagasta, de manera que esta proporcione información acerca de ciertos lugares de las distintas matrices que necesitan un recambio de elementos.

El escaso registro que existe del comportamiento estructural de las tuberías no permite analizar físicamente qué sucede exactamente con los elementos, momentos previos a la ocurrencia de las distintas roturas, pero dada la fiscalización de la Superintendencia de Servicios Sanitarios, se tiene registro de ciertas características intrínsecas de los elementos. Por lo tanto, para caracterizar el estado actual de las tuberías se ha analizado estadísticamente a través de tres propiedades: material, edad y diámetro, especialmente mediante un modelo probabilístico, en donde el comportamiento de estas variables se obtiene con las funciones de distribución acumulada, generando un modelo que entregue la probabilidad de falla (de presentar rotura) de una tubería, dentro de un dominio de elementos previamente seleccionados. Esta probabilidad de falla condicionada es obtenida gracias al teorema de Bayes, el que permite obtener la probabilidad de que una tubería presente rotura dado que presenta ciertos rangos de valores de los predictores mencionados.

Por otro lado, mediante un modelo probabilístico univariado con enfoque bayesiano, se analiza el comportamiento de distintos indicadores de presión comparando estadísticamente qué tanto se diferencia la función de distribución acumulada asociada a las roturas, con la función de distribución acumulada asociado al comportamiento cotidiano de la presión en distintos sectores de la ciudad de Antofagasta, con la finalidad de escoger el indicador de presión que guarda mayor relación con las roturas de cada sector, y así obtener los valores de este que aumentan la probabilidad de presentar rotura en un futuro cercano.

Palabras claves: probabilidad de falla, función de distribución acumulada, teorema de Bayes.

Índice

1. Introducción	9
2. Objetivos	10
2.1. Objetivo General	10
2.2. Objetivos Específicos	10
3. Marco Teórico	11
3.1. Estudio de las Roturas de Tuberías	11
3.1.1. Edad / Año de instalación	12
3.1.2. Diámetro	14
3.1.3. Material	15
3.1.4. Presión	15
3.1.5. Otros factores influyentes	17
3.2. Modelos de Predicción	18
3.2.1. Modelos Físicos	18
3.2.2. Modelos Estadísticos	19
3.2.3. Modelos Bayesianos	21
4. Descripción de la Zona de Estudio	26
4.1. Descripción de la Red de Distribución de Agua Potable de Antofagasta	26
4.2. Sectorización de la Red de Distribución de Antofagasta	27
4.2.1. Zonas de Abastecimiento	27
4.2.2. Sectores de Presión	28
4.2.3. Cuarteles	30
4.3. Registro de Roturas de Tuberías	30
4.3.1. Continuidad del Servicio de Agua Potable	30
4.4. Reposición e Inversión	32
5. Metodología	34
5.1. Primera parte: Probabilidad de Falla mediante Propiedades Intrínsecas	34
5.1.1. Identificación de Zonas con Información y Período de Estudio	34
5.1.2. Selección de Variables Explicativas	36
5.1.3. Construcción del Modelo Bayesiano	36
5.1.4. Procedimiento de Validación	42
5.2. Segunda parte: Análisis de Presión	43
5.2.1. Obtención de Datos de Presión	44
5.2.2. Análisis de los Indicadores de Presión	44
5.2.3. Relación de Probabilidad	49
6. Tratamiento de Datos de Roturas	51
6.1. Probabilidad mediante Propiedades Intrínsecas	51
6.2. Análisis de Presión	53

7. Resultados y Análisis	55
7.1. Probabilidad de falla mediante varias variables	55
7.1.1. Análisis por Zona Crítica: Zona N°1	55
7.1.2. Análisis por Zona Crítica: Zona N°3	60
7.1.3. Análisis por Zona Crítica: Zona N°5	63
7.1.4. Análisis por Zona Crítica: Zona N°7	66
7.1.5. Procedimiento de Validación	69
7.1.6. Conclusiones	74
7.2. Análisis de Presión	77
7.2.1. Análisis de los Indicadores de Presión	77
7.2.2. Conclusiones	86
7.2.3. Relación de Probabilidad	88
8. Conclusiones Generales	93
9. Bibliografía	95
10. Anexo	97
10.1. Puntos de Control de Presión	97
10.2. PR0013001: Continuidad del Servicio de Agua Potable	97
10.3. Series de Presión de los Sectores de Presión Críticos	101
10.4. Datos de Tuberías de Zonas Críticas	104
10.5. Resultados	109

Índice de figuras

1. Distribución de roturas de tuberías por edad. Fuente: Hossein (2015)	13
2. Porcentaje de fallas por década de cada material de tubería instalado (Steel: Acero, DI: Hierro Dúctil, CSC: Cilindro de Acero Hormigón, CI: Hierro Fundido, AC: Asbesto Cemento). Fuente: Folkman (2018)	13
3. Función de intensidad de roturas a través de la edad. Fuente: Watson et al. (2004)	14
4. Izq: Tasa de explosión anual en función del diámetro, de tuberías de Hierro Fundido. Fuente: Boxall (2007). Medio: Tasa anual de roturas vs Diámetro. Fuente: Wang (2006). Der: Tasa de ruptura por kilómetro por año vs diámetro. Fuente: Goulter y Kazemi (1988)	14
5. Resumen de material de tubería de 8 a 12 comunidades en Suecia (1) de Petterson (1978), (2) de Reinius (1981) y (3) de Larsson et al. (1990). Fuente: Wengström (1993)	15
6. Comparación Tasa de Roturas de las Encuestas del año 2018 y año 2012. Fuente: Folkman (2018)	16
7. Comparación Tasa de Roturas de las Encuestas del año 2018 y año 2012. Fuente: Thornton y Lambert (2007)	17
8. Principales Modos de Falla de tuberías enterradas: Tensión Directa (Arriba-Izq), Tensión Circunferencial (Arriba-Der) y Falla por Flexión (Abajo). Fuente: Rajani et al. (2001)	19
9. a) Cálculo del indicador condicionado a las roturas; b) comparación de FDA condicionada a las roturas y FDA de la serie completa; c) comparación de FDA incondicional a las roturas y 100 FDAs procedentes de la FDA de la serie completa. Fuente: Martínez-Codina (2016)	23
10. Intervalos de los indicadores del rango de presión y de la variabilidad de presión y su respectivo valor de la relación de probabilidad. Fuente: Martínez-Codina (2015)	24

11.	Izq: Distribución Porcentual de la materialidad de las tuberías de la Red de Agua Potable de Antofagasta. Medio: Distribución Porcentual de los diámetros de las tuberías de la Red de Agua Potable de Antofagasta. Der: Distribución Porcentual de la edad de las tuberías de la Red de Agua Potable de Antofagasta. Fuente: Elaboración Propia	26
12.	Abastecimiento de la Red de Agua Potable de Antofagasta. Fuente: Depto. de Confiabilidad de la Operación de Aguas de Antofagasta S.A.	27
13.	Zonas de Abastecimiento Agua Potable Antofagasta. El mar está a la izquierda de la figura, mientras que la cordillera de la costa está a la derecha. Fuente: Elaboración Propia	28
14.	Cómo afecta una rotura en distintos cuarteles. Fuente: Elaboración Propia	31
15.	Ficha de control de interno de emergencias con discontinuidades. Fuente: Aguas de Antofagasta S.A.	32
16.	Izq: Tubería reparada con abrazadera producto de una rotura de menor gravedad. Der: Reposición de un tramo de tubería de Asbesto Cemento por una tubería de PVC, producto de una rotura de mayor gravedad. Fuente: Informes Orden de Trabajo Aguas de Antofagasta S.A.	33
17.	Mapa de Calor del Total de Roturas en la Zona 1 de Antofagasta. Fuente Elaboración Propia	36
18.	Arriba: Función de Distribución Acumulada de la variable Material (1: Fierro Fundido, 2: Acero negro, 3: Hierro Dúctil, 4: HDPE, 5: Asbesto Cemento, 6: PVC). Medio: Función de Distribución Acumulada de la variable Diámetro, agrupada en diámetros cada 50 mm. Abajo: Función de Distribución Acumulada de la variable Edad, agrupada en edades cada 5 años. Fuente Elaboración Propia	41
19.	Ubicación Geográfica de Roturas del Período de Validación (color negro) dentro del Mapa de Probabilidad de Rotura de una Zona de estudio. Fuente Elaboración Propia	42
20.	Serie de Presión utilizada para el sector 0104. Fuente Elaboración Propia	45
21.	Izq: Función de Distribución Acumulada Empírica de Presión Máxima asociada a las roturas (color rojo) y Función de Distribución Acumulada Empírica de Presión Máxima Genérica confeccionada con todos los datos de la serie de presión (color azul). Der: Función de Distribución Acumulada Empírica de Presión Máxima asociada a las roturas (color rojo) y 100 Funciones de Distribución Acumulada Empíricas de Presión Máxima confeccionadas con datos aleatorios de la serie de presión (color gris). Fuente: Elaboración Propia	46
22.	FDA asociada a las roturas (rojo) con una FDA asociada al comportamiento normal (azul) del indicador: Presión Máxima. Fuente: Elaboración Propia	48
23.	Relación de Probabilidad para el indicador Rango de Presión. Fuente: Elaboración Propia	50
24.	Roturas en la Red de Distribución de Agua Potable de Antofagasta (período 2014-2020). Fuente: Elaboración Propia	51
25.	Localización Sectores Críticos de cada Zona Crítica (arriba de izquierda a derecha: Zona 1 y Zona 3; abajo de izquierda a derecha: Zona 5 y Zona 7). Fuente Elaboración Propia	53
26.	Serie de Presión utilizada para el sector 0103. Fuente: Elaboración Propia	54
27.	Cantidad de Roturas por Sector de Presión que se pueden utilizar para el análisis de presión. Fuente: Elaboración Propia	54
28.	Función de Distribución Acumulada para el caso genérico y de roturas de la Zona N°1. Der: FDAs de la variable Material (1: Fierro Fundido, 2: Acero Negro, 3: Hierro Dúctil, 4: HDPE, 5: Asbesto Cemento, 6: PVC). Medio: FDAs de la variable Diámetro, agrupada en diámetros cada 50 mm; Der: FDAs de la variable Edad, agrupada en edades cada 5 años. Fuente: Elaboración Propia	55
29.	Mapa de Probabilidad de Falla de las tuberías actuales, de los sectores críticos de la Zona N°1 de Antofagasta. Fuente: Elaboración Propia	56

30.	De izquierda a derecha: Proyectos de Infraestructura de las Matrices de Agua Potable de la Zona N°1 (proyectos desde el 2014 hasta el 2020); Distribución de las Roturas seleccionadas de los Sectores Críticos de la Zona N°1 (años desde el 2014 hasta el 2020); Cantidad de Roturas por Cuartel de los Sectores Críticos de la Zona N°1; Distribución de las tuberías de la Zona N°1 según su materialidad (celeste: PVC, naranja: Asbesto Cemento, negro: HDPE). Fuente: Elaboración Propia	57
31.	Principales roturas que afectaron al sector 0108. Fuente: Elaboración Propia	58
32.	Izquierda: Principales roturas que afectaron al sector 0103. Derecha: Principales roturas que afectaron al sector 0104. Fuente: Elaboración Propia	59
33.	Función de Distribución Acumulada para el caso genérico y de roturas de la Zona N°3. Izq: FDAs de la variable Material (1: Fierro Fundido, 2: Acero Negro, 3: Hierro Dúctil, 4: HDPE, 5: Asbesto Cemento, 6: PVC). Medio: FDAs de la variable Diámetro, agrupada en diámetros cada 50 mm; Der: FDAs de la variable Edad, agrupada en edades cada 5 años. Fuente: Elaboración Propia	60
34.	Mapa de Probabilidad de Falla de las tuberías actuales, de los sectores críticos de la Zona N°3 de Antofagasta. Fuente: Elaboración Propia	61
35.	De izquierda a derecha: Proyectos de Infraestructura de las Matrices de Agua Potable de la Zona N°3 (proyectos desde el 2014 hasta el 2020); Distribución de las Roturas seleccionadas de los Sectores Críticos de la Zona N°3 (años desde el 2014 hasta el 2020); Cantidad de Roturas por Cuartel de los Sectores Críticos de la Zona N°3; Distribución de las tuberías de la Zona N°3 según su materialidad (celeste: PVC, naranja: Asbesto Cemento, negro: HDPE y rojo: Acero Negro). Fuente: Elaboración Propia	61
36.	Principales roturas que afectaron a los sectores críticos de la zona N°3. Arriba de izquierda a derecha: sector norte 0301, sector sur 0301, sector 0302. Abajo de izquierda a derecha: sector 0304, sector 0306. Fuente: Elaboración Propia	62
37.	Mapa de densidad de roturas totales de la Zona N°5. Fuente: Elaboración Propia	63
38.	Función de Distribución Acumulada para el caso genérico y de roturas de la Zona N°5. Izq: FDAs de la variable Material (1: Fierro Fundido, 2: Acero negro, 3: Hierro Dúctil, 4: HDPE, 5: Asbesto Cemento, 6: PVC). Medio: FDAs de la variable Diámetro, agrupada en diámetros cada 50 mm; Der: FDAs de la variable Edad, agrupada en edades cada 5 años. Fuente: Elaboración Propia	64
39.	Mapa de Probabilidad de Falla de las tuberías actuales, de los sectores críticos de la Zona N°5 de Antofagasta. Fuente: Elaboración Propia	64
40.	De izquierda a derecha: Proyectos de Infraestructura de las Matrices de Agua Potable de la Zona N°5 (proyectos desde el 2014 hasta el 2020); Distribución de las Roturas seleccionadas de los Sectores Críticos de la Zona N°5 (años desde el 2014 hasta el 2020); Cantidad de Roturas por Cuartel de los Sectores Críticos de la Zona N°5; Distribución de las tuberías de la Zona N°5 según su materialidad (celeste: PVC, naranja: Asbesto Cemento, negro: HDPE). Fuente: Elaboración Propia	65
41.	Principales roturas que afectaron a los sectores críticos de la zona N°5. De izquierda a derecha: sector norte 0501, sector sur 0501 y sector 0507 (amarillo) con el sur del sector 0502 (azul). Fuente: Elaboración Propia	66
42.	Función de Distribución Acumulada para el caso genérico y de roturas de la Zona N°7. Izq: FDAs de la variable Material (1: Fierro Fundido, 2: Acero negro, 3: Hierro Dúctil, 4: HDPE, 5: Asbesto Cemento, 6: PVC). Medio: FDAs de la variable Diámetro, agrupada en diámetros cada 50 mm; Der: FDAs de la variable Edad, agrupada en edades cada 5 años. Fuente: Elaboración Propia	67

43.	Mapa de Probabilidad de Falla de las tuberías actuales, de los sectores críticos de la Zona N°7 de Antofagasta. Fuente: Elaboración Propia	67
44.	De izquierda a derecha: Proyectos de Infraestructura de las Matrices de Agua Potable de la Zona N°7 (proyectos desde el 2014 hasta el 2020); Distribución de las Roturas seleccionadas de los Sectores Críticos de la Zona N°7 (años desde el 2014 hasta el 2020); Cantidad de Roturas por Cuartel de los Sectores Críticos de la Zona N°7; Distribución de las tuberías de la Zona N°7 según su materialidad (celeste: PVC, naranja: Asbesto Cemento, negro: HDPE y violeta: Fierro Fundido). Fuente: Elaboración Propia	68
45.	Principales roturas que afectaron a los sectores críticos de la zona N°7. De izquierda a derecha: sector 0707 y lugares del sector 0705. Fuente: Elaboración Propia	69
46.	Ubicación de todas las roturas registradas en el período de validación de cada zona crítica (color azul). Arriba de izquierda a derecha: Zona N°1 y Zona N°3; abajo de izquierda a derecha: Zona N°5 y Zona N°7. Fuente: Elaboración Propia	71
47.	1ra columna: Porcentaje de Tuberías con menor o igual Probabilidad de Falla por Zona. 2da columna: Porcentaje de Tuberías que representa cada rotura por Zona. De arriba hacia abajo: Zona N°1, Zona N°3, Zona N°5 y Zona N°7. Fuente: Elaboración Propia	72
48.	Relación de Probabilidad ($P_{x f}/P_x$) de la variable Edad en las distintas Zonas Críticas. Arriba de izquierda a derecha: Zona N°1 y Zona N°3; abajo de izquierda a derecha: Zona N°5 y Zona N°7. Fuente: Elaboración Propia	75
49.	Resultados del Test de Bondad de Kolmogorov-Smirnov para distintos Tiempos de Anticipación e Intervalos de Datos. 1ra fila: sector 0102, 2da fila: sector 0103, 3ra fila: sector 0104, 4ta fila: sector 0108, 5ta fila: sector 0306. 1ra columna: Intervalo de Datos de 1 Día, 2da columna: Intervalo de Datos de 2 Días, 3ra columna: Intervalo de Datos de 3 Días. Fuente: Elaboración Propia	78
50.	Resultados del Test de Bondad de Kolmogorov-Smirnov para distintos Tiempos de Anticipación e Intervalos de Datos. 1ra fila: sector 0506, 2da fila: sector 0507, 3ra fila: sector 0707. 1ra columna: Intervalo de Datos de 1 Día, 2da columna: Intervalo de Datos de 2 Días, 3ra columna: Intervalo de Datos de 3 Días. Fuente: Elaboración Propia	79
51.	Representación del comportamiento de la presión cuando ocurre una rotura de tubería. Fuente: Software i2o, Aguas de Antofagasta S.A.	80
52.	Comparación de la Función de Distribución Acumulada asociada a las roturas con 100 Funciones de Distribución Acumulada asociadas al comportamiento genérico, del sector de presión 0103 para distintos indicadores. Arriba de izquierda a derecha: Rango de Presión y Variabilidad de Presión; abajo de izquierda a derecha: Presión Mínima y Presión Máxima. Fuente: Elaboración Propia	81
53.	Comparación de la Función de Distribución Acumulada asociada a las roturas con 100 Funciones de Distribución Acumulada asociadas al comportamiento genérico, del sector de presión 0306 para un tiempo de anticipación de 6 horas e intervalo de datos de 1 día. De izquierda a derecha: Promedio de Presión, Variabilidad de Presión y Presión Máxima. Fuente: Elaboración Propia	83
54.	Comparación de la Función de Distribución Acumulada asociada a las roturas con 100 Funciones de Distribución Acumulada asociadas al comportamiento genérico, del sector de presión 0506 para un tiempo de anticipación de 6 horas e intervalo de datos de 1 día. Arriba de izquierda a derecha: Promedio de Presión, Presión Máxima y Presión Máxima; abajo de izquierda a derecha: Rango de Presión, Variabilidad de Presión y Variación de Presión. Fuente: Elaboración Propia	83

55.	Comparación de la Función de Distribución Acumulada asociada a las roturas con 100 Funciones de Distribución Acumulada asociadas al comportamiento genérico, del sector de presión 0306 para distintos tiempos de anticipación e intervalos de datos. De izquierda a derecha: Promedio de Presión, Presión Máxima y Presión Mínima. Fuente: Elaboración Propia	84
56.	Comparación de la Función de Distribución Acumulada asociada a las roturas con 100 Funciones de Distribución Acumulada asociadas al comportamiento genérico, del sector de presión 0707 para distintos tiempos de anticipación e intervalos de datos. De izquierda a derecha: Presión Máxima, Presión Mínima y Rango de Presión. Fuente: Elaboración Propia	85
57.	Izquierda: Comparación de la Función de Distribución Acumulada asociada a las roturas con 100 Funciones de Distribución Acumulada asociadas al comportamiento genérico, del sector de presión 0707 para un tiempo de anticipación de 96 horas e intervalo de datos de 1 día. Derecha: Comparación de una Función de Distribución Acumulada aleatoria con 100 Funciones de Distribución Acumulada asociado al comportamiento genérico, para el mismo sector indicador, tiempo de anticipación e intervalo de datos. Fuente: Elaboración Propia	85
58.	Comparación de la Función de Distribución Acumulada asociada a las roturas con 100 Funciones de Distribución Acumulada asociadas al comportamiento genérico, para el caso que se generan mayor cantidad de hipótesis rechazadas, de cada sector de presión. Fuente: Elaboración Propia	87
59.	Ajuste de distintas funciones paramétricas para las FDA asociada a las roturas de cada sector de presión seleccionadas para el cálculo de la Relación de Probabilidad. Fuente: Elaboración Propia	88
60.	Izquierda: FDAs Paramétricas asociada a las roturas (rojo) y genérica (azul). Derecha: Resultados de la Relación de Probabilidad. Fuente: Elaboración Propia	90
61.	Izquierda: FDAs Paramétricas asociada a las roturas (rojo) y genérica (azul). Derecha: Resultados de la Relación de Probabilidad. Fuente: Elaboración Propia	91
62.	Serie de Presión utilizada para el sector 0102. Fuente: Elaboración Propia	101
63.	Serie de Presión utilizada para el sector 0103. Fuente: Elaboración Propia	102
64.	Serie de Presión utilizada para el sector 0104. Fuente: Elaboración Propia	102
65.	Serie de Presión utilizada para el sector 0108. Fuente: Elaboración Propia	102
66.	Serie de Presión utilizada para el sector 0306. Fuente: Elaboración Propia	103
67.	Serie de Presión utilizada para el sector 0506. Fuente: Elaboración Propia	103
68.	Serie de Presión utilizada para el sector 0507. Fuente: Elaboración Propia	103
69.	Serie de Presión utilizada para el sector 0707. Fuente: Elaboración Propia	104

Índice de tablas

1.	Factores que afectan las tasas de rotura de tuberías (Kleiner y Rajani, 2002)	11
2.	Factores que afectan el deterioro estructural de las tuberías de distribución de agua (Rostum, 2000)	12
3.	Información de las distintas variables explicativas para caracterizar las tuberías	37
4.	Cantidad de Roturas de tuberías por Zona de Abastecimiento de Antofagasta	52
5.	Cantidad de Roturas de cada Sector de Presión Crítico de las Zonas Críticas de Antofagasta	52
6.	Fecha de las roturas del Sector de Presión 0103	54
7.	Cantidad de Roturas en el Período de Validación de cada Zona Crítica	69
8.	Cantidad de Tiempo que pasa entre Roturas por Sector de Presión	82

9.	Información de las Funciones de Distribución Acumuladas Paramétricas seleccionadas para cada Sector de Presión	89
10.	Clasificación Motivo de Corte Informado. Fuente: Informe Indicadores Calidad de Servicio de Superintendencia de Servicios Sanitarios	100
11.	Ubicación Falla del Corte Informado. Fuente: Informe Indicadores Calidad de Servicio de Superintendencia de Servicios Sanitarios	100
12.	Material tubería asociada al Corte Informado. Fuente: Informe Indicadores Calidad de Servicio de Superintendencia de Servicios Sanitarios	101
13.	Propiedades del Total de Tuberías que presentaron Roturas en los Sectores Críticos de la Zona 1 Antofagasta	104
14.	Propiedades del Total de Tuberías que presentaron Roturas en los Sectores Críticos de la Zona 3 Antofagasta	105
15.	Propiedades del Total de Tuberías que presentaron Roturas en los Sectores Críticos de la Zona 5 Antofagasta	105
16.	Propiedades del Total de Tuberías que presentaron Roturas en los Sectores Críticos de la Zona 7 Antofagasta	106
17.	Propiedades del Total de Tuberías en los Sectores Críticos de la Zona 1 Antofagasta	106
18.	Propiedades del Total de Tuberías en los Sectores Críticos de la Zona 3 Antofagasta	107
19.	Propiedades del Total de Tuberías en los Sectores Críticos de la Zona 5 Antofagasta	107
20.	Propiedades del Total de Tuberías en los Sectores Críticos de la Zona 7 Antofagasta	108
21.	Listado de Tuberías en las que se propone Recambio de Elementos de la Zona N°1	109
22.	Listado de Tuberías en las que se propone Recambio de Elementos de la Zona N°3	110
23.	Listado de Tuberías en las que se propone Recambio de Elementos de la Zona N°5	111
24.	Listado de Tuberías en las que se propone Recambio de Elementos de la Zona N°7	112

1. Introducción

En la región de Antofagasta, la empresa sanitaria que se encarga de proveer los servicios de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas servidas es Aguas de Antofagasta S.A. (ADASA). La Empresa presenta una estrategia de mantención de la red de agua potable que se activa, o se hace efectiva, una vez que esta presenta una alteración evidente. No contar con un plan preventivo no sólo es perjudicial para los usuarios, dada la posible suspensión de la continuidad del servicio, muchas veces de manera no programada, sino que, también lo es para la empresa ya que el costo económico puede ser elevado, considerando que una rotura en una tubería podría implicar una gran cantidad de agua perdida, además del costo de la reparación o renovación de la red y posibles pagos a los usuarios por los anegamientos o daños causados a la propiedad a causa de la rotura.

Como es de suponer, la continuidad en la operación es importante para todas las empresas sanitarias, por lo que existen múltiples estudios que han propuesto distintos enfoques a la hora de decidir una nueva estrategia de recambio en los distintos componentes de la red, sobre todo de las tuberías, siendo la falla estructural de estas la más estudiada (Rajani & Kleiner, 2001). En la gran mayoría de los estudios (por ejemplo Martínez-Codina et al., 2015 y 2016, Watson et al., 2004) prevalece la probabilidad de falla de la red como indicador necesario para incorporarlo en la estrategia de recambio. En este sentido se han propuesto modelos probabilísticos univariados que mediante predictores de presión (típicamente presión máxima) permiten obtener la probabilidad de falla de las tuberías (Martínez-Codina et al., 2015); estos modelos se sustentan en qué tan diferente es la probabilidad de falla del sistema con la probabilidad de falla condicionada a ciertas variables de operación de la tubería (Kleiner & Rajani, 2001), siendo esta diferencia, un buen indicador de la calidad del predictor. Los indicadores de presión, que corresponden a predictores propios de la operación de las redes de agua potable, pueden no abarcar la totalidad de factores que producen las roturas. Agregar predictores asociados a las características intrínsecas de las tuberías permite robustecer el análisis probabilístico de las fallas estructurales, abarcando así causas operacionales con características fijas de las tuberías de la red de agua potable.

La empresa, al igual que todas las empresas concesionarias de servicios públicos de distribución de agua potable, debe informar mensualmente a la Superintendencia de Servicios Sanitarios (ente regulador y fiscalizador) todas las irregularidades que ocurrieron en la red de agua potable de todas las localidades del territorio operacional declarado por la empresa. Esto se hace mediante el informe o protocolo de información PR013001 “Indicadores de Calidad del Servicio”, en donde se detalla las características del corte de suministro que afectó a la población, como: la naturaleza de la irregularidad, la causa que provocó este corte, que elemento(s) de la red se vió afectado, fecha, hora de inicio, ubicación geográfica, entre otras características¹. Gracias a esta fiscalización, se puede conocer y depurar la información de los cortes de suministro no programados, que ocurrieron por una rotura de tubería de una matriz, teniendo un registro histórico de las características de estas tuberías para su análisis estadístico.

Mediante este trabajo se busca encontrar la probabilidad de falla de las tuberías de las distintas matrices de agua potable de los sectores más críticos de la localidad de Antofagasta. En particular se busca establecer un modelo probabilístico en base a características intrínsecas de las tuberías y causas operacionales, utilizando ciertas propiedades de los elementos: material, edad y diámetro, y datos de la serie histórica de presión, con el fin de jerarquizar el estado de las tuberías de la red, de manera de establecer un plan preventivo de recambio de tuberías. La probabilidad de falla es calculada mediante el teorema de Bayes (Martínez-Codina et al., 2015, Castañeda, 2015), en donde se puede obtener esta, gracias a la probabilidad de encontrar ciertas características

¹ Este informe además de informar lo detallado anteriormente, informa la continuidad del servicio de recolección de aguas servidas, la presión de servicio en la red de agua potable, el número total de refacturaciones (y el total de facturas generadas en el mes) y el número total de reclamos

específicas tanto en tuberías que presentaron roturas, como en las que presentaron un funcionamiento normal. Este resultado se puede correlacionar espacialmente, ayudando a decidir qué sector en específico podría necesitar un recambio de tuberías. En el caso de la presión como predictor de las roturas, se utiliza gran parte de la metodología propuesta por Martínez-Codina et al. (2015), en donde se puede decidir qué indicador de presión es el más adecuado para incorporar en el cálculo de la probabilidad de falla, e indicar el rango de este indicador que aumenta la probabilidad de falla.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Establecer un modelo de optimización de recambio de tuberías de la red de agua potable de Aguas de Antofagasta S.A., específicamente en la ciudad de Antofagasta, que tenga un carácter preventivo, basado sólo en análisis estadístico/probabilístico de las fallas históricas registradas.

2.2. Objetivos Específicos

- Analizar cuáles son los tipos de cortes (o fallas), detallado en el informe “Indicadores de Calidad de Servicio” (PR013), confeccionado por ADASA para la Superintendencia de Servicios Sanitarios, que se deben considerar en el análisis estadístico.
- Determinar la probabilidad de falla de las tuberías de la red de agua potable mediante un enfoque bayesiano, considerando las propiedades intrínsecas (material, edad y diámetro).
- Correlacionar espacialmente la probabilidad de falla de cada tubería operativa para crear un mapa georreferenciado de la red de agua potable que permita dilucidar el posible estado de esta.
- Analizar, mediante la metodología propuesta, cuál indicador de presión es el mejor predictor de operación para obtener la probabilidad de falla de cada sector de presión en específico, y qué rango de valores aumenta esta probabilidad.

3. Marco Teórico

3.1. Estudio de las Roturas de Tuberías

Las razones por las que se generan las roturas de tuberías en una red de agua potable pueden ser muy variadas, donde la combinación de factores puede jugar un rol muy importante a la hora de diagnosticar la falla del elemento, incluso en muchas ocasiones la causa de la rotura no se puede encontrar dado lo complejo del fenómeno y también por la falta de información fidedigna. Generalmente, en las empresas el registro de fallas es pequeño para asegurar un estudio profundo de estas (Watson et al., 2004).

Según Hossein et al. (2015) una rotura de una tubería ocurre cuando las tensiones (operativas y ambientales) actúan sobre las tuberías donde la corrosión, la degradación, la instalación inadecuada o los defectos de fabricación han afectado la integridad estructural de las tuberías. Según Kleiner y Rajani (2001) el proceso de deterioro de las tuberías se puede clasificar en dos categorías:

1. **Deterioro Estructural:** Esto disminuye la resiliencia estructural de las tuberías y su capacidad para soportar los diversos tipos de tensiones que se le imponen.
2. **Deterioro Interno (Hidráulico):** Esto es el deterioro de las superficies internas de las tuberías que resulta en una capacidad hidráulica disminuida, degradación de la calidad del agua y resistencia estructural reducida en casos de corrosión interna severa.

A su vez en dicha investigación, los componentes que le quitan fiabilidad a la red de agua potable son clasificados en: calidad del agua, capacidad hidráulica, desempeño y comportamiento estructural, rotura de tuberías, confiabilidad de la red, economía y proceso de toma de decisiones. A pesar del desglose de características, hasta la fecha de investigación, no existe un modelo que pueda acomodar explícita y cuantitativamente todos los componentes.

Tabla 1: Factores que afectan las tasas de rotura de tuberías (Kleiner y Rajani, 2002)

Estáticos	Dinámicos	Operacionales
Material	Edad	Tasas de remplazo
Diámetro	Temperatura (suelo, agua)	Protección catódica
Espesor	Humedad del suelo	Presión agua
Suelo	Resistividad eléctrica del suelo	
Instalación	Cargas dinámicas	

Kleiner y Rajani (2002) señalan que las tuberías por lo general se rompen cuando las condiciones ambientales y operativas ejercen tensiones que superan su capacidad de recuperación estructural decreciente. El deterioro de las tuberías puede verse afectado por las condiciones operativas y ambientales, algunas de las cuales son estáticas mientras que otras son dinámicas. La tabla 1 enumera los principales factores que pueden afectar la tasa de rotura de las tuberías según estos autores, donde se puede ver que los factores que son estáticos en el tiempo generalmente se relacionan con las propiedades de la tubería y su instalación, mientras que los factores dinámicos son los que rodean a la tubería, salvo la edad. Para Rostum (2000) las variables más importantes que describen el deterioro estructural de las redes de agua se pueden agrupar en cuatro categorías: variables estructurales, variables externas o ambientales, variables internas o hidráulicas y variables de mantenimiento, como se ve en la tabla 2, donde se desglosa cada uno de estos macro grupos.

Tabla 2: Factores que afectan el deterioro estructural de las tuberías de distribución de agua (Rostum, 2000)

Variables Estructurales	Factores Medioambientales	Factores Hidráulicos	Factores de Mantenimiento
Ubicación de tubería	Tipo de Suelo	Velocidad del agua	Fecha de ocurrencia del fallo
Diámetro	Cargas externas	Presión interna	Fecha de reparación del fallo
Largo Tubería	Nivel Freático	Calidad del agua	Ubicación del fallo
Año de instalación	Condición de la capa de apoyo	Fenómenos transitorios	Tipo de fallo
Material	Índice de fugas	Corrosión interna	Historial de fallos
Tipo de junta	Temperatura		
Revestimiento interno	Corrosión externa		
Revestimiento externo			
Espesor de las paredes			
Profundidad			

En la mayoría de los estudios que tratan de modelar la predicción de roturas se utilizan las variables nombradas por Rostum, sobretodo las variables estructurales como el diámetro, largo, edad y material de la tubería, en conjunto con factores hidráulicos como la presión del agua en la tubería (Gómez, P., 2017). En menor medida se utilizan las variables medioambientales, pero esto se debe al poco monitoreo que hay de estas variables, considerando que para tener un análisis por elemento en una red implica un monitoreo constante en toda la red de agua potable, por ende el registro que se tienen de las variables medioambientales es nula en muchas empresas. A continuación, se presenta una descripción de los factores más influyentes.

3.1.1. Edad / Año de instalación

Para algunos autores (Rostum, 2000; Andreou, 1986) es importante hacer la distinción entre edad y año de instalación, ya que los períodos de instalación tienen diferencias en su montaje y por ende en la cantidad de roturas que generaron tiempo después. Esto se explica en la investigación realizada por Andreou (1986), el cual modela un sector de red de agua potable, exclusivamente de tuberías de hierro fundido, en donde hay una gran diferencia en la tasa de roturas en tuberías de edades similares. Esto lo atribuye al tipo de junta que hay en estos dos grupos de tuberías, en donde en el de menor tasa de roturas se instala un tipo flexible de junta, las cuales impiden que el hecho de que la tubería se contraiga o expanda térmicamente sea un problema, lo que si ocasionan los otros tipos de juntas, provocando tensiones que ocasionan fallas mecánicas. Por otro lado, Boxall et al. (2007), en su análisis de cada variable explicativa, llega a la conclusión que la relación entre roturas y edad es compleja, probablemente debido a que la edad actúa como sustituto de otras variables explicativas, lo cual se condice con la conclusión de Andreou, en donde el cambio del tipo de junta cambia los resultados de tasas de roturas.

Hosseini et al. (2015), quien investiga el impacto de las condiciones dinámicas hidráulicas en una red de agua potable del Reino Unido, reúne un análisis estadístico de las principales variables explicativas que podrían guardar relación con las roturas en dicho sector. En la figura 1 se puede apreciar la relación que tiene la edad con la tasa de roturas, donde no se puede afirmar que hay una relación directa de la edad de los elementos, dada la forma de “campana” que tiene el gráfico, lo que se repite en la investigación de Folkman (2018).

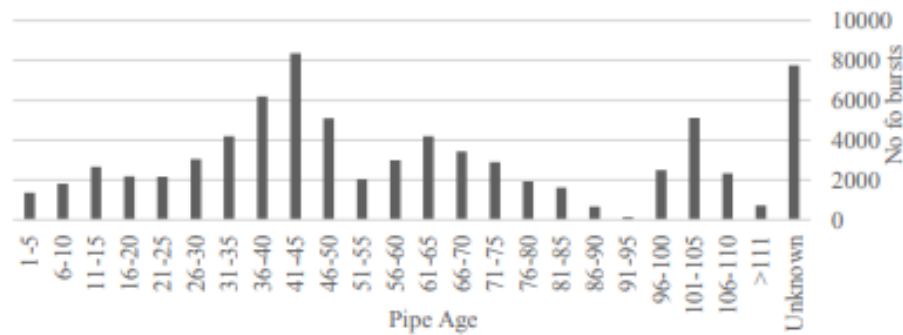


Figura 1: Distribución de roturas de tuberías por edad. Fuente: Hossein (2015)

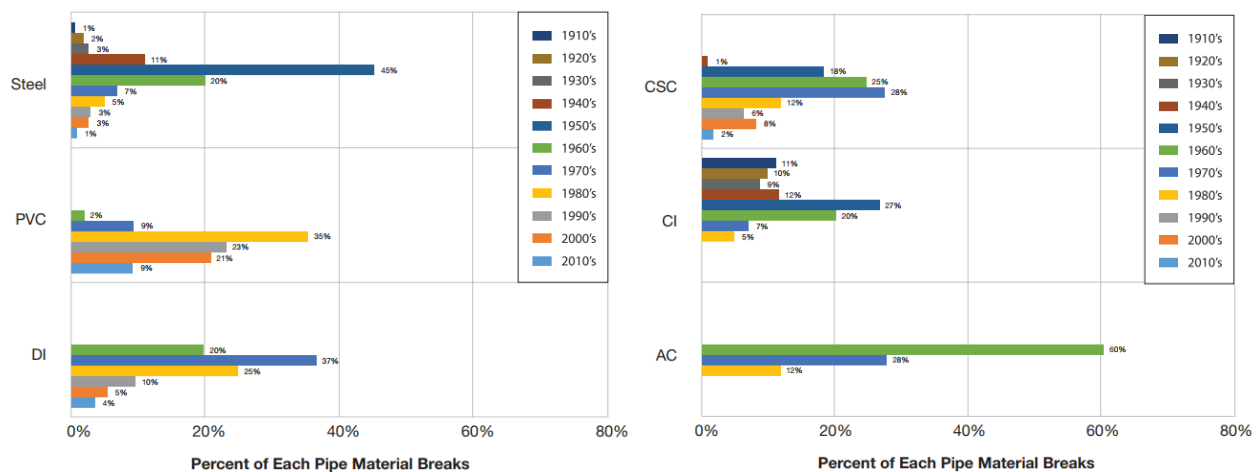


Figura 2: Porcentaje de fallas por década de cada material de tubería instalado (Steel: Acero, DI: Hierro Dúctil, CSC: Cilindro de Acero Hormigón, CI: Hierro Fundido, AC: Asbesto Cemento). Fuente: Folkman (2018)

Folkman (2018), quien en su investigación en Estados Unidos proporciona información para el análisis de activos de la red de agua potable, a través de una comparación de las tasas de ruptura de los materiales de tubería de uso común, presenta un desglose del porcentaje de roturas que hay por década de cada material empleado en las matrices de agua potable del dominio del estudio (figura 2). En esta figura se puede apreciar que la mayoría de los materiales presentan un peak de porcentaje de rotura alrededor de los años 1970, que no es la década más antigua de instalación, y luego decrece el porcentaje de rotura al avanzar los años (forma de campana), salvo el Asbesto Cemento (AC), el cual presenta el mayor porcentaje de rotura en la década más antigua de registro. Estos peaks se pueden atribuir a la cantidad de tuberías presentes en un rango de edad determinado: a medida que se reemplaza la tubería más antigua, hay menos disponibilidad para fallar. La excepción del comportamiento de las tuberías de Asbesto Cemento se puede atribuir al desuso que hay de este material en los últimos 25 años en Estados Unidos, por ende prácticamente todas las fallas datan de 1980 o antes. Se puede llegar a un análisis similar respecto de las tuberías de PVC y Hierro Dúctil (DI), esto ya que la producción de este material se masificó a partir de 1970, por ende no se debería encontrar un alto porcentaje de roturas antes de esta década. En general, Folkman, no brinda una relación directa respecto a la edad de las tuberías. Si bien las tuberías de 30-40 años de edad presentan un gran porcentaje de roturas, las tuberías de más de 30-40 años no responden de la misma manera.

Por otro lado, Watson et al. (2004) señala que el número de roturas por la unidad de tiempo siguen una función variable en el tiempo (figura 3): al principio hay un período de adaptación en el que se producen roturas que disminuyen con el paso del tiempo hasta permanecer constante durante un largo período de tiempo. Luego, con el paso del tiempo comienza el deterioro de los componentes de la red y el número de roturas en esta unidad de tiempo incrementa hasta que llega un punto en el que es más económico reemplazar la tubería. La forma de esta función es denominada “bathub”.

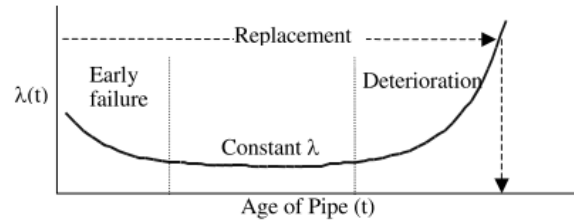


Figura 3: Función de intensidad de roturas a través de la edad. Fuente: Watson et al. (2004)

3.1.2. Diámetro

Respecto a esta variable explicativa, la mayoría de los autores (Morris, 1967; Wengström, 1993; Boxall, 2007; Wang, 2006 y Rostum, 2000) llegan a la misma conclusión: el diámetro sí tiene una estricta relación con la ocurrencia de roturas en la red de agua potable, independiente del material que tengan los elementos. Boxall et al. (2007) ha encontrado que la relación entre las roturas y el diámetro aumenta exponencialmente con diámetros decrecientes, lo que se explica por el aumento en la resistencia estructural de los perfiles de sección transversal más grandes. Wang (2006) y Rostum (2000) llegan a la misma conclusión, las tuberías con diámetro menores a 200 mm presentan mayor tasa de roturas, esto lo atribuyen a la reducida resistencia que tienen estas tuberías dado el reducido espesor que tienen, además de uniones de menor confianza para tuberías más pequeñas. Goulter y Kazemi (1988), quienes reunieron datos de redes de agua potable en cuatro ciudades de Estados Unidos desde 1960 hasta 1985, encontraron que la tasa de ruptura aumenta con la disminución del diámetro, sobre todo encontraron una fuerte relación para tuberías con un diámetro igual o menor a 300 mm. En la figura 4 se presentan los resultados de la investigación de Boxall (2007), Wang (2006) y Goulter y Kazemi (1988).

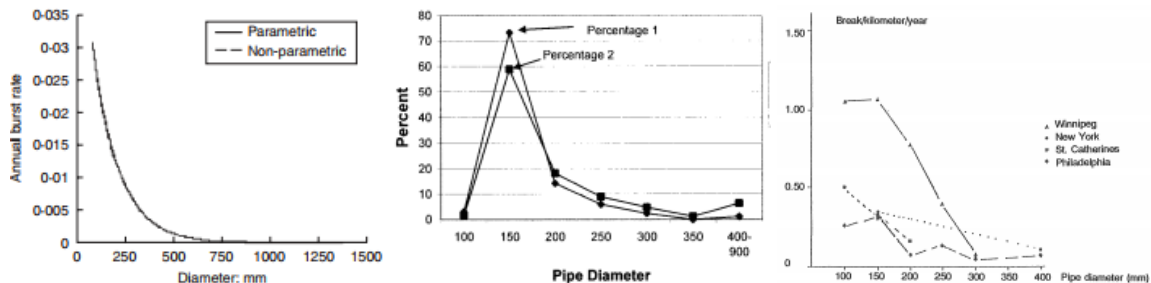


Figura 4: Izq: Tasa de explosión anual en función del diámetro, de tuberías de Hierro Fundido. Fuente: Boxall (2007). Medio: Tasa anual de roturas vs Diámetro. Fuente: Wang (2006). Der: Tasa de ruptura por kilómetro por año vs diámetro. Fuente: Goulter y Kazemi (1988)

3.1.3. Material

Wengström (1993), concluyó que el material depende de otras variables explicativas para encontrar una estricta relación con la tasa de roturas. Además señala que en la mayoría de investigaciones realizadas en Canadá, EE.UU. y Gran Bretaña sólo se analizan el Hierro Fundido y el Hierro Dúctil (O'Day, 1987), esto ya que antiguamente en la mayoría de dichas redes de agua potable instalaban, en su mayoría, estos dos materiales. Se hizo una recopilación de información de roturas en Suecia por tres autores (Pettersson, 1978; Reinius, 1981; Larsson et al., 1990) en distintos años, donde la red tiene más tipos de material de manera representativa. Para los materiales clásicos se tiene un comportamiento similar al encontrado por O'Day (1987): la tasa de ruptura del Hierro Fundido y Hierro galvanizado es creciente al pasar los años, pero para los materiales “nuevos” para la época como el PVC se encontró una tasa decreciente, incluyendo las tuberías de Acero. Esto se puede visualizar en la figura 5.

	Median value, number of breaks		
	(1) 1975-1977	(2) 1977-1978	(3) 1981
Asbestos cement	0.5	0	n
Cast (grey) iron	1.5	1.1	1.7
Concrete	0.25	0	n
Ductile iron	0.05	0.2	0.7
Galvanized iron	1.4	0.6	2.4
Steel	3.2	1.2	1.7
PVC	3.7	1.8	0.8
PEL/PEH	0	0.6	0.5
Others	0	0	0.3
Average number of observations:	138	56	85
Total length of pipe in survey, km:	526	540	658
Time of survey, months:	24	21	12

n = material not incorporated in survey

Figura 5: Resumen de material de tubería de 8 a 12 comunidades en Suecia (1) de Petterson (1978), (2) de Reinius (1981) y (3) de Larsson et al. (1990). Fuente: Wengström (1993)

Folkman (2018) recopiló información de todas las roturas ocurridas en los años 2012 y 2018 de más de 200 redes de agua potable entre Estados Unidos y Canadá (más de 270.000 km de longitud de tubería) y las separó por material, como se puede ver en la figura 6. El incremento total de la tasa de roturas (en 27 %) se debe principalmente a las roturas del Asbesto Cemento (AC) y Hierro Fundido (CI), que son los materiales que presentan mayor edad, por ende están cerca de llegar al fin de su vida útil; además cerca del 90 % de las tuberías instaladas corresponden a Hierro Fundido, Asbesto Cemento y PVC, por lo tanto este último material tiene una baja tasa de rotura.

3.1.4. Presión

La presión del agua es probablemente el factor individual más importante que controla las pérdidas de aguas (Boxall et al., 2007). Todos los elementos de la red tienen una presión nominal asociada, que equivale a la presión máxima que soporta ese elemento en particular en cualquier condición de servicio. Esta presión nominal, en el caso de las tuberías a presión normada por ASME B31.3-2010, está determinada por el espesor, el diámetro y el esfuerzo a tracción del material de la tubería. La norma española UNE EN 805:2000, al igual

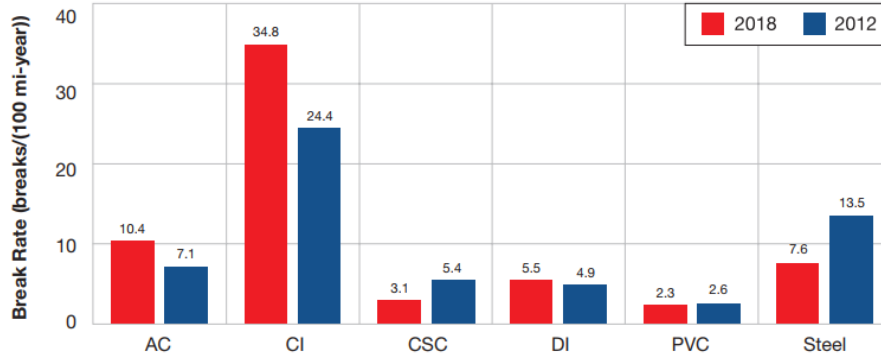


Figura 6: Comparación Tasa de Roturas de las Encuentas del año 2018 y año 2012. Fuente: Folkman (2018)

que la ASME B31.3-2010, define la presión de funcionamiento admisible como:

$$PFA = \frac{2 \cdot e \cdot R_m}{D_m \cdot C_{DP}}$$

Donde e es el espesor de la tubería, R_m es la resistencia a la tracción del material de la tubería, D_m es el diámetro de la tubería y C_{DP} es un coeficiente de seguridad. Por lo tanto, la presión, que fue definida anteriormente como un factor individual, no lo es tanto dado que la presión admisible está estrictamente relacionada con factores geométricos e intrínsecos del elemento, además las fallas que se generan debido a la presión se relacionan directamente con el estado del elemento producto de la corrosión de este (Hossein et al., 2015).

La presión del agua en un conducto cerrado, como la red de agua potable, está sujeta a la topografía, velocidad del flujo y pérdidas energéticas asociadas a la fricción y a singularidades, como lo define el principio de Bernoulli:

$$z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + h_f + h_s$$

Donde el factor topográfico, por lo general, juega un rol más importante en las redes de agua potable que el de las pérdidas de carga por fricción y singularidades. Tan determinante es la topografía de la red, que se han diseñado sectores acotados con una topografía similar que permiten gestionar la presión en dicho sector mediante válvulas reductoras de presión. Esto ya que en el caso en que toda la red tenga una única fuente de presión de servicio que controle el total de esta, probablemente en muchos lugares aguas abajo con cotas muy inferiores a la cota del comienzo del suministro, tendrán presiones de servicio muy elevadas que aumentarían la tasa de rotura.

La presión de diseño no sólo debe estar por encima de una presión de servicio, calculada con el principio de Bernoulli para un régimen permanente, es decir para el caso cotidiano, esta también debe contemplar sobre-

presiones y subpresiones, esto gracias a los fenómenos transitorios y a la cavitación. El efecto transitorio, que ocurre cuando se cierra una válvula por ejemplo, puede generar grandes esfuerzos en el elemento en períodos cortos de tiempo. Rostum (2000) señala que las zonas con mayor número de roturas se pueden atribuir a fenómenos transitorios. Estas variaciones de presiones también se explican por la cavitación, donde la presión es menor a la presión de vapor, formando burbujas dentro de la tubería aumentando el volumen del fluido, generando sobrepresiones en la tubería las que podrían ocasionar una onda de choque (Martinez-Codina, 2015).

Thornton y Lambert (2007) presentaron una relación entre la tasa de rotura y la presión, para un sistema controlado por la gravedad. Esta relación se puede apreciar en la figura 7. En este modelo se quiere explicar que cuando la presión del agua alcanza un determinado valor, los fallos en el sistema aumentan considerablemente. En dicho estudio se trató de demostrar que el porcentaje de roturas disminuye cuando existe una buena gestión de presión. En la figura 7 se muestran tres momentos diferentes representados con tres circunferencias, con la intención de explicar el resultado de un plan de presión (reducción de presión). Si en el momento de la gestión de presiones (implementación de una sectorización por ejemplo) la red se ubica en el círculo rojo, la reducción de la presión llevará a una disminución considerable de la tasa de roturas, pasando al momento representado por el círculo azul. Por otro lado, si en el momento de la implementación de la gestión de presiones, la relación entre presión y tasa de rotura está en el círculo azul, la red pasará al estado representado por el círculo verde, no cambiando el número de roturas pero alargándose la vida útil de las tuberías.

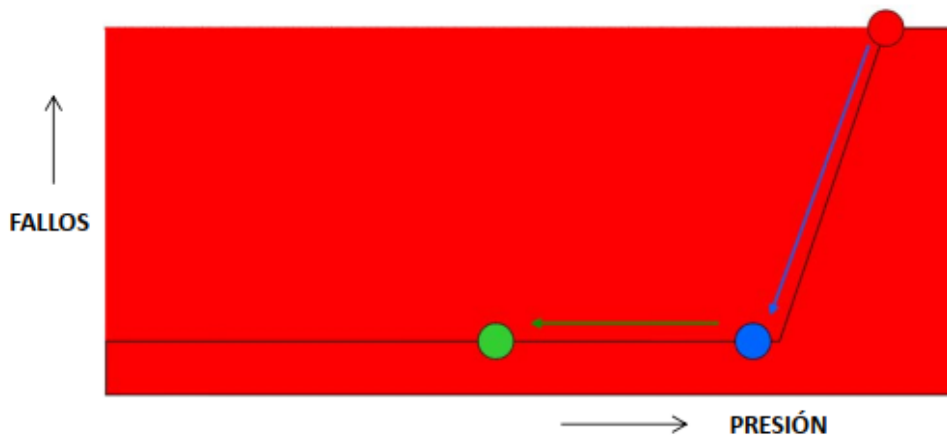


Figura 7: Comparación Tasa de Roturas de las Encuentras del año 2018 y año 2012. Fuente: Thornton y Lambert (2007)

Estos autores quieren demostrar que la reducción de presiones no necesariamente tiene asociado una baja en la tasa de rotura, sino que esta, está asociada al estado en el que se encuentra la red. Además los autores sostienen que al controlar las grandes variaciones de presión y los efectos transitorios, la reducción de las roturas es significativa e inmediata.

3.1.5. Otros factores influyentes

En la mayoría de estudios citados en los factores influyentes desglosados anteriormente también se analiza el **número de roturas previas**, como Andreou (1986), quien gracias a su modelo de riesgos proporcionales concluyó que tras cada rotura la tasa de fallos de una tubería incrementa. Goulter y Kazemi (1988) quienes

observaron en su investigación que el 22 y el 46 % de todas las fallas ocurren dentro de un radio entre 1 metro y 20 metros de distancia respectivamente, de ocurrida otra falla. Esta estadística sugiere que la ocurrencia de una falla es un fuerte indicador de un mayor potencial de fallas adicionales en las tuberías de una vecindad cercana a la primera rotura, y dentro de un tiempo relativamente corto, que incluso puede ser días después, ya que en la misma investigación un 42 % de las roturas ocurrieron 1 día después del registro de una falla en una vecindad cercana. La **temperatura** (sobre todo la reducción de esta) también incide en las roturas de las tuberías, esto dado la posible expansión del volumen de agua que rodea la tubería, aumentando su fragilidad (Hossein et al., 2015). Además este último autor valida su argumento al encontrar una mayor tasa de roturas en invierno. Boxall et al. (2007), encontró que muchas de las fallas de las tuberías se generaban por los esfuerzos que generan los movimientos del **suelo**, además la tubería puede estar en suelo “agresivo” que permite la aceleración de la corrosión del elemento.

3.2. Modelos de Predicción

El envejecimiento de la infraestructura, el crecimiento y el capital limitado dan como resultado la necesidad de una metodología más sólida y rigurosa para priorizar las decisiones de rehabilitación y renovación para prever los requisitos de gastos futuros (Watson et al., 2004). Existen diversos estudios que estudian las propiedades de las tuberías en el instante que presentan rotura, o en horas previas, con el fin de prevenir estas y predecir las roturas dentro de un dominio de la red en específico. Según los investigadores Kleiner et al. y Rajani et al. (2001 y 2001, respectivamente) los modelos se dividen en:

- Modelos Físicos y
- Modelos Estadísticos

3.2.1. Modelos Físicos

Los modelos físicos obtienen la probabilidad de rotura de una tubería (o la tasa de rotura) considerando el comportamiento estructural del elemento y la capacidad estructural residual de la cañería, la que se ve alterada bajo cargas externas e internas, como la presión del suelo, carga del tráfico, condiciones operativas o interferencia de terceros (Rajani et al., 2001). Es más probable que se produzcan roturas cuando las tensiones externas e internas actúan sobre elementos cuya integridad estructural se ha visto comprometida por corrosión, degradación o instalación inadecuada.

El conocer la composición física del material y conocer las condiciones a las que está sometida permanentemente la tubería, proporciona información de cómo se verá afectada esta a lo largo de los años y qué tipo de falla será la más probable de ocurrir. Rajani et al. (2001) clasifica los modos de fallo estructural de las tuberías en cuatro grupos: (1) roturas circunferenciales causadas por tensiones longitudinales, (2) roturas longitudinales causadas por tensiones transversales, (3) *split bell* (su traducción es campana dividida) causadas por tensiones transversales en la junta de las tuberías y (4) corrosión. Las tensiones longitudinales que generan las roturas circunferenciales son el resultado de varias causas, como: contracción térmica que actúa sobre una tubería restringida, esfuerzo de flexión debido al movimiento diferencial del suelo, y acciones accidentales producidas por terceros. Por otro lado las roturas longitudinales que están provocadas por tensiones transversales, se producen por la presión del agua, cargas del terreno, cargas del tráfico y por agua congelada del terreno que está sobre la tubería. Martínez-Codina (2018), quién recoge información de las posibles causas de los distintos modos de falla en la Comunidad de Madrid, sostiene que los agujeros en las tuberías suelen producirse por la corrosión y que las fallas explosivas ocurren debido a la presión interna en conjunto con la corrosión, además de confirmar lo planteado por Rajani et al. (2001). Según Hossein et al. (2015) las tensiones circunferenciales (transversales) provocan las roturas longitudinales dado el comportamiento cíclico que tiene la

presión, lo que provoca un aumento en la corrosión del elemento (aumento de fisuras), exponiendo una mayor superficie del material a un estado crítico. Además, con la corrosión se generan cargas adicionales en el interior de la fisura agrandando aún más la abertura. La figura 8 ilustra las principales interacciones carga-tubería.

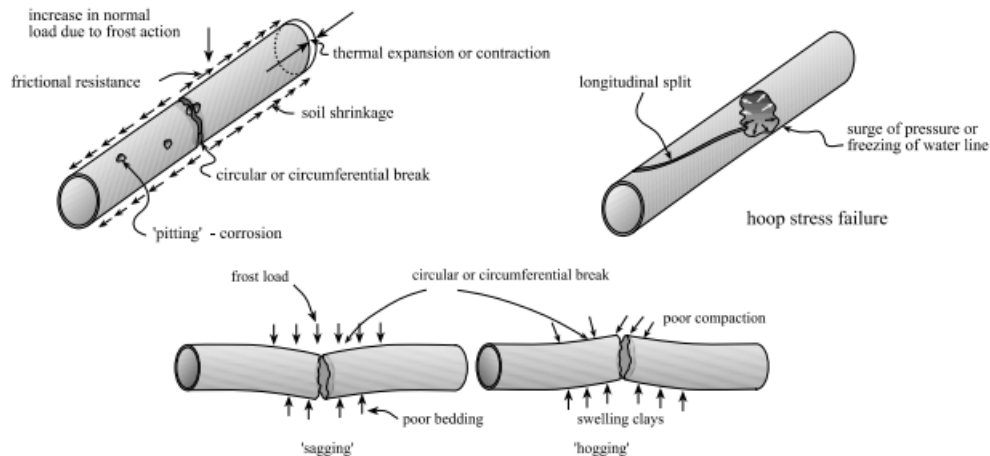


Figura 8: Principales Modos de Falla de tuberías enterradas: Tensión Directa (Arriba-Izq), Tensión Circunferencial (Arriba-Der) y Falla por Flexión (Abajo). Fuente: Rajani et al. (2001)

Los mecanismos físicos que conducen a la rotura de tuberías suelen ser complejos y abarcar muchas causas. El hecho de que la mayoría de las tuberías estén enterradas y de que existan pocos datos disponibles sobre sus modos de rotura, contribuye al poco conocimiento que existe (Xu, 2011). Esta falta de datos se puede comprender dado que obtener un registro de esta índole tiene un costo significativo (Kleiner y Rajani, 2001).

3.2.2. Modelos Estadísticos

Si bien es deseable un modelo físico integral del deterioro de las tuberías, actualmente es más realista utilizar modelos estadísticos para las tuberías principales de distribución de agua debido a la falta de disponibilidad y al costo de adquirir los datos necesarios para los modelos físicos. Durante las últimas décadas, se han desarrollado varias metodologías para modelar y predecir estadísticamente las fallas de las tuberías y las tasas de fallas. Estos modelos, sin embargo, se han ocupado predominantemente de factores estáticos en lugar de factores dependientes del tiempo que influyen en la rotura de las tuberías (Kleiner y Rajani, 2002). Los modelos estadísticos se pueden dividir en tres categorías:

- Modelos deterministas
- Modelos probabilísticos multivariados
- Modelos probabilísticos univariados

Los modelos deterministas predicen la tasa de rotura utilizando algunos parámetros (pocos), en función de la antigüedad del elemento y la tasa de rotura histórica, en palabras simples estos modelos tratan de replicar lo que sucederá en el futuro considerando las condiciones que existieron en el pasado. Los modelos reconocidos por su éxito se caracterizan por separar las variables predictoras en grupos de datos que sean apreciablemente uniformes en cantidad, y agrupan las tuberías en grupos homogéneos respecto a ciertos

factores, como material, condiciones operacionales y/o ambientales. Esto puede producir un conflicto ya que estos grupos deben ser lo suficientemente pequeños para ser uniformes entre sí, y a la vez tienen que ser lo suficientemente grandes para ser estadísticamente consistentes. Un modelo bastante estudiado es el de Shamir y Howard (1979), quienes crearon un modelo de predicción de tasa de rotura mediante un análisis de regresión, utilizando la edad del elemento como predictor único.

$$N(t) = N(t_0)e^{A(t+g)}$$

En este modelo t es el tiempo en años, $N(t)$ es el número de roturas por longitud por año, $N(t_0)$ es la tasa de rotura en el año de instalación del elemento modelado, g en la edad de la tubería en el año t , y A es el coeficiente de crecimiento de la tasa de rotura. Según Kleiner y Rajani (2001) este modelo presenta varios problemas de ejecución, primero se debe tener información suficiente para asegurar la homogeneidad de características compartidas en las tuberías agrupadas para llevar a cabo el modelo. También se debe tener una base de datos consistente estadísticamente que permita agrupar las roturas en grupos (también denominados *cluster*) de similar tamaño. Los modelos de regresión que sucedieron a Shamir y Howard incluyen más parámetros en el análisis, muchos de ellos lineales y no exponenciales. Según Kleiner y Rajani (2001) estos modelos son muy acotados en su predicción de tasa de roturas, esto lo atribuyen a la muestra reservada que debe existir y al alcance en sus resultados. Los factores de predicción de rotura están sujetos a las condiciones operacionales y ambientales que difícilmente se pueden modelar como uniformes en el tiempo, por ende estas regresiones son sólo satisfactorias si se tiene un vasto conocimiento de las características de las tuberías, que permita obtener una tasa de rotura en un período cercano prácticamente instantáneo.

Los modelos probabilísticos multivariados consideran un conjunto de variables predictoras, las cuales no necesitan un previo agrupamiento de condiciones homogéneas en las condiciones operativas o medioambientales, esto permite agrandar geográficamente la cantidad de tuberías a utilizar en el modelo. Al abarcar mayor cantidad de datos para su predicción de tasa de roturas y/o probabilidad de rotura, estos modelos se caracterizan por ser matemáticamente complejos, además los modelos son satisfactorios cuando se utiliza una base de datos extensa, lo que limita su aplicación. Los autores citados Andreou (1986) y Wengström (1993) utilizan el modelo hazard proporcional y modelo de hazard aditivo, respectivamente. Estos modelos reducen significativamente la cantidad de pre agrupación que requieren los modelos determinísticos, pero este requisito no se elimina completamente, ya que se requiere un análisis previo para identificar grupos de tuberías que puedan diferir en su proceso de deterioro. Además, suponer que todas las tuberías tienen el mismo riesgo de falla al estar sujeta a ciertos factores puede ser erróneo, como por ejemplo la resistividad del suelo, la cual tiene un efecto significativo en las tuberías de hierro fundido sin protección, pero tiene un efecto menor en las tuberías con protección, por lo tanto si estas dos categorías no se dividen en el análisis, las diferencias pueden reducir la precisión de los resultados.

Por último se encuentran los modelos probabilísticos univariados, estos son los modelos que postulan la predicción de la probabilidad de falla o la tasa de rotura de un conjunto de tuberías, mediante sólo una variable explicativa o por un criterio de agrupamiento de características similares (Martínez-Codina et al., 2015). Según Kleiner y Rajani (2001) los modelos univariados más conocidos son los de supervivencia cohorte, los modelos que emplean cadenas de semi-Markov, los modelos bayesianos y los modelos que se apoyan en el agrupamiento de datos. De todos los modelos de probabilidad, sólo se analiza en profundidad los modelos bayesianos, dada la metodología de esta investigación.

3.2.3. Modelos Bayesianos

Kulkarni et al. (1986) desarrollaron un sistema de optimización de mantenimiento de tuberías de hierro fundido, con el fin de identificar segmentos de tubería de gas propensos a fallar y determinar el momento óptimo para su reemplazo. Identificaron dos grupos de características en las tuberías: estáticas (diámetro, largo, tipo de suelo, etc.) y dinámicos (número de roturas, edad, etc.), y relacionaron la probabilidad de falla de una tubería, teniendo un conjunto de las características nombradas, con la probabilidad de falla del sistema, la probabilidad de presentar estas características específicas en tuberías que presentaron rotura y la probabilidad de encontrar estas características específicas en el total de tuberías, es decir, se basaron en el teorema de Bayes. La expresión que usaron los investigadores es:

$$P_{f|c} = \frac{P_{c|f} \cdot P_f}{P_{c|f} \cdot P_f + P_{c|nf}(1 - P_f)}$$

Donde:

$P_{f|c}$: Es la probabilidad de que una tubería con características “c” presente rotura.

P_f : Es la probabilidad de falla del sistema, es decir es la relación que hay entre el número de roturas de todo el dominio geográfico y el total de tuberías que estuvieron instaladas en dicho período.

$P_{c|f}$: Es la probabilidad de encontrar características “c” en tuberías que presentaron roturas en el período de estudio.

$P_{c|nf}$: Es la probabilidad de encontrar características “c” en tuberías que no presentaron roturas en el período de estudio.

Según Kleiner y Rajani (2001) la predicción del modelo se basa en qué tan distinta es la probabilidad de falla condicionada, con la probabilidad de falla del sistema. Si la probabilidad condicionada es similar a la probabilidad de falla del sistema, la capacidad de diagnóstico de dichas características es reducida. En cambio, si esta es considerablemente mayor o menor que la probabilidad de falla del sistema, estas características podrían guardar estricta relación con las causas de las roturas de las tuberías analizadas. Además, estos autores señalan que el modelo de Kulkarni es “plano” respecto al tiempo, esto ya que no considera el momento en que se produjo la rotura, sólo considera el número acumulado de roturas hasta el momento del análisis, por ende si es que el modelo se calibra con las roturas de un año, la tasa de rotura que generará para el próximo año serán las mismas que en el período de calibración (la estimación de la tasa es proporcional), por lo tanto el modelo no se especializa en la predicción del número de roturas a lo largo del tiempo (no hace proyecciones en un largo período de tiempo), sino que indica la probabilidad de fallo de las tuberías del sector escogido. Este modelo tiene buen alcance si es que se quiere analizar decisiones de reparación o reemplazo en un corto/mediano plazo.

El teorema de Bayes consta de tres términos probabilísticos, pero Kulkarni trabajó el denominador de manera de sólo trabajar con las probabilidades condicionales. El denominador de la expresión utilizada representa la probabilidad de encontrar estas características “c” en cualquier tubería, ya sea si presente roturas o no. Para obtener el formato original del teorema de Bayes es necesario desarrollar esta expresión. Esto es: si se desea la probabilidad no condicional del evento “c”, este se debe “condicionar” sobre algún evento “f” de un subexperimento que forme parte del experimento de interés. El evento “f” define una dicotomía en el espacio muestral, en donde el evento “c” puede ocurrir en dos caminos dependiendo si ocurrió f o f^C . Esto es:

$$c = cf \cup cf^C = cf + cf^C$$

Por lo tanto, gracias a la expresión de probabilidad condicional se obtiene:

$$P(c) = P(cf) + P(cf^C) = P(f) \cdot P(c|f) + P(f^C) \cdot P(c|f^C) = P_f \cdot P_{c|f} + (1 - P_f) \cdot P_{c|nf}$$

Siendo esta expresión la utilizada en el denominador de la relación utilizada por Kulkarni (1986).

$$P_{f|c} = \frac{P_{c|f} \cdot P_f}{P_{c|f} \cdot P_f + P_{c|nf}(1 - P_f)} = \frac{P_{c|f} \cdot P_f}{P_c}$$

Esta última expresión es utilizada por Ángela Martínez-Codina (2015) para analizar el comportamiento de la presión en distintos sectores de la Comunidad de Madrid y Ciudad de Panamá, para encontrar el indicador de presión que guarda mayor relación con las roturas de cada sector y así evaluar la gestión de presión en estas dos ciudades en particular. Algunos de estos indicadores son: promedio de presión, presión máxima, presión mínima, entre otros. Además en sus investigaciones propone obtener la tasa de rotura sólo considerando el tiempo que un punto de control de presión estuvo por sobre cierto umbral que aumenta la probabilidad de fallo. El modelo de probabilidad empleado es exclusivamente univariado: sólo depende de un predictor, la presión.

La metodología empleada por Martínez-Codina consiste en relacionar la función de distribución acumulada condicionada a los valores de presión que presentaron las roturas (FDA condicionada), es decir la función que permite obtener la probabilidad condicionada de las roturas ($P_{c|f}$), con la función de distribución acumulada confeccionada con la serie completa de presión (FDA genérica), esta permite obtener la probabilidad no condicionada (P_c). La relación que hay entre estas dos funciones de distribución es la que permite aumentar o disminuir la probabilidad de fallo: si esta relación es mayor a 1 la probabilidad aumenta, si es menor a 1 disminuye. Estos escenarios se pueden generar en ciertos rangos de valores que presentan los indicadores, por lo tanto esta relación tiene rangos de valores que podrían estar relacionados con las roturas.

Para encontrar el mejor predictor de la probabilidad de falla condicionada ($P_{f|c}$), se obtiene la serie completa de cada punto de control de presión de cada sector estudiado², se obtienen los valores de los distintos indicadores de presión que tuvieron las roturas registradas, se confecciona la función de distribución condicionada a las roturas y se compara estadísticamente con funciones de distribución acumulada confeccionada con datos aleatorios de la serie completa de presión. Esta comparación entre la FDA condicionada con cada FDA aleatoria se realiza mediante el test de bondad de Kolmogorov-Smirnov, el cual indica si las funciones de distribución acumulada provienen de la misma familia de datos. Si el valor estadístico obtenido es mayor al valor estadístico del test, la hipótesis nula se rechaza; en caso contrario no hay argumentos para rechazar la hipótesis nula de que los datos provienen de la misma distribución. Esta confección de series aleatorias, que representan el comportamiento cotidiano de la presión en el sector, se realiza ya que el test de bondad tiene mayor consistencia estadístico si se comparan funciones con la misma cantidad de datos. La FDA

²Los sectores estudiados son DMAs (*Districted Metered Areas*), los que se confeccionaron con la finalidad de mejorar la gestión del control de pérdidas de agua, no se confeccionaron para gestionar la presión

condicionada sólo tiene una cantidad de datos acotada por el número de roturas, en cambio la FDA genérica tiene los datos de toda la serie, por lo tanto para confeccionar una FDA aleatoria se toman valores aleatorios de la serie completa y se confecciona una FDA con la misma cantidad de valores que tiene la FDA condicionada a las roturas. Martínez-Codina (2015) señala que si hay un número considerable de hipótesis nulas rechazadas, se puede afirmar que el indicador estudiado no se asemeja con el comportamiento cotidiano de la presión, por ende ocurrieron anomalías en la presión momentos antes de que se produjeran las roturas.

Además con la intención de validar la metodología y tener un registro más amplio de resultados, la FDA condicionada a las roturas se hace para distintos tiempos de anticipación a las roturas y con distintos anchos de ventana. El tiempo de anticipación es el tiempo entre el final del período de cómputo del indicador de presiones y el instante de la rotura, y el ancho de ventana es el número de valores de presión instantáneos requeridos para calcular el indicador de presión (es un intervalo de datos). Por ejemplo, si se tiene una rotura registrada el día 5 de marzo del año 2017 a las 18.00 horas, y se quiere incluir esta rotura en la FDA condicionada con tiempo de anticipación a las roturas de 3 horas y un ancho de ventana de 1 día, se debe calcular el indicador de esa rotura con los datos que hay desde las 15.00 horas del día 4 de marzo hasta las 15.00 del día 5 de marzo del año 2017. La figura 9 ilustra cómo se obtienen los datos para calcular los indicadores de presión de cada rotura para distintos anchos de ventana y tiempos de anticipación, cómo se confecciona la FDA condicionada y cómo se compara con las distintas FDAs aleatorias ya explicadas.

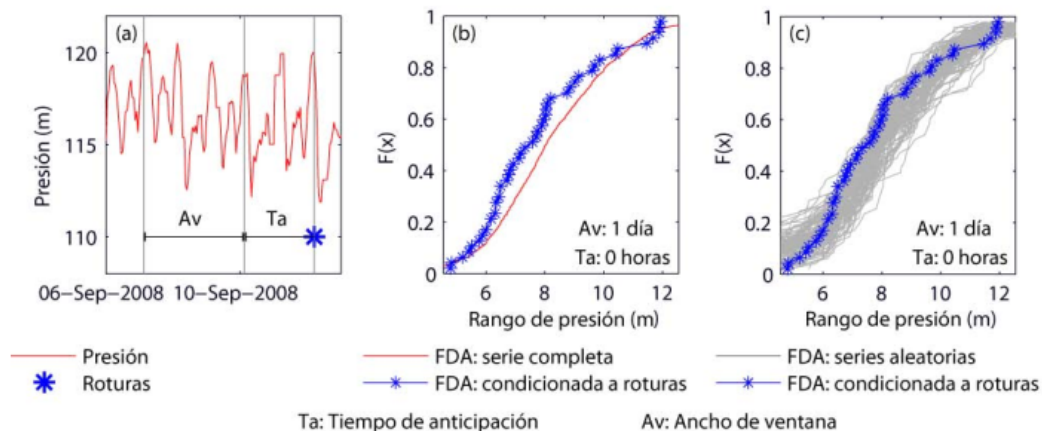


Figura 9: a) Cálculo del indicador condicionado a las roturas; b) comparación de FDA condicionada a las roturas y FDA de la serie completa; c) comparación de FDA incondicional a las roturas y 100 FDAs procedentes de la FDA de la serie completa. Fuente: Martínez-Codina (2016)

Una vez que se encuentra el indicador (o los indicadores) que rechazan una gran cantidad de hipótesis nulas, con un tiempo de anticipación y ancho de ventana dado, se relaciona la FDA condicionada con la FDA genérica para obtener los rangos de valores que incrementan efectivamente la probabilidad de falla condicionada. Esto significa encontrar qué valores del indicador de presión hacen que la relación de probabilidad ($\frac{P_{e|f}}{P_c}$) incremente la probabilidad de fallo (sea superior a 1) o disminuya la probabilidad de fallo (sea inferior a 1), como se ve en la figura 10, donde se muestra uno de los resultados de un sector estudiado por Martínez-Codina a modo de ejemplo (en dicha investigación nombran “Ratio de Probabilidad” a la Relación de Probabilidad mencionada en esta sección). Este límite que separa el aumento o la disminución de la probabilidad de fallo

tiene por nombre “umbral”.

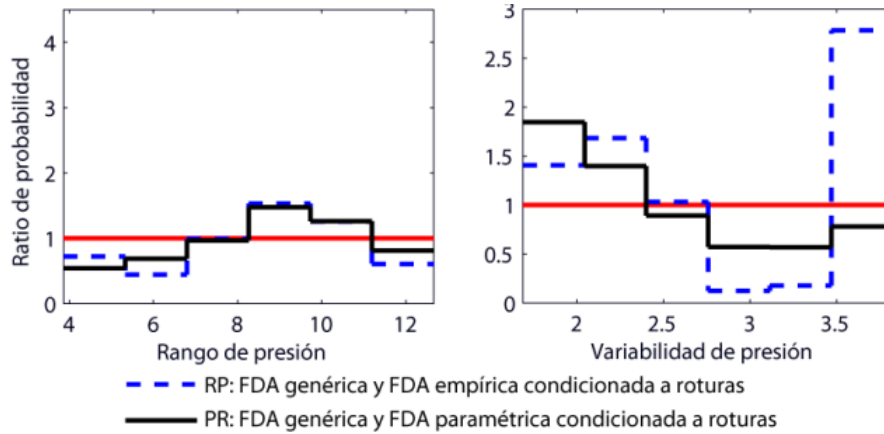


Figura 10: Intervalos de los indicadores del rango de presión y de la variabilidad de presión y su respectivo valor de la relación de probabilidad. Fuente: Martínez-Codina (2015)

La metodología propuesta por Ángela Martínez-Codina argumenta estadísticamente qué indicador de presión podría funcionar como un buen predictor de la probabilidad de falla de un conjunto de tuberías seleccionadas previamente para un modelo probabilístico (univariado o inclusivo multivariado), además de cuantificar los rangos de valores que incrementan, en distintas proporciones, la probabilidad de falla. Respecto a la metodología que presenta Martínez-Codina (2016), el número esperado de roturas que podría presentar un sector estudiado depende de la cantidad de horas en las que el indicador de presión estuvo sobre y bajo el umbral en el período de estudio. Esta cantidad de horas se proyecta en un período acotado en el futuro, esto permite predecir la cantidad de roturas que presentará el sector cuando el indicador aumenta o disminuye la probabilidad de falla. Esta separación, a través del umbral, se hace para cuantificar la cantidad de roturas que deberían surgir a partir de los rangos de valores que aumentan la probabilidad de falla, para así evaluar la gestión de presión, dado que si el indicador de presión realmente tiene estricta relación con la causa de las roturas en el sector, la gran mayoría de estas deberían acontecer cuando el indicador se encuentra sobre el umbral del aumento de la probabilidad de fallo. Este tipo de tasa de rotura se condice con lo señalado por Kleiner y Rajani (2001) respecto a los modelos bayesianos, quienes señalan que la mayoría de estos modelos se especializan en encontrar la probabilidad de fallo más que en predecir la cantidad de roturas, este modelo no es la excepción ya que la tasa propuesta sirve más para justificar el rango de valores que aumentan la probabilidad de falla que de predecir la tasa de rotura.

Watson et al. (2004), da un paso más allá del modelo de Kulkarni (1986), y considera el factor tiempo en la probabilidad de falla y en la tasa de rotura ocurrida en un período específico, pero a diferencia de Kulkarni, sólo se centra en la probabilidad condicionada y no considera la probabilidad no condicionada (denominador teorema de Bayes), trabaja con una expresión similar a la probabilidad condicional:

$$P(\lambda|data) \propto P(\lambda) \cdot P(data|\lambda)$$

Donde $P(\lambda)$ es la relación que hay entre el número total de roturas (N) y el tiempo considerado en el estudio (T), la que esta modelada por una función de intensidad que considera las características que presentaron las tuberías con roturas. En la expresión anterior $\propto$ significa proporcional, es decir que la probabilidad *posterior* es proporcional a la probabilidad *anterior*, creando un modelo bayesiano jerárquico. Esto significa partir de la probabilidad *anterior* obtenida con los datos del número de roturas en una unidad de tiempo, gracias al enfoque bayesiano se actualizan los datos de tuberías con características similares que no cuentan con registro de datos de roturas y se obtiene la probabilidad *posterior* de ocurrencia para un período de tiempo definido (Martínez-Codina, 2015). En un estudio posterior (Watson et al., 2006), en donde se modela la ocurrencia de roturas con un proceso no homogéneo de Poisson, concluye que el modelo de predicción no es del todo satisfactoria y que podría mejorarse teniendo en cuenta las tuberías que no tienen registro de roturas. Por lo tanto, el modelo se ve afectado por la falta de información de la red estudiada (Martínez-Codina, 2015).

Conclusión

Los factores (predictores) que pueden incidir en la rotura de una tubería son diversos, estos se pueden estudiar por separado, pero en la mayoría de las roturas la interacción de factores tanto estáticos como dinámicos es lo que determina realmente la causa del colapso del elemento. Por lo tanto, la probabilidad de falla es más realista cuando esta depende de varios factores.

Respecto a los modelos de predicción, existen varios tipos y muchos de ellos son satisfactorios, pero la gran mayoría tiene como impedimento el acceso a la información. Si bien los modelos bayesianos también necesitan una base de datos considerablemente robusta, en los estudios vistos en este capítulo el nivel de satisfacción es considerablemente mayor que los modelos físicos y deterministas. La gran ventaja de los modelos bayesianos se encuentra en la información que tienen las tuberías actualmente operativas, ya que las empresas del rubro tienen esta información, y en conjunto con la información de las roturas se puede saber el estado (la probabilidad) de los elementos de un sector acotado.

Respecto al cálculo de la tasa de rotura, los modelos bayesianos no son especialistas a menos que se tenga un gran registro de las roturas de la red, por lo tanto el utilizar un modelo de esta características permite evaluar el estado de las tuberías. Los resultados que arroje un modelo bayesiano se puede complementar con la frecuencia de roturas que existe en sectores específicos, además de factores económicos que permitan dilucidar de mejor manera qué segmentos de la red son mejores candidatos para un posible recambio.

4. Descripción de la Zona de Estudio

La empresa Aguas de Antofagasta S.A. es la empresa sanitaria encargada de proveer los servicios de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas servidas de todas las localidades de la región de Antofagasta. La empresa en el año 2014 pasó de estar a cargo del grupo minero Antofagasta PLC, a estar a cargo del Grupo EPM (Empresas Públicas de Medellín), empresa prestadora de servicios públicos (energía, gas y agua), la más grande de Colombia.

Hasta el año 2020, la empresa informó un total de 181.150 clientes de agua potable y/o alcantarillado atendidos en las etapas de distribución de agua potable y/o recolección de aguas servidas. Las localidades de su dominio son: Antofagasta, Calama, Tocopilla, Taltal, Mejillones, Baquedano y Sierra Gorda. La gran mayoría de las localidades presentan un proceso de captación, conducción, producción y distribución de agua potable, además de recolección y disposición de aguas servidas; salvo la localidad de Mejillones, que no presenta un proceso de captación propio. Dado el alcance de esta memoria, las siguientes secciones describen cómo se conforma y se distribuye la red de agua potable de la localidad de Antofagasta.

4.1. Descripción de la Red de Distribución de Agua Potable de Antofagasta

Según el último Informe de Gestión del Sector Sanitario (2021), ADASA cuenta con una longitud total de 1.236 km de red de distribución de agua potable y 1.084 km de longitud total en conducciones de agua potable. Respecto a la red de distribución, la localidad de Antofagasta tiene 744 km de longitud de tubería, eso corresponde a 60,2 % de total de la región.

La empresa dispone de un sistema de información geográfico (ArcGIS), esto es un sistema digital de información que contiene una base de datos que permite visualizar geográficamente la red de agua potable y alcantarillado; tiene como finalidad unificar la información de las distintas matrices y difundir esta información geográfica dentro de la empresa. Con esta base de datos se pueden identificar las distintas variables y parámetros de toda la red de las distintas localidades. Respecto a las tuberías de las matrices de distribución de agua potable, este sistema contiene la información del material, diámetro, longitud, año de instalación y geocalización de cada elemento de la red. En la figura 11 se muestra la distribución porcentual de la materialidad, diámetro y edad de las tuberías de la red de agua potable de la localidad de Antofagasta respectivamente.

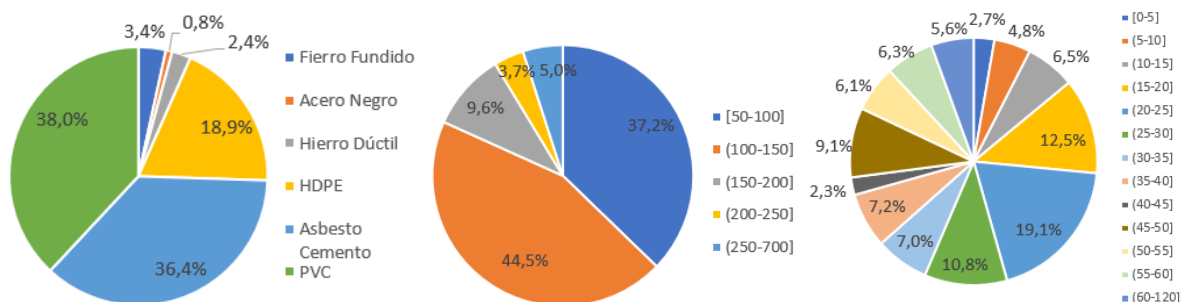


Figura 11: Izq: Distribución Porcentual de la materialidad de las tuberías de la Red de Agua Potable de Antofagasta. Medio: Distribución Porcentual de los diámetros de las tuberías de la Red de Agua Potable de Antofagasta. Der: Distribución Porcentual de la edad de las tuberías de la Red de Agua Potable de Antofagasta. Fuente: Elaboración Propia

4.2. Sectorización de la Red de Distribución de Antofagasta

La red de distribución de agua potable se encuentra dividida en distintas unidades geográficas. De mayor a menor envergadura territorial están definidas por abastecimiento, niveles de presión de servicio y válvulas de corte, respectivamente. Esto es:

- Zonas de Abastecimiento
- Sectores de Presión
- Cuarteles.

Respecto al abastecimiento de agua potable de la ciudad de Antofagasta, este se efectúa mediante dos fuentes de agua: los estanques *Caracoles*, que se abastecen de agua de cordillera potabilizada y la Planta Desaladora Norte de Antofagasta. Los estanques *Caracoles* se encuentran ubicados en la Quebrada Salar Del Carmen y reciben las aguas tratadas de la Planta de filtros *Salar Del Carmen*, que a su vez contiene la Planta Salar Del Carmen Nueva y Salar Del Carmen Antigua. Desde *Caracoles*, el agua es conducida hasta la ciudad a través de 2 tuberías alimentadoras: *Sur* y *Toconce*. En el nudo de interconexión entre la alimentadora *Sur* y *Toconce* nace la alimentadora *Norte* y más al norte de esta última nace la alimentadora *Cerro Moreno*. Las tuberías alimentadoras conducen el agua a los estanques de regulación de cada zona de abastecimiento. Por otro lado, la Planta Desaladora de Antofagasta abastece mediante impulsión a tres estanques de regulación de la ciudad. Es importante señalar que más de un estanque de regulación se abastece por más de una alimentadora y/o planta desaladora. La figura 12 contiene un esquema simple que ilustra el comienzo de la distribución de la red de Antofagasta.

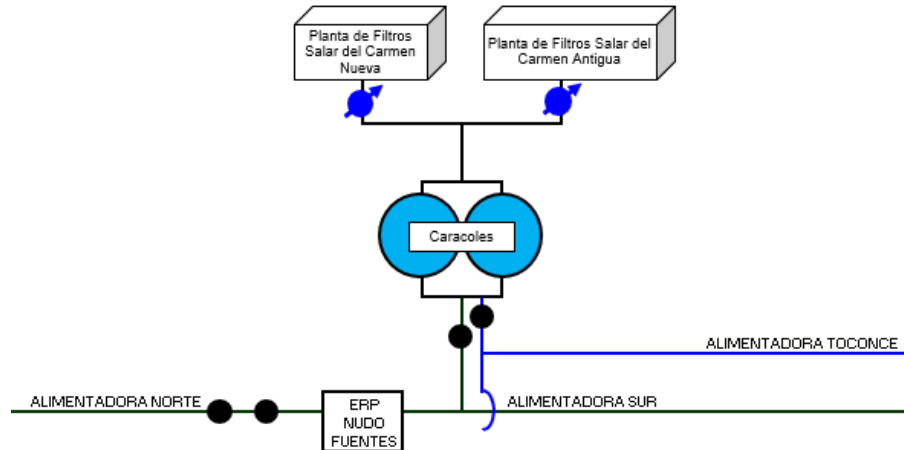


Figura 12: Abastecimiento de la Red de Agua Potable de Antofagasta. Fuente: Depto. de Confiabilidad de la Operación de Aguas de Antofagasta S.A.

4.2.1. Zonas de Abastecimiento

Esta localidad se encuentra dividida en 12 zonas de abastecimiento, cada una gobernada por un estanque (o batería de estanques) de regulación, salvo la zona 11 (población Bulnes) que está abastecida directamente de la alimentadora Norte. Las zonas de abastecimiento se confeccionaron sólo considerando la cantidad de clientes que podían ser abastecidos por un estanque de regulación (o batería de estanques), no responden a

un criterio otorgado por la Superintendencia de Servicios Sanitarios³. Toda zona de abastecimiento contiene en su interior unidades geográficas de menor tamaño: sectores de presión y cuarteles. La figura 13 ilustra la distribución de las distintas zonas de la ciudad.

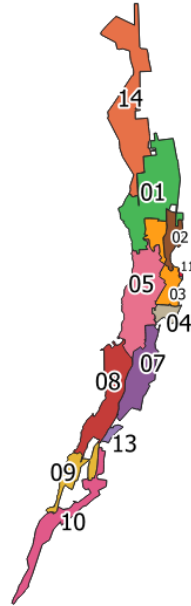


Figura 13: Zonas de Abastecimiento Agua Potable Antofagasta. El mar está a la izquierda de la figura, mientras que la cordillera de la costa está a la derecha. Fuente: Elaboración Propia

4.2.2. Sectores de Presión

La norma NCh 691 Of.1998 (y también en su actualización el 2015) establece valores límites máximos y mínimos a las presiones en los sistemas de distribución de agua potable en todo el dominio de la red. Esto es:

- **Presión Máxima:** La presión máxima de diseño, a nivel de terreno sobre la tubería, que corresponde a la presión estática, debe ser menor o igual que 0,686 MPa (70 mca). La presión estática está determinada por la cota de aguas máximas del estanque o por la presión máxima producida por la estación elevadora de presión, o por la consigna aguas abajo de la estación reguladora de presión.
- **Presión Mínima:** Para el caudal máximo horario, la presión mínima de diseño a nivel de terreno sobre la tubería, excluyendo el arranque domiciliario, debe ser 0,147 MPa (15 mca). Para el caudal máximo diario más el caudal de incendio, la presión mínima de diseño (presión crítica) a la salida del grifo debe ser 0,049 MPa (5 mca).

Para dar cumplimiento a esta disposición de valores límites, la Superintendencia de Servicios Sanitarios emitió un documento el año 2000, que se actualizó el año 2002, llamado *Procedimiento para monitoreo de presiones en redes de distribución de agua potable* (Instructivo N°2559-2002), el cual tiene como objetivo

³La Superintendencia de Servicios Sanitarios es un servicio nacional descentralizado que vela porque los habitantes del país reciban los servicios de las empresas sanitarias con calidad y continuidad, establecida en la normativa vigente. Todas las empresas concesionarias del sector sanitario se rigen bajo su regulación y fiscalización.

especificar el protocolo que han de cumplir las empresas concesionarias para monitorear su desempeño en la mantención de las condiciones de presión en redes establecidas en la NCh 691 Of.1998⁴.

Para que la presión de servicio esté dentro de los valores límites delimitados por la NCh 691, el instructivo N°2559 establece criterios de sectorización. Esto corresponde a la subdivisión del total del área de concesión de distribución, asignando a cada subdivisión (sector de presión) una fuente de presión de servicio que imponga una cota piezométrica controlada, como estanques hidroneumáticos, bombas de impulsión directa a la red o estaciones reductoras de presión, siendo este mecanismo el utilizado en la región de Antofagasta. Estos sectores de presión deben presentar la siguiente información:

- Demarcación del Territorio Operacional de la concesión de distribución.
- Delimitación de los sectores de control de presión.
- Fuentes de presión, su descripción, ubicación y cota piezométrica consignada.
- Red de distribución existente, con inclusión de válvulas y grifos.
- Puntos de control de presión establecidos en cada sector, su descripción, ubicación y cota de nivel de terreno consignada.

Estos sectores son denominados en la literatura universal como PMZ (*pressure manage zone*) o PMA (*pressure managed area*), ya que se crearon con la intención de gestionar de mejor manera la presión al contar con un fuente única de presión. En distintas redes de distribución existen los sectores en donde existe una sola entrada de caudal denominados DMA (*districted metered areas*), los cuales surgieron en un comienzo para disminuir las pérdidas de agua existentes en la red, además de estar independizados a través de válvulas de corte que tienen la facultad de impedir la circulación de agua entre sectores.

Para asegurar que cada sector cumpla con la presión de servicio, el instructivo N°2559 define unos puntos de control de presión (PCP) de la red de agua potable, basándose en la definición de los puntos de interés (presiones máximas, mínimas y críticas). La definición de estos puntos de control se definen a continuación:

- **Punto de control de presión estática máxima:** Se emplaza permanentemente en la cámara de grifo más próxima al punto de red con la menor elevación de un sector.
- **Punto de control de presión dinámica mínima:** Se emplaza permanentemente en la cámara de grifo más próxima al punto de red con la mayor elevación de un sector. Este punto también es denominado Punto de control de presión estática mínima.
- **Punto de control de presión dinámica crítica:** Se emplaza temporalmente en el punto de mayor riesgo de falla de las redes de un sector para los consumos máximos determinado por el concesionario de distribución a partir de sus modelos hidráulicos de la red, reclamos de clientes, el historial de fallas de presión, variación de demandas, pérdida de la capacidad de transporte u otra causal.

Como se menciona anteriormente, los PCPs se instalan considerando la definición de presión de servicio, presión máxima y presión mínima de la norma NCh 691. Este detalle se encuentra en la sección 10.1 del Anexo.

En los sectores en que se puedan omitir uno o más puntos de control de presión, se deberá contar con la justificación técnica que certifique esta circunstancia. Esto quiere decir que mediante modelamiento hidráulico se puede dar de baja un punto de control dado que dicho sector de presión no presenta problemas de presiones

⁴Esta norma se actualizó el año 2015, pero respecto a las consignas de presión máxima y mínima no presentó variaciones.

límite. La empresa ha seleccionado, para formar parte de este sistema de monitoreo de presiones, aquellos puntos de los cuales se tenga antecedentes que el punto presenta fallas en condiciones de máxima demanda, aún cuando la presión dinámica crítica sea superior a 15 mca. Esto significa que la empresa tendrá un monitoreo constante acorde al instructivo, pero el reporte de datos se hará de los puntos de control de presión que sí presenten problemas en el modelamiento hidráulico.

4.2.3. Cuarteles

Un cuartel es la sectorización de la red de agua potable en un área más pequeña. La definición de cuartel viene dada por la Norma NCh 691 Of.2015, esta es: mínima subdivisión de la red de distribución que está delimitada por válvulas de corte. Al cuartel también se le denomina subsector.

Los cuarteles deben disponer de válvulas que permitan aislarlos, limitando la suspensión del suministro a no más de 4 cuarteles. Los cuarteles se deben proyectar de modo que la longitud total de las tuberías sea menor a 1.000 m (se pueden proyectar cuarteles con más de 2.000 m sólo en áreas rurales).

4.3. Registro de Roturas de Tuberías

Dentro de los requerimientos y obligaciones que tienen las distintas empresas sanitarias para con la SISS, está el informe *Indicadores de Calidad de Servicio* (PR013001). En este se informa mensualmente 5 grandes tópicos: (1) Continuidad del servicio de agua potable, (2) Continuidad del servicio de recolección de aguas servidas, (3) Presión de servicio de agua potable, (4) Exactitud en el cobro del servicio y (5) Atención y respuestas a reclamos y emergencias.

Dado el alcance de esta memoria, se explica con detalle el informe asociado a la continuidad del servicio de la red de agua potable, ya que con esta información se puede obtener la cantidad de cortes de servicio que están asociados a una rotura de tubería.

4.3.1. Continuidad del Servicio de Agua Potable

Se informa mensualmente los cortes de suministro que afectaron la continuidad del servicio en sectores de la red de agua potable. Se deben informar todos los cuarteles que sean afectados por alguna discontinuidad de servicio, de acuerdo a las siguientes situaciones:

- Cuando el corte afecta a más de un cuartel, deben informarse tantos registros como cuarteles afectados. Esto se hace dado que un corte de suministro, cualquiera sea la naturaleza de su origen, puede abarcar más de un cuartel.
- En el caso de cortes en las redes de distribución en cuarteles donde existan clientes con infraestructura particular para acumulación de agua, es obligatorio informar dicho corte considerando el total de clientes de ese cuartel.
- Cuando se realicen reparaciones de tuberías sin corte de suministro, se debe informar el cuartel (o cuarteles) en el que se efectúa la reparación. Como existe suministro no se deben informar clientes afectados, de modo que no afecte el indicador de continuidad AP.

La fiscalización de la SISS se realiza por las órdenes de trabajo realizadas por la concesionaria y por el seguimiento de reclamos. Los requerimientos que tiene este informe no son todos obligatorios de informar. La cantidad total de datos que se deben informar en dicho informe se encuentran en la sección 10.2 del Anexo, a

continuación se presenta el detalle de información que permite asociar un corte de suministro a una rotura de tubería.

- **Falla:** Debe informar un Corte No Programado, esto se refiere a suspensiones del servicio ocasionadas por fallas en la infraestructura.
- **Clasificación Motivo:** Este debe informar falla de matriz (según la tabla 10, que se encuentra en la sección 10.2, debe informar el valor 1), siendo exclusivo de tuberías, dado que las conexiones y válvulas se detallan en otros motivos⁵.
- **Ubicación Falla:** Este ítem es el más importante para detectar el lugar exacto de la rotura. Debe informar una falla ubicada en el mismo cuartel informado (según la tabla 11, que se encuentra en la sección 10.2, debe informar el valor 1). El corte de suministro generalmente abarca más de un cuartel, por ende una rotura de tubería provoca que se informen varios cuarteles asociados al mismo suceso. Sólo los cortes informados que tengan el valor 1 en este ítem están asociados al lugar exacto donde ocurrió la rotura⁶. A modo de ejemplo se presenta la figura 14, esta contiene una rotura que provoca el corte de suministro en cuatro cuarteles, pero sólo en uno de ellos (color naranja) el corte informado contiene el valor 1 que indica que en ese cuartel ocurrió la falla del elemento.

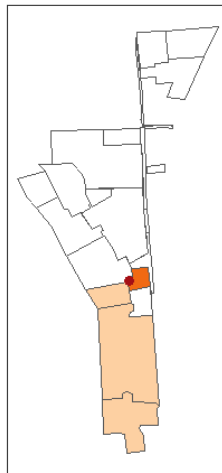


Figura 14: Cómo afecta una rotura en distintos cuarteles. Fuente: Elaboración Propia

Los ítems descritos anteriormente son los que determinan que el corte de suministro se debe a una falla de alguna tubería de la red. Pero como se ve en la sección 10.2 del Anexo, existen más tópicos a informar que son obligatorios como: hora de inicio del corte, duración del corte, fecha, coordenadas UTM, diámetro y número de orden de trabajo. Cuando ocurre una rotura y la empresa se dirige al lugar para evidenciar y reparar la falla se emite un informe de peritaje con un número de orden de trabajo, luego cuando se debe informar el corte de suministro en el informe PR013001 se debe incluir este número. La empresa cuenta con una plataforma web que almacena estos informes, y en ellos se detalla características de la falla y del elemento, como el diámetro y material del elemento que presenta rotura, tipo de falla, entre otras características. Esto se puede ver en la figura 15, donde se presenta la ficha de control de emergencias asociadas a discontinuidad debido a una rotura

⁵ mayor detalle en la tabla 10 de la sección 10.2 del Anexo

⁶ mayor detalle en la tabla 11 de la sección 10.2 del Anexo

ocurrida en el año 2016. Además de esta ficha, el informe presenta fotografías del lugar donde ocurrió la falla.

FICHA CONTROL INTERNO DE EMERGENCIAS CON DISCONTINUIDAD (R-DM-F-001)			
DEPARTAMENTO DE DESARROLLO OPERACIONAL			
FECHA	30-09-16	SUPERVISOR	Rosa Vega Oraya
OT	2943600	DIRECCIÓN	Tránsito SBYO
SUPERVISOR EE.CC	Heger	RESPONSABLE D1	Claudio
MÓVIL	110 Roberto	RESPONSABLE D2	Claudio
CARACTERÍSTICAS			
LLEGADA AL PUNTO SUPERVISOR	10:15	LONGITUD	7 mt
TIPO DE FALLA	Asestamiento	PROFUNDIDAD	1.50 mt
MATERIAL EXISTENTE	ASB	SOBRE EXCAVACIÓN	—
DIAMETRO EXISTENTE	35	RELLENO	—
MATERIAL REPARACIÓN	PVC	PAVIMENTO EXISTENTE	Asfalto
DIAMETRO REPARACIÓN	35	PAVIMENTO REPARACION	Asfalto
TIPO DE REPARACION	C/Tramo	M2	14 mts ±
TIEMPOS			
INICIO REPARACION	12:00	TERMINO REPARACION	14:40
CONTROL			
PROVOCADA	SI NO	OBRA PLAN DESARROLLO	SI NO
EMPRESA RESPONSABLE		EMPRESA	
SUPERVISOR		SUPERVISOR	
RUT			
FONO			
DIRECCION			
FIRMA SUPERVISOR EE.CC		FIRMA SUPERVISOR EZENTIS	

Figura 15: Ficha de control de interno de emergencias con discontinuidades. Fuente: Aguas de Antofagasta S.A.

4.4. Reposición e Inversión

La Superintendencia de Servicios Sanitarios maneja toda la información de los distintos cortes de suministro de todas las redes del país, por lo tanto se pueden identificar los cuarteles de las redes que presentan cortes no programados de manera reiterada. Para procurar resolver el problema de los cortes no programados, dada la reiteración registrada, la SISS generó un nuevo protocolo denominado “PR048-Plan de acción por cortes reiterados” con el que se tiene como finalidad principal resolver, en el más breve plazo posible, las deficiencias que originan estos cortes de suministro. Específicamente el protocolo busca definir, identificar y ordenar las acciones de las empresas orientadas al control y corrección de las causas de los cortes reiterados. Este informe se entrega una vez por semestre.

En dicho informe se debe informar todos los cuarteles que fueron afectados por dos o más cortes de suministro no programados durante un semestre. Se debe informar el diagnóstico de la falla (fatiga de material, falla en dispositivos hidráulicos, entre otros), la acción que la empresa tomó para dar solución a la reiteración de cortes (como reposición de tramos de tubería) y el avance que se tiene de estas obras. Si bien este protocolo permite solucionar el problema en diversos cuarteles, sobretudo los que presentan problemas prácticamente recientes, no permite realizar un diagnóstico más profundo en donde se haga un plan de recambio a largo plazo.

Por otro lado, la empresa realiza proyectos de renovación de infraestructura a raíz de la frecuencia de roturas en lugares específicos de la red, y no responde a ningún otro criterio. Algunos de estos nacen gracias al protocolo PR048, y otros se realizan por el alto número de roturas que registran ciertos tramos de tubería a

lo largo de los años y no necesariamente por registrar dos roturas en un semestre. Generalmente se hacen cambios de tramos de tuberías de asbesto cemento, dado que este material ya se encuentra en desuso, por lo tanto las tuberías de este material son las más antiguas.

Respecto a la solución instantánea que se utiliza para dar fin a un corte de suministro no programado producto de una rotura de tubería, se utilizan dos soluciones dependiendo de la gravedad de la rotura. Cuando la falla es menor y del tipo circunferencial se utilizan abrazaderas. En el caso de roturas más grandes, generalmente del tipo longitudinal, se hace recambio de un tramo de tubería, pero sólo donde ocurrió la falla. Es tan acotado el tramo a cambiar, que en el registro de características de la red que hay en el GIS no se cambia la información, esto se hace sólo cuando el cambio de tubería es de longitud considerable, como cuando se efectúan los proyectos de infraestructura. Por lo general la empresa ocupa tuberías de PVC para hacer la reposición instantánea⁷, estas se instalan en un tramo acotado mediante juntas desmontables independiente del material de la tubería que falló. La figura 16 presenta una tubería reparada con abrazadera y una reposición de tubería mediante tubería de PVC.



Figura 16: Izq: Tubería reparada con abrazadera producto de una rotura de menor gravedad. Der: Reposición de un tramo de tubería de Asbesto Cemento por una tubería de PVC, producto de una rotura de mayor gravedad. Fuente: Informes Orden de Trabajo Aguas de Antofagasta S.A.

La inversión realizada por la empresa en el último año (2020) fue de 64.642 pesos por cliente (MM\$84.031 en total), esta inversión se concentra mayoritariamente en la red de conducción de agua potable, le sigue la recolección de aguas servidas y por último la red de distribución de agua potable. Respecto a la reposición de elementos producto de los planes de desarrollo informados a la SISS, se cumplió el 98 % de estos. En el último año informado, de los 1.236 km de red de distribución se realizaron reposiciones de redes en 13 km, correspondiente al 1,03 % del total de la red. El porcentaje de reposición de red de distribución del año 2019 fue de 0,71 %.

En el año 2000 el Ministerio de Salud, mediante el decreto supremo DS MINSAL N°656/2000, estableció que ya no se puede instalar tuberías de asbesto cemento, ya que el asbesto es un mineral reconocidamente dañino para la salud cuando es inhalado al encontrarse en el aire en forma de fibras de asbesto libre, pudiendo causar graves enfermedades. Por lo tanto, a partir de esa fecha la reposición e instalación de redes de distribución de agua de todo el país, son realizadas con materiales exentos de asbestos. Aún así no existe un plan de recambio del total de estas tuberías, ya que en la actualidad el 36,95 % de la longitud de red de agua potable de Chile está construida en asbesto cemento. La reposición se realiza una vez que estas tuberías presentan fallas o bien cumplen su vida útil.

⁷En algunos tramos se repone con hierro dúctil o HDPE, es dependiente del tipo de falla y registro histórico de roturas

5. Metodología

En las siguientes secciones se detalla el procedimiento de cálculo de la probabilidad de falla de las tuberías dada sus propiedades intrínsecas, mediante el teorema de Bayes. Además se detalla el procedimiento de cálculo del indicador de presión que podría guardar estricta relación con las roturas de cada sector de presión, con el fin de analizar su comportamiento previo a las roturas históricas para así adelantarse a un corte de suministro de manera no programado y ayudar a la gestión de presiones de los puntos de control de los sectores de presión escogidos.

La metodología para obtener la probabilidad de falla mediante propiedades intrínsecas se estructura en las siguientes etapas:

1. Identificación de sectores de la red de distribución de agua potable de la localidad de Antofagasta que contengan información de posibles variables explicativas para ser analizadas.
2. Selección de variables explicativas para aplicar el modelo de probabilidad.
3. Construcción de funciones de distribución acumulada para obtener la probabilidad de falla de los elementos seleccionados mediante un enfoque bayesiano.
4. Procedimiento de validación del resultado, comparando la frecuencia de roturas con la probabilidad de falla de las tuberías.

Por otro lado, el análisis del predictor de presión se divide en:

1. Filtrado de datos a utilizar por sector de presión escogido.
2. Análisis de los distintos indicadores de presión por sector.
3. Obtención de la relación de probabilidad por sector.

5.1. Primera parte: Probabilidad de Falla mediante Propiedades Intrínsecas

5.1.1. Identificación de Zonas con Información y Período de Estudio

Como se menciona en el marco teórico de este informe, el nivel de satisfacción de los modelos de predicción se ve afectado por la cantidad de datos disponible. Por lo tanto, para llevar a cabo la metodología propuesta, se debe contar con una base de datos lo más robusta posible de roturas de tuberías, que contenga información de distintas variables explicativas que permitan obtener la probabilidad de falla condicionada. Además los modelos, cual sea su naturaleza, que presentan mayor homogeneidad entre los datos, presentan mayor satisfacción.

Del párrafo anterior se desprenden dos argumentos que permiten crear dos criterios para escoger el alcance geográfico del modelo a emplear:

Criterio N°1: Análisis por Zona de Abastecimiento

El modelo se emplea a nivel zonal, esto quiere decir que se obtendrá la probabilidad de falla de los elementos considerando las tuberías que están dentro de una zona de abastecimiento como el total. Esto ya que la red de distribución se fue ampliando a medida que la ciudad fue creciendo, por ende las tuberías que se instalaron contienen características similares entre sí. Además, la empresa cuando hace planes de reposición (recambio)

de tuberías dada la alta frecuencia de roturas en lugares específicos, lo hace por zona de abastecimiento, por ende las nuevas tuberías siguen teniendo características implícitas similares entre sí.

Criterio N°2: Análisis Exclusivo de Zonas de Abastecimiento Críticas

Según lineamientos de la SISS, los informes de orden de trabajo por rotura de tubería, deben ser almacenados por la empresa por un período de 2 años desde que se informa en el informe PR013001. Estos informes son el único registro oficial que permite obtener el material y diámetro de manera fidedigna. Como se ha mencionado anteriormente, la empresa sanitaria cambió de dueño en el año 2014, esto trae consigo cambio de estructuración en la empresa y por consiguiente políticas nuevas. Durante este cambio, desafortunadamente hubo pérdida de información, siendo los informes asociados a órdenes de trabajo por rotura de tubería uno de los registros que se vio afectado.

La empresa desde el año 2014 tiene la política de almacenar todo informe de orden de trabajo, aun así existen órdenes de trabajo que ya no cuentan con un informe asociado, por lo tanto se analizan sólo las zonas que cuentan con mayor cantidad de roturas (mayor robustez del análisis) y sólo se incluyen las roturas de los sectores de presión que cuenten con un amplio registro de roturas, donde efectivamente existan los informes que permiten obtener los valores de las variables explicativas de las tuberías (mayor representatividad del resultado). Además, dado el cambio de dueño de la empresa y el prácticamente nulo registro que existe de las roturas de tuberías antes del año 2014, se decide acotar el período de recopilación de información desde el año 2014 hasta el año 2020 (incluyéndolo).

Los sectores de presión que entran en este modelo son los que contienen un cantidad de roturas de manera tal que la suma de roturas entre sectores equivalga mínimo a un 70 % del total de roturas de la zona de abastecimiento. A modo de ejemplo, si una zona de abastecimiento contiene 5 sectores de presión donde el sector de presión N°1 contiene 30 roturas, el sector de presión N°2 contiene 30 roturas, el sector de presión N°3 contiene 25 roturas, el sector de presión N°4 contiene 10 roturas y el sector de presión N°5 contiene 5 roturas, sólo se consideran las roturas que están en los sectores de presión 1, 2 y 3 ya que son los sectores que tienen mayor frecuencia de roturas y además la suma de estas equivalen al 85 % de la zona de abastecimiento, luego se comprueba si cada rotura de este nuevo total contiene la información pertinente. Esto se realiza dado que la pequeña cantidad de roturas de los sectores se puede atribuir a eventos fortuitos y podría distorsionar los resultados, por lo tanto el trabajar con los sectores con mayor cantidad de roturas focaliza aún más el análisis, considerando que el fin principal de esta investigación es encontrar lugares específicos que necesiten un recambio de tubería por tener una alta probabilidad de fallar en un futuro cercano. Esta decisión además está respaldada por el hecho de que en los sectores con menor cantidad de roturas hay una cantidad considerable de roturas que no tienen informes de orden de trabajo vigentes en el registro de la empresa. Los sectores de presión que entran en el modelo se denominan sectores de presión críticos.

Martínez-Codina (2018) sostiene que para mantener las propiedades del conjunto total de tuberías es necesario realizar un muestreo estratificado de las roturas. En este caso no es necesario realizar esto dado que a diferencia de Martínez-Codina, el resultado y análisis se efectúa sólo en los sectores escogidos, los cuales son representados por el total de roturas registradas en ese dominio, no se extrapola el resultado a los sectores que no son incluidos en el modelo. Para explicar el criterio anterior, donde se hace una selección de los sectores de presión que se incluyen en el modelo, se presenta la figura 17, donde se muestra el total de roturas de una zona de abastecimiento que contiene 15 sectores de presión. En dicha zona se nota una concentración de roturas en 4 sectores de presión, donde son estos los que tienen mayor cantidad de roturas y la suma de roturas

entre estos sectores equivalen a un 73 %, por ende sólo estos sectores se incluyen en el modelo de probabilidad.

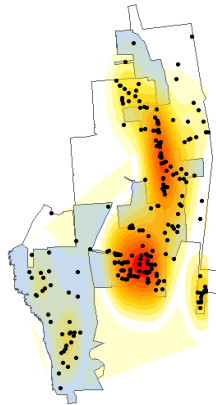


Figura 17: Mapa de Calor del Total de Roturas en la Zona 1 de Antofagasta. Fuente Elaboración Propia

5.1.2. Selección de Variables Explicativas

La información de los elementos operativos de las distintas matrices actualmente se encuentra en el sistema de información geográfico, donde se puede encontrar el año de instalación del elemento, su diámetro y material. En el caso de las roturas, como se ha mencionado, el informe asociado a la orden de trabajo de un rotura contiene fichas e imágenes que permiten identificar el diámetro y material de la tubería rota, además en el registro del informe PR013001 se puede saber la fecha y hora del corte de suministro. En dicho informe no se puede saber el año de instalación del elemento, por ende, para saber su edad es necesario dirigirse a los archivos *shape* (GIS) y verificar el año de instalación de la tubería que está operativa, si coinciden las características se puede asumir que la tubería operativa es la que sufrió una rotura. En el caso en el que se esté buscando el año de una tubería de asbesto cemento que ya se cambió por otro elemento de otro material, se debe verificar si existen tuberías de similares características cercanas a las coordenadas informadas, para así asumir un año de instalación y obtener la edad de la tubería⁸. Desafortunadamente el largo de la tubería que sufrió rotura no se encuentra en todos los informes, por ende no se puede utilizar esta variable explicativa. En la tabla 3 se muestran distintas variables explicativas y su disponibilidad. Se decide dejar fuera los indicadores de presión del cálculo de la probabilidad de falla mediante varias variables, dado que no todos los sectores tienen un registro de presión instantánea para incluir en el análisis. Muchos autores afirman que la presión es un factor importante a incluir, y por esto se decide trabajar por separado esta variable, a nivel de sector. Esto se explica en la segunda parte de la metodología.

5.1.3. Construcción del Modelo Bayesiano

El modelo predictivo utilizado permite obtener la probabilidad de ocurrencia (de rotura en este caso) mediante la estadística de las variables seleccionadas: el teorema de Bayes. Este modelo permite obtener el estado

⁸Desafortunadamente, como el período de estudio son sólo 7 años ([2014-2020]), son muy pocas las roturas que presentaron este problema.

Tabla 3: Información de las distintas variables explicativas para caracterizar las tuberías

Tipo	Variable	Disponibilidad	Selección
Estático	Material	Sí	Sí
	Diámetro	Sí	Sí
	Longitud	Sin información	No
	Suelo	Sin información	No
	Espesor	Sin información	No
Dinámico	Edad	Sí	Sí
	Temperatura	Sin información	No
	Humedad Suelo	Sin información	No
Operacionales	Presión Instantánea	Sí	Sí
	Presiones Transitorias	Sin información	No
	Velocidad del agua	Sin información	No

probabilístico de una tubería dentro de un subconjunto de tuberías previamente seleccionado (sectores de presión críticos de una zona de abastecimiento), en base al comportamiento de las roturas utilizadas.

Para determinar la probabilidad de rotura de tubería condicionada a que tenga ciertas características, es necesario explicar cómo se obtiene el teorema de Bayes. En un caso genérico, donde se quiere encontrar la probabilidad de encontrar una característica **A** condicionada a que se sabe que en un conjunto de elementos ya se encuentra la característica **B** (ambos características independientes entre sí), dentro de un total de datos Ω viene dada por la siguiente expresión.

$$P(A|B) = \frac{P(AB)}{P(B)} = \frac{\frac{|A \cap B|}{|\Omega|}}{\frac{|B|}{|\Omega|}} = \frac{|A \cap B|}{|B|}$$

La expresión anterior (probabilidad condicional) permite llegar al teorema, pero primero es necesario recurrir a un simple truco matemático. El truco consiste en la regla de la cadena, este significa dividir el evento A como una secuencia de sub eventos de manera que A se pueda expresar como la intersección de los eventos A_1 y A_2 :

$$A = A_1 \cap A_2 = A_1 A_2$$

Con esta unión de sub eventos, y con la expresión básica de probabilidad condicional, se puede representar la probabilidad de ocurrencia de A de la siguiente manera.

$$P(A) = P(A_1 \cap A_2) = P(A_1 A_2) = P(A_1)P(A_2|A_1)$$

que también se puede expresar como:

$$P(A) = P(A_1 \cap A_2) = P(A_1 A_2) = P(A_2)P(A_1|A_2)$$

Con este truco, se puede encontrar la probabilidad de obtener la característica A dado que se sabe que se tiene la característica B ($P(A|B)$), en función de la probabilidad de obtener la característica B dado que se sabe que se tiene la característica A ($P(B|A)$). Esto es:

$$P(A|B) = \frac{P(AB)}{P(B)} = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}$$

ya que que $P(AB)$ se puede obtener con $P(A) \cdot P(B|A)$ o con $P(B) \cdot P(A|B)$. Este truco permite obtener el teorema de Bayes, que para efectos de esta investigación permite obtener la probabilidad de que una tubería experimente una rotura dada la condición de tener ciertas características. Esta última probabilidad mencionada, en la expresión anterior corresponde a $P(A|B)$, y con la información que se puede obtener de las características de las tuberías que experimentaron alguna rotura se puede encontrar $P(B|A)$. Por último, la probabilidad de rotura no condicionada del sistema, en la expresión genérica del teorema de Bayes es $P(A)$.

Para el caso concreto de esta investigación, la probabilidad queda sujeta a dos grupos:

- Suceso A : la tubería entra en el grupo de tuberías que comparte la característica A
- Suceso f : la tubería presentó rotura (falló) en algún momento

La probabilidad de rotura del sistema viene dado por la relación que existe entre el total de elementos que presentaron roturas (N_f), en un período de estudio escogido (2014-2020), y el total de tuberías que estuvieron operativas en el período de estudio en la zona de la red de agua potable que fue escogida para ejecutar el modelo (N_T).

$$P(f) = \frac{N_f}{N_T} \quad (1)$$

Para encontrar la probabilidad de ocurrencia de los otros dos términos que conforman el teorema de Bayes es necesario definir la probabilidad de ocurrencia en términos genéricos, donde se necesita encontrar la probabilidad de ocurrencia dentro de un conjunto de datos cuantitativos de la variable X . La probabilidad de ocurrencia de X hasta el valor x es:

$$P(X < x) = \int_0^x f(\tau) d\tau = F(x)$$

La probabilidad de ocurrencia de un valor mayor que x es:

$$P(X > x) = \int_x^{\infty} f(\tau) d\tau = 1 - F(x)$$

Con estas definiciones se puede encontrar la probabilidad de ocurrencia dentro de un período $[x, x + \Delta x]$.

$$P(x < X < x + \Delta x) = \int_x^{x+\Delta x} f(\tau) d\tau = F(x + \Delta x) - F(x)$$

Donde $F(x)$ es la función de distribución acumulada de la variable X . Esta función es la que permite encontrar la probabilidad de ocurrencia de una variable en cualquier intervalo de datos, como se explicó anteriormente.

Por un lado se tiene la información de las roturas, y por otro se tiene la información de todas las tuberías que están (y estuvieron) operativas en la red de distribución. Con la información de las roturas se genera la función de distribución que permite obtener la probabilidad de obtener ciertas características en las tuberías que presentaron rotura. A continuación se presenta la probabilidad de encontrar la característica A en este conjunto de tuberías, en un intervalo $[x, x + \Delta x]$.

$$P(A|f) = P(x \leq A < x + \Delta x|f) = F_{Af}(x + \Delta x) - F_{Af}(x) \quad (2)$$

La función de distribución que permite obtener la probabilidad de encontrar una característica A sin estar condicionado a las roturas (denominada por varios autores como probabilidad genérica), se obtiene de manera similar al planteamiento matemático anterior, salvo que el conjunto de datos con los que se obtiene esta función es con el total de tuberías que estuvieron operativas en el intervalo de tiempo escogido para recopilar la información, es decir este conjunto de datos es la suma entre las tuberías operativas actuales y las que presentaron roturas.

$$P(A) = P(x \leq A < x + \Delta x) = F_A(x + \Delta x) - F_A(x) \quad (3)$$

El teorema de Bayes para encontrar la probabilidad de que una tubería presente rotura (falle) dado que presente una característica A , en un intervalo $[x, x + \Delta x]$, se obtiene gracias a las expresiones 1, 2 y 3, y viene dado por la siguiente expresión.

$$P(f|A) = \frac{F_{Af}(x + \Delta x) - F_{Af}(x)}{F_A(x + \Delta x) - F_A(x)} \cdot \frac{N_f}{N_T} \quad (4)$$

Para el caso de un modelo probabilístico multivariado, en donde la ocurrencia de las variables explicativas de los elementos en estudio son independientes entre sí, se puede dividir la probabilidad genérica y la probabilidad asociada a las roturas según la cantidad de variables incluidas en el modelo. Cuando las variables son independientes, la función de densidad conjunta se obtiene mediante el producto de las funciones de densidad marginales de cada una de las variables (Gómez Martínez, P., 2017). Por lo tanto, sean A_1 y A_2 eventos mutuamente excluyentes y f un evento cualquiera del que se conocen las probabilidades condicionales $P(A_1|f)$ y $P(A_2|f)$ la probabilidad $P(f|A_1 \cap A_2)$ en un intervalo $[x, x + \Delta x]$ se define como:

$$P(f|A_1 \cup A_2) = \frac{F_{A_1f}(x + \Delta x) - F_{A_1f}(x)}{F_{A_1}(x + \Delta x) - F_{A_1}(x)} \cdot \frac{F_{A_2f}(x + \Delta x) - F_{A_2f}(x)}{F_{A_2}(x + \Delta x) - F_{A_2}(x)} \cdot \frac{N_f}{N_T} \quad (5)$$

que según las expresiones anteriores también se puede expresar de manera más sencilla como:

$$P(f|A_1 \cup A_2) = \frac{P(A_1|f)}{P(A_1)} \cdot \frac{P(A_2|f)}{P(A_2)} \cdot P(f) \quad (6)$$

De las definiciones anteriores se puede ver que la probabilidad de rotura (falla) asociada a las características A_1 y A_2 es una multiplicación de la probabilidad de falla del sistema $P(f)$ con la relación que existe entre la probabilidad asociada a las roturas y la probabilidad genérica. Esto genera información importante del resultado del teorema en cada zona aplicada de la red de agua potable, dado que la alta frecuencia de roturas que podrían tener ciertas características es importante (numerador), pero no implica necesariamente que la probabilidad de falla asociada a estas características sea alta, esto ya que esta gran frecuencia de roturas se puede ver opacada por la gran cantidad de tuberías que comparten estas características (denominador).

La función de distribución acumulada es la encargada de obtener la probabilidad de ocurrencia en un conjunto de datos, ya sea condicionada o no. Genéricamente, como se demostró anteriormente, esta función se obtiene gracias a la función de densidad de un conjunto de datos; en esta investigación estas funciones se obtienen sólo con las observaciones de datos que existen de cada variable explicativa. La función de distribución puede ser de carácter continua o discreta, dependiendo de la naturaleza de la variable. En el caso de esta parte de la investigación, en este modelo se trabaja con una variable cualitativa discreta (material), cuantitativa discreta (diámetro) y cuantitativa continua (edad). Para el caso de una variable discreta la confección de la función de distribución tiene el siguiente orden: se discretiza la variable en varios grupos y se obtiene la cantidad de observaciones por grupo. Luego a cada grupo se le asigna una probabilidad de ocurrencia correspondiente a: $(\text{cantidad de datos del grupo})/(\text{cantidad total de datos})$. Finalmente se ordenan los grupos de menor a mayor valor y se le asigna a cada grupo una probabilidad acumulada. En el caso del material el orden no afecta dada la naturaleza de la variable, pero en el caso del diámetro este se debe ordenar de menor a mayor, como se muestra en la figura 18. En esta figura se puede apreciar que esta variable está dividida en diámetros cada 50 mm, esto se hace para que cada diámetro pueda ser representado por una cantidad considerable de datos. En el caso de la edad, que puede ser una variable que se le atribuya el carácter de continua, también se puede trabajar como una función de distribución discreta, ya que la cantidad de datos que existe de un número específico de edad puede ser muy pequeño y para que este valor de edad sea representado de buena manera por una probabilidad, es mejor agrupar las edades en grupos de mayor tamaño. Por esta razón se decide trabajar esta variable con una función de distribución discreta. Todo esto se puede ver en la figura 18.

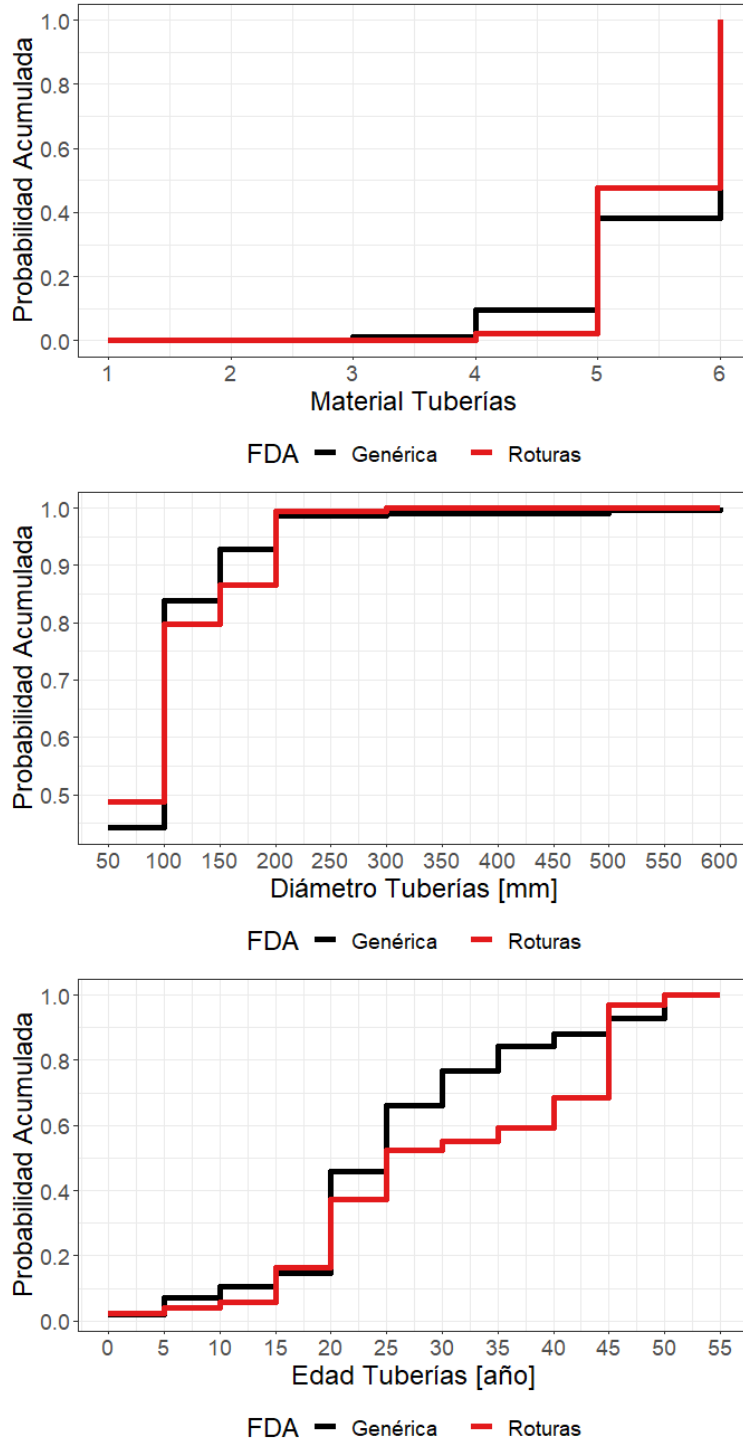


Figura 18: Arriba: Función de Distribución Acumulada de la variable Material (1: Fierro Fundido, 2: Acero negro, 3: Hierro Dúctil, 4: HDPE, 5: Asbesto Cemento, 6: PVC). Medio: Función de Distribución Acumulada de la variable Diámetro, agrupada en diámetros cada 50 mm. Abajo: Función de Distribución Acumulada de la variable Edad, agrupada en edades cada 5 años. Fuente Elaboración Propia

Una vez obtenidas las funciones de distribución acumulada de cada variable, para el conjunto de datos genérico como el conjunto de datos condicionado a las roturas, se puede obtener la probabilidad de rotura de cada tubería de los sectores escogidos gracias a la expresión 6. Se obtiene una probabilidad de ocurrencia para cada grupo de cada variable, en donde la probabilidad se acrementa (o disminuye) si es que hay una gran diferencia entre la FDA genérica y la FDA condicionada.

5.1.4. Procedimiento de Validación

A cada tubería operativa se le puede atribuir una probabilidad de rotura, esto ya que existen archivos *shape* que tienen las características de todos los elementos de la red de agua potable. Como los archivos *shape* se caracterizan por entregar las características de manera georreferenciada, se puede ver como se distribuye la probabilidad de rotura en la zona estudiada, generando un mapa de probabilidad. Este mapa de probabilidad se tiene que comparar con lo que realmente pasó en un período de validación, comparando la probabilidad con las roturas que se registraron en dicho período. El período de validación transcurre desde 01-01-2021 hasta el 30-11-2021. El modelo tiene una buena evaluación si es que gran parte de las roturas del período de validación corresponde a tuberías que arrojan una alta probabilidad de rotura. Esto se puede ver en la figura 19, donde a cada centroide de cada tubería se le atribuye la probabilidad de rotura según las características que esta posea.

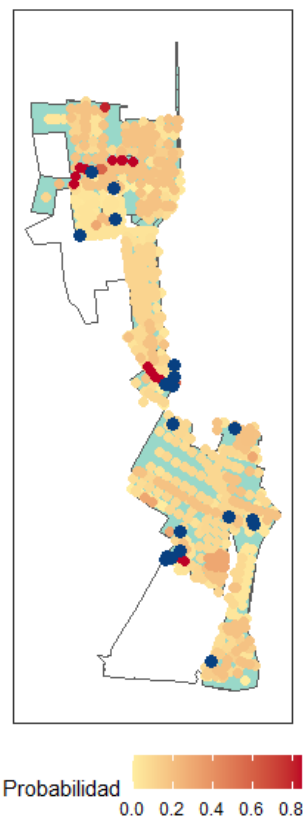


Figura 19: Ubicación Geográfica de Roturas del Período de Validación (color negro) dentro del Mapa de Probabilidad de Rotura de una Zona de estudio. Fuente Elaboración Propia

5.2. Segunda parte: Análisis de Presión

Saber cómo se comportan algunos indicadores de presión antes de las roturas registradas permite obtener la probabilidad de falla de manera más eficaz, además de proporcionar información de cómo se podría mejorar la gestión de presiones para evitar posibles fallas en el futuro. El objetivo de esta sección de la metodología es evaluar estadísticamente cuál indicador de presión proporciona mayor información útil a la hora de evaluar la probabilidad de falla de una tubería para un sector de presión en específico. Gran parte del análisis de presión que se explica en esta sección fue postulado por Ángela Martínez-Codina en su tesis doctoral del año 2015.

La metodología se basa en comparar estadísticamente el comportamiento histórico de presión de un sector de presión con lo ocurrido antes de las roturas registradas en dicho sector. Esto se realiza comparando la función de distribución acumulada asociada a las roturas (probabilidad condicionada) con la función de distribución acumulada confeccionada con la serie completa de presión (probabilidad genérica). Esta comparación se efectúa mediante un test estadístico que permite saber si la familia de datos de ambas funciones son parecidas o no entre sí. Cuando se demuestra estadísticamente que estas funciones no provienen de la misma población, se podría afirmar que el indicador de presión analizado tiene influencia en la ocurrencia de las roturas de las tuberías de dicho sector (Martínez-Codina, 2015).

Respecto al alcance geográfico del modelo, se trabaja por sector de presión (también denominado *PMA* en la literatura universal), al igual que al trabajo postulado por Martínez-Codina. En dicha tesis el modelo es ejecutado en un sector, en donde la presión es obtenida de un punto de control de presión que caracteriza todo el sector. La empresa ADASA tiene distintos puntos de control de presión en cada sector de presión (como se señala en la sección 4.2.2), donde el punto de control de presión dinámica crítica tiene un registro temporal más robusto que los otros dos PCP, ya que en la plataforma web donde se albergan los datos de presión instantánea de este PCP (plataforma i2o) se almacenan desde el año 2015, en cambio los otros dos PCP sólo tienen registro de valores de presión desde el año 2019 (plataforma Wiseaccess). Además, la plataforma i2o puede controlar subidas y/o bajadas abruptas de presión, lo que hace que el dato registrado sea más confiable. Por lo tanto, se decide ejecutar el modelo de análisis en cada sector de presión crítico de cada zona crítica que contenga un registro robusto de presión del punto de control de presión dinámica crítica.

El punto de control de presión dinámica crítica tiene la particularidad de registrar valores similares de presión entre cada sector de presión, esto dado que se emplazan en lugares cercanos a la estación reguladora de presión, es decir lugares de alta cota en comparación al resto del sector de presión. Antofagasta se caracteriza por estar situada desde la costa hasta la falda de los cerros de la cordillera de la costa, por ende existe pendiente a lo largo de todos los sectores de presión, esto exige que los valores de presión del PCP de presión dinámica crítica sean bajos para que la presión en el punto de menor cota del sector de presión no sobrepase lo establecido en la norma NCh 691 Of.2015.

La decisión de ejecutar el modelo por sector de presión y no por zona de abastecimiento se sustenta por dos razones:

1. Cada sector de presión tiene un registro propio, como se puede ver en la sección 10.3 del Anexo, en donde el comportamiento de presión para dicho PCP es relativamente similar entre sectores, pero existen diferencias topográficas entre estos que hacen que el análisis zonal sea muy diverso. Si bien una consigna de presión dinámica crítica en dos sectores puede ser la misma, esta no representa lo mismo en términos de operación del sector. Por ejemplo el sector de presión 0104 de la zona N°1 está en la costa de la ciudad, el cual es mucho más homogéneo topográficamente en comparación al sector 0102 de la

misma zona, que está próximo a la falda de la cordillera de la costa, donde la topografía es bastante heterogénea. Ejecutar el modelo por sector de presión permite obtener la probabilidad de falla sólo en dicho sector, lo que dificulta la decisión de proponer un lugar dentro de la zona que está propenso a fallar, pero permite evaluar el comportamiento de presión de manera más precisa y localizada.

2. Desafortunadamente no todos los sectores de presión del dominio de ADASA tienen un registro histórico de valores de presión de la PCP escogida. Si bien el punto de control de presión dinámica crítica se controla mediante el software i2o, el cual registra valores desde el año 2015 a la fecha, no todos los sectores tienen un PCP que registra todos los valores de presión (en muchos casos existe pérdida de datos por múltiples circunstancias), por ende no todas las roturas tienen un registro de presión donde sustentarse para ejecutar el modelo. Esto dificulta obtener un análisis a nivel zonal, ya que de todos los sectores que entran en el modelo de una zona crítica, no todos tienen un número de roturas que permita que el análisis estadístico/probabilístico sea óptimo o representativo.

Esta metodología se divide en tres etapas: obtención de datos de presión, análisis de los indicadores de presión y obtención de la relación de probabilidad por sector de presión.

5.2.1. Obtención de Datos de Presión

Lo primero es obtener los valores de presión instantánea del punto de control de presión dinámica de cada sector escogido, los cuales registran los valores de presión cada 15 minutos. Este estudio se sustenta en base a la confianza del dato que se registra, y la empresa sostiene que si existe un peak de valor alto de presión en la serie de presión, este efectivamente ocurrió, pero caso contrario si existe un peak de valor bajo de presión, específicamente si este valor es negativo, esto puede ser producto de la realidad, como por ejemplo cuando ocurren fenómenos transitorios, pero en la mayoría de los casos es producto de un error de medición del equipo. Es por esta razón que se omiten los valores negativos en las series de presión de los distintos puntos de control, para evitar trabajar con datos ficticios.

Una vez obtenida la serie de presión de cada punto de control, se realiza el cruce de información con las roturas clasificadas como roturas de tubería del documento PR013. Sabiendo la fecha y hora de las roturas de tuberías se puede saber el rango de tiempo con el que se puede obtener los valores de presión que interesan para la confección de la FDA asociada a las roturas y para la FDA asociada al comportamiento cotidiano de presión. En la figura 20 se ilustra la serie de presión con datos filtrados del sector de presión 0104 de la zona de abastecimiento N°1.

Para aplicar la metodología propuesta se debe trabajar con los datos de presión de los puntos de control que abarcan el tiempo en donde se registran roturas. Si existen fallas informadas asociadas a roturas de tuberías en un sector específico en los años 2015, 2016 y 2017, y sólo se cuenta con registro de presión desde el año 2017, sólo se trabaja con los valores de presiones emitidos durante ese año. Si bien los valores de presión se repiten diariamente, existen variaciones de consignas que impiden incluir la serie de presión registrada en los años 2015 y 2016 para este ejemplo (ficticio) en particular.

5.2.2. Análisis de los Indicadores de Presión

El siguiente paso en la metodología es obtener las funciones de distribución acumulada para los distintos indicadores de presión. Estos indicadores de presión son obtenidos de la literatura clásica que además son

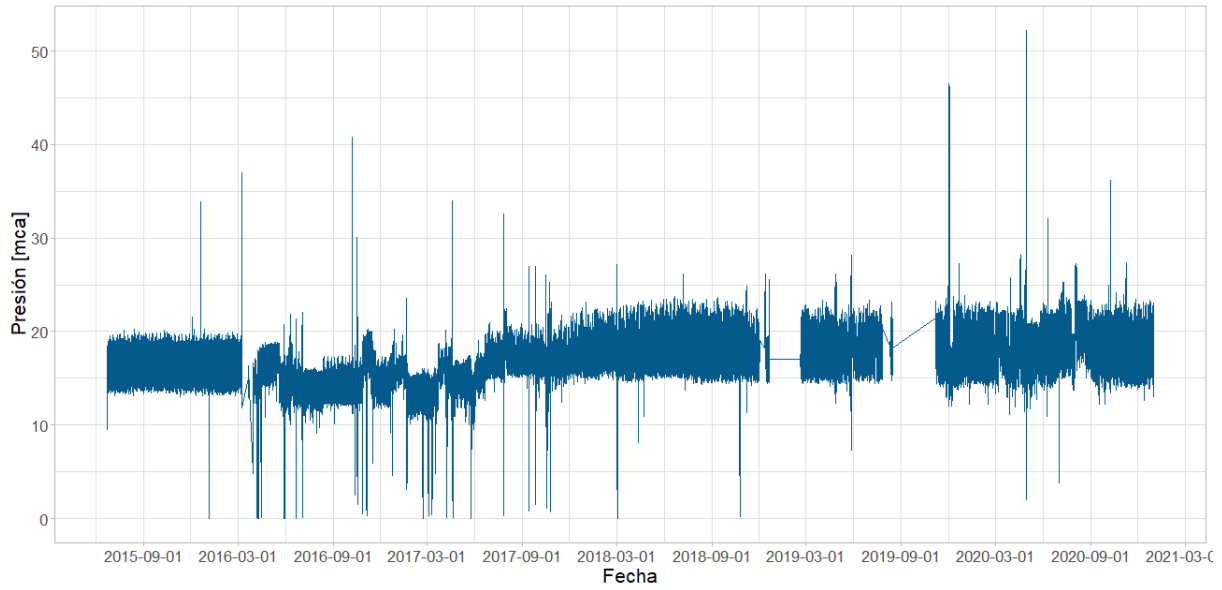


Figura 20: Serie de Presión utilizada para el sector 0104. Fuente Elaboración Propia

sencillos y rápidos de obtener para la empresa.

- Promedio de Presión: También llamada presión media. Consiste en obtener la media con los valores dentro del intervalo de datos escogido.

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

- Presión Máxima (P_{max}): Máximo valor de presión registrado dentro del intervalo de datos.
- Presión Mínima (P_{min}): Mínimo valor de presión registrado dentro del intervalo de datos.
- Rango de Presión (R_{gP}): Es la diferencia entre el valor máximo de presión registrado con el mínimo valor de presión registrado en el intervalo de datos escogido.
- Variabilidad de Presión (S_P): También llamado desviación típica. Guarda estricta relación con la dispersión de los datos en el intervalo de datos. Se calcula con la siguiente expresión:

$$S_P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n}}$$

- Variación de Presión (v_P): Es la variación en magnitud que hay entre valores sucesivos de presión. Como en la plataforma i2o se almacenan datos de presión cada 15 minutos, este indicador consiste en obtener la máxima variación que hay entre un dato con el dato registrado 15 minutos antes.

$$v_P = \max[abs(P_2 - P_1, P_3 - P_2, \dots, P_n - P_{n-1})]$$

Para encontrar cuál indicador de presión podría guardar estricta relación con las roturas de tuberías se comparan dos funciones de distribución acumulada (FDA): una asociada a las roturas y otra asociada al comportamiento normal. La FDA del comportamiento normal se confecciona con los valores de la serie de presión histórica, en cambio la FDA asociada a las roturas se confecciona con los valores de presión que se registraron momentos antes de ocurrida las roturas. Dada la gran diferencia de valores que existe entre estos dos registros, se confeccionan 100 FDAs con datos aleatorios de la serie de presión de comportamiento normal (serie de presión histórica filtrada), y luego cada una de estas FDAs es comparada estadísticamente con la FDA asociada a las roturas mediante un test de bondad. Cada FDA aleatoria tiene la misma cantidad de datos que la FDA asociada a las roturas. Esta confección de 100 FDAs aleatorias se realiza por dos razones: el test de bondad tiene un resultado más confiable si se comparan funciones con la misma cantidad de valores, y además realizar el test de bondad con 100 series aleatorias permite obtener un porcentaje de incidencia en las roturas de las tuberías de dicho sector: si existe una gran cantidad de series aleatorias que no se asemejan con la FDA asociada a las roturas se puede inferir que los datos asociados a las roturas son distintos a los del comportamiento cotidiano (normal), por ende no provienen de la misma “familia de datos”, esto podría significar que este indicador guarda relación con las roturas de las tuberías.

La figura 21 ilustra cómo se ven estas 100 funciones aleatorias con la función asociada a las roturas. Como la presión es una variable cuantitativa continua, para la confección de estas FDAs se obtiene una probabilidad de ocurrencia para cada dato equivalente a $1/(cantidad\ total\ de\ datos)$, luego estos datos se ordenan de menor a mayor y a cada dato se le asigna una probabilidad de ocurrencia acumulada. A diferencia de las variables discretas, no hay un previo agrupamiento de datos.

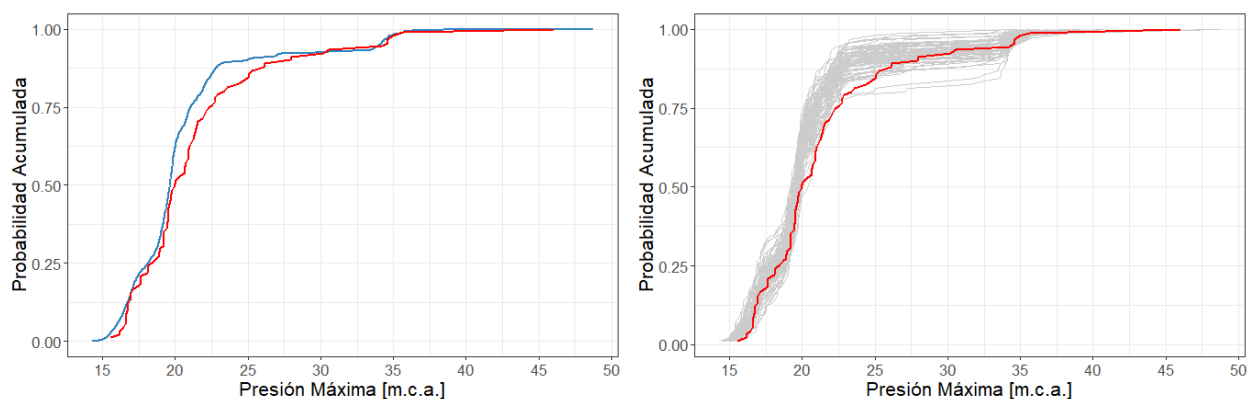


Figura 21: Izq: Función de Distribución Acumulada Empírica de Presión Máxima asociada a las roturas (color rojo) y Función de Distribución Acumulada Empírica de Presión Máxima Genérica confeccionada con todos los datos de la serie de presión (color azul). Der: Función de Distribución Acumulada Empírica de Presión Máxima asociada a las roturas (color rojo) y 100 Funciones de Distribución Acumulada Empíricas de Presión Máxima confeccionadas con datos aleatorios de la serie de presión (color gris). Fuente: Elaboración Propia

Para confeccionar la función de distribución acumulada asociada a las roturas se debe escoger un intervalo de datos (en la investigación de Martínez-Codina es denominado ancho de ventana) y un tiempo de anticipación. El intervalo de datos es el rango de tiempo en donde se obtienen los valores de presión para calcular los indicadores mencionados. Este intervalo de datos puede ser de un día; por ejemplo, si una rotura se registra un 28 de septiembre a las 11.00 horas y esta se quiere incluir en la FDA asociada a las roturas, un intervalo de datos de 1 día equivale a obtener los valores desde las 11.00 horas del día 27 de septiembre hasta las 11.00 horas del día 28 de septiembre. El tiempo de anticipación es la cantidad de tiempo que hay entre la hora registrada de la rotura de tubería y la hora del dato más reciente registrado dentro del intervalo de datos escogido. Para el ejemplo antes mencionado el tiempo de anticipación es 0 horas; en el caso que se quiera incluir la rotura antes mencionada en una FDA asociada a las roturas con un tiempo de anticipación de 4 horas con un intervalo de datos de 1 día, se tiene que calcular los valores de los indicadores de presión con los datos de presión instantánea que hay desde las 07.00 horas del día 27 de septiembre hasta las 07.00 horas del día 28 de septiembre.

Para confeccionar la FDA asociada a las roturas se debe calcular cada indicador de presión para cada rotura registrada en el documento PR013 como se explica en el párrafo anterior. En el caso de una FDA aleatoria asociada al comportamiento normal de la presión se hace lo mismo, sólo que el intervalo de datos escogido es móvil dentro de la serie completa de presión filtrada del sector de presión. Por otro lado, es importante entender el intervalo de datos y el tiempo de anticipación a la hora de analizar la comparación entre la FDA asociada a las roturas y la FDA asociada al comportamiento normal del sector de presión, dado que la rotura puede no ser percibida a tiempo por la empresa o por los habitantes, pudiendo pasar días incluso de pasada la rotura de alguna tubería, por ende las anomalías en algunos indicadores pueden extenderse por más de un día con días de anticipación al registro de la rotura. Los intervalos de datos que se calculan en esta investigación son múltiplos de 24 horas, dado que el comportamiento de presión es cíclico y se repite diariamente.

En la figura 22 se muestran dos funciones de distribución acumulada, una de ellas corresponde a la FDA asociada a las roturas del indicador presión máxima (color rojo), y la otra FDA es una de las 100 FDAs aleatorias asociada al mismo indicador (color azul). Para saber si estas dos funciones se asemejan entre sí, se aplica el test de bondad de Kolmogorov-Smirnov.

En el test de bondad de Kolmogorov-Smirnov se comparan dos funciones $F_1(x)$ y $F_2(x)$, las cuales son funciones de distintas muestras de la variable x , y se verifica si se cumple la hipótesis nula (H_0) o la hipótesis alternativa (H_1):

$$H_0: F_1(x) = F_2(x) \text{ para todo } x$$

$$H_1: F_1(x) \neq F_2(x) \text{ para al menos un valor de } x$$

El test se lleva a cabo calculando la máxima distancia vertical (D) que hay entre $F_1(x)$ y $F_2(x)$. Esta distancia (D) se compara con el estadístico D_α :

$$D_\alpha = \frac{c(\alpha)}{\sqrt{n} + 0,12 + \frac{0,11}{\sqrt{n}}} \quad (7)$$

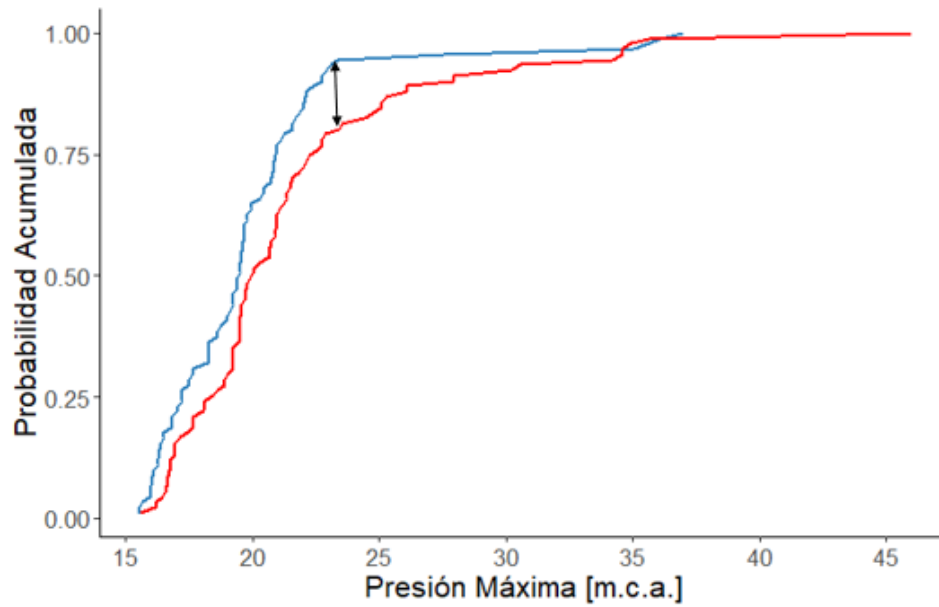


Figura 22: FDA asociada a las roturas (rojo) con una FDA asociada al comportamiento normal (azul) del indicador: Presión Máxima. Fuente: Elaboración Propia

Donde n es la cantidad de datos de las funciones, en este caso se está comparando funciones con la misma cantidad de valores. El coeficiente $c(\alpha)$ depende del nivel de confianza, para $\alpha = 0.05$ (95 % de nivel de confianza) el coeficiente equivale a 1.36.

Si la distancia vertical es mayor al estadístico, la hipótesis nula se rechaza. En caso contrario no hay argumentos para rechazar la hipótesis nula de que los datos provienen de la misma distribución (Stowhas, 2017). Rechazar la hipótesis nula nos permite afirmar que la familia de datos de la función $F_1(x)$ no es la misma que la familia de datos de la función $F_2(x)$. Aplicar el test para cada FDA aleatoria de comportamiento normal con la FDA asociada a las roturas permite obtener una tendencia: si existe una gran cantidad de FDAs aleatorias que rechazan la hipótesis nula, este indicador, con el intervalo de datos y tiempo de anticipación dado, puede guardar relación con las roturas de la zona en cuestión. Esto se debe aplicar para cada indicador, variando el tiempo de anticipación y el ancho de ventana. La combinación que mayor hipótesis nulas rechace es la que se escoge como más influyente en las roturas de tuberías del sector de presión.

Luego de obtener el mejor indicador de cada sector de presión de las zonas críticas, se obtiene la FDA asociada a las roturas, con el intervalo de datos y tiempo de anticipación óptimos, esto quiere decir la combinación de estos dos factores que hacen que la FDA asociada a las roturas rechace la mayor cantidad de hipótesis nula con las FDAs aleatorias asociadas al comportamiento normal. Con esta FDA asociada a las roturas se obtiene la relación de probabilidad, el cual arroja valores de presión donde la probabilidad de falla (gracias al teorema de Bayes) incrementa o decrece.

5.2.3. Relación de Probabilidad

Como se ha mencionado anteriormente, dada la información se quiere realizar un diagnóstico bayesiano de distintos indicadores de presión utilizando el total de información: comportamiento normal (cotidiano) y el comportamiento asociado a las roturas.

$$P(f|i) = \frac{P(i|f) \cdot P(f)}{P(i)}$$

Del análisis de los indicadores de presión se puede obtener la probabilidad de obtener un valor de cierto indicador i dado que las tuberías presentaron fallas ($P(i|f)$, con la FDA asociada a las roturas) y la probabilidad de obtener un valor de cierto indicador ($P(i)$, con la FDA asociada al comportamiento normal). La relación entre estas dos funciones permite obtener un rango de valores del indicador que incrementa o decrece la probabilidad de falla. Si la probabilidad de falla condicionada a ciertas características es similar a la probabilidad de fallo del sistema, la capacidad de diagnóstico será reducida (Kleiner Rajani, 2001). Esta posible similitud entre estas dos probabilidades se da si $P(i|f)$ y $P(i)$ es parecida, ya que la división entre estas dos probabilidades será cercana a la unidad. Cuando las funciones comparadas no proceden de la misma función de distribución, se puede concluir que el indicador analizado es dependiente de la probabilidad de las roturas (Martinez-Codina et al., 2015). Esta relación:

$$R.P. = \frac{P(i|f)}{P(i)} \quad (8)$$

es nombrada como Ratio de Probabilidad (Martinez-Codina et al., 2016) y permite obtener rangos de valores que incrementan la probabilidad de falla, por lo mismo se puede encontrar un valor umbral que permite dividir el rango de valores del indicador escogido que incrementa la probabilidad.

Para determinar qué indicador de presión es el que guarda mayor dependencia a la probabilidad de roturas se analiza la función de distribución acumulada empírica. Para este caso es necesario obtener la probabilidad, tanto genérica como condicionada a las roturas, para varios valores arbitrarios del indicador escogido, por lo tanto, para esta parte de la investigación es necesario obtener una función de distribución acumulada paramétrica. Para el caso de la función de distribución acumulada genérica no existe mayor problema para ajustar una FDA paramétrica, dado que existe un amplio registro de valores de los indicadores de presión, pero para el caso de la FDA asociada a las roturas son pocos los valores con los que se confecciona esta FDA empírica. Por esta razón se hace necesario estimar una FDA paramétrica que se ajuste con el menor error posible a la FDA empírica. Para encontrar la FDA paramétrica que más se asemeja a la FDA empírica existen varios criterios de selección, dos criterios populares son los criterios de información de Akaike (AIC) y el criterio de información bayesiano (BIC), ambos penalizan la función de probabilidad logarítmica negativa minimizada para el número de parámetros estimados. De una colección de modelos, BIC (o AIC) selecciona el modelo que minimiza la cantidad obtenida en la expresión 9 (Katz, 2013). Martínez-Codina utiliza el criterio BIC para decidir que FDA paramétrica escoger para el cálculo de la relación de probabilidad.

$$BIC = -2\log p(L) + p\log(s) \quad (9)$$

Donde p es el número de parámetros, L es la probabilidad del modelo ajustado y s es el tamaño de la muestra (para el caso de la FDA asociada a las roturas sería la cantidad de roturas contabilizadas para el análisis de presión).

Al obtener ambas FDAs paramétricas se puede calcular la probabilidad para distintos valores del indicador de presión escogido, y con estos valores, gracias a la expresión 8, calcular la relación de probabilidad. En la figura 23 se puede ver el resultado de la relación de probabilidad para un sector de presión, donde el valor umbral es 10 m.c.a. para el indicador rango de presión, donde valores sobre ese umbral incrementan la relación de probabilidad, por ende incrementan la probabilidad de falla en este sector específico.

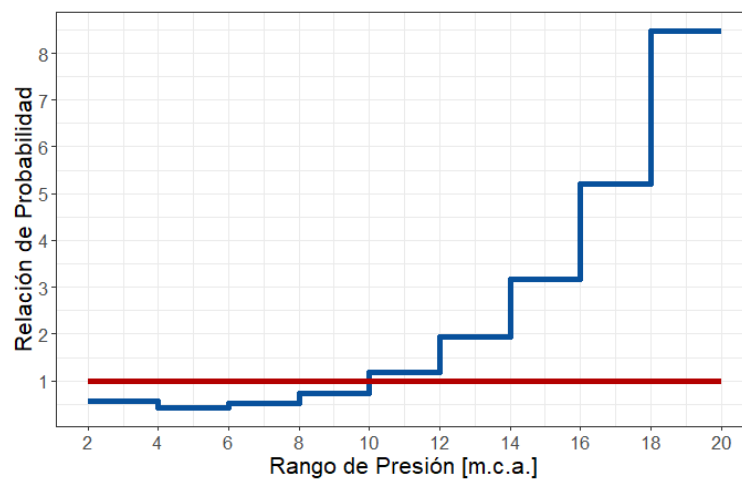


Figura 23: Relación de Probabilidad para el indicador Rango de Presión. Fuente: Elaboración Propia

6. Tratamiento de Datos de Roturas

6.1. Probabilidad mediante Propiedades Intrínsecas

De la sección 4.3 se puede saber qué registros de corte de suministro se pueden asociar a roturas de tuberías de la red de agua potable. Dentro del período de estudio existen 20.584 cortes de suministro en la localidad de Antofagasta, de ese total 58,1 % corresponden a cortes no programados y 44,6 % corresponden a cortes no programados producto de una rotura de tubería. Pero como se menciona en la sección 4.3, el corte no programado producto de una rotura de tubería puede abarcar más de un cuartel, y el informe PR013001 exige informar todos los cuarteles afectados, por lo tanto, sólo se trabaja con los cortes que detallan que la falla ocurrió en dicho cuartel informado. Con este filtro de datos se obtienen 1306 roturas de tuberías dentro del período de estudio, esto equivale a 6,34 % respecto del total de cortes informados en la localidad, pero a su vez equivale a 14,2 % respecto del total de cortes no programados asociados a roturas tuberías de Antofagasta. En la figura 24 se puede ver cómo se distribuyen estas roturas en toda la ciudad.

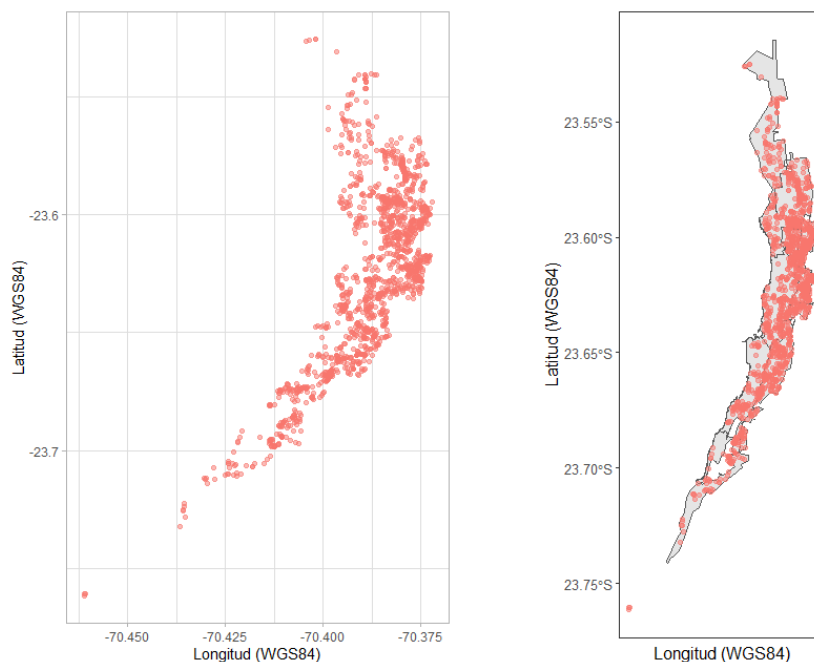


Figura 24: Roturas en la Red de Distribución de Agua Potable de Antofagasta (período 2014-2020). Fuente: Elaboración Propia

Las roturas totales se deben agrupar por zona de abastecimiento, para así discriminar entre estas y sólo considerar en el análisis las zonas con gran frecuencia de roturas. En la tabla 4 se puede apreciar que las zonas 1, 3, 5 y 7 son las que acumulan mayor cantidad de roturas, superando por casi el doble a la zona 2 que es la quinta con mayor cantidad de roturas, por lo tanto el análisis sólo se efectuará en las cuatro zonas con mayor cantidad de roturas. Una vez obtenidas las roturas por zona es necesario obtener las roturas por sector de presión, la tabla 5 contiene esta información. Las zonas de abastecimiento pueden tener muchos sectores de presión dada su extensión, por ende, en la tabla 5 sólo se encuentran los sectores de presión que tienen

mayor cantidad de roturas que cumplen con el criterio explicado en la metodología⁹. En cada rotura que hay en cada sector se verificó que exista información que permita obtener las características de la tubería que presentó rotura. En la figura 25 se puede ver gráficamente que sectores de presión se consideran en este análisis.

Tabla 4: Cantidad de Roturas de tuberías por Zona de Abastecimiento de Antofagasta

Zonas	Área [km ²]	Cantidad de Roturas
1	6,38	236
2	1,14	119
3	2,24	208
4	0,64	40
5	5,32	213
7	3,17	211
8	3,91	90
9	1,61	36
10	3,14	57
11	0,029	7
13	0,26	13
14	6,78	76

Tabla 5: Cantidad de Roturas de cada Sector de Presión Crítico de las Zonas Críticas de Antofagasta

Zona	Sector de Presión	Área [m2]	Cantidad de Roturas	Porcentaje
1	0102	801,53	61	73 %
	0103	517,22	34	
	0104	1.597,27	35	
	0108	303,42	42	
3	0301	358,33	57	78 %
	0302	436,31	40	
	0304	401,46	38	
	0306	316,6	27	
5	0501	851,83	55	73 %
	0502	1.377,89	19	
	0506	1.133,58	46	
	0507	819	36	
7	0701	539,93	24	86 %
	0702	518,45	51	
	0705	446,33	30	
	0707	885,75	77	

⁹Sólo se consideran en el modelo los sectores con mayor cantidad de roturas que al ser sumadas equivalgan mínimo al 70 % del total de roturas de la zona.

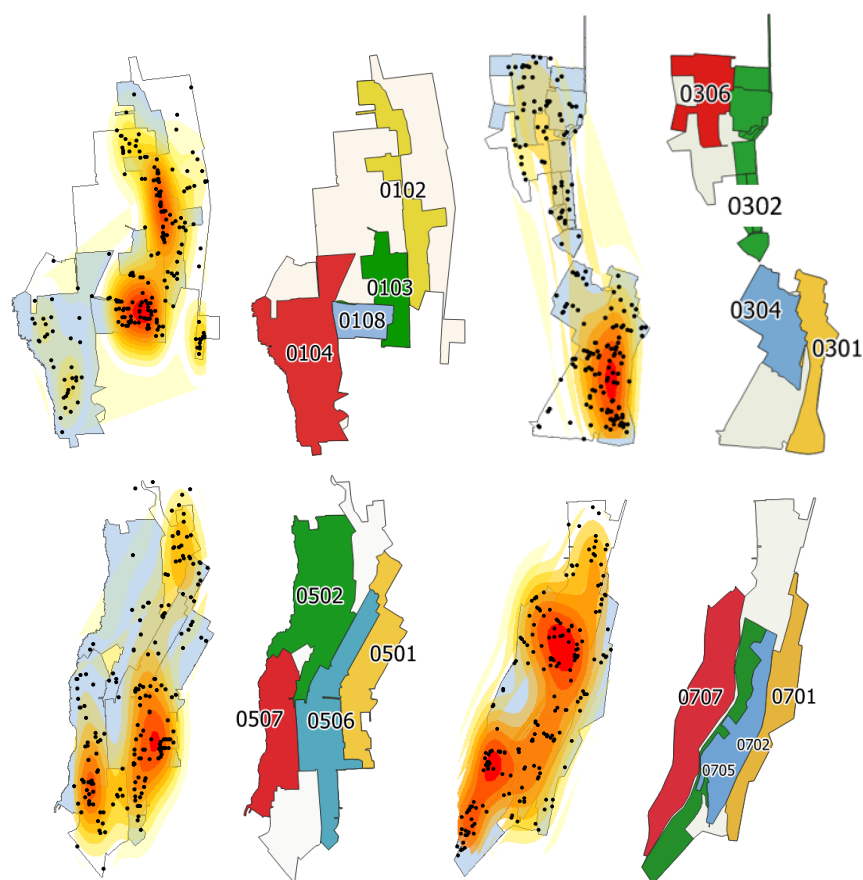


Figura 25: Localización Sectores Críticos de cada Zona Crítica (arriba de izquierda a derecha: Zona 1 y Zona 3; abajo de izquierda a derecha: Zona 5 y Zona 7). Fuente Elaboración Propia

6.2. Análisis de Presión

Los sectores de presión que entran en el análisis son aquellos que son denominados sectores de presión críticos según la tabla 5. Además, se requiere un número mínimo de roturas para que el análisis tenga consistencia. Los autores Martínez-Codina (2015), Zenaida (2012) y Stowhas (2017) sostienen que para que una muestra tenga representatividad debe tener al menos 30 datos. No todos los sectores de presión tienen una muestra de esta magnitud, por lo tanto se considera 15 roturas como mínimo para analizar.

Para encontrar la cantidad de roturas a considerar por sector, se debe hacer el cruce de información entre los datos de presión instantáneos del punto de control con la fecha y hora de las roturas registradas en el documento PR013001. A modo de ejemplo se presenta el caso del sector de presión 0103, el cual tiene un registro de presión que se ilustra en la figura 26. Como se puede ver en esta figura, no existe registro de presión desde el 30-11-2017 hasta el 26-11-2019, pero durante ese período sí hay registros de roturas en dicho sector, como se muestra en la tabla 6, por lo tanto, estas roturas (5) quedan fuera del análisis. También existe una falta de registro de presiones en el período desde 23-02-2020 hasta el 15-05-2020, donde existen 5 roturas, por ende estas tampoco se incluyen en el análisis, además de las roturas presentadas en el año 2014 (2), dado que tampoco hay registro en esa fecha. Por lo tanto, el análisis de este sector sólo se hace con 18 roturas.

Tabla 6: Fecha de las roturas del Sector de Presión 0103

Sector de Presión	Cantidad de Roturas	Fecha
0103	2	01-06-2014/30-06-2014
	10	01-11-2015/31-12-2016
	4	01-02-2017/31-10-2017
	5	01-08-2018/30-11-2019
	9	31-12-2019/30-09-2020

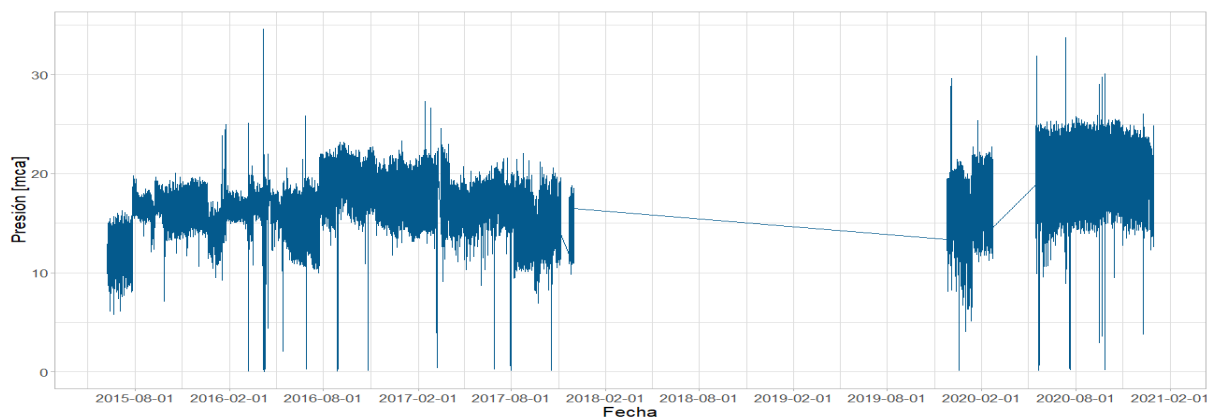


Figura 26: Serie de Presión utilizada para el sector 0103. Fuente: Elaboración Propia

En la figura 27 se puede ver el resultado de hacer el cruce de información entre cada serie de presión con los registros de roturas de cada sector de presión crítico. Los sectores 0102, 0103, 0104, 0108, 0306, 0506, 0507 y 0707 son los únicos que presentan una base de datos de mínimo 15 roturas, por lo tanto sólo estos sectores se analizan¹⁰.

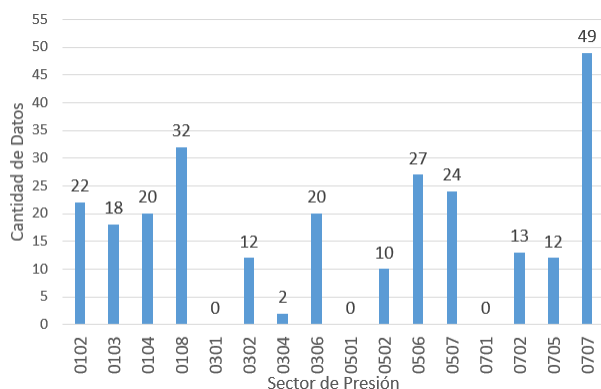


Figura 27: Cantidad de Roturas por Sector de Presión que se pueden utilizar para el análisis de presión. Fuente: Elaboración Propia

¹⁰Los registros de presión utilizados en todos los sectores de presión críticos se encuentran en la sección 10.3 del Anexo

7. Resultados y Análisis

7.1. Probabilidad de falla mediante varias variables

La probabilidad de falla mediante varias variables se obtiene gracias al teorema de Bayes, que en su caso genérico para dos variables independientes entre sí se obtiene con la expresión 6, detallada en la metodología. En esta sección de la investigación, la probabilidad de falla es obtenida con tres variables independientes: material, diámetro y edad. Para generar las probabilidades se deben confeccionar las funciones de distribución acumulada para el caso genérico y para las roturas. La información del total de tuberías para confeccionar ambas funciones de cada zona se encuentra en la sección 10.4 del Anexo. A continuación se presenta los resultados y análisis por zona de abastecimiento.

7.1.1. Análisis por Zona Crítica: Zona N°1

Esta zona cuenta con una selección de 172 roturas de tuberías y un total de 2.433 tuberías para caracterizar el caso genérico (corresponde a la suma de las tuberías operativas actuales con las tuberías que presentaron roturas). De las funciones de distribución acumulada presentadas en la figura 28 se puede saber los rangos de valores que son más representativos tanto en el total de tuberías estudiadas, como en las tuberías que presentaron roturas, esto permite dilucidar rápidamente qué rango de valores de las variables aumentan o disminuyen la probabilidad de falla de los elementos.

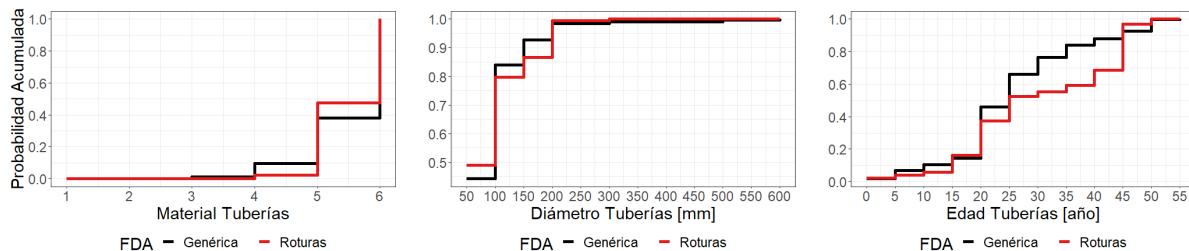


Figura 28: Función de Distribución Acumulada para el caso genérico y de roturas de la Zona N°1. Der: FDAs de la variable Material (1: Fierro Fundido, 2: Acero Negro, 3: Hierro Dúctil, 4: HDPE, 5: Asbesto Cemento, 6: PVC). Medio: FDAs de la variable Diámetro, agrupada en diámetros cada 50 mm; Der: FDAs de la variable Edad, agrupada en edades cada 5 años. Fuente: Elaboración Propia

Respecto del material, se nota una concentración de tuberías en dos materiales: PVC y Asbesto Cemento; para el caso genérico las tuberías de PVC son las que tienen mayor cantidad (62,6 %), seguidas de las tuberías de Asbesto Cemento (27,3 %), pero esto cambia para el caso de las roturas ya que las tuberías de PVC bajan su representación a un 52,3 %, en cambio las tuberías de Asbesto Cemento tienen una representación de 45,4 %. Como se explica en la metodología, lo que aumenta o disminuye la probabilidad de falla es la relación entre la probabilidad condicionada a las roturas y la probabilidad genérica ($\frac{P(i|f)}{P(i)}$), por lo tanto si la probabilidad sólo dependiera del material como predictor, el material Asbesto Cemento tendría mayor probabilidad de falla, a pesar de que no es el material que presenta mayor cantidad de roturas.

De lo señalado anteriormente, se desprende cómo saber qué grupo de cada variable aumenta o disminuye la probabilidad de falla: interesa saber la diferencia que hay entre los escalones de cada grupo en cada FDA, no interesa saber la probabilidad acumulada de un grupo de valores en particular (la probabilidad acumulada

proporciona información de cómo se distribuye la variable en los dos escenarios estudiados). Por ejemplo, en la figura 28 para la variable Edad se puede ver que las tuberías que están en el rango (40-45] años en la FDA asociada a las roturas tienen una probabilidad acumulada menor que en la FDA genérica, pero la diferencia que hay entre el escalón del grupo anterior (35-40] con el de (40-45] es mayor en la FDA asociada a las roturas que en la FDA genérica. El porcentaje de representatividad de cada grupo de valores de cada variable se ve representado en esta diferencia de escalones, por lo tanto la probabilidad de falla aumenta para las tuberías que se encuentran en el rango de valores entre (40-45] años. Sucede lo mismo para las tuberías que están en el rango (45-50] años, donde la diferencia entre el escalón del grupo anterior con el mencionado es mayor en la FDA asociada a las roturas que en la FDA genérica, aumentando la probabilidad de falla.

Respecto al diámetro, se puede ver claramente que el aumento de la probabilidad de falla se da para las tuberías con diámetros que están en el rango (50-100] y (200-250] mm ya que hay mayor representatividad para estos grupos en la FDA asociada a las roturas que en la FDA genérica; esto no se da para las tuberías que están en el rango (100-150] mm, dado que la representatividad de la FDA asociada a las roturas es menor que la FDA genérica, lo que hace que la relación de probabilidad sea menor a 1, a pesar de ser el segundo grupo de diámetros con mayor cantidad de tuberías operativas y el segundo grupo con mayor cantidad de roturas. En la figura 29 se muestra el estado de cada tubería que se encuentra operativa actualmente dentro de los sectores críticos de esta zona. Lo que se ve en esta figura es la representación de la probabilidad de falla en cada centroide de cada tubería.

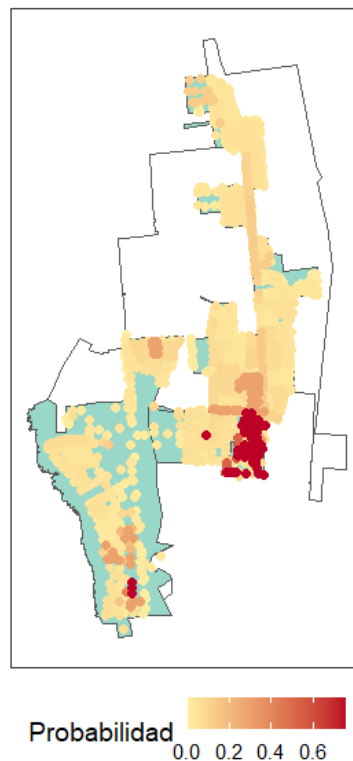


Figura 29: Mapa de Probabilidad de Falla de las tuberías actuales, de los sectores críticos de la Zona N°1 de Antofagasta. Fuente: Elaboración Propia

En la figura 29 se puede apreciar que la mayoría de las tuberías tiene un valor bajo de probabilidad de presentar rotura dada las características de ellas. El 57 % de las tuberías actuales presentan una probabilidad de falla de 0,035 y en su mayoría corresponden a elementos de PVC instalados en la década de 1990 (entre 20 y 30 años de edad aproximadamente) y de diámetro superior a 100 mm. Respecto a la distribución geográfica de la probabilidad de falla, esta presenta altos valores en todos los sectores, pero el mayor valor de la probabilidad se concentra en el sector 0103, donde las tuberías son en su mayoría de Asbesto Cemento, se instalaron entre 1970 y 1975 y el diámetro no supera los 100 mm. La probabilidad de falla de estas tuberías es de 0,75, que es la mayor en esta zona. En el sector 0104 también se presenta este valor de probabilidad, pero en un lugar más acotado; en el sur de este sector existe un grupo de tuberías con las mismas características: material de Asbesto Cemento, en su mayoría con diámetros menor a 100 mm pero instaladas entre 1975 y 1980, por esta combinación de valores la probabilidad decrece a 0,29. En primera instancia este valor de probabilidad pareciera ser bajo, pero las tuberías que tienen igual o mayor valor corresponden al 5,5 % de elementos con mayor probabilidad de falla.

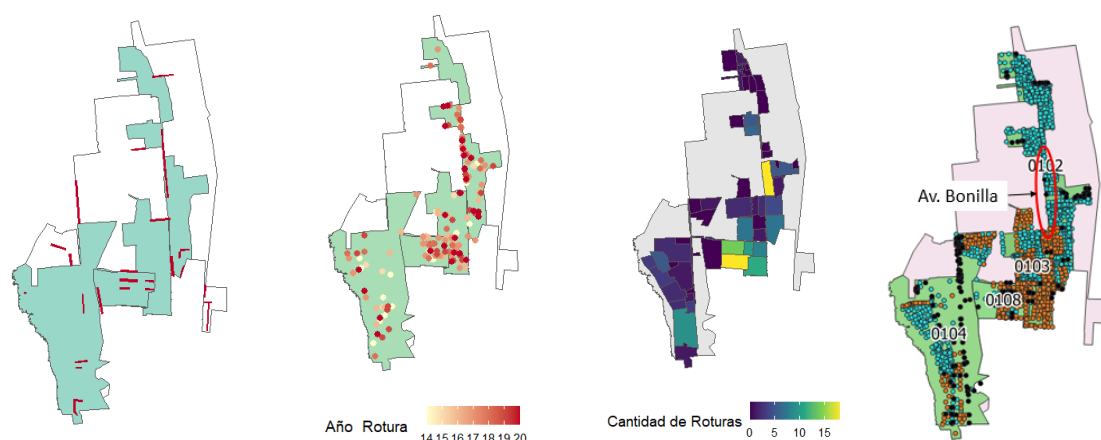


Figura 30: De izquierda a derecha: Proyectos de Infraestructura de las Matrices de Agua Potable de la Zona N°1 (proyectos desde el 2014 hasta el 2020); Distribución de las Roturas seleccionadas de los Sectores Críticos de la Zona N°1 (años desde el 2014 hasta el 2020); Cantidad de Roturas por Cuartel de los Sectores Críticos de la Zona N°1; Distribución de las tuberías de la Zona N°1 según su materialidad (celeste: PVC, naranja: Asbesto Cemento, negro: HDPE). Fuente: Elaboración Propia

Respecto al panorama actual del sector 0108 se puede apreciar que ya no presenta tanto riesgo, a pesar que dentro del período de estudio existe una alta concentración de roturas en dicho sector, como se muestra en la figura 30. En esta figura se puede ver que dos de los cuarteles de este sector son los que más roturas presentan (18 y 14 roturas), pero en esta figura también se muestran los distintos proyectos de infraestructura que se realizaron en esta zona desde el año 2014 hasta el año 2020, y se ve claramente que este sector cuenta con varios proyectos de reposición de red, donde se cambiaron tuberías de Asbesto Cemento por tuberías de HDPE, específicamente en las calles Mariano Farandato y Leonardo Da Vinci. En Leonardo Da Vinci se hizo una reposición de tubería en el año 2014 de 118 metros (se cambió Asbesto Cemento por HDPE), pero aguas arriba de este proyecto continuaron las roturas, por lo tanto la empresa decidió realizar una reposición de 110 metros en el lugar donde se concentraron las roturas. Entre medio de estos dos nuevos tramos de tuberías de HDPE aún continua en operación un tramo de tubería de Asbesto Cemento, este tramo es el que se divisa como punto rojo de alta probabilidad en la figura 29.

Lo mencionado de la calle Leonardo Da Vinci se muestra con detalle en la figura 31. En esta figura se puede apreciar que en las calles El Roble, Ricardo Mora y Bandera hay un número significativo de roturas que sólo se han solucionado mediante la reposición de tramos de tuberías de PVC (como se explica en la sección 4.4), siendo una solución instantánea. Estas tres calles mencionadas tienen tuberías con las mismas características: material de Asbesto Cemento, diámetro de 75 mm y se instalaron el año 1969 (52 años de edad), siendo la edad el predictor que disminuye el valor de la probabilidad de falla (0,05), dado que la cantidad de roturas que se registraron en tuberías de (50-55] años es baja. Si bien las tuberías de estas calles presentaron roturas, lo hicieron cuando la edad de los elementos oscilaba entre los (45-50] años, por esta razón es que este último grupo de edad mencionado tiene un alto valor de probabilidad de falla. Este bajo valor de probabilidad en las tuberías instaladas en 1969 se pueden atribuir al criterio de agrupamiento para confeccionar las FDAs, dado que solo dos años separan a estos elementos de obtener una probabilidad de 0,75. Por otro lado, Folkman (2018) asegura que las tuberías más antiguas dejan de presentar roturas debido a la reposición de tramos de tubería, dado que esto puede resolver problemas de características implícitas, como el cambio de juntas de tuberías o el recambio de algún tramo de tubería con un notorio deterioro. Esto puede ocurrir en este caso, dado que la reposición de tramos de tuberías son realizados por tuberías de PVC, que es un material que registra pocas roturas en esta zona y en las zonas restantes.

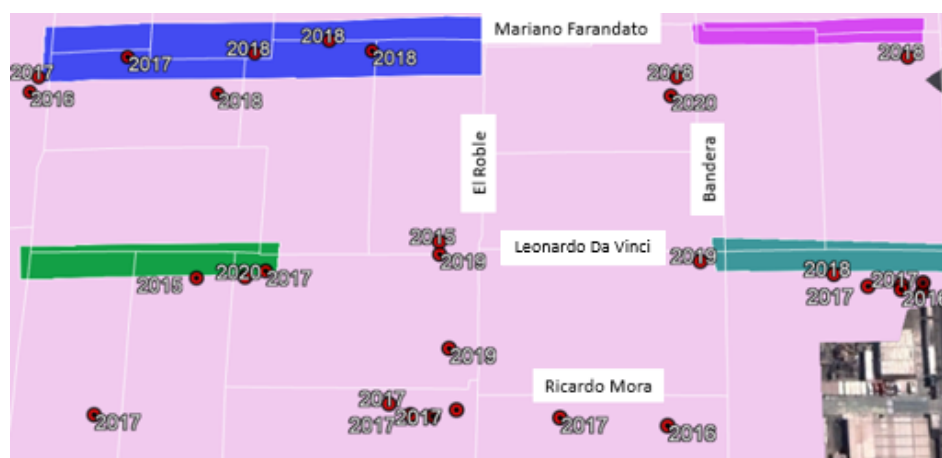


Figura 31: Principales roturas que afectaron al sector 0108. Fuente: Elaboración Propia

Respecto al sector 0102, en la figura 29 se puede ver que la probabilidad de la mayoría de los elementos de este sector es baja. Esto se puede atribuir al material de las tuberías que en su mayoría es de PVC en este lugar, salvo en un pequeño grupo al sur de este sector como se aprecia en la figura 30¹¹. El lugar que acumula la mayor cantidad de roturas en este sector es la Avenida Bonilla, en la figura 30 esto se ve representado por la concentración de roturas relativamente recientes (2019 y 2020), específicamente en el cuartel 010209, donde hay 18 roturas en el período de estudio (único cuartel en este sector con más de 15 roturas). En dicha Avenida, específicamente entre las calles Arturo Pérez Canto y El Laco, hay cuatro tuberías, donde dos son de HDPE y dos son de PVC, y una de ellas presenta una probabilidad de 0,12 dada sus características: material PVC, diámetro 160 mm y año de instalación 2003 (18 años de edad). El predictor edad es el que aumenta significativamente el valor de la probabilidad ya que el porcentaje de tuberías totales con esta edad no supera

¹¹ Este sector se formó durante el final de la década de 1980, y en la década de 1990 se propagó el habilitar en este lugar de la ciudad. Es por esta razón que las tuberías son de PVC y no de Asbesto Cemento, ya que este último material ya contaba con muchos problemas de roturas. Además este sector cuenta con un valor de baja probabilidad no sólo dado el material, sino también por el año de instalación (1990 aproximadamente).

al porcentaje de roturas que presentan esta edad. Por esta razón es que la tubería de PVC aladaña no tiene un alto valor de probabilidad de rotura, ya que se instaló en 1993 y durante esa década hay un gran número de tuberías instaladas, sobre todo en este sector de presión. La gran mayoría de las roturas ocurridas después del año 2018 en esta avenida, ocurrieron en estas tuberías de PVC, ya que como se ve en la figura 30 se hicieron reposiciones de tubería por HDPE.

Como se menciona anteriormente, los sectores 0103 y 0104 concentran la mayor cantidad de tuberías con el máximo valor de probabilidad de falla (0,75). Respecto al sector 0103, en la figura 30 se puede ver que no registra ningún proyecto de reposición de matriz en el período de estudio, y probablemente antes tampoco hubo ya que en esta misma figura se puede apreciar que el sur de este sector, que es donde se concentra la alta probabilidad de falla y la mayor cantidad de roturas, el material de todas las tuberías es de Asbesto Cemento. Las calles que presentan gran concentración de roturas recientes y una alta probabilidad de falla son Nicolás González, Juan Gutenberg y Av. Huamachuco, donde se comparten las mismas características: tuberías de Asbesto Cemento, instaladas en 1972 (49 años de edad) de diámetro 75 mm, salvo en Av. Huamachuco donde el diámetro es 125 mm, por lo tanto su probabilidad de falla disminuye a 0,53¹². En el sector 0104 la alta frecuencia de roturas coincide con el conjunto de tuberías que presentan altos valores de probabilidad de falla, esto es en las calles Dagoberto Godoy, Lautaro Espíndola y Colorado, donde las tuberías son de Asbesto Cemento, fueron instaladas entre 1970 y 1980 y tienen un diámetro inferior a los 100 mm. No todas las tuberías tienen la misma probabilidad de falla dada la diferencia de edad. El rango de valores de probabilidad que existe en las calles mencionadas del sector 0104 es entre 0,05 y 0,75, y en esta zona las tuberías que están en este rango de probabilidad corresponden al 24 % de tuberías con mayor probabilidad de presentar rotura.

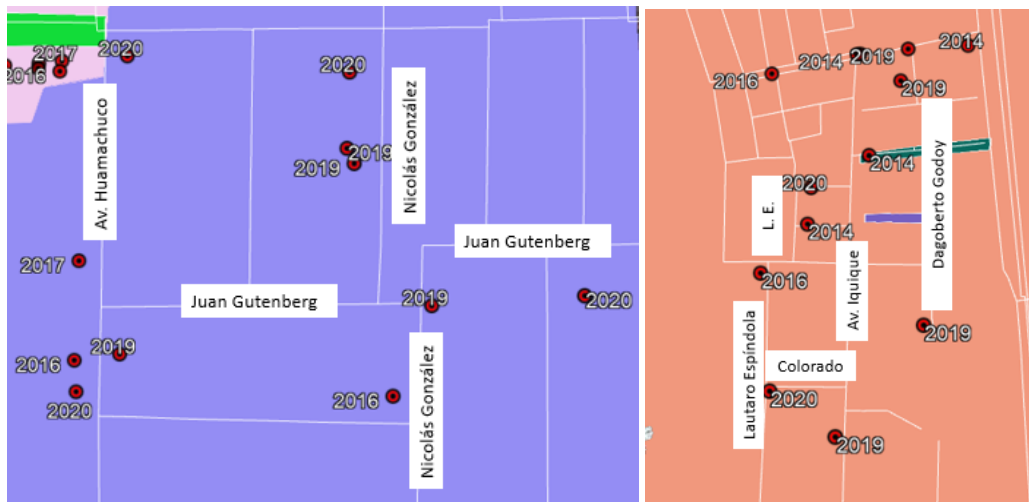


Figura 32: Izquierda: Principales roturas que afectaron al sector 0103. Derecha: Principales roturas que afectaron al sector 0104. Fuente: Elaboración Propia

¹²En el capítulo 3.2.2 del Marco Teórico se hace referencia al tratamiento de datos que se debe realizar en los modelos multivariados: el agrupamiento de variables se debe hacer teniendo información clara de la tendencia de cada variable, para así evitar la mala interpretación de los resultados. En este caso los diámetros entre 100 y 150 mm tiene una relación de probabilidad que hace disminuir la probabilidad final, dado que existen muchas tuberías de PVC que son de diámetro 110 mm, por lo tanto, las roturas de tuberías de Asbesto Cemento (y de cualquier material) que presenten diámetros entre 100 y 150 mm se ven opacadas por la gran cantidad de tuberías de PVC que se encuentran operativas actualmente, sobre todo en el sector 0102, a pesar de presentar un alto número de roturas en este rango de diámetro.

7.1.2. Análisis por Zona Crítica: Zona N°3

Esta zona crítica es la que tiene menor área, por lo mismo es la zona crítica que cuenta con mayor cantidad de roturas por km². Cuenta con 162 roturas en total (todas con información pertinente para ser caracterizadas) y con 1.147 tuberías en total para representar el caso genérico. Las funciones de distribución acumulada de las variables para obtener la probabilidad de falla de los elementos se presenta en la figura 33.

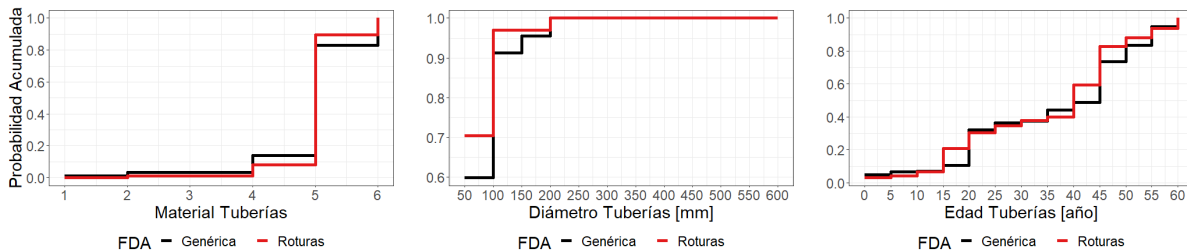


Figura 33: Función de Distribución Acumulada para el caso genérico y de roturas de la Zona N°3. Izq: FDAs de la variable Material (1: Fierro Fundido, 2: Acero Negro, 3: Hierro Dúctil, 4: HDPE, 5: Asbesto Cemento, 6: PVC). Medio: FDAs de la variable Diámetro, agrupada en diámetros cada 50 mm; Der: FDAs de la variable Edad, agrupada en edades cada 5 años. Fuente: Elaboración Propia

En esta figura se puede apreciar que en la mayoría de los valores de las distintas variables existe similitud entre la FDA asociada a las roturas con la FDA genérica. Respecto al material de los sectores críticos, hay una supremacía en cuanto a la cantidad de Asbesto Cemento por sobre los demás materiales, tanto en las roturas como en el total. En el caso del diámetro, sólo el grupo (50, 100] mm permite que la relación entre los dos escenarios aumente la probabilidad de presentar rotura en esta zona. Al igual que en la zona N°1 la edad es la que mayor dispersión presenta entre las roturas y el total de elementos. En esta zona existe una representación notoria en los elementos que presentaron roturas en los 40 a 50 años de edad, pero también hay un aumento en la probabilidad de falla en las tuberías que están en el rango de (15-20] años que no son elementos de PVC como en la zona N°1, sino de HDPE que se instalaron durante el principio de la década 2000 y presentaron roturas en el período de estudio. La figura 34 presenta el resultado en esta zona.

En el sector 0301 existen dos grupos de concentraciones de roturas de tuberías (esto se presenta en la figura 36), uno de ellos se encuentra en el sector norte específicamente en el cuartel 030102 donde se registran 12 roturas, como se ilustra en la figura 35, y el otro grupo de roturas se encuentra en el cuartel 030112, ubicado en el sector sur con 28 roturas. En este primer lugar las roturas son de Asbesto Cemento, de 100 mm de diámetro o menor e instaladas entre 1970 y 1975 o entre 1995 y 2000 (salvo en la calle Fresia donde las tuberías son de Acero Negro instaladas en 1999). Por otro lado, en el sector sur de este sector de presión existen varios proyectos de reposición de elementos de matrices, como se ve en la figura 35, pero aún así existen roturas recientes en sectores aledaños a las calles donde se cambiaron tuberías que permiten que la probabilidad de falla de las tuberías operativas tengan un elevado valor. Específicamente, las calles Candelaria Pérez, Centenario, P. Jaraquemada, Cruz del Sur y Av. Bonilla tienen un alto valor de probabilidad de presentar rotura dada las características, donde las tuberías son de Asbesto Cemento, instaladas durante 1970 y 1975 y de diámetro variable que va desde los 75 mm hasta los 150 mm. En este sector, en las calles mencionadas en este párrafo, el rango de probabilidad va desde 0,08 y 0,19, lo que equivale al 29,1 % de tuberías con mayor probabilidad de presentar rotura en esta zona.

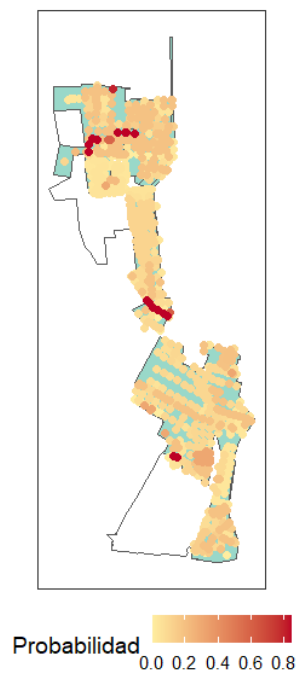


Figura 34: Mapa de Probabilidad de Falla de las tuberías actuales, de los sectores críticos de la Zona N°3 de Antofagasta. Fuente: Elaboración Propia

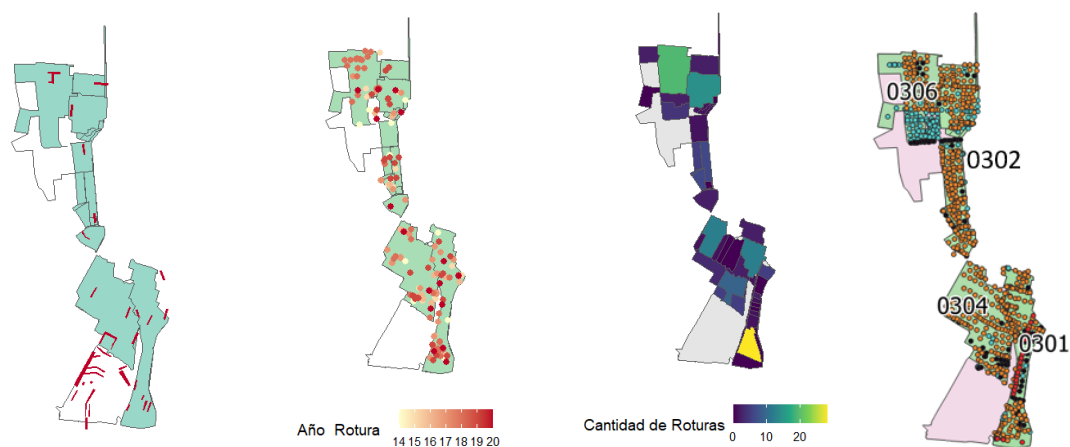


Figura 35: De izquierda a derecha: Proyectos de Infraestructura de las Matrices de Agua Potable de la Zona N°3 (proyectos desde el 2014 hasta el 2020); Distribución de las Roturas seleccionadas de los Sectores Críticos de la Zona N°3 (años desde el 2014 hasta el 2020); Cantidad de Roturas por Cuartel de los Sectores Críticos de la Zona N°3; Distribución de las tuberías de la Zona N°3 según su materialidad (celeste: PVC, naranja: Asbesto Cemento, negro: HDPE y rojo: Acero Negro). Fuente: Elaboración Propia

En el sector 0302 también se tienen escenarios por conjunto de tuberías. En el sector sur de dicho sector se tiene una concentración de roturas en calle Bandera y en sus calles aledañas, como se ve en la figura 36, esto se da ya que las tuberías son de Asbesto Cemento, de diámetro menor o igual a 100 mm con un rango de (45-50] años de edad. Aun así esta calle mencionada tiene una probabilidad de 0,19, siendo muy inferior al máximo valor en esta zona (0,85), que se encuentra en las tuberías de la calle El Roble. Esta diferencia de valores de probabilidad sólo se da por la diferencia de edad, dado que las tuberías de la Calle el Roble presentan 45 años de edad, edad que tiene la mayor representatividad en la FDA asociada a las roturas. En el norte de dicho sector se tiene un conjunto con las mismas características que las tuberías de la calle Bandera del sector sur, por ende la misma probabilidad de presentar rotura. En este caso el problema se comparte con el sector 0306, específicamente con el cuartel 030601 (presenta 19 roturas), mediante la calle Pantaleón Cortes, Pedro Lobos, Huamachuco, Juan Antonio Ríos y Radomiro Tomic, estas últimas dos calles presentan una probabilidad de presentar rotura de 0,85 (máximo valor de la zona).

En el sector 0304 se tiene la mayor concentración de roturas totales de la zona, específicamente en el sur de este sector. Por lo mismo se han efectuado reposiciones de tuberías de Asbesto Cemento por tuberías de HDPE en el período de estudio, pero aun así las calles aledañas comparten características que elevan la probabilidad de presentar rotura. Las calles La Unión y Pucón, que presentan tuberías instaladas en 1991, tienen la mayor probabilidad de presentar rotura (0,85), y no así las tuberías de las calles Traiguén y Tenglo, que se instalaron en 1956, las cuales tiene una probabilidad de 0,1. Las tuberías de las calles presentadas en la figura 36 entran en el 26 % de elementos con mayor probabilidad de presentar rotura en esta zona. Respecto a las roturas de tuberías de HDPE, estas se efectuaron en las calles Bío Bío y Pasaje Culcur al sur de la calle Víctor Jara, que corresponden a tuberías instaladas en el año 2001, por eso es que la FDA de edad asociada a las roturas presenta una alta representatividad en el grupo de edad de (15-20] años; además en el sector 0301 también ocurrieron roturas de HDPE en calles donde se realizaron proyectos de infraestructura, por lo tanto estas roturas de tuberías de menos de 1 año de edad se puede atribuir a errores de instalación, bastante común según Watson (2004).



Figura 36: Principales roturas que afectaron a los sectores críticos de la zona N°3. Arriba de izquierda a derecha: sector norte 0301, sector sur 0301, sector 0302. Abajo de izquierda a derecha: sector 0304, sector 0306. Fuente: Elaboración Propia

7.1.3. Análisis por Zona Crítica: Zona N°5

Esta zona es la segunda con mayor área y a su vez es la segunda zona crítica con mayor cantidad de roturas, aun así tiene menor cantidad de roturas seleccionadas para aplicar el modelo que la zona N°3. Esto sucede por el criterio confeccionado para acotar la búsqueda de los lugares con mayor probabilidad de presentar rotura, en donde se decide seleccionar los sectores de presión con mayor cantidad de roturas. Esto puede obviar lugares de la red que se encuentran en sectores de presión geográficamente más pequeños que presentan gran número de roturas por unidad de área, que es lo que sucede en esta zona¹³. Esto se puede ver en la figura 37, donde existe concentración de roturas en los sectores de presión 0503 y 0505, con 10 y 17 roturas respectivamente, pero como no superan en cantidad al sector 0502 quedan fuera del modelo. Lo mismo sucede en los sectores 0508 y 0504, pero las roturas no son recientes debido a que se realizaron proyectos de infraestructura que solucionaron los problemas en este lugar, lo que no sucede en los otros dos sectores de presión mencionados.

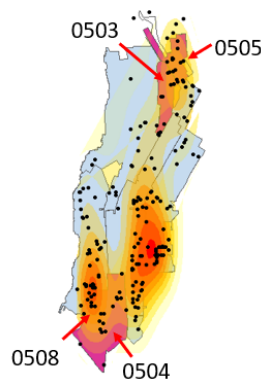


Figura 37: Mapa de densidad de roturas totales de la Zona N°5. Fuente: Elaboración Propia

Esta zona cuenta con 156 roturas seleccionadas y con 1.563 tuberías totales. El Asbesto Cemento presenta una supremacía tanto en las tuberías operativas como en las tuberías que presentaron roturas. Respecto a los elementos relativamente nuevos, existe un incremento en el uso del HDPE, esto se debe al gran número de proyectos de infraestructura que se presenta en esta zona¹⁴, dado que prácticamente el total de estos se realiza con HDPE y no con PVC. Respecto a la edad de las tuberías, existe una distribución notoria de ambos escenarios: producto del gran número de reposiciones recientes hay una gran representatividad de valores bajos en la FDA genérica, además las roturas se concentran en los valores altos de la edad, lo que permite que la FDA genérica tenga una diferencia vertical positiva respecto a la FDA asociada a las roturas en casi todos los valores de edad, salvo en las edades más altas. Aun así existen relaciones de probabilidad que aumentan la probabilidad condicional de presentar roturas en valores intermedios de edad, como el grupo de valores de (40-45] años, dado un conjunto específico de roturas de tuberías que se instalaron entre 1975 y 1980. Respecto al diámetro, sucede lo mismo que en las dos zonas descritas anteriormente: los valores bajos tienen mayor tasa de roturas, salvo el conjunto de tuberías de (250-300] mm que presenta roturas en una avenida específica.

¹³En las demás zonas los sectores de presión que entran en el modelo efectivamente son los lugares geográficos que mayor problema presentan.

¹⁴Estos se realizaron en el período de estudio, pero también a principio de la década de los 2000, sólo que no se cuenta con un registro gráfico de estos.

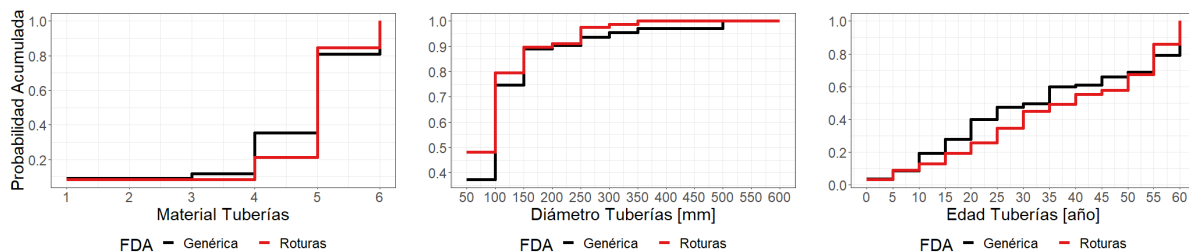


Figura 38: Función de Distribución Acumulada para el caso genérico y de roturas de la Zona N°5. Izq: FDAs de la variable Material (1: Fierro Fundido, 2: Acero negro, 3: Hierro Dúctil, 4: HDPE, 5: Asbesto Cemento, 6: PVC). Medio: FDAs de la variable Diámetro, agrupada en diámetros cada 50 mm; Der: FDAs de la variable Edad, agrupada en edades cada 5 años. Fuente: Elaboración Propia

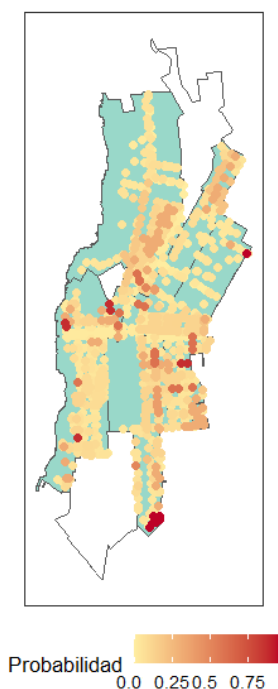


Figura 39: Mapa de Probabilidad de Falla de las tuberías actuales, de los sectores críticos de la Zona N°5 de Antofagasta. Fuente: Elaboración Propia

En esta zona la mayor probabilidad de falla es 0,95 y es representada por tuberías de Asbesto Cemento, de diámetro menor o igual a 100 mm y de 42 años de edad, pero este conjunto de tuberías tiene poca representación en esta zona, equivale al 0,41 %. La probabilidad de falla que se considera alta en esta zona y tiene notoria representatividad es la que presentan las tuberías de Asbesto Cemento de diámetro menor a 100 mm instaladas entre 1961 y 1965, estas tuberías tienen un valor de probabilidad de 0,32, y equivalen al 7,1 % de tuberías con mayor probabilidad de presentar rotura. Dentro de este último porcentaje se encuentran tuberías de similares características, salvo que se instalaron entre 1966 y 1971, es decir entre 55 y 60 años de edad.

En el sector 0501 existen dos lugares claros donde se concentran las roturas más recientes, como se ve en la figura 40, donde existen pocos proyectos de infraestructura realizados en el período de estudio, además

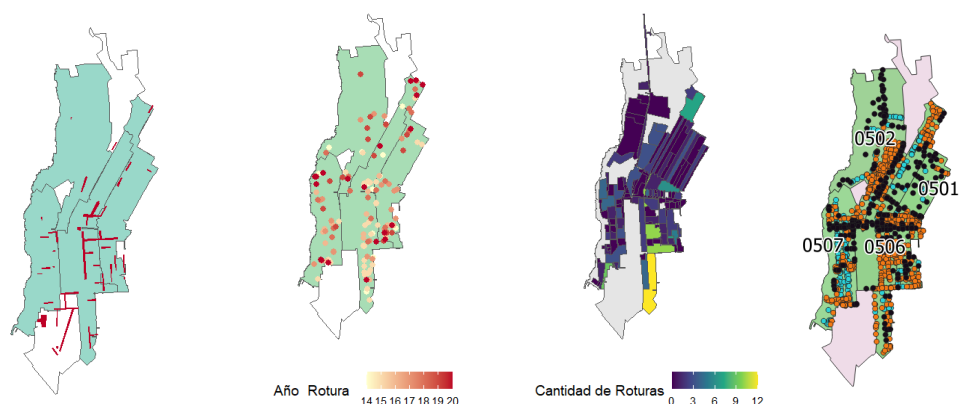


Figura 40: De izquierda a derecha: Proyectos de Infraestructura de las Matrices de Agua Potable de la Zona N°5 (proyectos desde el 2014 hasta el 2020); Distribución de las Roturas seleccionadas de los Sectores Críticos de la Zona N°5 (años desde el 2014 hasta el 2020); Cantidad de Roturas por Cuartel de los Sectores Críticos de la Zona N°5; Distribución de las tuberías de la Zona N°5 según su materialidad (celeste: PVC, naranja: Asbesto Cemento, negro: HDPE). Fuente: Elaboración Propia

en estos lugares, como es de esperarse dada la alta probabilidad que presentan, el material de las tuberías es de Asbesto Cemento. En el norte de este sector, en las calles nombradas en la figura 41, las tuberías son de Asbesto Cemento, de diámetro entre 75 y 150 mm e instaladas entre los años 1961 y 1966. Estas tuberías tienen una probabilidad de 0,09 y 0,32 de presentar rotura, esto equivale al 23,6 % de tuberías con mayor riesgo de fallar en esta zona. Por otro lado, en el sur de este sector se encuentran tuberías de similar probabilidad, pero con diferencias en su composición. Si bien la mayoría es de Asbesto Cemento, la mayor concentración de roturas se da en la calle Quito, donde las tuberías son de Fierro Fundido instaladas en 1932, por lo tanto su probabilidad es baja, no sólo por su material sino también por la edad, ya que las tuberías más antiguas paradójicamente son las que menos roturas presentan. En las demás calles de este lugar, mencionadas en la figura 41, se presentan tuberías de Asbesto Cemento, de similares características a las mencionadas en el sector norte del mismo sector de presión.

Respecto al sector de presión 0506, que es el sector con la segunda mayor cantidad de roturas, este no presenta un gran número de roturas recientes. Esto se puede atribuir a la gran cantidad de reposiciones de tuberías que se han realizado, por lo mismo se nota una concentración de HDPE en la figura 40. Hay pocos lugares que presentan alta probabilidad de presentar rotura con un registro robusto de roturas, estos se da en el sur de este sector, como en el cuartel 050613 donde hay 12 roturas. En este cuartel, en la Avenida Antonio Rendic entre las calles Lima y Huanchaca, especialmente en las calles hacia el oriente, hay una probabilidad general de 0,31. Lo mismo sucede en el cuartel 050607, específicamente en la Avenida Rendic con Río de Janeiro (y en las calles aledañas), donde hay gran cantidad de tuberías de Asbesto Cemento instaladas en la década de 1960.

En el sector 0507 los valores altos de probabilidad se encuentran aún más localizados que en el sector 0506, donde el cuartel 050736 presenta 12 roturas y tuberías de Asbesto Cemento que presentan un valor de probabilidad 0,09, que pareciera ser poco pero representa al 23 % de tuberías con mayor riesgo. En el norte de este sector, donde los cuarteles son pequeños y se dividen la cantidad de roturas en este segmento de este sector de presión, hay una concentración de roturas en tuberías con alto valor de probabilidad, donde el valor fluctúa entre 0,12 y 0,31, que representa el 19 % con mayor riesgo. Esto se presenta en la figura 41.

Por último, el sector 0502 es el sector crítico con menor cantidad de roturas y a su vez es el sector geográficamente más grande de esta zona. En este sector los valores altos de probabilidad se encuentran en el cuartel 050205 (sur de este sector), cuartel colindante con el norte del sector 0507, donde las tuberías son de Asbesto Cemento y se instalaron en su mayoría entre 1961 y 1966, especialmente en las calles Illapel, Chuquicamata y Mejillones (figura 41). En el cuartel 050203 también hay una concentración de valores altos de probabilidad (0,12) dado que las tuberías son todas de Asbesto Cemento, pero estas fueron instaladas en la década de 1950, específicamente en las calles Psje. Loa, Toconao, Pisagua, Héctor Robles y Ollagüe, donde esta última extiende su probabilidad hacia el cuartel 050217 llegando hasta la calle Victor Jara.

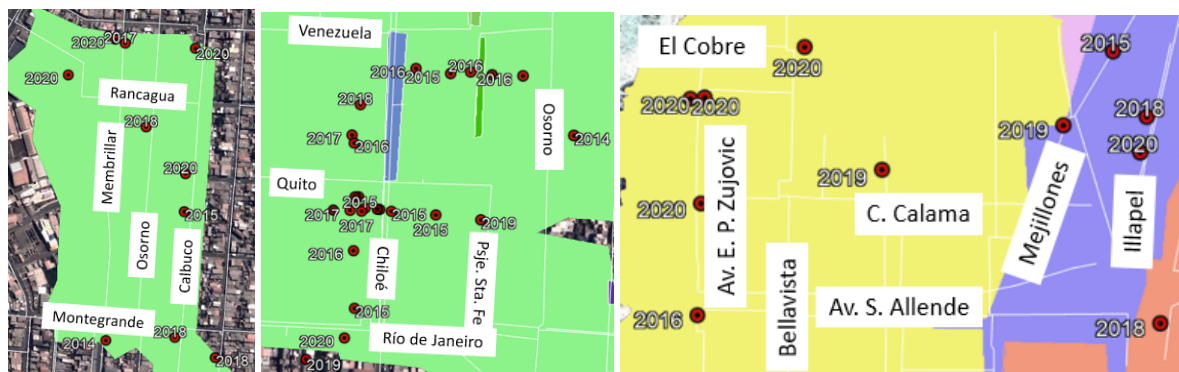


Figura 41: Principales roturas que afectaron a los sectores críticos de la zona N°5. De izquierda a derecha: sector norte 0501, sector sur 0501 y sector 0507 (amarillo) con el sur del sector 0502 (azul). Fuente: Elaboración Propia

7.1.4. Análisis por Zona Crítica: Zona N°7

Esta zona cuenta con una selección de 182 roturas y 1.667 tuberías para ejecutar el modelo propuesto. Las funciones de distribución acumulada que permiten obtener la probabilidad de falla se presentan en la figura 42. Esta zona cuenta con la particularidad de no presentar mayor diferencia entre la FDA condicionada y la FDA genérica respecto al material de los elementos, siendo el Asbesto Cemento y el Fierro Fundido los únicos que tienen una relación que aumentan la probabilidad de rotura, pero no en gran magnitud. El diámetro tiene una tendencia clara en todas las zonas (señalada por los autores citados en la sección 3.1.2) donde los diámetros más pequeños concentran las roturas de los sectores escogidos, siendo sólo el grupo de diámetros entre [50-100] mm los que tienen una relación que aumentan la probabilidad de rotura. La distribución de la edad es la que mayor problema puede presentar a la hora de realizar un diagnóstico de los elementos que presentan mayor riesgo de presentar rotura, dado que al ser una variable dinámica se le puede atribuir un alto valor de probabilidad de falla a elementos que no presentaron gran cantidad de roturas en el período de estudio. Por ejemplo, el grupo de edad entre (25-30] años presenta una relación que aumenta la probabilidad de falla, pero hoy en día las tuberías que presentan ese rango de edad son tuberías de PVC, que no presentaron roturas en el rango de edad mencionado, sino que fueron tuberías de Asbesto Cemento instaladas en la década de 1990; por lo tanto, sugerir un recambio en las tuberías de PVC sería un error considerando que aún están en su vida útil, y además las tuberías de las zonas restantes con similares características no presentan problemas de roturas. Por otra parte, las tuberías de Asbesto Cemento tienen un comportamiento similar a las zonas restantes, donde las roturas se dan en su mayoría en elementos que fueron instalados en las décadas de 1970 y 1980, acompañados por un pequeño grupo instalado en 1960 y 1990. Por último, es importante notar la aparición, en cuanto a probabilidad, que tiene el Fierro Fundido, el que tiene una representación importante gracias a los elementos instalados en el sector 0707, lo que permite que las

roturas de tuberías de otro material que estén por sobre los 60 años de edad, se vean solapadas por las roturas de este, debido a que este material es el más antiguo, instalado en las décadas de 1930 y 1940 en su mayoría.

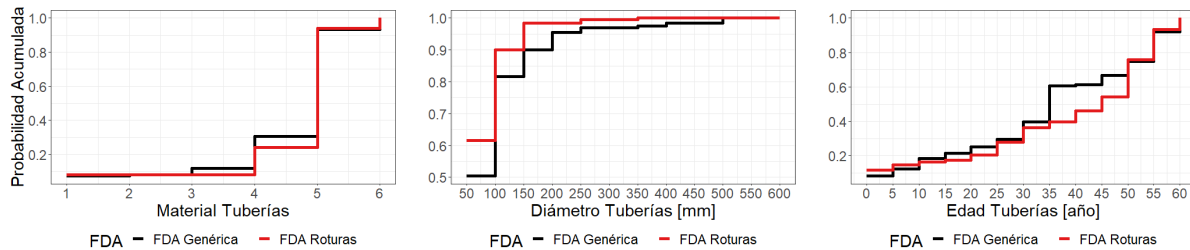


Figura 42: Función de Distribución Acumulada para el caso genérico y de roturas de la Zona N°7. Izq: FDAs de la variable Material (1: Fierro Fundido, 2: Acero negro, 3: Hierro Dúctil, 4: HDPE, 5: Asbesto Cemento, 6: PVC). Medio: FDAs de la variable Diámetro, agrupada en diámetros cada 50 mm; Der: FDAs de la variable Edad, agrupada en edades cada 5 años. Fuente: Elaboración Propia

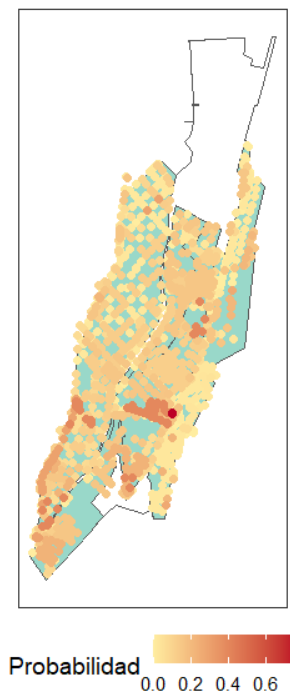


Figura 43: Mapa de Probabilidad de Falla de las tuberías actuales, de los sectores críticos de la Zona N°7 de Antofagasta. Fuente: Elaboración Propia

De la figura 43 se puede ver que el panorama de las tuberías operativas no es muy diverso en cuanto a la magnitud de la probabilidad de rotura. Esto se puede atribuir a la gran cantidad de proyectos de infraestructura que hay en los sectores de presión escogidos¹⁵, donde el sector 0707 es el que presenta mayor cantidad de reposiciones, pero a su vez también presenta uno de los valores más altos de probabilidad (0,39), como es el caso de los elementos de la calle Hermógenes Alfaro con Barón de la Riviere y sus calles aledañas, donde hay

¹⁵Esta zona es la que cuenta con mayor cantidad de proyectos de recambio de tuberías.

una notoria concentración de roturas. Aún así, dadas las distintas reposiciones en el sector sur no se registran abundantes roturas recientes, como se ve en el figura 44.

El sector 0705 es el sector que menos reposiciones registra y por lo mismo es el sector con tuberías que presentan la mayor probabilidad de fallar, sobretudo en el extremo norte y sur. En las calles al oriente de la intersección de Andrés Sabella con Chillán se presenta una concentración de alta probabilidad, en las calles Ramón Barros Luco, Diego Portales Manuel Montt, Patricio Lynch y Chillán inclusive dado que las tuberías son de diámetro menor a 100 mm, de Asbesto Cemento e instaladas entre 1960 y 1970, dando una probabilidad entre 0,15 y 0,22 lo que corresponde al 14,8 % de tuberías con mayor riesgo de presentar rotura. En el norte de este sector hay dos cúmulos de roturas, ambos se presentan aguas arriba de la Av. Andrés Sabella, uno se concentra entre las calles Teniente Igancio Serrano y Simón Bolívar, y el otro se concentra entre las calles Méndez y Teniente Ernesto Riquelme, donde la probabilidad de rotura es de 0,15 en todos los elementos (figura 45).

El sector 0702 presenta uno de los cuarteles que mayor cantidad de roturas registra (14), pero a su vez este cuartel contiene la mayor concentración de reposiciones de elementos, por lo mismo sus tuberías no tienen un alto valor de probabilidad y tampoco gran cantidad de roturas recientes, aunque producto de estas reposiciones, la FDA asociada a las roturas presenta una notoria representación del grupo de edad entre (0-5] años, ya que existen roturas de elementos de HDPE a menos de un año de su instalación, algo bastante común. En el sur de este sector, en los cuarteles 070227 y 070228, hay tuberías que tienen un valor de probabilidad de 0,22 (5,5 % de mayor riesgo) que están en las calles Diagonal Sur, Araucanía y Caupolicán, producto de las tuberías de Asbesto Cemento instaladas en el año 1972. Este pequeño grupo de alta probabilidad responde a la buena gestión que ha tenido la empresa con este sector, donde el gran registro histórico de roturas no permite tener un gran conjunto de tuberías con alto riesgo de presentar rotura. Por último, el sector 0701 no contiene concentraciones de altos valores de probabilidad que permitan proponer recambios de tuberías producto del notorio deterioro; entre las calles que mayor conflicto presentan destacan la calle Martin Luther King (entre Urrutia y Riquelme), Alfonso Meléndez (entre Cordillera y Los Morros) y Doce de Octubre (Bogotá y Riquelme).

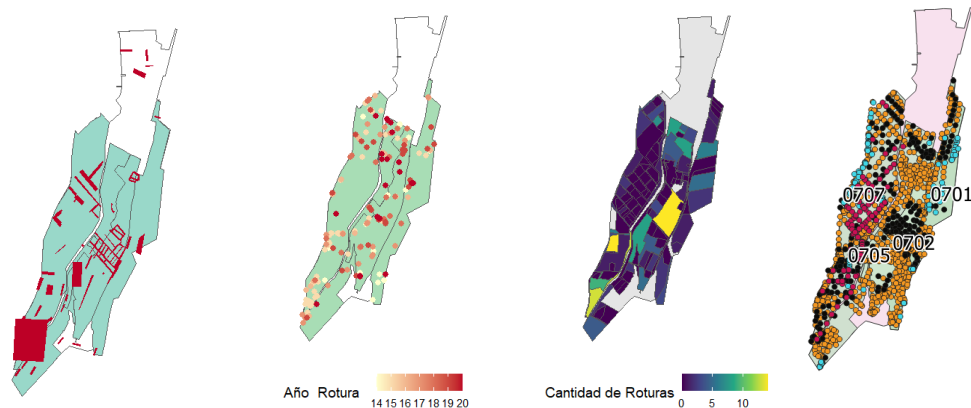


Figura 44: De izquierda a derecha: Proyectos de Infraestructura de las Matrices de Agua Potable de la Zona N°7 (proyectos desde el 2014 hasta el 2020); Distribución de las Roturas seleccionadas de los Sectores Críticos de la Zona N°7 (años desde el 2014 hasta el 2020); Cantidad de Roturas por Cuartel de los Sectores Críticos de la Zona N°7; Distribución de las tuberías de la Zona N°7 según su materialidad (celeste: PVC, naranja: Asbesto Cemento, negro: HDPE y violeta: Fierro Fundido). Fuente: Elaboración Propia

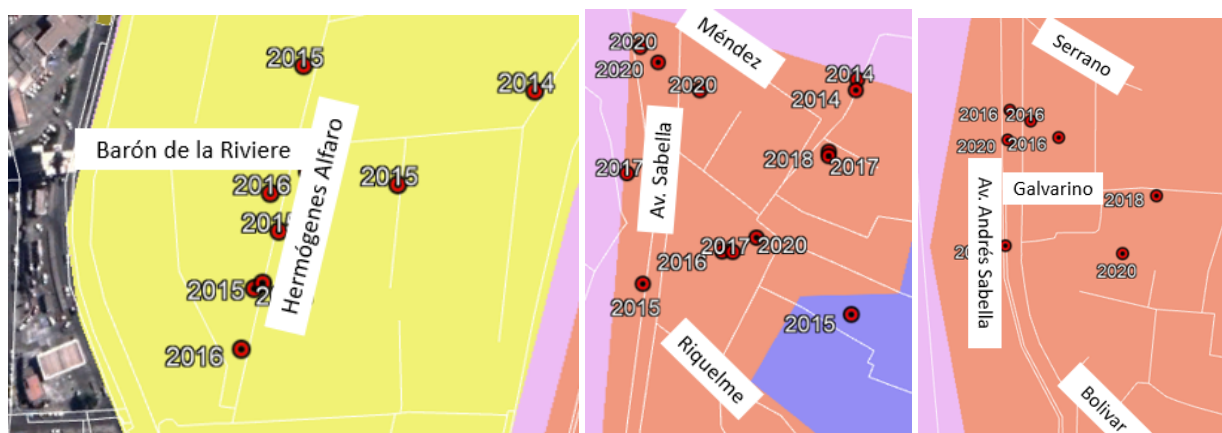


Figura 45: Principales roturas que afectaron a los sectores críticos de la zona N°7. De izquierda a derecha: sector 0707 y lugares del sector 0705. Fuente: Elaboración Propia

7.1.5. Procedimiento de Validación

En la sección anterior se presenta el resultado de obtener la probabilidad de falla mediante tres predictores independientes entre sí, por cada zona crítica de abastecimiento. La mayoría de los lugares de la red de agua potable que se mencionan en la sección anterior, además de presentar una alta probabilidad de rotura relativa a su zona, presentan un historial de roturas significativo que aún no presenta un proyecto de reposición que cese la frecuencia de fallas en la red. En esta sección se presentan las roturas que se registran en el período de validación, que data del 01-01-2021 hasta el día 30-11-2021, y se verifica el estado de las tuberías que presentaron rotura en este período. La ubicación de cada rotura en este período de validación de cada zona crítica se muestra en la figura 46.

Como se puede ver en la tabla 7, la mayoría de las roturas registradas en el período de validación ocurrieron en los sectores de presión críticos que entran en el modelo empleado. Por otra parte, el valor de la probabilidad de falla de las roturas registradas es diverso: existen roturas en elementos que comparten características con las tuberías que no presentaron roturas en el período de estudio, por ende presentan un bajo valor de probabilidad de falla; también existen roturas en las calles con mayor conflicto mencionadas en la sección anterior, y roturas en lugares con un alto valor de probabilidad que no tienen un vasto historial de roturas en el período de estudio, pero dada sus características el modelo indica que aún así presentan alto riesgo de presentar rotura.

Tabla 7: Cantidad de Roturas en el Período de Validación de cada Zona Crítica

Zona	Total Roturas	Dentro del Dominio	Fuera del Dominio	Rango Probabilidad
1	9	7	2	[0,03 - 0,09]
3	20	20	0	[0,02 - 0,85]
5	27	21	6	[0,016 - 0,95]
7	9	8	1	[0,09 - 0,23]

Respecto a la Zona N°1, en el sector 0102 ocurrieron 2 roturas en uno de los lugares de la red que concentra un alto valor de probabilidad relativo al sector, producto de la concentración de roturas registradas en el período de estudio; ambas ocurrieron en Av. Bonilla en tuberías de PVC, de 110 mm de diámetro e instaladas

a principios de la década de 1990 (29 y 27 años respectivamente), por lo tanto para este sector, en este corto período de validación, las roturas ocurrieron en el lugar de mayor riesgo. Por otro lado, en el sector 0103 se registran 3 roturas en este período de validación, pero no ocurrieron en el lugar de la red donde se concentra la mayor probabilidad de falla, mencionado en la sección anterior; las tuberías que presentaron rotura están al norte del lugar con mayor valor de probabilidad (como se ve en la figura 46) en tuberías de Asbesto Cemento que tienen una probabilidad de fallar de 0,04 y 0,09 (difieren en el valor por la diferencia de edad), este último valor de probabilidad es el mayor registrado en este período. En el sector 0104 sólo existe una rotura de PVC de 110 mm de diámetro instalada en 1994 que presenta un valor de 0,035 de probabilidad de falla, en la intersección de la calle Ónix con Av. E. Pérez Zujovic, donde ya se registraban dos roturas. Por último, en el sector 0108 hay una rotura en la calle El Roble que presenta una probabilidad de 0,05, siendo un valor relativamente bajo pero registrado en una tubería instalada en 1969 que presenta un extenso historial de roturas, pero que por el agrupamiento de edades en las FDAs queda fuera del grupo de edad (sólo por 2 años) que aumenta significativamente la probabilidad de falla.

En la figura 47 se muestran dos gráficos por zona, en donde uno de ellos muestra el porcentaje de tuberías operativas en el período de validación que presentan un valor menor o igual a cierta probabilidad de falla en específico. Para aclarar su lectura se presenta el siguiente ejemplo: en la Zona N°1 casi el 60 % de las tuberías tiene una probabilidad de falla menor o igual a 0,05, y alrededor del 90 % de las tuberías tiene una probabilidad menor o igual que 0,1. En el segundo gráfico se muestra en qué porcentaje de las tuberías operativas están cada una de las tuberías que presentaron rotura. Por ejemplo, una tubería con rotura con un valor de probabilidad de falla muy bajo (0,01 por ejemplo) entra en un porcentaje bajo del gráfico anterior, por lo tanto una tubería con rotura que presenta el mayor valor de probabilidad de falla de la zona, debería indicar el 100 % dado que no hay tuberías que superen este valor (eso significa que el 100 % de las tuberías presentan un valor de probabilidad de falla menor al valor registrado en esta rotura). Por lo tanto, en el caso ideal en donde sólo tuberías con el mayor valor de probabilidad presentan roturas, se debería formar una curva horizontal a lo largo de todo el gráfico ubicada en el porcentaje 100 %. En esta figura se puede ver claramente que las roturas ocurridas en el período de validación dentro de la Zona N°1 abarcan prácticamente todo el espectro de elementos, donde sólo la mitad de las roturas entran en el 50 % de tuberías con mayor riesgo de falla.

Respecto a la Zona N°3, en la figura 47 se puede ver que más de la mitad de las roturas (11), registradas en el período de validación, ocurrieron en el 30 % de elementos con mayor riesgo de presentar rotura, en donde 6 de esas 11 roturas equivalen a elementos con la máxima probabilidad presentada en esta zona; además, 16 roturas (equivalentes al 80 % del total en esta zona) están consideradas en el 50 % de mayor riesgo. Las roturas que tienen el mayor valor de probabilidad de falla (0,85) se encuentran en las calles Radomiro Tomic (sector 0306), El Roble (sector 0302), Huasco (sector 0304) y Pucón (sector 0304). Las calles Huasco y El Roble no registran roturas (en este sector) en el período de estudio, pero dada sus características están en el grupo de mayor riesgo de presentar rotura. Las otras roturas de tuberías se encuentran en matrices que presentan un historial de roturas en el período de estudio, pero dada sus características su valor de probabilidad no es el mayor en esta zona; estas roturas se generaron en las calles Tenglo (0304), El Tijar (0301) y Pantaleón Cortés (0306), donde todas estas tuberías entran en el 30 % de mayor riesgo. El resto de las roturas son de probabilidad relativamente baja en la zona, pero comparten características, como ser de Asbesto Cemento, de diámetro menor o igual a 100 mm, pero instaladas en la década de 1950, lo que disminuye su probabilidad de presentar rotura en esta zona, como pasó en las roturas registradas en las calles Puerto Natales y Carlos Oviedo Cavada. Las roturas con el menor valor de probabilidad (0,023) ocurrieron en la calle Fresia (sector 0301), que presenta un vasto historial de roturas, pero dado que sus elementos son de Acero Negro su probabilidad decrece bastante.

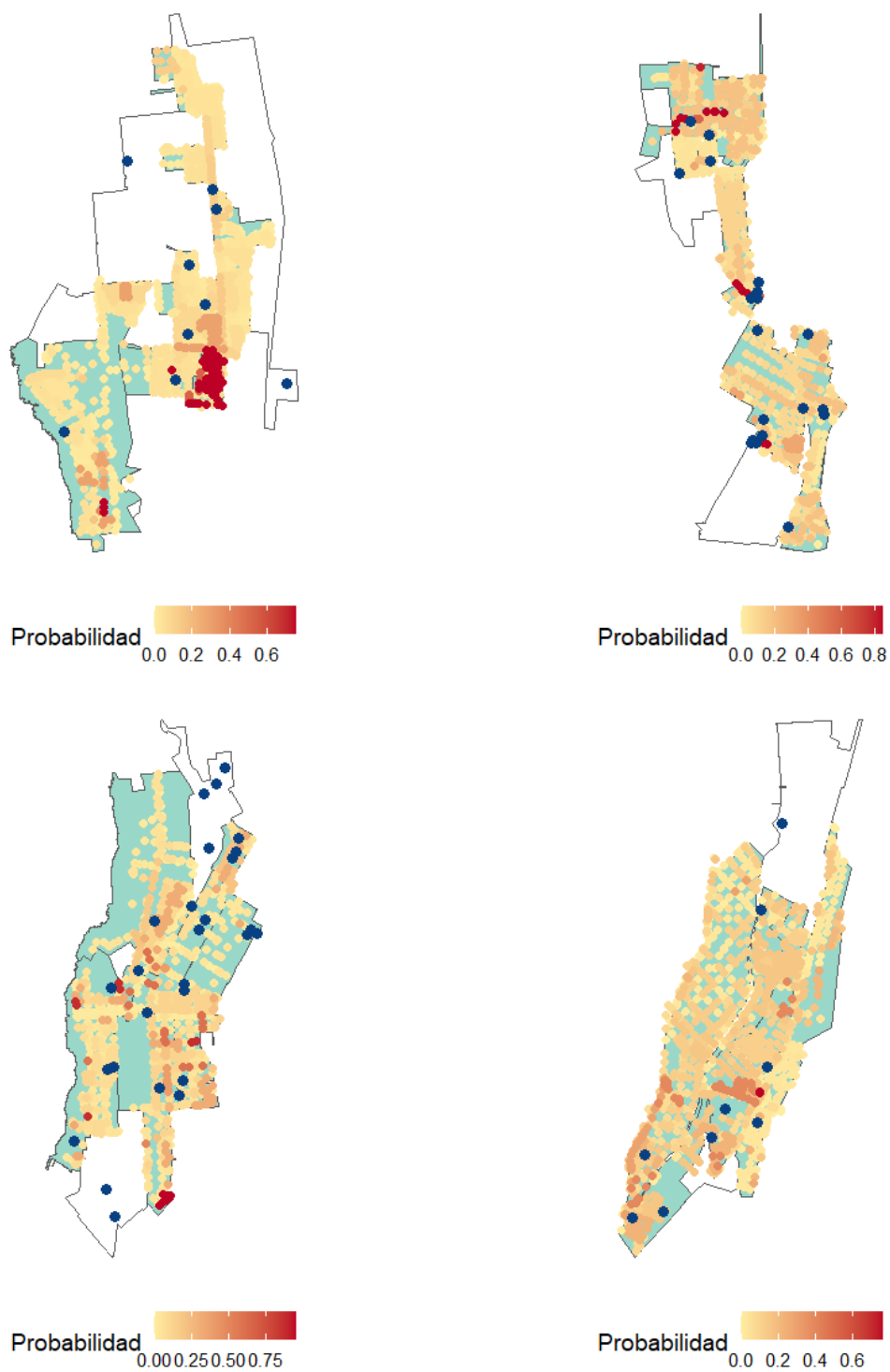


Figura 46: Ubicación de todas las roturas registradas en el período de validación de cada zona crítica (color azul). Arriba de izquierda a derecha: Zona N°1 y Zona N°3; abajo de izquierda a derecha: Zona N°5 y Zona N°7. Fuente: Elaboración Propia

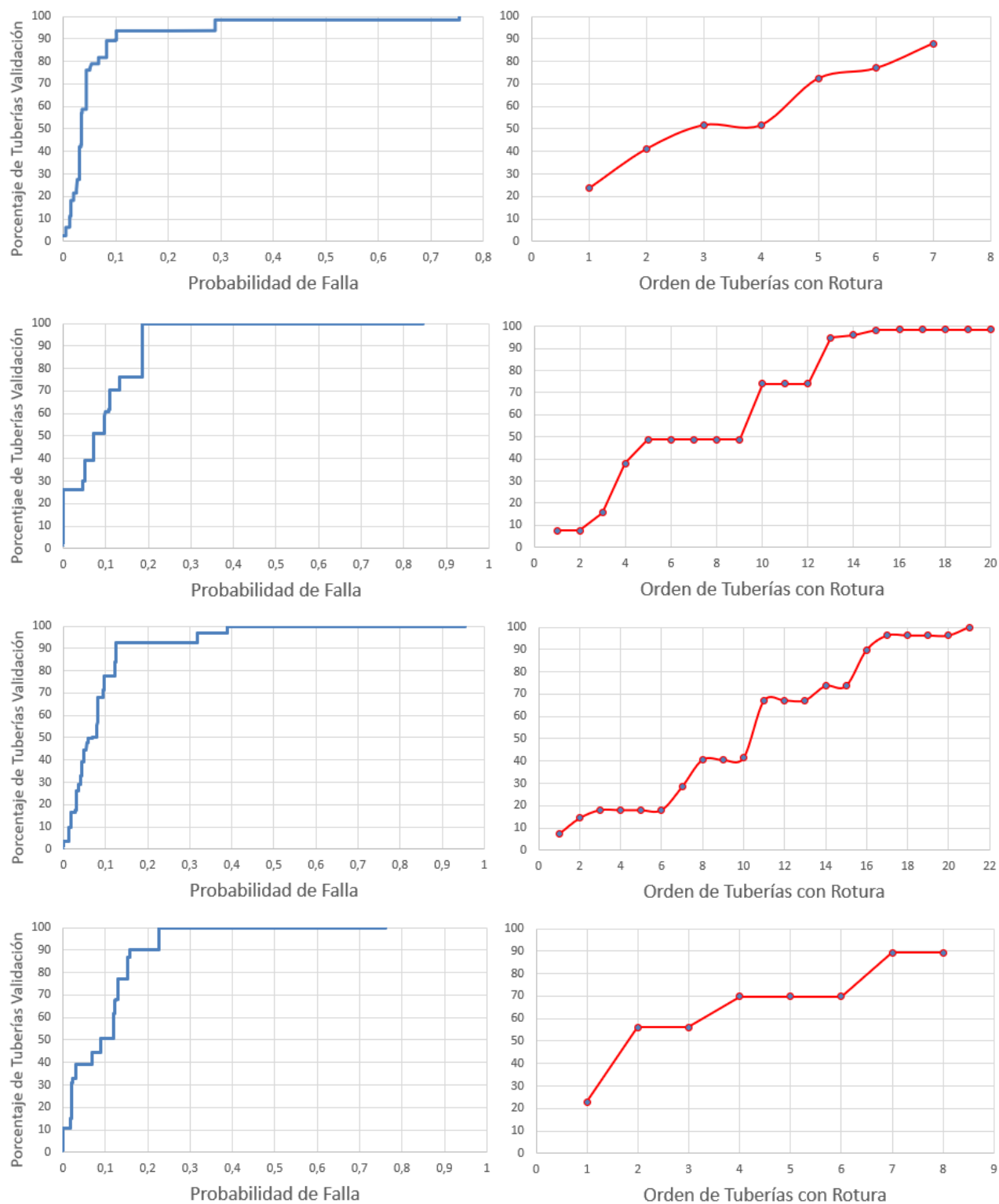


Figura 47: 1ra columna: Porcentaje de Tuberías con menor o igual Probabilidad de Falla por Zona. 2da columna: Porcentaje de Tuberías que representa cada rotura por Zona. De arriba hacia abajo: Zona N°1, Zona N°3, Zona N°5 y Zona N°7. Fuente: Elaboración Propia

Las roturas, registradas en el período de validación, de la Zona de abastecimiento N°5 ocurrieron mayoritariamente en calles donde ya existía un largo registro de roturas, pero en donde no se han realizado proyectos de reposición. Por esta razón es que 11 de las 21 roturas están en el 40 % de mayor riesgo, donde 5 de estas roturas entran en el 4 % de mayor riesgo. En el sector de presión 0501 se encuentran 3 roturas que están en este 4 % de mayor riesgo, estas ocurrieron en las calles Membrillar, Osorno y Puerto Natales¹⁶. En el sector 0506 ocurrieron roturas de tuberías de HDPE en lugares donde ya existía registro, como en la calle Salvador Allende y Calbuco; por otro lado, en la calle Río de Janeiro, donde se concentra gran parte de las roturas en el período de estudio, ocurrió una rotura en el período de validación, y dos en sus calles aledañas (Blanco Encalada y Quito, limitando con el sector 0501), en tuberías de Asbesto Cemento y Fierro Fundido. En el sector 0507 las roturas ocurrieron en lugares que no registran roturas, pero en donde se tiene un gran riesgo de presentar rotura dado el modelo; esto ocurrió en las calles Tarapacá y Anibal Pinto, que quedan en los extremos norte y sur respectivamente (como se indica en la sección 7.1.3), donde las tuberías son de Asbesto Cemento y PVC, ambas con una probabilidad de 0,32 (4 % de mayor riesgo). Por último, en el sector 0502 las roturas presentadas son variadas en sus características, estas ocurrieron en las calles Ollagüe y Valdivia, y presentaban una probabilidad de 0,12 y 0,05 respectivamente, si bien su probabilidad es baja relativa a la zona, existen roturas previas en los lugares mencionados.

Como se menciona en la sección 7.1.3, el modelo empleado deja fuera del análisis sectores de presión con un gran número de roturas por unidad de área. En este período de validación ocurrieron roturas en dichos sectores, sobre todo en el norte de la zona en los sectores 0503 y 0505, donde se registran 3 roturas. Lo interesante de estas roturas es que equivalen a tuberías de Asbesto Cemento, de 75 mm de diámetro y 50 años de edad, conjunto de características que tienen varias roturas en el período de estudio de los sectores escogidos, por lo tanto, en el caso hipotético en el que las roturas escogidas para calibrar el modelo corresponden a una muestra del total de la zona (y por ende todas las tuberías operativas entrarían en el análisis), estas tuberías mencionadas que presentaron rotura estarían en el 25 % de mayor riesgo, aumentando la cantidad de roturas con un alto valor de probabilidad de falla de la zona.

Por último, en la Zona N°7 la mayoría de las roturas presentadas en el período de validación ocurrieron en matrices que ya presentaban problemas de falla en años anteriores. Es por esta razón que gran parte de las roturas tienen un elevado valor de probabilidad relativo a la zona, lo que se manifiesta en la figura 47, donde se puede ver que 5 de las 8 roturas entran en el 30 % de elementos con mayor riesgo de presentar rotura. Estas roturas comparten características, como ser de Asbesto Cemento y tener un diámetro menor o igual a 100 mm; la diferencia del valor de probabilidad es debido a la edad, donde la mayor probabilidad de estas roturas lo tienen elementos de 49 años de edad, seguidas de tuberías entre 57 y 60 años de edad. Estas ocurrieron en calles mencionadas en la sección 7.1.4, como Hermógenes Alfaro con Barón de La Riviere (0707), Chillán con Andrés Sabella (0705), Patricio Lynch (0705), Diagonal Sur con Araucanía (0702) y Andrés Sabella con Riquelme (0702). Respecto a las roturas restantes, donde 2 de ellas corresponden a tuberías de HDPE de menos de 5 años de edad, ocurrieron en lugares de la red donde se realizaron reposiciones de tuberías en el período de estudio. Estas roturas entran en el 50 % de mayor riesgo, lo que a priori es alto para una tubería de HDPE instalada hace menos de 5 años, es coherente su riesgo ya que según los autores citados en la sección 3.1.3 las redes de agua potable tienen un elevado valor de tasa de rotura para tuberías instaladas recientemente, lo que lo atribuyen a errores propios del proceso de instalación. Respecto a la rotura con menor probabilidad, esta corresponde a una tubería de Asbesto Cemento, de 75 mm de diámetro con 40 años de edad, lo que sería un elemento con una probabilidad alta para otra zona, en esta no se registran muchas roturas con esa edad.

¹⁶Estas tuberías son de Asbesto Cemento, de 75 mm de diámetro e instaladas en 1962 (59 años de edad)

7.1.6. Conclusiones

En esta parte de la investigación, el modelo empleado permite obtener el panorama actual de cada tubería operativa dentro de un lugar geográfico acotado. A diferencia de los modelos deterministas, que proporcionan una tasa de rotura basada en lo ocurrido en un período de análisis previo, este modelo le proporciona a cada tubería una probabilidad de presentar rotura, por ende, si el elemento tiene características similares a la mayoría de las roturas, debería tener un alto valor de probabilidad de falla, aumentando el riesgo en ese lugar de la red de agua potable. Este modelo permite jerarquizar elementos de las matrices y en conjunto a información adicional proponer un recambio de elementos en la red.

Respecto a los predictores de la probabilidad de falla, estos presentaron un comportamiento similar a lo defendido por los autores del marco teórico. En el caso del diámetro, la concentración de roturas se da para las tuberías con los diámetros más pequeños, siendo el grupo de [50-100] mm de diámetro el único que tiene una relación de probabilidad que aumenta la probabilidad de falla en todas las zonas. Los diámetros entre 100 y 150 mm también presentan un elevado valor de roturas registradas, pero también son los diámetros con mayor representación en la red de agua potable, lo que no permite que la relación de probabilidad necesariamente aumente la probabilidad de falla para las tuberías con esta característica. Para los diámetros más grandes, sólo presentaron un elevado número de roturas las principales avenidas de los sectores escogidos.

En relación al material, las roturas se concentraron en su mayoría en las tuberías de Asbesto Cemento, lo que no es sorpresa dado lo que se presenta en el marco teórico, donde los autores sostienen que este material es considerado frágil, por lo que su implementación se encuentra en desuso, además de presentar componentes dañinos para la salud de la población, en especial para los instaladores de tuberías. Otros materiales que presentan una gran tasa de rotura en las investigaciones de los autores citados en la sección 3.1.3 es el Hierro Dúctil y el Hierro Fundido. En las zonas de abastecimiento analizadas en esta investigación hay poco registro de roturas de Hierro Dúctil, pero esto se atribuye a la prácticamente nula representación que hay de este material en estas zonas, no así el Hierro Fundido. Este último material sólo tiene un alto número de tuberías instaladas en la Zona N°7, precisamente en el sector de presión 0707, y con sólo las roturas de este material registradas en este sector de presión, la relación de probabilidad permite aumentar la probabilidad de falla para las tuberías de este material en esta zona en específico. Respecto a las tuberías de PVC, estas presentaron una concentración de roturas solamente en un sector de presión donde prácticamente sólo hay tuberías de este material instaladas; en los sectores de presión restantes también hay tuberías de PVC instaladas, pero presentaron una baja tasa de rotura. Por ende, en esta investigación, al igual que en las citadas en el marco teórico del presente informe, el Asbesto Cemento y el Hierro Fundido son materiales que presentan una gran tasa de rotura.

La edad de las tuberías es el único predictor dinámico utilizado, por lo mismo es el predictor que presenta mayor problema a la hora de validar la probabilidad de falla de un elemento. Como se menciona en la sección 3.1.1, este predictor tiene características implícitas en ella, como los tipos de juntas empleadas o diferencias en su instalación, que hacen que las tasas de roturas para tuberías con la misma edad sean distintas en otros lugares geográficos, lo que se evidencia en esta investigación. Aún así, en todas las zonas se registraron concentraciones de roturas instaladas en la década de 1970 y parte de la década de 1980, y poco en tuberías con mayor edad, como se puede apreciar en la figura 48. Esto último se puede atribuir a que la mayoría de estas tuberías antiguas ya presentan reposiciones en tramos de tubería específicos, donde se pueden arreglar tramos con notorio deterioro, por lo tanto, esas tuberías antiguas podrían no presentar mayor problema. Esto último también pasa dado que coincidentemente estas tuberías antiguas podrían estar instaladas en lugares de la red que no presentan mayor flujo o están lejos de los lugares donde constantemente ocurren fenómenos transitorios.

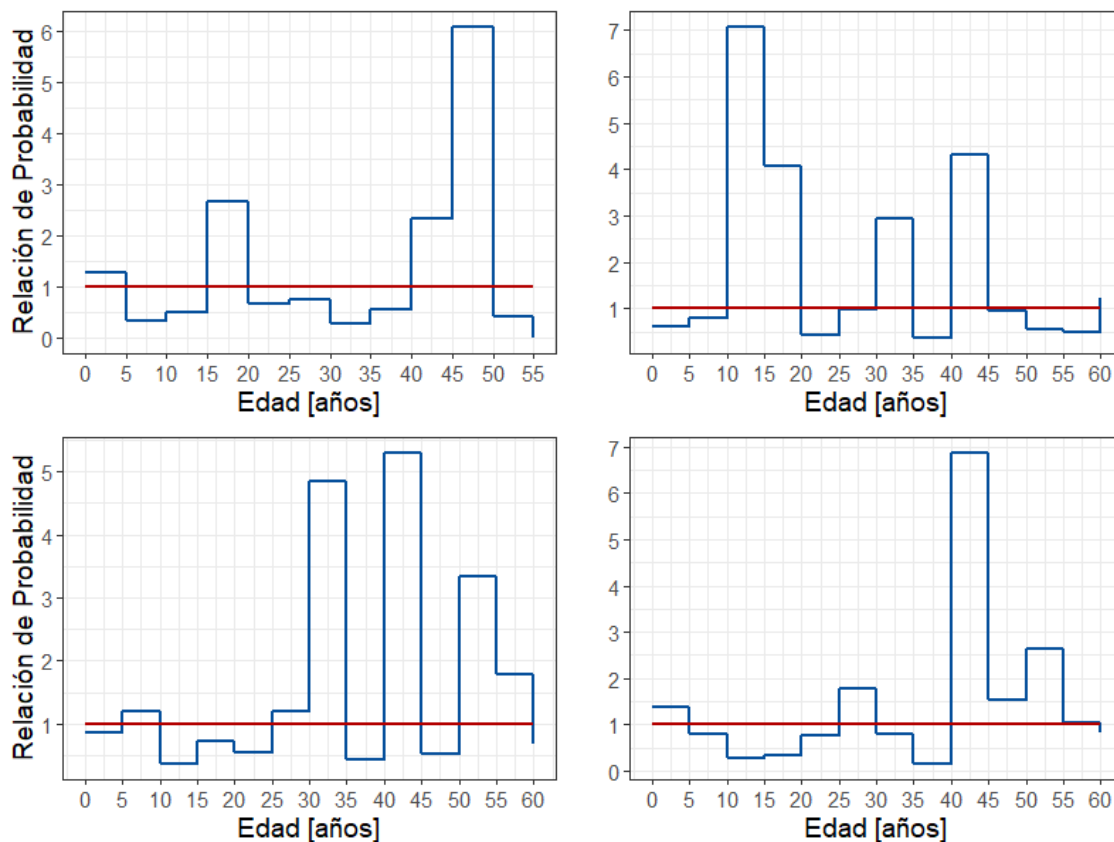


Figura 48: Relación de Probabilidad ($P_{x|f}/P_x$) de la variable Edad en las distintas Zonas Críticas. Arriba de izquierda a derecha: Zona N°1 y Zona N°3; abajo de izquierda a derecha: Zona N°5 y Zona N°7. Fuente: Elaboración Propia

Es importante distinguir entre materiales cuando se quiere analizar la edad de las roturas, esto ya que la gran mayoría de las roturas registradas con una edad sobre los 40 años son de Asbesto Cemento y/o Fierro Fundido; las roturas entre 15 y 30 años se le atribuyen a las tuberías de PVC, por lo mismo sólo hay un aumento de la relación en la Zona N°1, y las roturas de menos de 5 años son ocasionadas en tuberías de HDPE. Respecto a las tuberías de Asbesto Cemento, en la figura 48 se puede apreciar que las tuberías de 40 a 45 años de edad (instaladas durante 1976 y 1981) presentan un aumento de la probabilidad de falla en todas las zonas estudiadas. Pero esta relación tiende a disminuir para la Zona N°1 y la Zona N°3 cuando las tuberías presentan entre 50 y 55 años, no así en las zonas restantes, donde existen diversas roturas que presentan problemas en tuberías de estas edades (esto se evidencia en las distintas calles mencionadas en la sección anterior).

Como se menciona en el desglose de los resultados por zona, esto se puede atribuir al agrupamiento de las edades para confeccionar las FDAs, como sucede en el sector 0108, donde hay un número considerable de tuberías con 52 años que han presentado roturas recientes, pero dada su edad su probabilidad es baja. Pero también, esto puede ser debido a que efectivamente las roturas responden a un proceso de instalación propio del período y el lugar donde se hizo, por lo tanto, las tuberías entre 50 y 55 años de edad tienen características implícitas que responden a distintos factores que se manifiestan en roturas de tuberías en ciertos lugares de la red y en otros no. Por lo tanto, en esta investigación no se puede obtener una relación directa respecto a las edades de las tuberías, pero sí puede evidenciar geográficamente donde existe una alta probabilidad de

rotura en lugares específicos de la red de agua potable, donde no necesariamente se tenga que necesitar un gran historial de roturas para proponer un recambio dado su riesgo de fallar en un futuro cercano. El listado de las tuberías que se proponen para un recambio de elementos se presenta en las tabla 21, 22, 23 y 24 de la sección 10.5, donde se detallan los metros de recambio propuestos, el lugar exacto delimitado por las calles, cuartel (subsector), material, diámetro y año de instalación de los elementos a cambiar.

7.2. Análisis de Presión

En esta sección se muestran los resultados de aplicar la metodología propuesta, acerca de uno de los predictores más determinantes a la hora de atribuir una causa a las distintas roturas que ocurren en una red de agua potable, según la mayoría de los autores citados en este informe. Como se detalla en la metodología (sección 5.2), la presión se trabaja como predictor dentro de un modelo univariado, en donde gracias al teorema de Bayes se puede obtener la probabilidad de falla de una tubería dentro de una selección de elementos. Esta probabilidad, al igual que en el modelo descrito en la sección anterior, depende de la relación que existe entre el comportamiento del predictor asociado a las roturas con el comportamiento del predictor genérico, denominada relación de probabilidad. Esta relación es el resultado final en esa investigación, ya que interesa saber qué rangos del mejor indicador de presión son los que aumentan la probabilidad de presentar rotura, en cada sector de presión.

7.2.1. Análisis de los Indicadores de Presión

En esta parte de la investigación se analizan todos los indicadores, y se determina estadísticamente cuál indicador es el que guarda mayor relación con las roturas asociadas en los distintos sectores de presión, escogidos en la sección 6.2. Para esto se confecciona una FDA con los valores de cada indicador, obtenidos con los valores de presión instantáneos momentos previos a la generación de cada una de las roturas seleccionadas (FDA condicionada a las roturas), y 100 FDAs con valores aleatorios de la serie completa (filtrada) del punto de control del sector de presión correspondiente (estas FDAs representan a la FDA genérica). Luego cada FDA confeccionada con valores aleatorios se compara estadísticamente mediante el test de bondad de Kolmogorov-Smirnov¹⁷ con la FDA condicionada a las roturas, el cual indica si las dos funciones provienen de la misma serie de datos. Si es que hay varias FDAs que rechazan la hipótesis nula del test, se puede concluir que los valores del indicador de presión analizado difieren del comportamiento cotidiando del sector, por lo tanto ese indicador de presión podría guardar estricta relación con las roturas seleccionadas en ese sector de presión específico. Este análisis se hace para distintos tiempos de anticipación e intervalos de datos, ya que puede ocurrir que la presión presente anomalías horas e incluso días previos al registro de las roturas. Una vez que se encuentre el mejor indicador de presión, esto significa encontrar el indicador que rechace la mayor cantidad de hipótesis nulas para una combinación de tiempo de anticipación e intervalo de datos dado, se confecciona la FDA genérica del indicador con todos los valores de presión de la serie filtrada. Al obtener la FDA asociada a las roturas y la FDA genérica se genera la relación de probabilidad, que muestra cómo se comporta la probabilidad de falla para distintos rangos de valores del indicador, los cuales pueden aumentar o disminuir esta probabilidad mencionada. Todo esto se explica con detalle en la sección 5.2.

En las figuras 49 y 50 se muestran la cantidad de hipótesis nulas rechazadas de cada sector de presión escogido, para distintos tiempos de anticipación e intervalo de datos. Este último parámetro se trabaja cada 24 horas, dado que los valores de presión se repiten cíclicamente cada 1 día. El tiempo de anticipación varía cada 24 horas también, pero se hace una excepción momentos previos a las roturas, específicamente 6 horas antes de la hora informada, ya que esta hora informada hace referencia al inicio del corte de suministro, que no necesariamente es la misma hora de las roturas de las tuberías. Por lo tanto, muchas veces la presión mínima es 0 [m.c.a.] cuando el tiempo de anticipación es 0 horas, lo que hace que la FDA asociada a las roturas difiera mucho de las 100 FDAs aleatorias, esto genera que el test rechace prácticamente todas las FDAs.

¹⁷ Este test de bondad mide la máxima diferencia vertical que existe entre dos funciones. Si esta diferencia es mayor a un valor estadístico propio del test, la hipótesis nula se rechaza, la cual sostiene que las dos funciones sometidas al test provienen de la misma “familia de datos”.

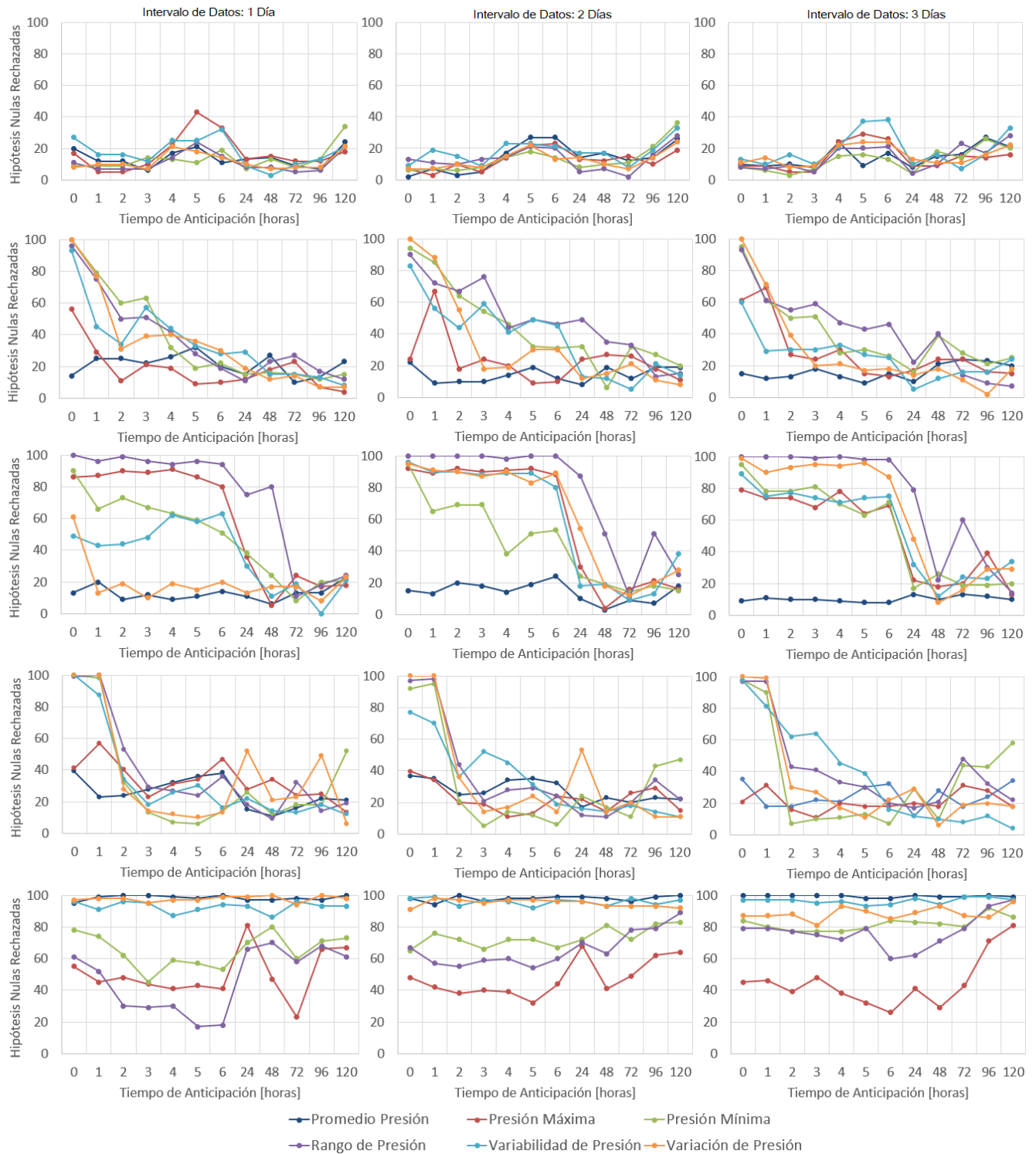


Figura 49: Resultados del Test de Bondad de Kolmogorov-Smirnov para distintos Tiempos de Anticipación e Intervalos de Datos. 1ra fila: sector 0102, 2da fila: sector 0103, 3ra fila: sector 0104, 4ta fila: sector 0108, 5ta fila: sector 0306. 1ra columna: Intervalo de Datos de 1 Día, 2da columna: Intervalo de Datos de 2 Días, 3ra columna: Intervalo de Datos de 3 Días. Fuente: Elaboración Propia

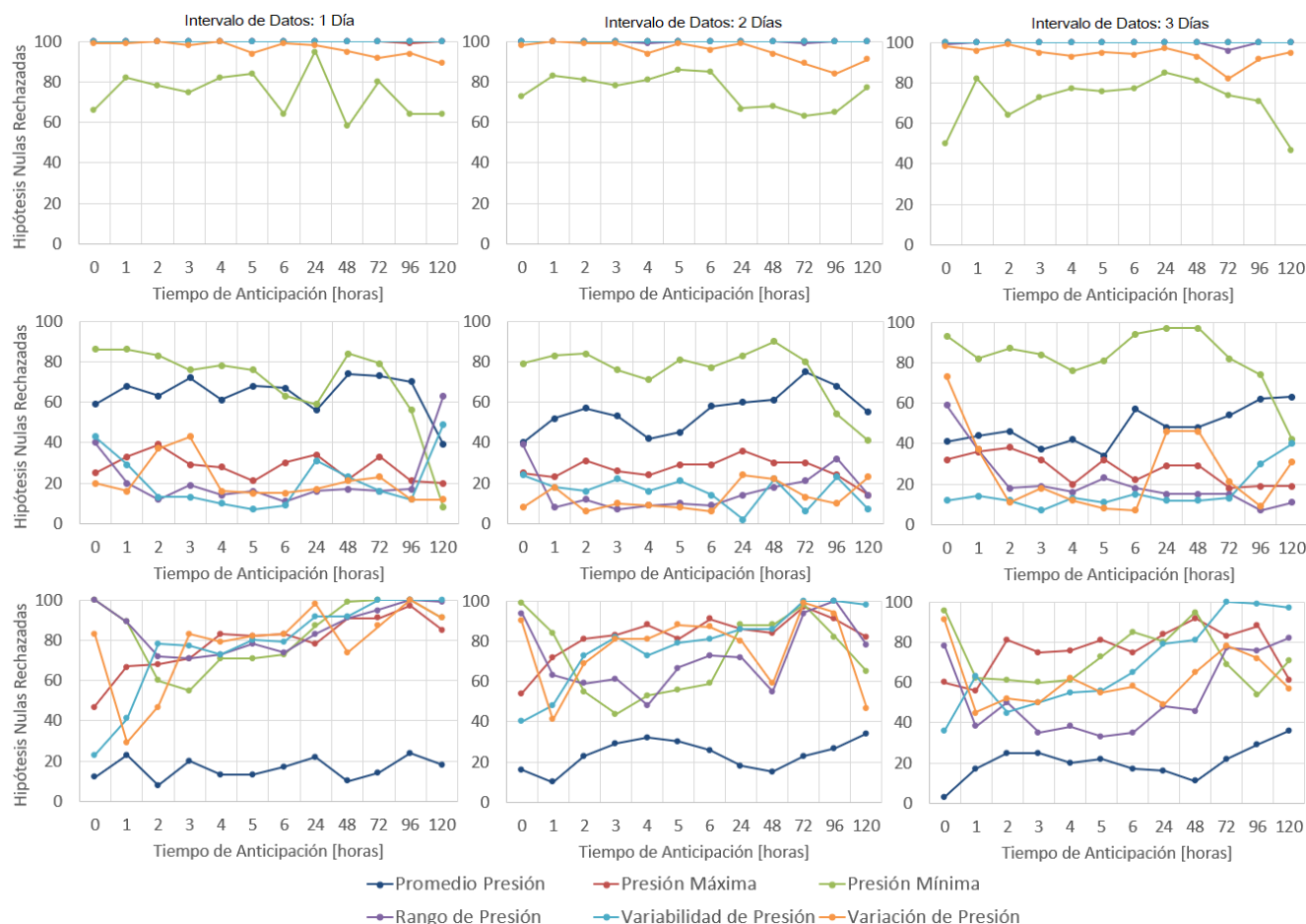


Figura 50: Resultados del Test de Bondad de Kolmogorov-Smirnov para distintos Tiempos de Anticipación e Intervalos de Datos. 1ra fila: sector 0506, 2da fila: sector 0507, 3ra fila: sector 0707. 1ra columna: Intervalo de Datos de 1 Día, 2da columna: Intervalo de Datos de 2 Días, 3ra columna: Intervalo de Datos de 3 Días. Fuente: Elaboración Propia

En su mayoría, cada sector de presión analizado tiene un comportamiento único, por ende se nota una diferencia en los resultados mostrados en las figuras 49 y 50. Respecto al sector de presión 0102, no hay ninguna combinación de tiempo de anticipación e intervalo de datos que rechacen más de 60 FDAs aleatorias¹⁸, por lo tanto se puede afirmar a priori que ningún indicador de presión tiene relación con las roturas de dicho sector. Como se puede ver en la figura 62 (Anexo), la serie de presión filtrada tiene un cambio abrupto de valores de presión, por lo mismo las FDAs abarcan un espectro de valores más amplio. Esto podría generar que la diferencia vertical entre FDAs sea más grande, generando un gran número de FDAs rechazadas por el test, pero también hay que tener en cuenta la cantidad de datos con los que se confeccionan las FDAs, ya que el valor estadístico del test aumenta a medida que disminuyen los datos con los que se confeccionan las FDAs analizadas, por lo tanto mientras menor sea la cantidad de datos con las que se confeccionan las FDAs, mayor será el valor estadístico del test que se tenga que superar para rechazar la hipótesis nula. Esto quiere decir que en los sectores de presión con pocas roturas seleccionadas, los valores de estas tienen que ser muy diferentes a los cotidianos para que se rechace una gran cantidad de FDAs aleatorias. Por lo tanto en el sector de presión 0102, a pesar

¹⁸Martínez-Codina (2015) afirma que 60 FDAs rechazadas por el test es un número consistente para afirmar que esa combinación de tiempo de anticipación e intervalo de datos guarda relación con las roturas del sector.

del gran espectro de valores de presión con los que se confeccionan las FDAs, los valores de los indicadores de las roturas no representan un comportamiento notoriamente distinto al comportamiento cotidiano del sector.

En el sector de presión 0103 ocurre lo contrario a lo ocurrido en el sector de presión 0102, esto ya que varios indicadores presentan más de 60 hipótesis rechazadas en varias combinaciones de tiempo de anticipación e intervalo de datos, sobre todo cuando se calculan los indicadores con los valores de presión instantáneos desde las 0 horas hasta las 6 horas previas al corte de suministro. Además este sector sólo cuenta con 18 roturas para validar el modelo, por lo que el valor estadístico del test aumenta su valor respecto del sector de presión 0102, por lo que esta gran cantidad de hipótesis rechazadas significa que la presión momentos previos a las roturas presenta un comportamiento anómalo; esto ocurre para todos los indicadores salvo el promedio de presión. Respecto al intervalo de datos, no se ve mayor diferencia entre los 3 escenarios propuestos, en todos los indicadores disminuyen la cantidad de hipótesis rechazadas a medida que aumenta el tiempo de anticipación.

En este sector destaca el rango de presión y la variabilidad de presión, los cuales tienen relación con la dispersión de los datos, es decir hubo un aumento en el espectro de valores de presión instantánea, esto se ve en la figura 52, donde se ve que la FDA asociada a las roturas está “a la derecha” del total de FDAs aleatorias, lo que indica que los valores registrados de las roturas son superiores en magnitud a los valores de las FDAs de comportamiento normal. Aún así, es necesario analizar los distintos intervalos de datos ya que la variabilidad de presión decae en cantidad de hipótesis rechazadas cuando se consideran 3 días de intervalo de datos, esto quiere decir que la gran dispersión de datos no transcurre en un período sostenido en el tiempo. En este sector también destaca la presión máxima y la presión mínima, pero este último es un indicador muy sensible, dado que si hay una rotura que no se informó instantáneamente, la FDA asociada a las roturas tendrá una gran diferencia vertical sobre las demás FDAs, por lo tanto este indicador es fiable cuando la presión no es 0 [m.c.a.] o cuando el tiempo de anticipación a las roturas es mayor a 6 horas. En la figura 51 se muestra el registro de presión cuando ocurre una rotura, donde se ve esta baja de presión en dos momentos, los cuales representan 2 roturas respectivamente. Por último, la presión máxima no tiene este problema de fiabilidad del dato y aún así registra valores altos momentos previos a las roturas. Estos 4 indicadores se muestran en la figura 52, para tiempos de anticipación e intervalo de datos que maximizan las hipótesis rechazadas.

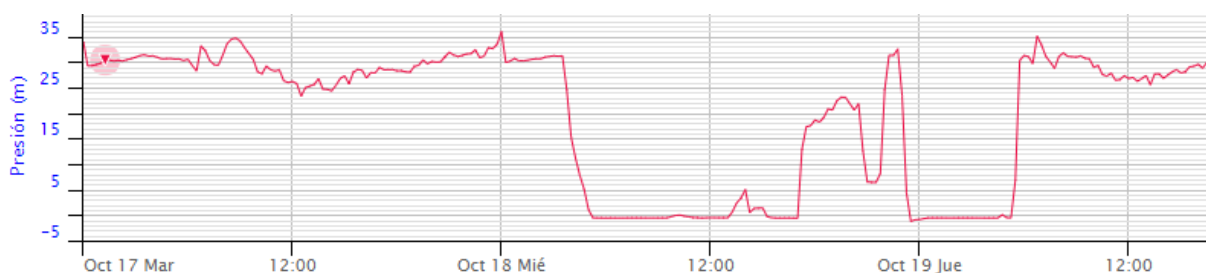


Figura 51: Representación del comportamiento de la presión cuando ocurre una rotura de tubería. Fuente: Software i2o, Aguas de Antofagasta S.A.

En el sector 0104 los indicadores de presión tienen un comportamiento similar al mostrado en el sector 0103, donde los indicadores rechazan más de 60 hipótesis nulas cuando el tiempo de anticipación es máximo 6 horas previas a las roturas. Los indicadores que destacan son el rango de presión, la variación de presión, la presión máxima y la presión mínima, para los 3 intervalos de datos propuestos. El hecho de que sólo se presenten una gran cantidad de hipótesis rechazadas horas antes del corte de suministro informado, se puede atribuir a hechos aislados en el comportamiento del sector, por ende, posiblemente las roturas ocurrieron en

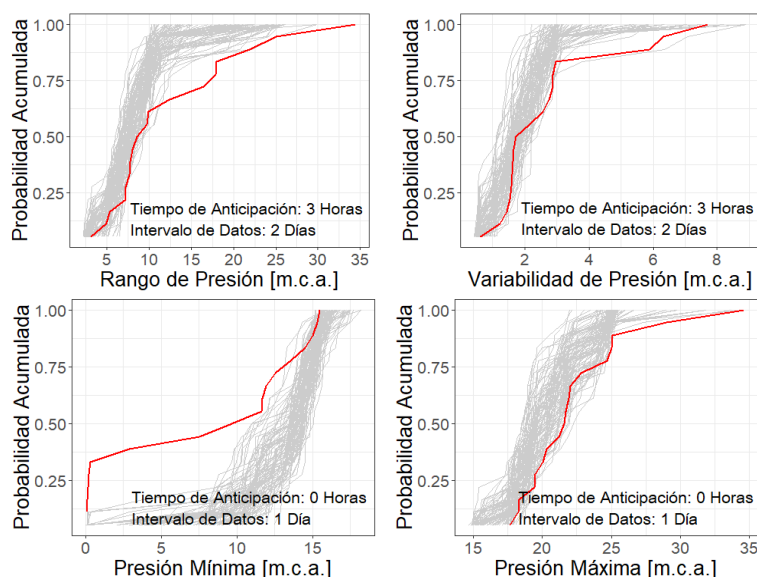


Figura 52: Comparación de la Función de Distribución Acumulada asociada a las roturas con 100 Funciones de Distribución Acumulada asociadas al comportamiento genérico, del sector de presión 0103 para distintos indicadores. Arriba de izquierda a derecha: Rango de Presión y Variabilidad de Presión; abajo de izquierda a derecha: Presión Mínima y Presión Máxima. Fuente: Elaboración Propia

tuberías que presentaban notorio deterioro, y que no fue resultado producto de la variación de presión en un gran abánico de valores y sostenido en el tiempo. Este análisis se sustenta por el hecho de que la variación de presión presenta gran cantidad de hipótesis rechazadas y no la variabilidad de presión, el cual indica qué tan agrupados están los datos. Además como la presión mínima no tiene más hipótesis rechazadas que la presión máxima, se puede suponer que no hay gran cantidad de roturas que se informaron mucho tiempo después de que se presentaron las roturas en la red.

Respecto al sector 0108, este tiene 32 roturas seleccionadas para este análisis, por ende según los autores citados en la sección 6.2 del Tratamiento de Datos, este sector tiene datos que permite efectuar un análisis estadísticamente consistente. Como se ve en la figura 65 (Anexo) donde se representa la serie de presión (filtrada) de este sector, hay variaciones de consignas de presión, pero estas no son tan abruptas como la que se menciona anteriormente del sector 0102, por ende los valores son relativamente homogéneos, es por esto que el promedio de presión no es un buen indicador en este sector, y así lo demuestra la cantidad de hipótesis rechazadas por este indicador. Los resultados respecto a la variación, variabilidad, rango de presión y presión mínima son prácticamente los mismos que en los sectores anteriores, pero sólo para tiempos de anticipación menores a 6 horas, lo que se puede atribuir a los valores de presión que son 0 [m.c.a], los que desgraciadamente no tienen una causa clara, ya que este valor puede suceder por el desfase entre la rotura y el corte de suministro informado o por fenómenos de presión como el transiente, donde la primera opción es la más probable¹⁹. Aún así, existe un alza en la cantidad de hipótesis rechazadas de la presión mínima cuando el tiempo de anticipación a las roturas es de 5 días para todos los intervalos de datos. Según Morrison (2004), el tiempo de concienciación de una rotura (esto es el tiempo que transcurre entre que ocurre una rotura

¹⁹Cuando la rotura y el corte de suministro se hacen con mucho tiempo de desfase, la comparación de la FDA asociada a las roturas con las 100 FDAs aleatorias tiene un comportamiento como el mostrado en la figura 52 para tiempos de anticipación menores o igual a 6 horas.

hasta que la compañía a cargo se da cuenta de este suceso) para un caudal alto ($0,4[m^3/h]$) es de 3 días, por lo tanto, para saber si efectivamente ocurrieron anomalías en la presión 5 días antes del registro de las roturas, se debe saber el tiempo que transcurre entre estas, dado que si bien una rotura puede generar otra en lugares cercanos, esto debería ocurrir en un tiempo prudente; por ende, en el caso en que el tiempo entre roturas es de 5 días y el tiempo de anticipación es 120 horas (5 días), los datos de presión se podrían estar solapando, esto significa que ciertos valores de los indicadores fueron calculados con datos de presión instantánea que no tienen relación con dicha falla, sino que con una rotura registrada días previos. El tiempo entre roturas de cada sector se presenta en la tabla 8, donde se puede ver que en el sector 0108 hay roturas que ocurren 3 días desde que ocurre otra, pero también se puede ver que esto también sucede en 3 roturas para los 5, 6 y 8 días²⁰, por lo tanto estas estarían tomando valores de roturas que probablemente no tengan relación, ocasionando una FDA asociada a las roturas que aumenta la diferencia vertical con las 100 FDAs aleatorias, como ocurre en la figura 52.

Tabla 8: Cantidad de Tiempo que pasa entre Roturas por Sector de Presión

Tiempo entre roturas	0102	0103	0104	0108	0306	0506	0507	0707
< 12horas	0	1	1	2	1	3	0	4
1 día	2	1	0	2	1	1	1	3
2 días	1	1	0	1	1	0	2	3
3 días	1	0	0	1	0	0	1	0
4 días	1	0	0	0	1	1	0	0
5 días	0	0	0	1	0	2	0	0
6 días	0	0	0	2	1	2	1	3
7 días	0	0	1	0	0	1	2	3
8 días	0	0	1	1	0	0	0	4
> 8 días	17	15	17	22	15	17	17	29

Respecto a los sectores 0306 y 0506, ambos tienen un registro de presión que cuenta con cambio de consignas muy distintas en sus valores, lo que hace que los valores con los que se trabaje sean heterogéneos. Como se menciona anteriormente, esto genera que muchas FDAs aleatorias tengan una gran diferencia vertical con la FDA asociada a las roturas, por ende es más probable que muchas FDAs rechacen el test de bondad, sobre todo el sector 0306 que sólo cuenta con 20 roturas seleccionadas. Este último sector mencionado cuenta con un registro robusto de presión con 2 consignas de presión muy distintas entre sí (figura 66, Anexo), y las roturas ocurrieron en su mayoría en una consigna de presión, lo que dificulta el análisis dado que esto hace que la FDA asociada a las roturas tenga una forma vertical muy definida, como se ve en la figura 53; como el test mide la diferencia vertical, si las FDAs tienen esta forma es más sencillo rechazar la hipótesis nula. Esto sucede en los indicadores promedio de presión y variabilidad de presión, donde se ve que estos indicadores sólo concentran valores muy acotados y las FDAs aleatorias no; la presión máxima, que es un indicador que sólo registra un dato, también cuenta con una FDA vertical que dificulta el análisis.

Por otro lado, el sector 0506 también tiene varias consignas de presión en su serie, pero las roturas se reparten equitativamente a lo largo de esta serie, por lo tanto hay una representación consistente de cada consigna de presión en las FDAs. En la figura 50 se ve que todos los indicadores presentan más de 60 hipótesis rechazadas

²⁰Para el caso donde se calculan los indicadores con un intervalo de datos de 3 días, una rotura registrada 8 días antes puede incidir cuando el tiempo de anticipación es de 5 días, dado que para el cálculo del indicador se toman los valores de 3 días antes desde el tiempo de anticipación.

en todos los intervalos de datos y en casi todos los tiempos de anticipación. Como hay varias roturas que ocurrieron días después de otras fallas, para validar esta gran cantidad de hipótesis sólo es fiable lo ocurrido entre las 0 horas y las 6 horas previas a las roturas, donde no hay un solape de roturas que no tienen relación alguna. En la figura 54 se puede apreciar que la presión mínima no registra una concentración de valores cercanos a los 0 [m.c.a.] (a diferencia de todos los sectores descritos anteriormente), es más, la FDA asociada a las roturas se encuentra a la derecha de todas las FDAs aleatorias, lo que también ocurre en el indicador presión máxima, promedio de presión y rango de presión, por lo tanto en este sector las roturas ocurrieron por un aumento de la presión de manera consistente. Esto se muestra con detalle en la figura 54.

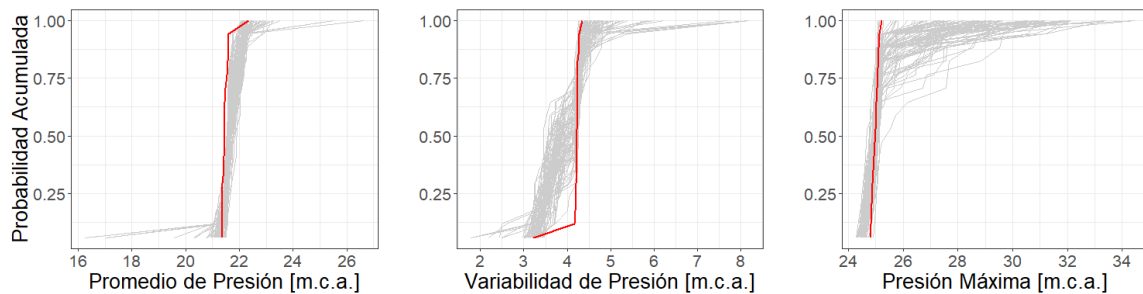


Figura 53: Comparación de la Función de Distribución Acumulada asociada a las roturas con 100 Funciones de Distribución Acumulada asociadas al comportamiento genérico, del sector de presión 0306 para un tiempo de anticipación de 6 horas e intervalo de datos de 1 día. De izquierda a derecha: Promedio de Presión, Variabilidad de Presión y Presión Máxima. Fuente: Elaboración Propia

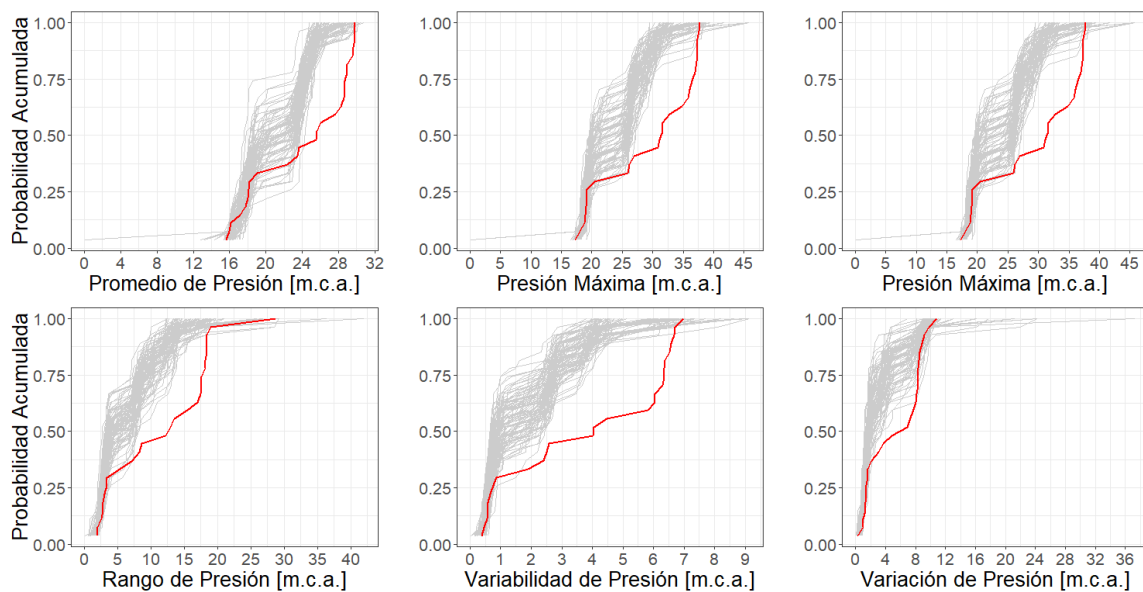


Figura 54: Comparación de la Función de Distribución Acumulada asociada a las roturas con 100 Funciones de Distribución Acumulada asociadas al comportamiento genérico, del sector de presión 0506 para un tiempo de anticipación de 6 horas e intervalo de datos de 1 día. Arriba de izquierda a derecha: Promedio de Presión, Presión Máxima y Presión Máxima; abajo de izquierda a derecha: Rango de Presión, Variabilidad de Presión y Variación de Presión. Fuente: Elaboración Propia

El sector de presión 0507 tiene dos indicadores que rechazan más de 60 hipótesis en casi todos los tiempos de anticipación. Uno de ellos es la presión mínima, que podría atribuirse al solape de roturas, pero aún así se ve en la figura 55 que la FDA asociada a las roturas se encuentra a la izquierda del total de FDAs aleatorias en todos los valores de presión, por ende las roturas que no están solapadas por otra rotura anterior igual presentaron valores más bajos que los valores bajos cotidianos. El otro indicador que presenta más de 60 hipótesis rechazadas es el promedio de presión, indicador que es más difícil de presentar un comportamiento diferente al cotidiano, ya que un valor de presión mínima muy ínfimo no hace que el valor de promedio se desenmarque notoriamente del comportamiento cotidiano de manera que rechace el test de bondad. En la figura 55 se presentan los dos indicadores mencionados para distintos tiempos de anticipación y además se incluye la presión máxima, que al igual que los indicadores anteriores, la FDA asociada a las roturas también se encuentra a la izquierda de la mayoría de las FDAs aleatorias, lo que confirma el hecho de que los valores de presión disminuyen su rango de valores horas (e incluso días) antes de las roturas.

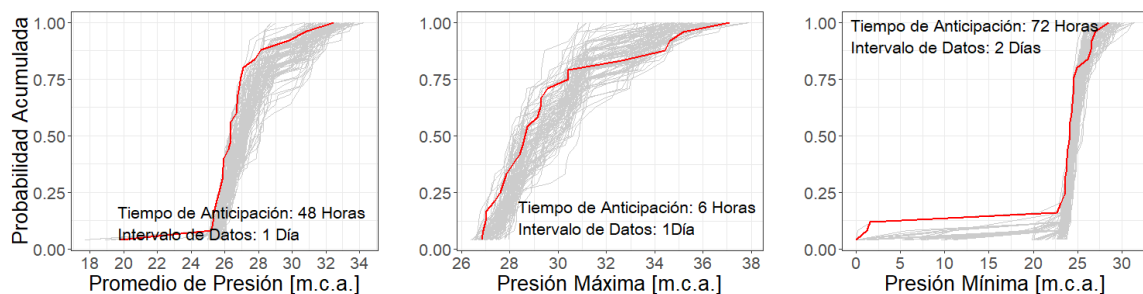


Figura 55: Comparación de la Función de Distribución Acumulada asociada a las roturas con 100 Funciones de Distribución Acumulada asociadas al comportamiento genérico, del sector de presión 0306 para distintos tiempos de anticipación e intervalos de datos. De izquierda a derecha: Promedio de Presión, Presión Máxima y Presión Mínima. Fuente: Elaboración Propia

Por último, el sector 0707 es el que tiene más roturas seleccionadas para realizar el análisis estadístico de los indicadores de presión, con 49 roturas, lo que genera el menor valor estadístico a superar para que una FDA aleatoria rechace el test de bondad. En la figura 50 se puede apreciar que el promedio de presión es el indicador que menos hipótesis rechaza, (nunca supera las 40 hipótesis rechazadas), esto se atribuye a los valores de presión de la serie utilizada (figura 69, Anexo), la cual tiene consignas de valores acotados en sus extremos por presiones parecidas, por ende la confección de la mayorías de las FDAs aleatorias no tienen una diferencia vertical con la FDA asociada a las roturas mayor al valor estadístico. Los demás indicadores tienen un comportamiento similar al sector 0507, donde la FDA asociada a las roturas de la presión máxima presenta valores más bajos que las FDAs aleatorias. Por otro lado, la presión mínima, al igual que en la mayoría de los demás sectores de presión, presenta un alto rechazo del test de bondad debido a la gran cantidad de valores cercanos a 0 [m.c.a.], pero además debido al solape de roturas que ocasiona un gran rechazo de hipótesis para tiempos de anticipación mayores a 3 días; aun así la presión mínima de las roturas que no registran valores cercanos a 0 [m.c.a.] tienen un comportamiento normal al cotidiano, por ende la gran cantidad de hipótesis rechazadas se da más por los valores bajos de presión, que son ocasionados probablemente por el desfase entre la hora de la rotura y la hora en que la empresa efectivamente se percata de esto y realiza el corte de suministro. Por lo tanto, al igual que en el sector 0507, este sector presenta un decrecimiento de los valores de presión horas y días antes del registro de las roturas. En la figura 56 se presenta la comparación de FDAs aleatorias con la FDA asociada a las roturas de los indicadores mencionados, además se presenta los resultados del rango de presión, que sirve para afirmar el hecho de que el espectro de valores de presión

disminuye momentos previos al registro de roturas.

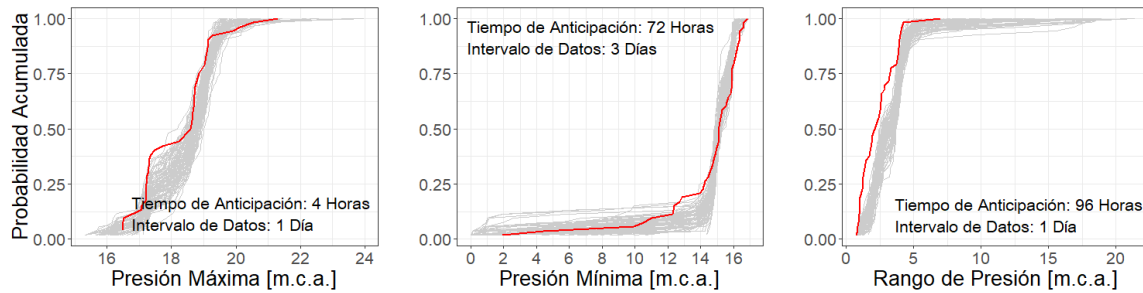


Figura 56: Comparación de la Función de Distribución Acumulada asociada a las roturas con 100 Funciones de Distribución Acumulada asociadas al comportamiento genérico, del sector de presión 0707 para distintos tiempos de anticipación e intervalos de datos. De izquierda a derecha: Presión Máxima, Presión Mínima y Rango de Presión. Fuente: Elaboración Propia

Para confirmar el método empleado, el cual ayuda a determinar cuál indicador guarda mayor relación con las roturas evidenciando qué tanto se diferencia la FDA asociada a las roturas con las FDAs aleatorias momentos previos a las fallas, se presenta la figura 57 que contiene la comparación de la FDA asociada a las roturas con 100 FDAs aleatorias para la presión máxima con un tiempo de anticipación de 96 horas con un intervalo de datos de 1 día, donde se rechazan 97 hipótesis, con la comparación de una de las FDAs aleatorias con 100 FDAs aleatorias del mismo indicador para el mismo tiempo de anticipación e intervalo de datos, donde se ve que no hay mayor diferencia ya que sólo se rechazan 22 hipótesis.

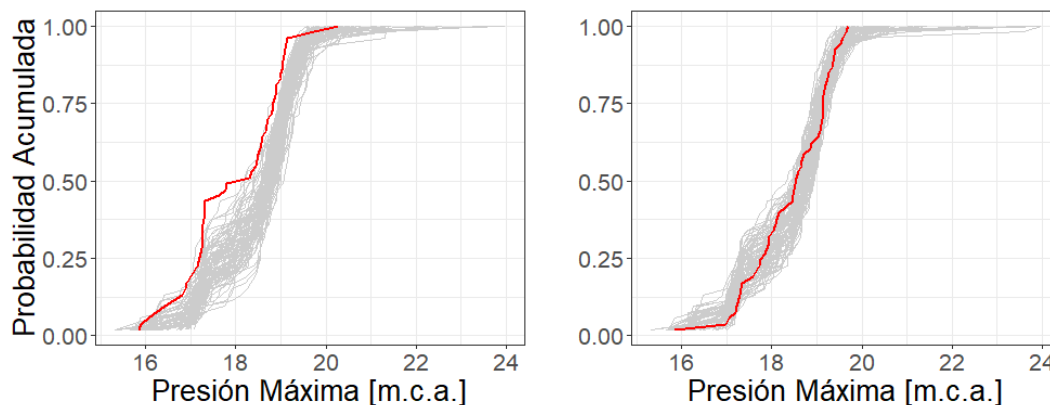


Figura 57: Izquierda: Comparación de la Función de Distribución Acumulada asociada a las roturas con 100 Funciones de Distribución Acumulada asociadas al comportamiento genérico, del sector de presión 0707 para un tiempo de anticipación de 96 horas e intervalo de datos de 1 día. Derecha: Comparación de una Función de Distribución Acumulada aleatoria con 100 Funciones de Distribución Acumulada asociado al comportamiento genérico, para el mismo sector indicador, tiempo de anticipación e intervalo de datos. Fuente: Elaboración Propia

7.2.2. Conclusiones

Los resultados obtenidos por sector de presión son variados, y esto puede ser porque cada sector de presión tiene notorias diferencias en su composición, como la diferencia de cota, el tipo de tuberías e incluso la cantidad de clientes. A pesar de esto, se pueden obtener conclusiones en común respecto al comportamiento de la presión de servicio momentos previos a las roturas de las tuberías. En el caso del promedio de presión, este indicador por lo general no guarda mucha relación con las roturas dado que los intervalos de datos son múltiplos de 24 horas, y la serie trabajada registra valores cada 15 minutos, por ende el caso en que la rotura efectivamente sea ocasionada por un vaivén de presión, este tendría que ser muy abrupto y prolongado en el tiempo para que el promedio pueda cambiar su valor y desenmarcarse del comportamiento normal del sector.

Respecto a la presión mínima y la variación de presión, estos indicadores no tienen una tendencia clara producto del desfase que existe entre la rotura de la tubería y el corte de suministro no programado, ya que este último es el que se informa a la SISS mediante el informe PR013001; por lo tanto en la mayoría de los casos en donde el test de bondad rechaza varias FDAs aleatorias, esto ocurre debido a que la FDA asociada a las roturas contiene valores muy pequeños de presión, los que no se pueden atribuir a fenómenos propios de la red, sino a que las tuberías que ya presentan rotura, generando que el flujo esté a presión atmosférica.

Los predictores que proporcionan mayor fiabilidad respecto a su comportamiento, y que además proporcionan información de cómo se podría gestionar la presión de mejor manera momentos previos a las roturas son la presión máxima, rango de presión y variabilidad de presión. Estos indicadores están relacionados entre sí, dado que si ocurre una rotura producto de un aumento de la presión de servicio, esto aumenta el valor del rango de presión que ocurre previo a la rotura, y además esto será detectado por la variabilidad de presión, pero esto último ocurrirá con mayor énfasis si este aumento es prolongado en el tiempo; pasa lo mismo si es que hay una disminución de los valores de presión como se ve en los sectores 0507 y 0707. Debido a lo detallado recién, es que la cantidad de hipótesis rechazadas, mostradas en las figuras 49 y 50, en estos indicadores es similar. Respecto a la superposición de roturas, esto generalmente pasa dado que probablemente la causa de una rotura sea compartida con tuberías muy cercanas a esta, o también ya que al generarse una rotura se pueden generar cambios muy repentinos de comportamiento en lugares cercanos a la rotura, generando roturas en sectores o subsectores aledaños (Martinez-Codina, 2016). Por otro lado, respecto al desfase entre la hora de la rotura y la hora informada, estos indicadores también se ven afectados por esta condición, especialmente el rango de presión dada su definición, la variabilidad también pero en menor medida, ya que depende de una mayor cantidad de valores. Por lo tanto se debe verificar bien la comparación entre la FDA asociada a las roturas con las 100 FDAs aleatorias, dado que puede ser que se rechacen varias de estas, pero esto se deba a la superposición de roturas o al desfase de hora entre la rotura y el corte de suministro. Por lo tanto, la presión máxima es el indicador más fiable en sus valores y a su vez es uno de los que mayor cantidad de hipótesis rechaza, y en menor medida lo siguen el rango y la variabilidad de presión.

Respecto a la variación de consignas que registran varias de las series de presión utilizadas, esto genera problemas sólo en el caso que se tenga una supremacía de representación de una consigna sobre otra para valores muy distintos entre sí, como pasa en el sector 0306, donde el resultado del test de bondad no permite entregar información clara. En estos casos es preferible separar la serie y realizar el modelo por consigna de presión, ya que se analizan datos más homogéneos y sería más sencillo analizar una anomalía en los indicadores de presión. Por último, respecto del punto de control de presión utilizado, este representa datos relativamente más homogéneos que el punto de control de presión estática máxima²¹, por lo tanto para este

²¹ Esto ocurre porque el PCP de presión dinámica se dispone en un lugar dentro del sector de presión que presenta bajos valores de presión, y esto ocurre en cotas altas de la ciudad; por lo tanto, como la ciudad está en pendiente en prácticamente toda su longitud,

análisis es preferible usar este PCP si es que se cuentan con pocos datos, dado que el valor estadístico es más grande a medida que se utilizan menos datos, esto genera que si es que ocurre una anomalía, esta debe ser de gran magnitud para rechazar la hipótesis nula.

En la figura 58 se presenta la comparación entre la FDA asociada a las roturas con las 100 FDAs aleatorias del indicador que rechaza la mayor cantidad de hipótesis para cada sector de presión, para un tiempo de anticipación e intervalo de datos específico. Con este indicador, tiempo de anticipación e intervalo de datos se obtiene la relación de probabilidad que se describe en la siguiente sección del presente informe.

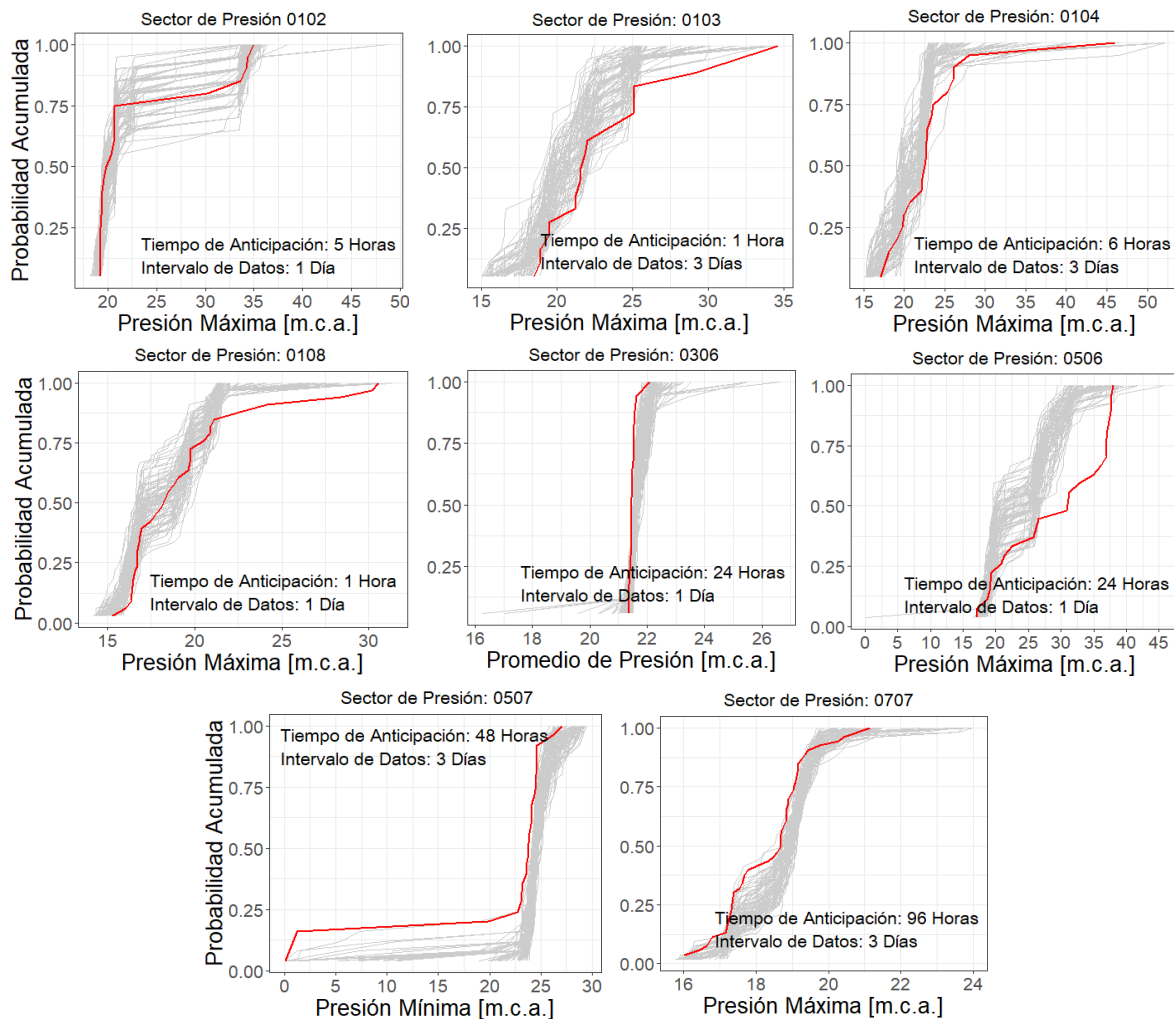


Figura 58: Comparación de la Función de Distribución Acumulada asociada a las roturas con 100 Funciones de Distribución Acumulada asociadas al comportamiento genérico, para el caso que se generan mayor cantidad de hipótesis rechazadas, de cada sector de presión. Fuente: Elaboración Propia

las cotas bajas están aguas abajo del comienzo del sector de presión, que es donde se emplazan los PCPs de presión estática, que registran valores más hetergéneos producto de la topografía y la cantidad de clientes que existen entre el inicio del sector y el final.

7.2.3. Relación de Probabilidad

La relación de probabilidad es la relación que hay entre la FDA asociada a las roturas con la FDA genérica, en donde esta determina si la probabilidad de falla aumenta o disminuye dependiendo del rango de valores de cada sector de presión. Las FDAs confeccionadas en la sección anterior son empíricas, dado que en ese caso sólo se intenta determinar la diferencia vertical entre funciones. Para este caso, esta FDA empírica, sobre todo la asociada a las roturas, no permite obtener la probabilidad para valores arbitrarios, sólo permite obtener la probabilidad para los valores con los que se confeccionó la FDA empírica, por lo tanto se debe encontrar una FDA paramétrica que se ajuste de la mejor manera a las FDAs de la relación de probabilidad. Para el caso de la FDA genérica, esto no presenta mayor problema ya que la cantidad de valores con los que se confecciona esta función es muy grande, el problema lo presenta la FDA asociada a las roturas por su pequeña cantidad de datos, por ende, se utiliza el criterio de selección de BIC que determina que función de ajuste lo hace de mejor manera.

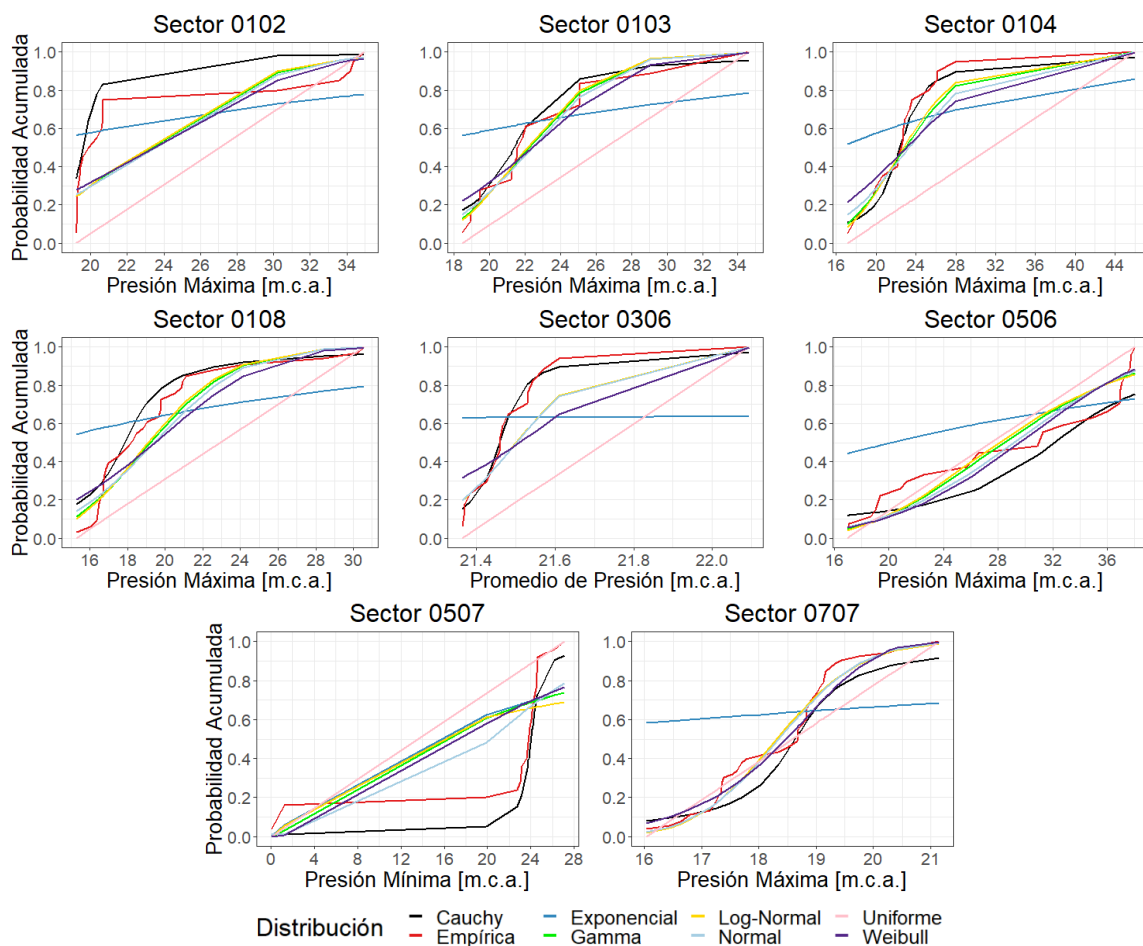


Figura 59: Ajuste de distintas funciones paramétricas para las FDA asociada a las roturas de cada sector de presión seleccionadas para el cálculo de la Relación de Probabilidad. Fuente: Elaboración Propia

En la figura 59 se muestra una serie de funciones de distribución acumulada que tratan de ajustarse a la FDA empírica seleccionada, para cada sector de presión²². En estos diagramas se puede observar que en la

²²Las funciones de distribución paramétricas fueron obtenidas mediante el software RStudio, específicamente del paquete de información *stats*.

mayoría de los sectores las FDAs paramétricas se ajustan de buena manera a la FDA empírica, salvo en los sectores 0102 y 0507, ya que existe un gran rango de valores donde la diferencia vertical es muy grande. De todos modos, la FDA paramétrica que tiene el menor valor de coeficiente BIC se somete al test de bondad de Kolmogorov-Smirnov para saber si estas funciones provienen de una familia de datos similar. En la tabla 9 se muestra la FDA paramétrica que tiene el menor valor de BIC para cada sector de presión, y además muestra si esta acepta o no el test de bondad, donde se puede ver que a pesar de la diferencia vertical que hay en algunas de estas funciones, todas las FDAs paramétricas son aceptadas por el test de Kolmogorov-Smirnov.²³

Tabla 9: Información de las Funciones de Distribución Acumuladas Paramétricas seleccionadas para cada Sector de Presión

Sector de Presión	Tipo de FDA	FDA paramétrica	BIC	Acepta Test K-S
0102	Roturas	Cauchy	111,1	SI
	Genérica	Cauchy	7038,9	SI
0103	Roturas	Log-Normal	109,4	SI
	Genérica	Log-Normal	5906,9	SI
0104	Roturas	Cauchy	121,9	SI
	Genérica	Log-Normal	9279,1	SI
0108	Roturas	Log-Normal	180,5	SI
	Genérica	Log-Normal	5229,1	SI
0306	Roturas	Cauchy	-18,9	SI
	Genérica	Cauchy	749,8	SI
0506	Roturas	Uniforme	171,1	SI
	Genérica	Gamma	10166,3	SI
0507	Roturas	Cauchy	135,5	SI
	Genérica	Cauchy	5555,5	SI
0707	Roturas	Log-Normal	173,8	SI
	Genérica	Normal	5367,3	SI

En las figuras 60 y 61 se presentan las dos FDAs paramétricas que se presentan en la tabla 9 de cada sector de presión, que permiten obtener la relación de probabilidad. Como se puede apreciar en estas figuras, existe una relación de probabilidad constante entre valores arbitrarios de presión, la cual se obtiene con la siguiente expresión.

$$R.P. = \frac{F_{roturas}(Presión\ 2) - F_{roturas}(Presión\ 1)}{F_{genérica}(Presión\ 2) - F_{genérica}(Presión\ 1)}$$

En la expresión anterior, el valor de probabilidad de ocurrencia del valor de *Presión 2* es mayor a la probabilidad de ocurrencia del valor de *Presión 1*, los cuales no pueden ser muy cercanos en magnitud dado que esto podría generar un denominador muy pequeño, ocasionando una relación de probabilidad grande, lo que sería poco representativo. Por lo tanto, se eligen valores arbitrarios que permitan ilustrar de mejor manera que tanto

²³Los sectores 0102 y 0507 son los que presentan una diferencia vertical notoria entre las FDAs sometidas al test. El sector 0102 tiene una diferencia vertical, entre las funciones sometidas al test, de 0,24 y el valor estadístico es 0,29. Por otro lado, el sector 0507 tiene una diferencia vertical de 0,23 y un valor estadístico de 0,26, por ende, a pesar de la diferencia que presentan, el test no rechaza la hipótesis nula.

aumenta (o disminuye) la probabilidad de falla en los distintos sectores de presión.

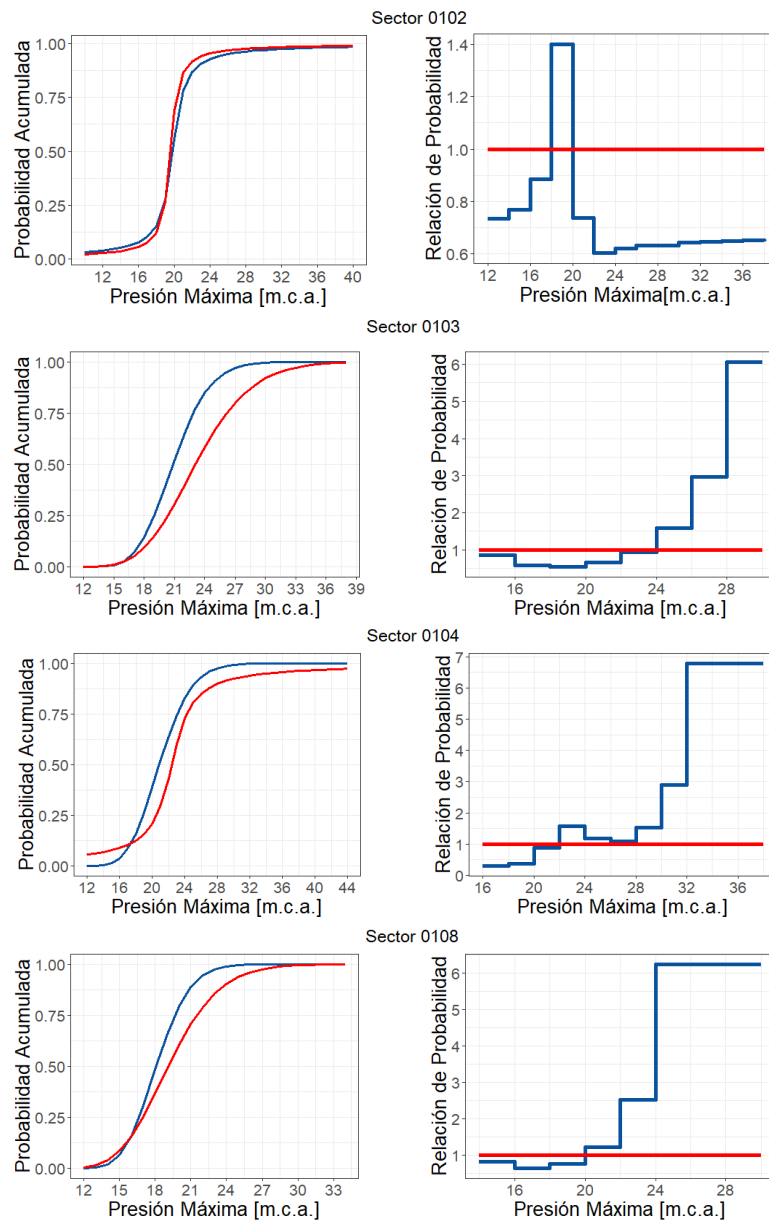


Figura 60: Izquierda: FDAs Paramétricas asociada a las roturas (rojo) y genérica (azul). Derecha: Resultados de la Relación de Probabilidad. Fuente: Elaboración Propia

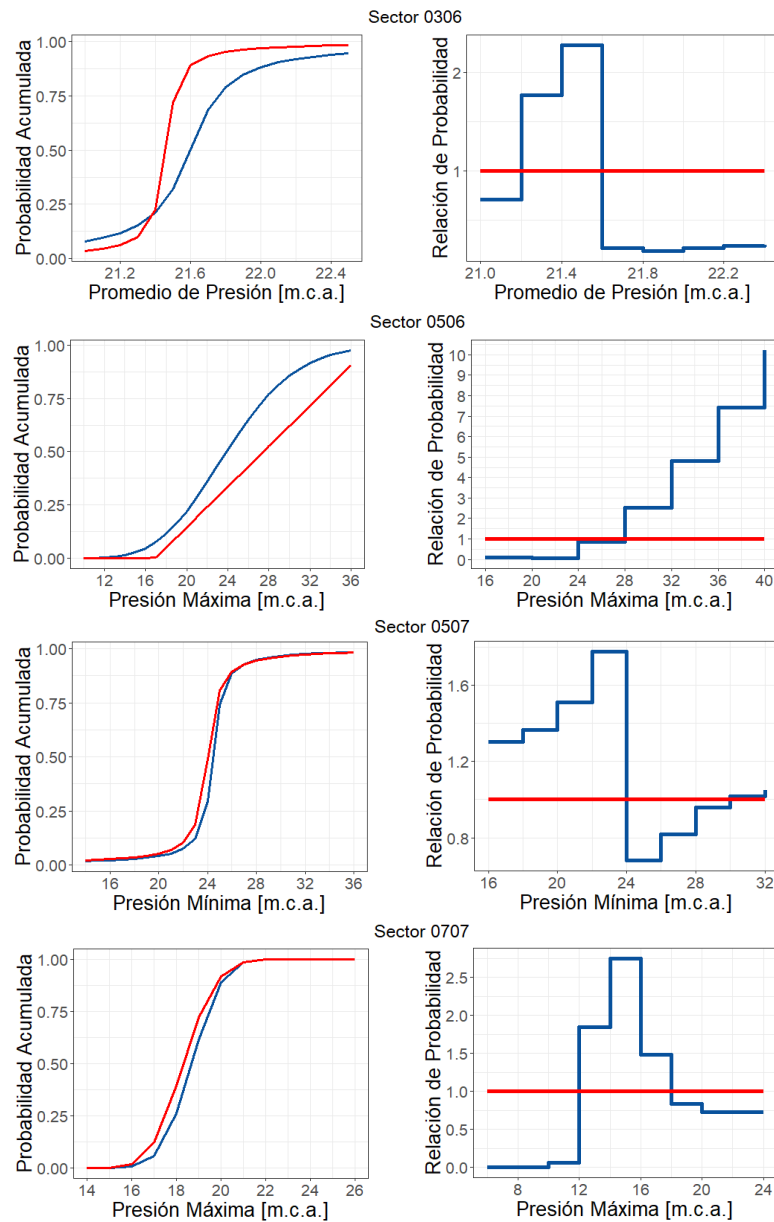


Figura 61: Izquierda: FDEs Paramétricas asociada a las roturas (rojo) y genérica (azul). Derecha: Resultados de la Relación de Probabilidad. Fuente: Elaboración Propia

Los resultados, obtenidos en las figuras anteriores, permiten validar lo descrito en la sección anterior: para los sectores de presión donde se tiene una clara tendencia de hipótesis rechazadas, con una serie de presión relativamente homogénea, en donde cada consigna de presión tiene una representación significativa de roturas, se puede encontrar una relación de probabilidad clara para el mejor indicador de presión obtenido con la metodología presentada; estos sectores de presión son el 0103, 0104, 0108, 0506 y 0707. Anteriormente se menciona que los mejores predictores son la presión máxima, rango de presión y variabilidad de presión. El término en común que tienen estos indicadores es el aumento de presión, ya sea repentino o prolongado, por lo tanto, para los sectores de presión donde este predictor rechaza la mayor cantidad de hipótesis, se escoge este indicador para obtener la relación de probabilidad, además para la empresa es más sencillo

verificar el valor máximo de presión y así identificar si un sector presenta un potencial riesgo de presentar rotura en alguno de sus elementos. En los sectores mencionados, la relación de presión que aumenta la probabilidad de falla ocurre para valores grandes e inusuales de la serie de presión, lo que quiere decir que efectivamente el comportamiento de la presión momentos previos a las roturas es significativamente distinto al comportamiento cotidiano. Además, en las figuras 60 y 61 en el rango de valores mostrados en el eje de las abscisas efectivamente ocurrió por lo menos una de las roturas, por ende no existe una extrapolación de la FDA paramétrica para valores grandes (extremos) de presión, lo que quiere decir que los valores grandes de relación de probabilidad son ocasionados en gran medida por las roturas, y no por el ajuste de las funciones de distribución²⁴. El sector de presión 0707, el que además es el que mayor registro de roturas tiene, no presenta un aumento de presión para valores grandes, pero esto ocurre debido a que se encontró que en la mayoría de las roturas los valores de presión decrecieron en su magnitud, incluyendo el peak diario de presión (presión máxima), por lo tanto, en este sector el rango de presión tiene un rol igual de importante que la presión máxima; esto quiere decir que si la presión máxima se encuentra entre los 12 y 18 [m.c.a] el rango de presión también se verá reducido, y dado el registro de presión de las roturas existe una alta probabilidad de que en un futuro cercano un elemento presente rotura.

Respecto al sector 0506, este no presenta una tendencia clara en el análisis de la sección anterior, y esto se ve reflejado en la relación de probabilidad. Los valores de presión máxima que presentan un notorio aumento en la probabilidad de falla, son para valores que se presentan a diario en algunas de las consignas de presión del punto de control de presión escogido, esto puede ocurrir por dos razones: la presión máxima que ocasionó la rotura se encuentra en una consigna específica que presenta valores más bajos de presión, lo que quiere decir que la presión máxima de rotura si es inusual en ese contexto²⁵; o lo otro es suponer que este indicador no tiene relación con las roturas, pero en este último escenario no se debería presentar una gran relación para los valores extremos que se muestran en la figura 61. Para escoger uno de los dos escenarios, es necesario recurrir a la FDA asociada a las roturas y compararla con las 100 FDAs aleatorias (figura 58), aquí se parecía que en todos los valores de presión máxima la FDA asociada a las roturas se encuentra a la derecha de todas las FDAs aleatorias, por ende, se puede concluir que la presión máxima, momentos previos antes de las roturas, presentó un alza independiente de la consigna de presión presentada. Por otro lado, el sector de presión 0507 tiene a la presión mínima como mejor predictor, pero este no presenta mucha diferencia entre la FDA asociada con las FDAs aleatorias y esto se ve reflejado en la figura 61, donde se puede ver que la FDA paramétrica asociada a las roturas no tiene mucha diferencia con la FDA paramétrica genérica, por lo mismo es que la relación de probabilidad tiene el mayor aumento de la probabilidad de falla para valores de presión mínima que son relativamente cotidianos en la serie de presión utilizada. Aún así, existen valores más bajos de presión mínima (inusuales) que presentan valores altos de relación de probabilidad. Además esta pequeña diferencia que hay entre las FDAs paramétricas se atribuye precisamente al ajuste de la FDA asociada a las roturas, como se aprecia en la figura 59, donde la FDA paramétrica no se ajusta de buena manera a la FDA empírica, generando valores bajos de probabilidad de ocurrencia para valores bajos de presión mínima, que son los valores inusuales que se registraron momentos previos al registro de varias roturas en este sector.

Respecto a los sectores de presión 0102 y 0306, estos no presentan resultados claros que permitan asociar las roturas ocurridas a los valores de presión presentados momentos previos a las roturas. Por un lado, se presenta la presión máxima como el mejor predictor en el sector 0102, pero la relación de probabilidad sólo

²⁴En el caso en que los valores del eje de las abscisas fueran más grandes en magnitud, en donde ninguna rotura haya registrado tales valores de presión, la relación de probabilidad aumentaría significativamente debido a la extrapolación y al ajuste de la FDA paramétrica.

²⁵Esto quiere decir que un aumento del valor de presión máxima puede ser anómalo dentro de una consigna específica de valores bajos, este registro anómalo puede ser usual dentro de otra consigna de presión.

permite un aumento en la probabilidad para valores de presión que no tienen relación con las roturas, esto se puede atribuir dado que básicamente sólo existen dos grandes consignas de presión en la serie de presión utilizada (figura 62, Anexo), que son muy distintas entre sí, además en la figura 49 se puede ver que todos los indicadores no presentan más de 60 hipótesis rechazadas en ningún tiempo de anticipación e intervalo de datos, lo que es un indicio de que la presión no guarda relación con las roturas. Por último, el sector de presión 0306 también presenta una serie de presión con dos grandes consignas que no se asemejan entre sí, esto permite que las FDAs tengan un gran espectro de valores que ocasionan que la diferencia vertical entre estas sea más grande que el valor estadístico del test de bondad, esto ocasiona que incluso el promedio de presión presente varias hipótesis rechazadas. En la figura 60 se aprecia que el aumento de probabilidad de falla sucede para valores usuales de la consigna que mayor representación tiene en la serie, por lo tanto se puede concluir que no existe una anomalía en los valores de presión momentos antes de las roturas, especialmente dado que el promedio es buen predictor sólo si es que la irregularidad es prolongada en el tiempo.

8. Conclusiones Generales

Respecto a la primera parte de la metodología, en donde se analizan varios predictores y con estos se calcula la probabilidad de falla de una selección de elementos, se puede concluir que los predictores estudiados presentan un comportamiento similar a lo demostrado por los autores citados en el presente informe.

En relación al criterio de acotar el dominio de la probabilidad de falla por zona de abastecimiento, esto resulta favorable para encontrar lugares en las matrices con gran probabilidad de falla sin contar con un amplio registro de roturas, esto ya que el predictor *Edad* no cuenta con una relación directa propia, sino que en ella se encuentran características implícitas que guardan relación con el proceso de instalación más que con la edad de la tubería, por ende, la *Edad* como predictor tiene mayor influencia cuando se acota el dominio, ya que en caso contrario se podría estar atribuyendo características de roturas que están bastante alejadas geográficamente que no guardan relación con otros elementos de la red que están en otras zonas de abastecimiento. Por otro lado, el criterio de sólo seleccionar ciertos sectores de presión para incluir en el modelo, presenta buenos resultados, dado que efectivamente en el período de validación las roturas se concentraron en dichos sectores, salvo en la Zona N°5, donde sectores con gran cantidad de roturas quedaron fuera del análisis, y evidentemente también presentan problemas de roturas de manera frecuente, por lo tanto, este criterio es válido sólo si es que la diferencia de cantidad de roturas entre sectores es muy grande, en caso contrario es mejor incluir los sectores de presión que también presentan gran cantidad de roturas que no cumplen con el criterio N°2, propuesto en la sección 5.1.1. Además, en este modelo no se extrapola geográficamente los resultados de la probabilidad de falla, pero en las zonas donde las roturas presentan una tendencia en sus características, y además los elementos que quedan fuera del modelo tienen características similares a las tuberías incluidas, esto sí se podría hacer ya que las roturas que se registraron en sectores que no se incluyeron en el modelo presentan características similares con la tendencia de las roturas incluidas en el análisis, como es el caso de la Zona N°5 y N°7. De lo anterior se puede concluir que el modelo confirma lo señalado por los autores citados en la sección 3.2.2, ya que esta metodología al presentar varias variables podría abarcar mayor dominio geográfico, sin embargo se obtienen resultados más favorables cuando los valores de los atributos estudiados son relativamente homogéneos.

El análisis de la presión también tiene un carácter estadístico/probabilístico, en donde gracias al teorema de Bayes se puede saber qué rangos de valores de ciertos indicadores aumentan o disminuyen la presión. Debido a esto, ocurre algo similar que lo descrito en el párrafo anterior: los resultados son más favorables y fáciles

de interpretar cuando los datos con los que se trabajan son homogéneos, esto sucede tanto para el análisis estadístico para encontrar el mejor predictor (indicador de presión) que guarda relación las roturas de los sectores de presión, como para el análisis de la relación de probabilidad²⁶. Esto ocurre porque al incorporar varias consignas de presión en la serie del PCP escogido, los valores anómalos que podrían tener relación con ciertas roturas podrían confundirse dentro de la gran cantidad de datos, ya que valores inusuales dentro de una consigna, no lo son en otra. Por lo tanto, en el caso en donde la serie de presión filtrada sea heterogénea, es preferible separar esta y llevar a cabo la metodología por consigna de presión. Si bien en un sector de presión con valores heterogéneos, con ayuda de la comparación entre la FDA asociada a las roturas con las FDAs aleatorias, se pudo encontrar los rangos de valores que aumentan la probabilidad de falla, esto también se puede encontrar si es que se aplica la metodología por consigna de presión; lo único que limita esto es la cantidad de roturas que ocurren por consigna, dado que una cantidad muy baja de roturas podría significar que el análisis no es estadísticamente consistente.

En resumen, si es que se quiere realizar un recambio de tuberías existen muchos aspectos a considerar (como el económico), con esta metodología se puede dilucidar de mejor manera qué elementos de las matrices están más propensos a presentar una rotura producto de factores estáticos y dinámicos. Por otro lado, también proporciona información de cómo se comporta la presión momentos previos a que se produzcan roturas, lo cual permite que esta se pueda gestionar de mejor manera para anticiparse a posibles eventos de discontinuidad de agua potable en cada sector de presión analizado. Finalmente, esta metodología se caracteriza por entregar información a partir de pocos datos acerca del historial de las roturas, por ende el modelo se puede robustecer fácilmente aplicando la metodología a otros posibles predictores como la velocidad del agua, cantidad de roturas aledañas (o cantidad de reparaciones con abrazaderas en matrices cercanas), entre otras.

²⁶Martinez-Codina (2015) separa la serie de presión por consigna de presión, y a cada una le aplica la metodología, obteniendo resultados favorables.

9. Bibliografía

Referencias

- Andreou, S. (1986). "Predictive models for pipe break failures and their implications on maintenance planning strategies for deteriorating water distribution systems". En: *PhD thesis, MIT, Cambridge, MA*.
- Boxell, J.B. y col. (2007). "Estimation of burst rates in water distribution mains". En: *Water Management* 160, págs. 73-82.
- Castañeda, L. (2015). "Modelo de Gestión para el mantenimiento de tuberías en redes de distribución de agua potable". En: *Universidad de Manizales*.
- Folkman, S. (2018). "Water Main Break Rates In the USA and Canada: A Comprehensive Study". En: *Mechanical and Aerospace Engineering Faculty Publications* Paper 174.
- Gómez Martínez, P. (2017). "Análisis de variables explicativas en modelos de predicción de roturas en redes de tuberías". En: *Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*.
- Goulter, I.C. y A. Kazemi (1988). "Spatial and temporal groupings of water main pipe breakage in Winnipeg". En: *Canadian Journal of Civil Engineering* 15, No. 1, págs. 91-97.
- Hosseini, R. e I. Bernadette R. and Stoianov (2015). "Pipe failure analysis and impact of dynamic hydraulic conditions in water supply networks". En: *Procedia Engineering* 119, págs. 253-262.
- Katz, R (2013). *Extremes in Changing Climate*. Water Science y Technology Library.
- Kleiner, Y. y B. Rajani (2001). "Comprehensive review of Structural deterioration of water mains: Statistical models". En: *Urban Water* 3.(3), págs. 131-150.
- (2002). "Forecasting Variations and Trends in Water-Main Breaks". En: *Journal of Infrastructure Systems, ASCE* 8(4), págs. 122-131.
- Kulkarni R. B. and Golabi, K. y J. Chuang (1986). "Analytical techniques for selection of repair-or-replace options for cast iron gas piping systems - Phase I". En: *Chicago IL: Research Institute* PB87-11411.
- Larsson, L.-G. (1990). "Driftstörningar på vattenledningsnät i elva svenska kommuner år". En: *Svenska vatten-och avloppsverksförbundet* Report Jun, 7 pages.
- Martínez-Codina, A. (2015). "Tesis: Metodología de análisis estadístico de roturas en redes de distribución de agua". En: *Universidad Politécnica de Madrid, España*.
- Martínez-Codina, A., L. Cueto-Felgueroso y col. (2015). "Use of Pressure Management to Reduce the Probability of Pipe Breaks: A Bayesian Approach". En: *Journal of Water Resources Planning and Management*.
- Martínez-Codina, A., P. Gómez y G. de la Fuente (2018). "Relación entre las causas y los modos de fallo de tuberías en la red de distribución de Canal de Isabel II en Madrid". En: *Ribagua* 5.1, págs. 16-28.
- Martínez-Codina, A., C. Saavedra y col. (2016). "Influencia de la presión en roturas de tubería de redes de distribución". En: *Tecnología y Ciencias del Agua* 7.(4), págs. 25-39.
- Morris, R. E. (1967). "Principal causes and remedies of water main breaks". En: *JSTOR: Journal (American Water Works Association)* 59, págs. 782-798.
- Morrison, J. (2004). "Managing leakage by District Metered Areas: a practical approach". En: *Water* 21, págs. 44-46.
- O'Day, D. K. (1987). "Water Distribution Record Keeping and Planning Approaches". En: *Journal of New England Water Works Association* 101(2), págs. 145-168.
- Petersson, A. (1978). "Driftstörningar på vattenledningsnät". En: *Svenska vatten-och avloppsverksförbundet, VAV. VAVs arbetsgrupp TR 22*. Report 1/78, 22 pages.
- Rajani, B. e Y. Kleiner (2001). "Comprehensive review of Structural deterioration of water mains: physically based models". En: *Urban Water* 3.(3), págs. 151-164.

- Reinius, L-G. (1981). "Comparative Statistics on Operational Malfunctions in Water and Sewer Systems". En: *Svenska vatten-och avloppsverksföreningen, VAV. VAVs arbetsgrupp TR 22*. Report 1/81, págs. 1-29.
- Rostum, J. (2000). "Thesis: Statistical Modelling of Pipe Failures in Water Networks". En: *Norwegian University of Science and Technology NTNU*.
- Shamir, U. y C. D. D. Howard (1979). "An analytic approach to scheduling pipe replacement". En: *Journal of AWWA* 71(5), págs. 248-258.
- Stowhas, L. (2017). *Fundamentos de Hidrología Aplicada*. Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento Obras Civiles.
- Superintendencia de Servicios Sanitarios, SISS (2021). "Informe de Gestión del Sector Sanitario 2020". En:
- Thornton, J. y A. Lambert (2007). "Pressure management extends infrastructure life and reduces unnecessary energy costs". En: *Water Loss. Conference Proceedings. Bucarest*.
- Wang, Y. (2006). "Tesis: Deterioration And Condition Rating Analysis Of Water Mains". En: *Concordia University, Montreal, Quebec, Canada*.
- Watson, T., C.D. Christian y col. (2004). "Bayesian-based pipe failure model". En: *Journal of Hydroinformatics* 6.(4), págs. 259-264.
- Watson, T. y A. Mason (2006). "A hierarchical bayesian model for the maintenance of water pipe networks". En: *7th International Conference on Hydroinformatics, Nice, France*.
- Wengström, T. R. (1993). "Drinking water pipe breakage records: a tool for evaluating pipe and system reliability". En: *Chalmers tekniska högskola*.
- Xu, Q. y col. (2011). "Pipe break prediction based on evolutionary data-driven methods with brief recorded data". En: *Reliability Engineering and System Safety* 96, págs. 942-948.
- Zenaida, M. (2012). *Métodos de Análisis de Datos*. Universidad de la Rioja.

10. Anexo

10.1. Puntos de Control de Presión

A continuación se presenta la relación de variables que permite obtener cada punto de control de presión:

Punto de control de presión estática máxima corresponde al punto de la red cuya presión sobrepasa el límite superior de la NCh 691 Of.2015 (70 mca).

$$P_{pto} = C_{fp} - C_{pto} + P_c$$

Donde:

P_{pto} : Presión en el punto,

C_{fp} : Cota de la fuente de presión, medido sobre el nivel medio del mar,

C_{pto} : cota del punto, medido sobre el nivel del mar,

P_c : Presión de consigna de reductora, si aplica.

Punto de control de presión estática mínima corresponde al punto de la red cuya presión es menor que el límite inferior de la NCh 691 Of.2015 (15 mca).

$$P_{pto} = C_{fp} - C_{pto} + P_c$$

Donde:

P_{pto} : Presión en el punto,

C_{fp} : Cota de la fuente de presión, medido sobre el nivel medio del mar,

C_{pto} : cota del punto, medido sobre el nivel del mar,

P_c : Presión de consigna de reductora, si aplica.

Punto de control de presión dinámica crítica corresponde al punto de la red cuya presión es menor que el límite inferior de la NCh 691 Of.2015 (5 mca, calculado con las disposiciones de la sección 8.1.3 de la misma norma).

$$P_{pto} = C_{fp} - C_{pto} + P_c + \Delta h_5$$

Donde:

P_{pto} : Presión en el punto,

C_{fp} : Cota de la fuente de presión, medido sobre el nivel medio del mar,

C_{pto} : cota del punto, medido sobre el nivel del mar,

P_c : Presión de consigna de reductora, si aplica. Δh_5 : Pérdida de carga de 5 mca cada 1000 m de distancia respecto de la fuente de presión.

10.2. PR0013001: Continuidad del Servicio de Agua Potable

La fiscalización de la SISS se realiza por las órdenes de trabajo realizadas por la concesionaria y por el seguimiento de reclamos. Los requerimientos que tiene este informe no son todos obligatorios de informar. El registro de datos de este informe debe contener la siguiente información:

- a) **Código Comuna** (Obligatorio): Código de comuna donde ocurrió el evento, éste debe obedecer a la misma nomenclatura establecida por la SISS.
- b) **Código de Localidad** (Obligatorio): Se deben informar todas las localidades vigentes en la SISS para la empresa. Esto quiere decir que se informa a nivel de empresa, donde se abarcan todos los eventos de todas las localidades.
- c) **Informa** (Obligatorio): Corresponde a un código de un número donde se detalla si informa discontinuidad en el mes y localidad informada.

0: No informa discontinuidades; 1: Informa discontinuidades

La empresa debe informar todas las localidades bajo su responsabilidad, independientemente si existieron eventos de discontinuidad en ellas en el mes informado. En el caso de no existir eventos de discontinuidad para la localidad informada, se deberá enviar este campo con el número 0, y el resto de los campos vacíos, excepto el campo Código de Localidad, que debe venir con su correspondiente información.

- d) **Orden de Trabajo** (Obligatorio): Este campo obedece al número correlativo de la orden de trabajo que llevó a cabo la reparación de la discontinuidad.

La orden de trabajo debe incluir en detalle el trabajo efectuado (día, hora, lugar, motivo, número de clientes afectados, etc.) de manera tal que cualquier persona con conocimiento técnico sea capaz de interpretar y concluir sobre el hecho a través de este.

La empresa debe generar, consolidar y almacenar físicamente por un período de 2 años, un catastro de las órdenes de trabajo que evidencian los eventos informados, el cual debe ser el mismo al informado a la SISS.

- e) **Lugar** (Obligatorio): En este campo se debe identificar el lugar donde se produce el corte. En él se debe especificar la dirección del evento lo más completo posible (calle, número y comuna). Como lugar de evento se entiende la dirección donde se realizaron los trabajos (o frente a qué dirección se realizaron). En el caso de discontinuidad del servicio por deficiencia en recintos de producción de agua potable o distribución (estanque de distribución y/o almacenamiento) se deberá informar la dirección y el nombre de estos recintos.
- f) **UTM Norte** (Obligatorio): Se debe informar las coordenadas UTM Norte en Datum WGS84 Huso 19 Sur del lugar donde se produjo la falla que originó la discontinuidad.
- g) **UTM Este** (Obligatorio): Se debe informar las coordenadas UTM Este en Datum WGS84 Huso 19 Sur de lugar donde se produjo la falla que originó la discontinuidad.
- h) **Código Cuartel** (Obligatorio): El informe considera en este apartado la norma NCh 691 Of 1998, la cual define cuartel como *“sector de la red de distribución en que puede suspenderse temporalmente el suministro de agua potable, sin afectar el suministro general”*. Para efectos de esta norma, se entiende como cuartel a todo sector que cumpla con esta definición, independientemente si corresponde a un pasaje o fracción importante de la red. Para tal efecto, la empresa deberá tener catastrado todos los

sectores de la red donde es posible cortar el suministro a un número definido de clientes sin afectar el suministro general, y con ello identificar los cuarteles que efectivamente componen la red.

Se debe informar el código del cuartel donde ocurrió el evento de discontinuidad, aceptándose sólo un código por registro. A modo de ejemplo, en el caso de una falla de matriz que afectó la continuidad del servicio en 4 cuarteles, cada uno de ellos debe informarse en forma separada, es decir, se deben enviar 4 registros para el mismo corte.

- i) **Fecha Inicio** (Obligatorio): Se debe informar todos los eventos de discontinuidad que se hayan iniciado en el mes informado, por lo cual en este campo sólo se reciben fechas correspondientes al período informado.
- j) **Hora Inicio** (Obligatorio): Se considera como hora de inicio la hora de cierre de válvulas, siempre y cuando no exista un reclamo previo por falta de agua, lo que deberá quedar debidamente registrado en los sistemas de atención de reclamos u documentos de respaldo que maneje la empresa. Esta información debe ser fiscalizable, es decir, debe quedar registro del requerimiento que originó la orden de trabajo.

En los casos de reclamos por el concepto de falta de agua, se deberá registrar como hora de inicio la hora de ingreso del primer reclamo.

- k) **Falla** (Obligatorio): La descripción de cada uno de los tipos de fallas posibles es:

1. **Corte programado:** Se refiere a que el origen de la suspensión fue ocasionado por necesidades de mantención preventiva, conexiones de nuevas instalaciones, entre otros. El usuario debe ser avisado previamente.
2. **Corte no programado:** Se refiere a suspensiones del servicio ocasionadas por fallas en la infraestructura, tales como roturas, obstrucciones, interrupciones de energía eléctrica, etc.
3. **Corte por Fuerza Mayor:** Se refiere a suspensiones del servicio ocasionadas por causas de fuerza mayor certificadas en cada caso por la SISS, como terremotos, crecidas de ríos. Es decir, se refiere a cortes ocasionados por causas de fuerza mayor que no se pueden predecir.
4. **Corte no programado por acciones de terceros:** Se refiere a suspensiones del servicio ocasionadas por fallas en la infraestructura cuya causa es la acción de un tercero, tales como daños producidos por trabajos de otra empresa, choque de vehículos, entre otros.

No se consideran como fallas de Acción de Terceros las producidas por contratistas de la empresa sanitaria. Tampoco entra en esta categoría las fallas por asentamientos y socavaciones producidas por fugas de aguas desde las redes de distribución de agua potable o recolección de aguas servidas debidos a fatiga de material, ingreso de raíces, o cualquier falla de responsabilidad de la empresa. Estas últimas causas de fallas entran en la categoría Corte no programado.

- l) **Clasificación Motivo** (Obligatorio): Corresponde a un código que entrega la descripción del motivo que generó la discontinuidad según la clasificación detalla en la Tabla 10.
- m) **Motivo** (No Obligatorio): Descripción genérica del motivo que generó el tipo de falla.

Tabla 10: Clasificación Motivo de Corte Informado. Fuente: Informe Indicadores Calidad de Servicio de Superintendencia de Servicios Sanitarios

Clasificación Motivo	Detalle Clasificación
1	Falla de matriz (Fatiga de material, rotura espontánea, rotura por raíces, etc.)
2	Obstrucción de la red
3	Desplazamiento de terreno
4	Uso de grifos
5	Bajo nivel de agua en estanques, Deficiencias de producción
6	Falla de equipos: Reductoras de presión, bombas de elevación, bombas de impulsión, sondaje.
7	Falla de válvulas
8	Falla en: Arranque, conexiones, uniones, pieza especial
9	Ampliación de redes o conexión
10	Cambio programado y/o instalación de infraestructura
11	Mantenimiento programada de infraestructura
12	Acción de terceros por trabajos de otras empresas
13	Acción de terceros por choque de vehículo contra infraestructura o paso de vehículo pesado
14	Acción de terceros-Otros
15	Falla de matriz sin suspensión de servicio

n) **Ubicación Falla** (Obligatorio): Describe la relación de la falla con el cuartel. Este campo debe ser completado según la clasificación detallada en la tabla 11.

Tabla 11: Ubicación Falla del Corte Informado. Fuente: Informe Indicadores Calidad de Servicio de Superintendencia de Servicios Sanitarios

Ubicación Falla	Detalle ubicación falla
1	Ocurrido en el mismo cuartel
2	Ocurrido en otro cuartel
3	Fuera del sistema de cuarteles

o) **Duración** (Obligatorio): Duración del evento de falla en la continuidad del servicio de agua potable medido en horas totales del servicio interrumpido.

p) **Fecha Término** (Obligatorio): Fecha de finalización de la suspensión del servicio y deberá corresponder a todos los eventos de discontinuidad que hayan finalizados en el mes informado.

q) **Hora Término** (Obligatorio): Hora en que se repuso el servicio de Agua Potable.

r) **Diámetro** (Obligatorio): Se informará el diámetro (en mm), de la cañería donde se produjo la falla. Si la falla se produce en más de una cañería, se informará la de mayor diámetro. Si el corte no es producto de una falla en cañerías, se informará el diámetro de la cañería de mayor tamaño afectado por el corte.

s) **Material** (No Obligatorio): Material de la tubería que falla y que ocasionó el corte de suministro. Este campo debe ser completado según la clasificación detallada en la tabla 12.

Tabla 12: Material tubería asociada al Corte Informado. Fuente: Informe Indicadores Calidad de Servicio de Superintendencia de Servicios Sanitarios

Código	Lista Materiales Global
0	Sin información
1	HDPE
2	PVC
3	Asbesto cemento
4	Acero negro
5	Acero revestido
6	Acero galvanizado
7	Fierro fundido
8	Tubería corrugada
9	Fibra de Vidrio
10	Hierro Dúctil

t) **Cantidad de Clientes** (Obligatorio): En este campo se debe informar el número de clientes total del cuartel informado en el campo “Código Cuartel”. El número de clientes por cuartel informado deberá ser concordante con la información vigente informada a la SISS a través del Protocolo PR0350001 Sectorización de Redes.

u) **Fecha Usuario** (No Obligatorio): La fecha de aviso al usuario siempre será obligatoria para las fallas tipo 1 Corte Programado. En los demás tipos de falla, de no existir aviso al usuario, este campo se deberá dejar en blanco.

10.3. Series de Presión de los Sectores de Presión Críticos

Dado lo señalado en la sección 6.2, los sectores de presión 0102, 0103, 0104, 0108, 0306, 0506, 0507 y 0707 son los únicos sectores de presión críticos que presentan una base de datos considerable para analizar estadísticamente. Se trabaja con los datos obtenidos del Punto de Control de Presión Dinámica Crítica, el cual registra los valores de presión cada 15 minutos. Las figuras siguientes muestran la serie completa de presión (filtrada según la sección 5.2.1) de los sectores de presión críticos analizados.

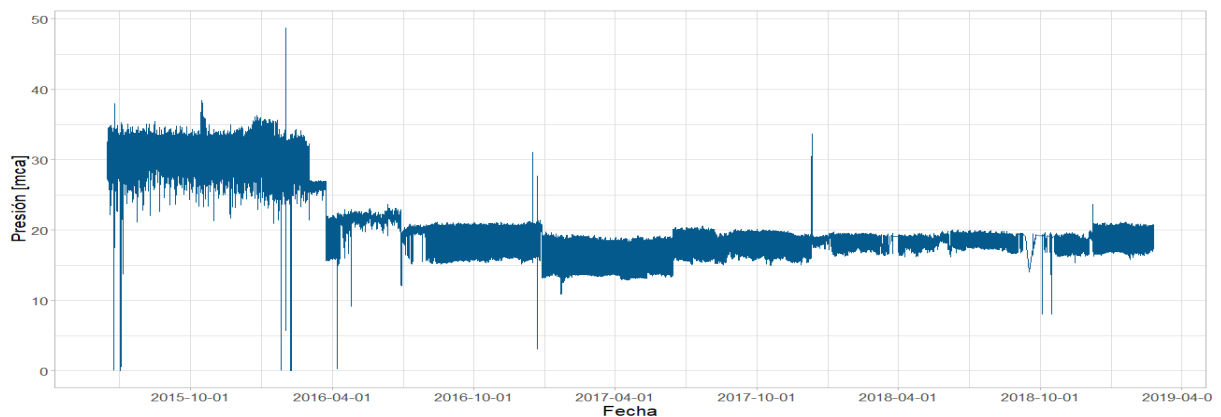


Figura 62: Serie de Presión utilizada para el sector 0102. Fuente: Elaboración Propia

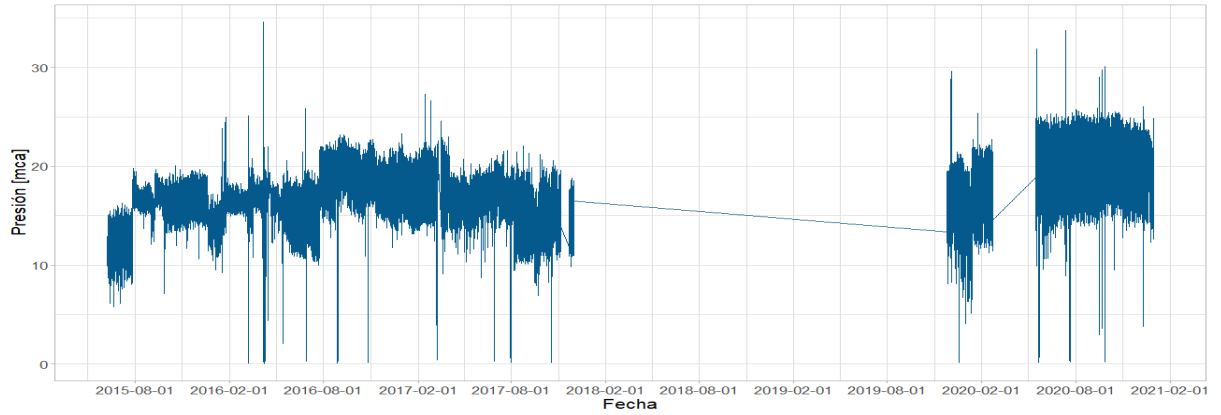


Figura 63: Serie de Presión utilizada para el sector 0103. Fuente: Elaboración Propia

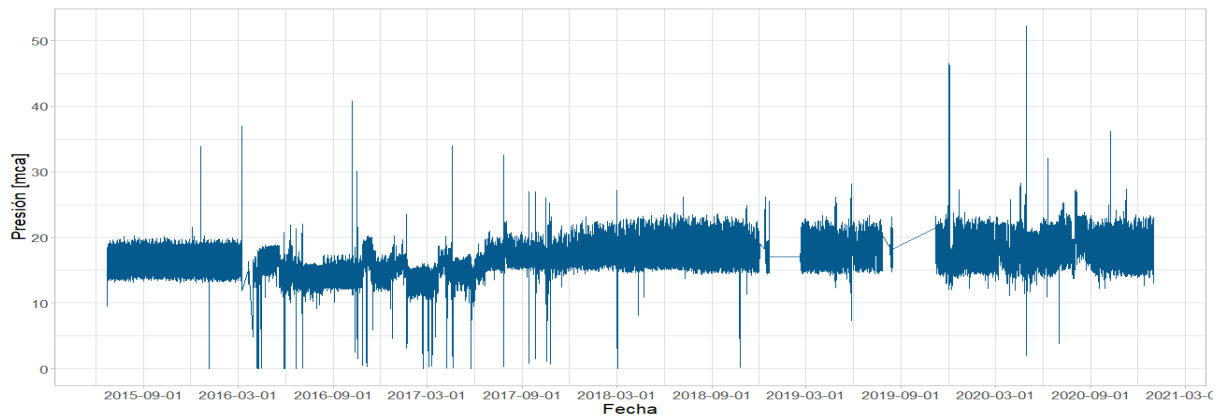


Figura 64: Serie de Presión utilizada para el sector 0104. Fuente: Elaboración Propia

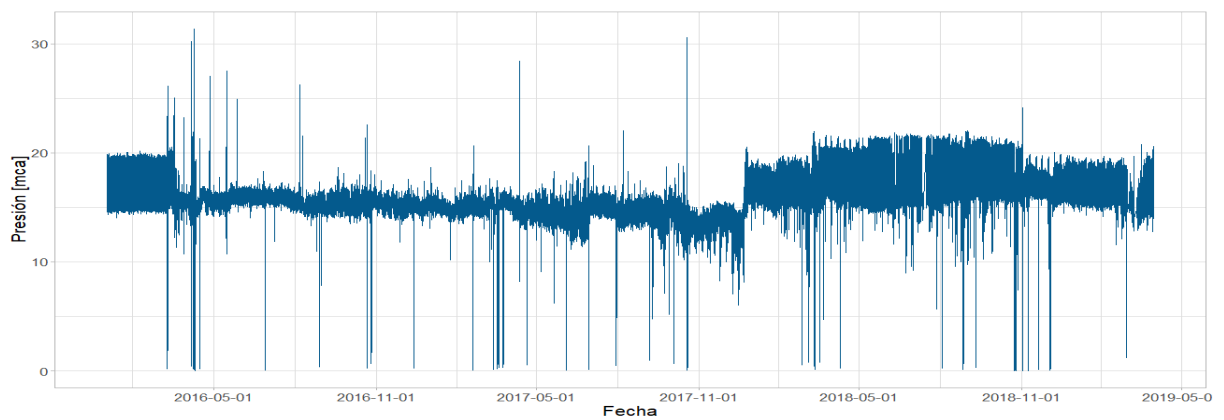


Figura 65: Serie de Presión utilizada para el sector 0108. Fuente: Elaboración Propia

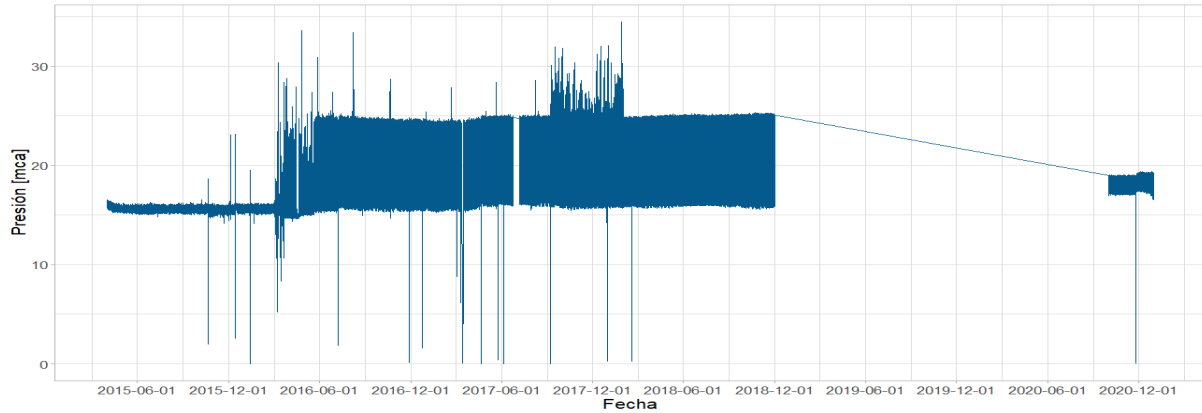


Figura 66: Serie de Presión utilizada para el sector 0306. Fuente: Elaboración Propia

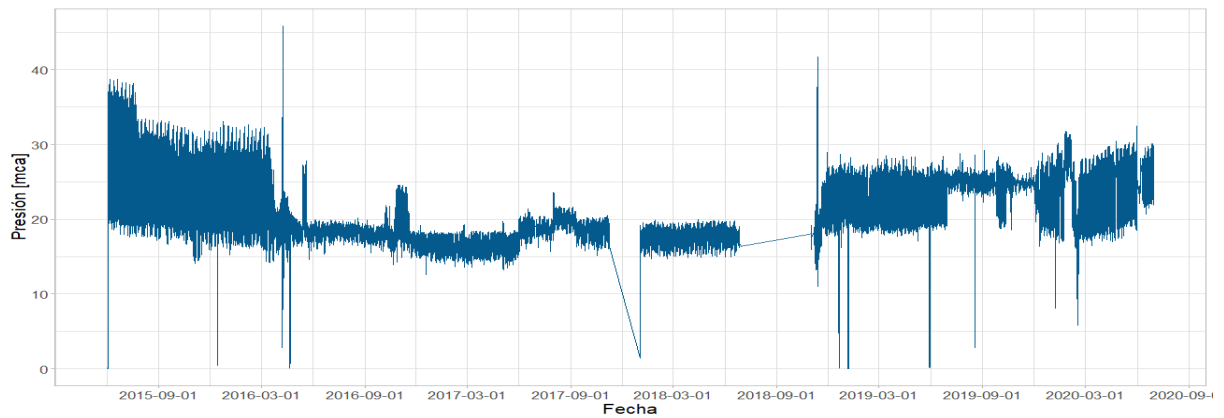


Figura 67: Serie de Presión utilizada para el sector 0506. Fuente: Elaboración Propia

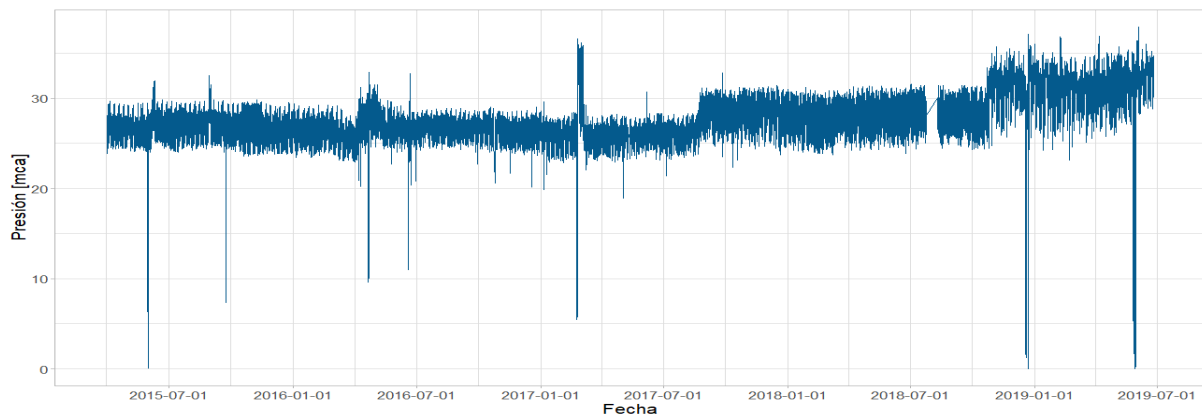


Figura 68: Serie de Presión utilizada para el sector 0507. Fuente: Elaboración Propia

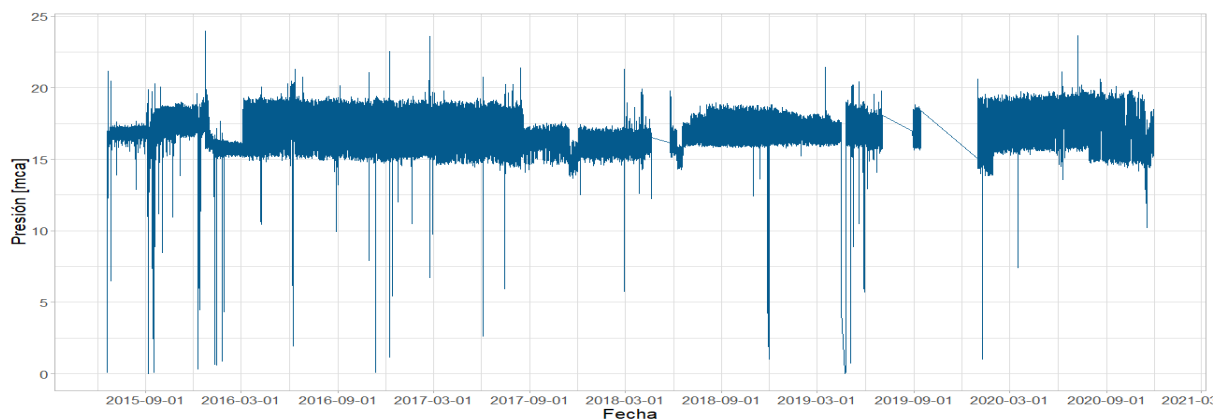


Figura 69: Serie de Presión utilizada para el sector 0707. Fuente: Elaboración Propia

10.4. Datos de Tuberías de Zonas Críticas

En las tablas siguientes se muestra la información que permite obtener la función de distribución acumulada para el caso asociado a las roturas y para el caso genérico (total de tuberías que estuvieron operativas en el período de estudio en los sectores críticos) de cada zona estudiada.

Tabla 13: Propiedades del Total de Tuberías que presentaron Roturas en los Sectores Críticos de la Zona 1 Antofagasta

Material	Cantidad	%	Diámetro	Cantidad	%	Edad	Cantidad	%
Fierro Fundido	0	0	[50-100]	84	48,84	[0-5]	4	2,33
Acero Negro	0	0	(100-150]	53	30,81	(5-10]	3	1,74
Hierro Dúctil	0	0	(150-200]	12	6,98	(10-15]	3	1,74
HDPE	4	2,33	(200-250]	22	12,79	(15-20]	18	10,47
Asbesto Cemento	78	45,35	(250-300]	0	0	(20-25]	36	20,93
PVC	90	52,33	(300-350]	1	0,58	(25-30]	26	15,12
			(350-400]	0	0	(30-35]	5	2,91
			(400-500]	0	0	(35-40]	7	4,07
			(500-600]	0	0	(40-45]	16	9,30
			(600-700]	0	0	(45-50]	49	28,49
						(50-55]	5	2,91
						(55-60]	0	0

Tabla 14: Propiedades del Total de Tuberías que presentaron Roturas en los Sectores Críticos de la Zona 3 Antofagasta

Material	Cantidad	%	Diámetro	Cantidad	%	Edad	Cantidad	%
Fierro Fundido	0	0	[50-100]	114	70,37	[0-5]	5	3,09
Acero Negro	2	1,23	(100-150]	43	26,54	(5-10]	2	1,23
Hierro Dúctil	0	0	(150-200]	0	0	(10-15]	4	2,47
HDPE	11	6,79	(200-250]	5	3,09	(15-20]	23	14,20
Asbesto Cemento	132	81,48	(250-300]	0	0	(20-25]	15	9,26
PVC	17	10,49	(300-350]	0	0	(25-30]	7	4,32
			(350-400]	0	0	(30-35]	5	3,09
			(400-500]	0	0	(35-40]	4	2,47
			(500-600]	0	0	(40-45]	31	19,14
			(600-700]	0	0	(45-50]	38	23,46
						(50-55]	9	5,56
						(55-60]	9	5,56
						(60-100]	10	6,17

Tabla 15: Propiedades del Total de Tuberías que presentaron Roturas en los Sectores Críticos de la Zona 5 Antofagasta

Material	Cantidad	%	Diámetro	Cantidad	%	Edad	Cantidad	%
Fierro Fundido	13	8,33	[50-100]	75	48,08	[0-5]	5	3,21
Acero Negro	0	0	(100-150]	49	31,41	(5-10]	9	5,77
Hierro Dúctil	0	0	(150-200]	16	10,26	(10-15]	6	3,85
HDPE	20	12,82	(200-250]	2	1,28	(15-20]	10	6,41
Asbesto Cemento	99	63,46	(250-300]	10	6,41	(20-25]	10	6,41
PVC	24	15,38	(300-350]	2	1,28	(25-30]	14	8,97
			(350-400]	2	1,28	(30-35]	16	10,26
			(400-500]	0	0	(35-40]	7	4,49
			(500-600]	0	0	(40-45]	9	5,77
			(600-700]	0	0	(45-50]	4	2,56
						(50-55]	15	9,62
						(55-60]	29	18,59
						(60-100]	22	14,10

Tabla 16: Propiedades del Total de Tuberías que presentaron Roturas en los Sectores Críticos de la Zona 7 Antofagasta

Material	Cantidad	%	Diámetro	Cantidad	%	Edad	Cantidad	%
Fierro Fundido	15	8,24	[50-100]	112	61,54	[0-5]	21	11,54
Acero Negro	0	0	(100-150]	52	28,57	(5-10]	6	3,30
Hierro Dúctil	0	0	(150-200]	15	8,24	(10-15]	3	1,65
HDPE	29	15,93	(200-250]	0	0	(15-20]	2	1,10
Asbesto Cemento	127	69,78	(250-300]	2	1,10	(20-25]	5	2,75
PVC	11	6,04	(300-350]	0	0	(25-30]	14	7,69
			(350-400]	1	0,55	(30-35]	15	8,24
			(400-500]	0	0	(35-40]	6	3,30
			(500-600]	0	0	(40-45]	12	6,59
			(600-700]	0	0	(45-50]	15	8,24
						(50-55]	39	21,43
						(55-60]	32	17,58
						(60-100]	12	6,59

Tabla 17: Propiedades del Total de Tuberías en los Sectores Críticos de la Zona 1 Antofagasta

Material	Cantidad	%	Diámetro	Cantidad	%	Edad	Cantidad	%
Fierro Fundido	1	0,04	[50-100]	991	43,83	[0-5]	40	1,77
Acero Negro	2	0,09	(100-150]	913	40,38	(5-10]	122	5,40
Hierro Dúctil	24	1,06	(150-200]	204	9,02	(10-15]	84	3,72
HDPE	200	8,85	(200-250]	119	5,26	(15-20]	78	3,45
Asbesto Cemento	618	27,33	(250-300]	0	0	(20-25]	727	32,15
PVC	1416	62,63	(300-350]	11	0,49	(25-30]	464	20,52
			(350-400]	0	0	(30-35]	254	11,23
			(400-500]	0	0	(35-40]	175	7,74
			(500-600]	13	0,57	(40-45]	81	3,58
			(600-700]	10	0,44	(45-50]	65	2,87
						(50-55]	168	7,43
						(55-60]	3	0,13

Tabla 18: Propiedades del Total de Tuberías en los Sectores Críticos de la Zona 3 Antofagasta

Material	Cantidad	%	Diámetro	Cantidad	%	Edad	Cantidad	%
Fierro Fundido	11	1,12	[50-100]	572	58,07	[0-5]	53	5,66
Acero Negro	23	2,34	(100-150]	318	32,28	(5-10]	16	1,71
Hierro Dúctil	0	0	(150-200]	48	4,87	(10-15]	0	0
HDPE	114	11,57	(200-250]	47	4,77	(15-20]	17	1,81
Asbesto Cemento	658	66,80	(250-300]	0	0	(20-25]	232	24,76
PVC	179	18,17	(300-350]	0	0	(25-30]	44	4,70
			(350-400]	0	0	(30-35]	7	0,75
			(400-500]	0	0	(35-40]	74	7,90
			(500-600]	0	0	(40-45]	20	2,13
			(600-700]	0	0	(45-50]	246	26,25
						(50-55]	106	11,31
						(55-60]	122	13,02
						(60-100]	48	5,12

Tabla 19: Propiedades del Total de Tuberías en los Sectores Críticos de la Zona 5 Antofagasta

Material	Cantidad	%	Diámetro	Cantidad	%	Edad	Cantidad	%
Fierro Fundido	127	9,03	[50-100]	507	36,03	[0-5]	53	3,77
Acero Negro	2	0,14	(100-150]	536	38,10	(5-10]	67	4,76
Hierro Dúctil	44	3,13	(150-200]	209	14,85	(10-15]	160	11,37
HDPE	347	24,66	(200-250]	20	1,42	(15-20]	127	9,03
Asbesto Cemento	612	43,50	(250-300]	39	2,77	(20-25]	175	12,44
PVC	275	19,55	(300-350]	28	1,99	(25-30]	104	7,39
			(350-400]	24	1,71	(30-35]	17	1,21
			(400-500]	0	0	(35-40]	154	10,95
			(500-600]	44	3,13	(40-45]	8	0,57
			(600-700]	0	0	(45-50]	73	5,19
						(50-55]	30	2,13
						(55-60]	135	9,59
						(60-110]	304	21,61

Tabla 20: Propiedades del Total de Tuberías en los Sectores Críticos de la Zona 7 Antofagasta

Material	Cantidad	%	Diámetro	Cantidad	%	Edad	Cantidad	%
Fierro Fundido	108	7,27	[50-100]	728	49,02	[0-5]	117	7,88
Acero Negro	10	0,67	(100-150]	470	31,65	(5-10]	63	4,24
Hierro Dúctil	65	4,38	(150-200]	123	8,28	(10-15]	97	6,53
HDPE	282	18,99	(200-250]	93	6,26	(15-20]	51	3,43
Asbesto Cemento	918	61,82	(250-300]	21	1,41	(20-25]	55	3,70
PVC	102	6,87	(300-350]	0	0	(25-30]	58	3,91
			(350-400]	9	0,61	(30-35]	154	10,37
			(400-500]	16	1,08	(35-40]	342	23,03
			(500-600]	25	1,68	(40-45]	4	0,27
			(600-700]	0	0	(45-50]	75	5,05
						(50-55]	96	6,46
						(55-60]	252	16,97
						(60-120]	121	8,15

10.5. Resultados

A conitnuación se presenta el listado de las calles en las que se proponen recambio de elementos dada su probabilidad de falla, por Zona Crítica.

Tabla 21: Listado de Tuberías en las que se propone Recambio de Elementos de la Zona N°1

Cuartel	Longitud [m]	Descripción	Año inst.	Material	Diámetro
010209	404,82	Av. O. Bonilla entre J. M. Salamanca y Río Doñihue	1990	PVC	250
010223	346,03	Av. O. Bonilla entre Orione y J. M. Salamanca	2003	PVC	160
010223	346,03	Av. O. Bonilla entre Orione y J. M. Salamanca	1992	PVC	160
010201	88,88	Detective L. Carrasco entre M. Silva y S. Novoa	1987	PVC	75
010303	196,4	N. González entre L. Da Vinci y M. Toro y Zambrano	1972	ASB	100
010303	259,66	J. Gutenberg entre Av. Huamachuco y Av. Bonilla	1972	ASB	100
010303	208,06	Huamachuco entre L. Da Vinci y M. Toro y Zambrano	1972	ASB	125
010303	112,28	L. Da Vinci entre Av. Huamachuco y N. González	1969	ASB	100
010302	61,76	Soldado E. Reyes entre Psj. O. Bonilla y N. González	1981	ASB	75
010414	69	Dagoberto Godoy entre Camarones y Punta Brava	1976	ASB	75
010415	124,17	Dagoberto Godoy entre Alto Hospicio y Colorado	1972	ASB	75
010415	274,61	Lautaro Espindola entre Cavancha y Colorado	1970	ASB	75
010415	74,45	Colorado entre L. Espindola y Av. Iquique	1970	ASB	75
010411	134,57	Av. E. Pérez Zujovic entre Ónix y Artesanía	1994	PVC	110
010803	202,43	L. Da Vinci entre Pedro Lobos y Bandera	1969	ASB	100
010803	250,83	Bandera entre Ricardo Mora y Nicolás Tirado	1969	ASB	75
010803	48,99	El Roble entre Ricardo Mora y J. Gutenberg	1969	ASB	100

Tabla 22: Listado de Tuberías en las que se propone Recambio de Elementos de la Zona N°3

Cuartel	Longitud [m]	Descripción	Año inst.	Material	Diámetro
030112	141	P. Jaraquemada entre Centenario y L. Franulic	1975	ASB	75
030112	91	Centenario entre Av. O. Bonilla y P. Jaraquemada	1975	ASB	100
030102	189	Tenglo entre Av. Óscar Bonilla e Independencia	1972	ASB	100
030101	590	Fresia entre Independencia y Elqui	1999	ACE	250
030112	68	Av. Oscar Bonilla entre Cruz del Sur y Tres Marías	1995	ASB	150
030103	96	El Tijar entre Traiguen y Puerto Natales	1974	ASB	75
030211	322	Juan Antonio Ríos entre Juan Petrina y Bandera	1971	ASB	75
030211	101	Psje. P. Cortés entre N. González y Huamachuco	1975	ASB	75
030201	212	El Roble entre Isabel Riquelme y Calbuco	1976	ASB	75
030201	109	Calbuco entre El Roble y Av. Los Leones	76	ASB	150
030204	91	Teatinos entre C. San Miguel y Mapocho	1998	ASB	75
030201	124	Quechereguas entre I. Riquelme y Membrillar	1974	ASB	75
030203	53	Mapocho entre 10 de Julio y Bandera	1971	ASB	100
030203	132	Bandera entre Mapocho e Isabel Riquelme	1971	ASB	100
030402	227	Puerto Natales entre C. Victor Jara y Elqui	1952	ASB	100
030402	46	Pucón entre La Unión y Victor Jara	1991	ASB	75
030402	127	La Unión entre Puerto Natales y Av. España	1991	ASB	75
030402	131	Huasco entre Puerto Natales y Av. España	1980	ASB	100
030401	174	Huasco entre Av. O. Bonilla y E. Arturo Araya	1974	ASB	100
030403	78	Huasco entre Av. España y Traiguén	1956	ASB	75
030401	109	El Toqui entre Hualqui y Huasco	1974	ASB	75
030403	131	Traiguén entre C. Victor Jara y Huasco	1956	ASB	75
030403	117	Tenglo entre C. Victor Jara y Vicuña	1956	ASB	100
030405	117	Puerto Montt entre Montegrande y Vicuña	1962	ASB	75
030410	220	Av. O. Cavada entre Cancha Rayada e Independencia	1952	ASB	75
030601	49	Juvenal Morla entre Av. R. Tomic y P. Lobos	1969	ASB	75
030601	104	P. Lobos entre J. A. Ríos y Psje. P. Cortés	1971	ASB	100
030601	99	Av. R. Tomic entre J. A. Ríos y Pje. P. Cortés	1977	ASB	75
030601	213	Juan Antonio Ríos entre Pedro Lobos y Bandera	1971	ASB	100
030601	214	Pje. Pantaleón Cortés entre Pedro Lobos y Bandera	1971	ASB	100
030603	99	Rapel entre Chacance y Bandera	1988	PVC	110

Tabla 23: Listado de Tuberías en las que se propone Recambio de Elementos de la Zona N°5

Cuartel	Longitud [m]	Descripción	Año inst.	Material	Diámetro
050122	119,5	Yerbas Buenas entre Isabel Riquelme y Plumerillo	1974	ASB	200
050122	53,89	Plumerillo entre Cancha Rayada y Rancagua	1974	ASB	100
050114	220,4	Membrillar entre Cancha Rayada e Independencia	1962	ASB	150
050114	336,07	Osorno entre Cancha Rayada y Cobija	1962	ASB	75
050114	337,01	Calbuco entre Independencia y Vicuña	1961	ASB	150
050140	112,03	Mauñín entre Montegrande y Vicuña	1961	ASB	150
050139	58,77	Venezuela entre Osorno y Psje. Santa Fe	1967	ASB	75
050139	61,39	Venezuela entre Psje. Santa Fe y Chiloé	1998	ASB	75
050139	87,14	Quito entre Psje. Santa Fe y Chiloé	1959	ASB	100
050112	113,66	Quito entre Chiloé y Av. C. C. Oviedo Cavada	1932	FF	100
050205	222,15	Illapel entre Ovalle y Calama	1968	ASB	75
050217	361,86	Ollagüe entre Victor Jara y Don Hugo Robles	1954	ASB	100
050203	158,51	Ollagüe entre Don Hugo Robles y Pisagua	1958	ASB	75
050203	176,69	Psje. Loa entre Don Hugo Robles y Pisagua	1964	ASB	75
050201	121,15	Valdivia entre Elqui y Huasco	1985	ASB	150
050205	99,25	Chuquicamata entre Ovalle y Mejillones	1986	ASB	75
050607	242,36	Av. Antonio Rendic entre Quito y Montevideo	1985	ASB	300
050607	113,87	Quito entre Av. Rendic y Llanquihue	1960	ASB	75
050607	398,89	Río de Janeiro entre Chiloé y Av. Rendic	1975	ASB	75
050613	240,48	Rosales entre Buenos Aires y Eleuterio Ramírez	1964	ASB	75
050613	110,85	Lima entre Av. Rendic y Llanquihue	1957	ASB	75
050609	113,33	Blanco Encalada entre Av. A. Rendic y Llanquihue	1960	ASB	75
050703	191,56	Tarapacá entre Av. Iquique y C. Calama	1963	ASB	100
050705	81,02	El Cobre entre Bellavista y Av. E. Pérez Zujovic	1960	ASB	75
050705	194,62	Av. E. Pérez Zujovic entre Pisagua y Av. S.Allende	1990	ASB	75
050720	63,95	Recabarren entre Bellavista e Irene Morales	1960	ASB	75
050730	139,64	Psje. Van Buren entre Montevideo y J. I. Zenteno	1990	ASB	100
050736	66,35	La Reconquista entre J. I. Zenteno y Procurador	1975	ASB	100
050732	296	Anibal Pinto entre J. I. Zenteno y El Corregidor	1989	PVC	110

Tabla 24: Listado de Tuberías en las que se propone Recambio de Elementos de la Zona N°7

Cuartel	Longitud [m]	Descripción	Año inst.	Material	Diámetro
070104	125,33	Psje. Ramaditas entre A. Meléndez y M. Luther King	1991	PVC	90
070104	120,11	Alfonso Meléndez entre Cordillera y Los Morros	1991	PVC	110
070102	144,19	12 de Octubre entre C. Bogotá y Riquelme	1995	PVC	110
070102	72,67	Martin Luther King entre César Urrutia y Riquelme	1995	PVC	110
070108	167,27	Av. P. A. Hurtado entre Lientur (Orella) y Rengo	1980	ASB	150
070227	33,59	Caupolicán entre Avelino Contardo y Leucotón	1972	ASB	75
070228	47,49	Avelino Contardo entre Caupolicán y Diagonal Sur	1972	ASB	75
070228	140,89	Diagonal Sur entre Araucanía y Avelino Contardo	1972	ASB	75
070217	126,25	Lientur entre Colo Colo y Av. Padre Alberto Hurtado	1969	ASB	100
070205	98,7	Las Brisas entre Antonio José de Sucre y Sierra	1968	ASB	100
070516	154,93	Av. Andrés Sabella Gálvez entre Chillán y Angol	1964	ASB	100
070529	98,12	Antonio Varas entre M. Bulnes y Ramón Barros Luco	1964	ASB	100
070528	144,93	Chillán entre Diego Portales y Av. Andrés Sabella	1964	ASB	100
070530	169,21	Patricio Lynch entre Ramón Barros Luco y Chillán	1964	ASB	75
070522	112,85	Avelino Contardo entre Guacolda y Marina	1965	ASB	75
070504	88,67	Av. Andrés Sabella entre Serrano y Galvarino	1963	ASB	100
070505	33,39	Av. Andrés Sabella entre Galvarino y Vega Lafferte	1963	ASB	100
070509	108,75	Av. Andrés Sabella entre Vega Lafferte y S. Bolivar	1963	ASB	100
070504	163,8	Galvarino entre Tucapel y Av. Andrés Sabella	1963	ASB	75
070504	104,98	Serrano entre Vista Al Mar y Av. Andrés Sabella	1963	ASB	100
070501	240,33	Av. Andrés Sabella entre Méndez y Riquelme	1963	ASB	75
070502	174,33	Libertad entre Ecuador y Covadonga Nueva	1963	ASB	75
070765	165,27	Orella entre Linares y Av. Argentina	1920	FF	75
070742	54,92	Larraín Macheno entre Orella y 21 de Mayo	1951	FF	75
070756	97,23	Barón de La Riviere entre Av. Argentina y H. Alfaro	1961	ASB	75