UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARACTERIZACIÓN DE LA ENVOLVENTE DE PRESIONES EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE (RDAP) CON SUMINISTRO INTERMITENTE

POR:

JESÚS RUBÉN SÁNCHEZ NAVARRO

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN INGENIERÍA

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO **AGOSTO DE 2021**

M.I. Javier González Cantú

Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Alejandro Villalobos Aragón

Secretario de Investigación y Posgrado

Dr. Alejandro Villalobos Aragón

Coordinador Académico

Dr. Eduardo Florencio Herrera Peraza

Director de Tesis

Fecha: **Agosto de 2021**

Comité:

Se enlistan todos los maestros que revisaron la tesis

Dr. Eduardo Florencio Herrera Peraza

Dr. Velitchko Gueorquiev Tzatchkov

Dra. Carmen Julia Navarro Gómez

Dr. Humberto Silva Hidalgo

© Derechos Reservados

Jesús Rubén Sánchez Navarro
Calle Cumbres de Arareco No. 2004
Residencial Cumbres II
Chihuahua, Chih.
C.P. 31217

AGOSTO DE 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

3 de Septiembre de 2021.

M.A. JESÚS RUBÉN SÁNCHEZ NAVARRO
Presente.-

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Ciencias Básicas, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. Alain Manzo Martínez** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **"CARACTERIZACIÓN DE LA ENVOLVENTE DE PRESIONES EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE (RDAP) CON SUMINISTRO INTERMITENTE".**

Índice de Contenido

Agradecimientos
Resumen
Abstract
Índice de contenido
Índice de tablas
Índice de figuras

CAPÍTULO 1: Introducción
1.1 Antecedentes
1.2 Definición del problema
1.3 Objetivos
1.4 Objeto de estudio
1.5 Justificación
CAPÍTULO 2: Marco Teórico
2.1 Principios básicos
2.2 Taxonomía de una red de distribución agua potable con suministre intermitente (IWS)
2.3 Modelación de una red de distribución
2.4 Fugas
2.5 Relación presión_Fugas
2.6 Relación presión_Consumo
2.7 Tipo de presiones en tuberías
2.8 Fatiga

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

CAPÍTULO 3: Materiales y Métodos

3.1 Introducción
3.2 Formulación de la investigación
3.3. Recopilación de información
3.4. Fase de análisis

CAPÍTULO 4: Resultados y Discusión

4.1 Análisis Geoestadístico
4.2. Análisis estadístico
4.3 Análisis numérico

CAPÍTULO 5: Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones
5.2 Recomendaciones

Bibliografía

A T E N T A M E N T E
"Naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

DIRECCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA U.A.CH.

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx

Dedicatoria

Esta investigación es un tributo a todos aquellos que han contribuido a la realización del presente trabajo.

Con especial mención:

A mis hijos Rubén y Roberto que son mi motor para dar lo mejor de mí.

A mi amada esposa Claudia por su incondicional amor y apoyo en todos mis proyectos.

A mi madre Carmen por ser siempre mi mentor y quien me impulsa a buscar la excelencia.

A mi padre Rubén por sus enseñanzas y la formación que me entregó.

A mis hermanos Fernando y David por motivarme a lograr mis metas.

Agradecimientos

Gracias Dios por estar presente en cada momento de mi vida.

Quiero dar un agradecimiento especial a:

A mi director el Dr. Herrera por su apoyo en este proyecto.

Al Dr. Astorga por haberme extendido la mano cuando la necesité, sin su respaldo no hubiera iniciado este trabajo.

Al Dr. Silva por sus consejos, retroalimentaciones y aportaciones a esta investigación.

Al Dr. Velitchko por su invaluable soporte y profesionalismo.

Al Dr. Álvarez por sus recomendaciones.

A mi querida Alma Mater la Universidad Autónoma de Chihuahua y en especial a la Facultad de Ingeniería por darme un espacio para desarrollarme profesionalmente y por todos lo apoyos brindados.

Al CONACYT por la beca recibida y por los incentivos para estancias doctorales.

Al IMTA por ser un Instituto abierto, amable y que sin sus investigaciones no hubiera sido posible la realización del presente documento, asimismo agradezco a los maestros Rodríguez y Santos por su cordialidad y apoyo.

Resumen

Una red de distribución de agua potable debe estar diseñada para suministrar el vital líquido en calidad, cantidad (volumen y presión suficiente), además de tener una disponibilidad del recurso las 24 horas del día, los 365 días del año. Sin embargo, es común en México y en países en desarrollo que los sistemas entreguen agua al usuario en periodos menores a 24 horas al día, situación que se denomina como suministro intermitente.

El suministro de agua de manera intermitente es impredecible y complejo, por lo cual, debe ser una prioridad de los organismos operadores, no solo evitarlo, sino también buscar la manera de que no sea una medida reiterativa y permanente; pero sobre todo planear estrategias para cambiar a un suministro continuo (24/7) como la mejor política de operación, desafortunadamente no siempre es una opción viable a corto plazo y fácil de revertir, para ello, dado que son sistemas cada vez más complejos, se requiere conocer el origen de la decisión de operar como suministro intermitente, ya sea por escasez física y/o económica.

De los problemas asociados al suministro intermitente, uno de gran relevancia y a la vez poco documentado, tiene que ver con la envolvente de presiones máximas y mínimas (sobrepresiones y presiones negativas) que se presentan como posible consecuencia del vaciado y llenado total o parcial de las tuberías, misma que pudiera tener un efecto importante en la incidencia de fugas en la red.

Las presiones altas contribuyen a la presencia de fugas y a que la descarga en las mismas aumente proporcionalmente a la raíz cuadrada de la presión, mientras que las presiones negativas provocan que las paredes del tubo se vean sometidas a una presión externa aplicada de manera radial a su periferia, lo cual tiende a aplastarla o colapsarla.

La presente tesis se enfoca en determinar la relación entre la envolvente de presiones y su incidencia en la generación de fugas en redes con suministro intermitente, para ello, se realizó una contribución metodológica en donde mediante el uso de modelos numéricos, geoestadísticos y estadísticos se caracterizó la envolvente de presiones, misma que incluye una fase de análisis para identificar las variables clave a considerar, así como su clasificación y agrupamiento.

Se estudiaron 347 puntos distribuidos en la ciudad de Chihuahua para monitoreo continuo de presiones en intervalos de 15 minutos, durante una semana completa; para la selección de esos puntos se consideraron: los diversos horarios de servicio, horas de suministro y las zonas que comprenden en superficie esos horarios de servicio. La cantidad de puntos fueron los requeridos para cubrir la mancha urbana garantizando una distancia máxima entre puntos de un kilómetro a la redonda. Además, se colocaron 10 puntos adicionales para observar posibles cambios abruptos en la presión con intervalos de registro de 30 segundos, y para la detección de transitorios rápidos se llevó a cabo un muestreo en donde se detectaron surgimiento de presión con frecuencia de hasta 1000 lecturas por segundo.

El caracterizar el comportamiento de la envolvente de presiones mediante el uso de las herramientas descritas en el presente estudio es un punto de partida fundamental para conocer las peculiaridades del sistema, identificar las zonas problemáticas, con lo que se espera contribuir a mejorar el servicio para el usuario.

Un adecuado manejo de las presiones en una red de distribución de agua es fundamental para disminuir la presencia de fugas y para un adecuado funcionamiento de la misma. Si bien la reducción de fugas es claramente una parte importante de la gestión sostenible del agua, sus impactos deben reconsiderarse en un indicador o meta, más amplio de protección del medio ambiente, que estrictamente las pérdidas de líquido evitadas y cuantificadas en metros cúbicos. La reducción del volumen de agua extraída de las fuentes (superficiales o subterráneas) reduce también los impactos ambientales asociados a la producción de agua (la operación y la infraestructura necesarias para la extracción, el tratamiento y el

suministro). Mientras tanto, las actividades para reducir las pérdidas de agua generan sus propios impactos ambientales, especialmente como resultado del trabajo, el equipo y la infraestructura utilizada para este propósito.

Índice de Contenido

AGRADECIMIENTOS VII

RESUMEN VIII

ÍNDICE DE CONTENIDO IX

ÍNDICE DE TABLAS XII

ÍNDICE DE FIGURAS XIII

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN 1

1.1 ANTECEDENTES 1

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA 3

1.3 OBJETIVOS 5

1.3.1 Hipótesis 5

1.3.2 Objetivo general 5

1.3.3 Objetivos específicos 5

1.4 OBJETO DE ESTUDIO 6

1.4.1. Características generales del área de estudio. 13

1.4.1.1. Clima 14

1.4.1.2. Uso de suelo y vegetación 14

1.4.1.3. Hidrología 14

1.4.1.3. Agua potable 17

1.4.1.4. Estado de la red de distribución 19

1.5 JUSTIFICACIÓN 21

1.5.1. Motivación 27

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO 29

2.1 PRINCIPIOS BÁSICOS 29

2.1.1. Conservación de la materia (principio de continuidad) 29

2.1.2. Conservación de la cantidad de movimiento 30

2.1.3. Conservación de la energía 31

2.1.4. Tipos de flujo *32*

2.2 TAXONOMÍA DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN AGUA POTABLE CON SUMINISTRO INTERMITENTE (IWS) 33

2.3 MODELACIÓN DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN 37

2.3.1 Métodos actuales para modelar redes con suministro intermitente *39*

2.4 FUGAS 40

2.5 RELACIÓN PRESIÓN – FUGAS 44

2.6 RELACIÓN PRESIÓN - CONSUMO 45

2.7 TIPO DE PRESIONES EN TUBERÍAS 46

2.7.1 Presión de trabajo. *46*

2.7.2 Sobrepresión *48*

2.7.3 Presiones negativas *48*

2.7.4 Envolvente de presión *50*

2.8 FATIGA 51

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS 56

3.1 INTRODUCCIÓN 56

3.2 FORMULACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 57

3.3. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN 57

3.4. FASE DE ANÁLISIS 59

3.4.1. Variables clave a considerar en una red de distribución con suministro intermitente *59*

3.4.2. Clasificación y agrupamiento de los factores fundamentales *65*

3.4.3. Campaña de medición y recopilación de datos *69*

3.4.3.1. Equipo de medición empleado 70

3.4.3.2. Registros de presión 71

3.4.4. Determinación de herramientas de análisis *73*

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN 75

4.1 ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO 75

4.1.1. Análisis de las presiones *75*

4.1.2. Fugas *97*

4.1.3. Análisis en tuberías principales y secundarias *100*

4.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO 102

4.2.1. Tratamiento de Datos *102*

4.2.2. Análisis de Potencia Estadística *104*

4.2.3. Análisis Multivariado *111*

4.2.3.1. Análisis Factorial (AF) 114

4.2.3.2. Matriz de Correlación 114

4.2.3.3. Análisis de Componentes Principales (ACP) 117

4.2.3.4. Análisis Factorial (AF) Rotación de Factores 120

4.2.3.5. ANOVA 122

4.2.3.6. Ajuste del Residuo de los Tratamientos 134

4.3 ANÁLISIS NUMÉRICO 143

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 170

5.1 CONCLUSIONES 170

5.2 RECOMENDACIONES 175

BIBLIOGRAFÍA 178

CURRICULUM VITAE 188

Índice de Tablas

Tabla 3. 1 Tipos de fallas registradas por el organismo operador (Elaboración propia).....64

Tabla 4. 1. Análisis de horarios de servicio y asignación de puntos de monitoreo (Elaboración propia).....76

Tabla 4. 2. Ejemplo del registro de datos de presión obtenidos por el monitoreo (Elaboración propia). 78

Tabla 4. 3. Análisis de presiones máximas, mínimas y promedio (*mca*) por horario de servicio (Elaboración propia).....84

Tabla 4. 4. Resumen de puntos de monitoreo adicionales (Elaboración propia).....93

Tabla 4. 5. Análisis de fugas reportadas en el CIS del 2015 al 2017 (Elaboración propia).....97

Tabla 4. 6 Cantidad de fugas por área de influencia (Elaboración propia).....98

Tabla 4. 7. Análisis de tuberías principales y secundarias por área de influencia (Elaboración propia). 101

Tabla 4. 8. Matriz de correlaciones concentradas (Elaboración propia). 116

Tabla 4. 9. Resumen para la aplicación de los *ANOVAs* (Elaboración propia). 123

Tabla 4. 10. Porcentaje de presencia del rango de presión en los distritos de medición (Elaboración propia). 123

Tabla 4. 11. Análisis para la integración de *ANOVA* (Elaboración propia). 124

Tabla 4. 12. *ANOVA TWO WAY: FR* versus Factor, Tratamiento (Elaboración propia). 128

Tabla 4. 13. Análisis de Varianza para *FR* (Elaboración propia) 128

Tabla 4. 14. Comparativa del modelo con las mediciones de campo, suministro continuo (Elaboración propia).....167

Índice de Figuras

Figura 1. 1 Piezométrica en progresiva (Hidra-Software, 2020) 4

Figura 1. 2 Chihuahua, Chih. en 1970 (Elaboración propia). 6

Figura 1. 3 Chihuahua, Chih. en 1990 (Elaboración propia). 7

Figura 1. 4 Volumen extraído para abasto de agua potable (JMAS, 2020). 8

Figura 1. 5 Evolución de la población de la ciudad de Chihuahua (JMAS, 2020). 8

Figura 1. 6 Eficiencias en el servicio de agua potable en la ciudad de Chihuahua (PIGOO, 2020) (Elaboración propia). 10

Figura 1. 7 Puntos de registro de presión en la ciudad de Chihuahua (JMAS/IMTA, 2008). 11

Figura 1. 8 Variación de presión promedio en zonas de influencia con suministro con horario de 5:00 a 10:00 horas y de 16:00 a 20:00 horas (JMAS/IMTA, 2008) 12

Figura 1. 9 Ubicación de la ciudad de Chihuahua, Chih., México (INEGI, 2005) 13

Figura 1. 10 Elevación del nivel estático en *msnm* (2009) (SUBTERRÁNEAS, 2020). 16

Figura 1. 11 Horarios de servicio en la ciudad de Chihuahua en el año 2000 (JMAS, 2020). 18

Figura 1. 12 Horarios de servicio en la ciudad de Chihuahua en el año 2018 (JMAS, 2020). 19

Figura 1. 13 Escasez física y/o económica de agua a nivel mundial (WWAP, 2012) 23

Figura 1. 14 Horas promedio a nivel nacional con servicio de agua potable (PIGOO, 2020) 24

Figura 1. 15 Tubería con perfil accidentado y bolsa de aire estacionaria (Pozos-Estrada, Fuentes, Sánchez, Rodal, & de Luna, 2017) 27

Figura 1. 16 Número de publicaciones científicas por año referentes a redes con suministro intermitente (IWS) (Mokssit, De Gouvello, Chazerain, Figuères, & Tassin, 2018) 28

Figura 2. 1 . Principio de continuidad (DCA.ULPGC, 2018) 30

Figura 2. 2. Pérdida de energía en una conducción a presión (Monge R., 2017). 31

Figura 2. 3. Etapas de flujo en una red de agua potable con suministro intermitente (Elaboración propia). 34

Figura 2. 4 Tubería en depresión (CONAGUA, 2015). 35

Figura 2. 5. Flujo del volumen de agua a través de las diferentes etapas en una RDAP con suministro intermitente (Elaboración propia).....36

Figura 2. 6. Modelo Hidráulico para una Red de Distribución de Agua Potable (Elaboración propia).....38

Figura 2. 7. Esquema de una red con fugas (Ochoa Alejo & Bourguett Ortiz, 2001).....41

Figura 2. 8. Ubicación y frecuencia de fugas en líneas principales y secundarias (CEPIS, 1983).....42

Figura 2. 9. Ubicación y frecuencia de fugas en tomas domiciliarias (Ochoa Alejo & Bourguett Ortiz, 2001).....43

Figura 2. 10. Relación presión-fugas para *e= 1.18* (Tzatchkov, Alcocer, Bourguett, & Felipe, 2014).....45

Figura 2. 11. Presión nominal para diferentes diámetros en tuberías de PVC (PTM, 2018).....47

Figura 2. 12. Envolventes de presión presentes en una línea de conducción (CONAGUA (B), 2015).....51

Figura 2. 13. Comportamiento de las presiones en una RDAP con suministro intermitente durante una semana (*datos del fraccionamiento Quinta Sebastián, en la ciudad de Chihuahua, Chih)* (Elaboración propia).....52

Figura 2. 14. Frecuencia de roturas de tuberías en países con suministro continuo e intermitente (World Bank, 2006).....53

Figura 2. 15. Curva de diseño contra fatiga en tuberías de PVC (AWWA, 2006).....54

Figura 2. 16. Variación de la presión en el paro de los equipos de bombeo, registrada en un acueducto en operación en México (Tzatchkov, Alcocer, Bourguett, & Felipe, 2014).....55

Figura 3. 1. Metodología de la investigación (Elaboración propia).....56

Figura 3. 2. Configuración típica de un sistema de abastecimiento de agua en localidades urbanas (CONAGUA, 2015).....60

Figura 3. 3. Tuberías principales de 4 pulgadas o mayor diámetro en la ciudad de Chihuahua (Elaboración propia).....61

Figura 3. 4. Tuberías secundarias con diámetros de 3 pulgadas o menores (Elaboración propia).....61

Figura 3. 5. Efecto que se tiene en la presión a lo largo del flujo de un fluido en una tubería (ASHM, 2015).....63

Figura 3. 6. Ejemplo de captura de reporte de fuga en el CIS (JMAS, 2020).....64

Figura 3. 7. Fuentes de suministro de la ciudad de Chihuahua, ubicación de pozos (JMAS, 2020).....66

Figura 3. 8. Fuentes de suministro de la ciudad de Chihuahua, ubicación de tanques y rebombeos (JMAS, 2020).....67

Figura 3. 9. Registradores de presión instalados en toma domiciliaria y medidor.....70

Figura 3. 10. Puntos de presión en áreas de influencia (Elaboración propia).....72

Figura 3. 11. Zonas para análisis de cambios repentinos en la presión (Elaboración propia).....73

Figura 4. 1. Clasificación por número de horas de suministro al día (Elaboración propia).....77

Figura 4. 2. Correlación espacial de presiones máximas en puntos de monitoreo (Elaboración propia).....79

Figura 4. 3. Correlación espacial de presiones mínimas en puntos de monitoreo (Elaboración propia). 79

Figura 4. 4. Correlación espacial de presiones promedio en puntos de monitoreo (Elaboración propia).....80

Figura 4. 5. Interpolación de los valores de presión máxima en *mca* de los puntos de monitoreo (Elaboración propia).....81

Figura 4. 6. Interpolación de los valores de presión mínima en *mca* de los puntos de monitoreo (Elaboración propia).....82

Figura 4. 7. Interpolación de los valores de presión promedio en *mca* de los puntos de monitoreo (Elaboración propia). 83

Figura 4. 8. Gráfica de los valores de presión máxima, mínima y promedio por área de suministro (Elaboración propia).....85

Figura 4. 9. Porcentaje acumulado de los diversos rangos de presión tomando en cuenta su área de influencia (Elaboración propia).....85

Figura 4. 10. Colocación de registrador de presiones en el fraccionamiento Montecarlo. 86

Figura 4. 11. Comportamiento de las presiones en el registrador No.14 en Montecarlo (Elaboración propia).....87

Figura 4. 12. Comportamiento de las presiones en el registrador No.11 en Montecarlo (Elaboración propia).....87

Figura 4. 13. Comportamiento de las presiones en el registrador No.13 en Montecarlo (Elaboración propia).....88

Figura 4. 14. Comportamiento de las presiones en el registrador No.5 en Zaragoza (Elaboración propia). 88

Figura 4. 15. Comportamiento de las presiones en el registrador No.30 en Cumbres II (Elaboración propia).....89

Figura 4. 16. Comportamiento de las presiones en el registrador No.1 en Cumbres II (Elaboración propia).....90

Figura 4. 17. Presencia de presiones negativas utilizando un manómetro/vacuómetro digital en el fraccionamiento Cumbres II. 90

Figura 4. 18. Comportamiento de las presiones en el registrador No.34 en Quinta Sebastián (Elaboración propia). 91

Figura 4. 19. Comportamiento de las presiones en el registrador No.39 en Quinta Sebastián (Elaboración propia). 91

Figura 4. 20. Registrador No.39 colocado en el fraccionamiento Quinta Sebastián. 92

Figura 4. 21. Comportamiento de las presiones en el registrador No.19 en Rigoberto Quiroz (Elaboración propia).....92

Figura 4. 22. Comportamiento de las presiones en el registrador No.24 en Rigoberto Quiroz (Elaboración propia).....93

Figura 4. 23. Registrador de Transitorios “Tritón IT”.....94

Figura 4. 24. Fraccionamiento Quinta Versalles (Elaboración propia).....95

Figura 4. 25. Transitorios rápidos del día 18 de diciembre en el fraccionamiento Quinta Versalles (Elaboración propia). 95

Figura 4. 26. Acercamiento al transitorio rápido presentado a las 3:32 a.m. en el Fraccionamiento Quinta Versalles (Elaboración propia).....96

Figura 4. 27. Transitorio de mayor magnitud registrador por el dispositivo (7.7 Kg/cm^2) (Elaboración propia). 97

Figura 4. 28 Puntos con fugas en medidor en el 2015 (Elaboración propia). 98

Figura 4. 29 Densidad de fugas por km^2 en medidor y en red en el 2015 (Elaboración propia). 99

Figura 4. 30 Densidad de fugas por km^2 en medidor y en red en el 2016 (Elaboración propia). 99

Figura 4. 31 Densidad de fugas por km^2 en medidor y en red en el 2017 (Elaboración propia). 100

Figura 4. 32 Tuberías principales por horario de servicio (Elaboración propia). 100

Figura 4. 33 Test de normalidad por observaciones del punto P18 de monitoreo de los 347 (Elaboración propia). 105

Figura 4. 34 Test de normalidad P31, fuente de suministro Tanque B (Elaboración propia).....107

Figura 4. 35 Test de normalidad P150, fuente de suministro Tanque Cerro Grande (Elaboración propia).....107

Figura 4. 36 Análisis de dispersión u homogeneidad por observaciones (Elaboración propia). 109

Figura 4. 37 Análisis de dispersión u homogeneidad por factores (Elaboración propia).....109

Figura 4. 38 Diagrama de Pareto de Efectos Estandarizados (Elaboración propia). 111

Figura 4. 39 Gráfica de Análisis de Componentes Principales (Elaboración propia). 118

Figura 4. 40 Gráfica de sedimentación (Elaboración propia). 120

Figura 4. 41 Gráfica de Análisis Factorial con rotación *VARIMAX* (Elaboración propia). 121

Figura 4. 42 Resultados de *ANOVA-ONE-WAY* (presiones) (Elaboración propia). 125

Figura 4. 43 Resultados de presiones mediante Tukey (Elaboración propia).....126

Figura 4. 44 Resultados de presiones mediante Fisher (Elaboración propia).....126

Figura 4. 45 Resultados de tratamientos (Elaboración propia). 127

Figura 4. 46 Resultados de Efectos Principales (Elaboración propia).....129

Figura 4. 47 Interacción entre la presión y el tratamiento (Elaboración propia). 130

Figura 4. 48 Gráfico de contorno (Elaboración propia). 131

Figura 4. 49 Gráfico de superficie (Elaboración propia).....131

Figura 4. 50 Ajuste de residuos de los tratamientos (Elaboración propia).....134

Figura 4. 51 Diagramas de Pareto de efectos estandarizados variable respuesta “Presión 7 a 15 *mca”* (Elaboración propia). 137

Figura 4. 52 Diagramas de Pareto de efectos estandarizados, variable respuesta “Presión 15 a 30 *mca”* (Elaboración propia). 137

Figura 4. 53 Gráficas de residuos para “Presión 7 a 15*mca”* (Elaboración propia).....137

Figura 4. 54 Gráficas de residuos para “Presión 15 a 30 *mca”* (Elaboración propia).....138

Figura 4. 55 Gráficas de residuos para Fugas en Red 2015 (Elaboración propia).....139

Figura 4. 56 Gráficas de residuos para Fugas en Red 2016 (Elaboración propia).....140

Figura 4. 57 Gráficas de residuos para Fugas en Red 2017 (Elaboración propia).....140

Figura 4. 58 Gráficas de residuos de Fugas Medidor 2015.....142

Figura 4. 59 Gráficas de residuos de Fugas Medidor 2016 (Elaboración propia). 142

Figura 4. 60 Gráficas de residuos de Fugas Medidor 2017 (Elaboración propia). 143

Figura 4. 61 Representación de la evolución histórica de los modelos de sistemas de distribución de agua (García C., 2003) 144

Figura 4. 62 Sistema de abastecimiento y distribución de agua potable de la ciudad de Chihuahua (Elaboración propia). 147

Figura 4. 63 Distribución de presiones a las 4:00 horas (Elaboración propia). 148

Figura 4. 64 Distribución de presiones a las 8:00 horas (Elaboración propia). 149

Figura 4. 65 Distribución de presiones a las 12:00 horas (Elaboración propia). 149

Figura 4. 66 Distribución de presiones a las 16:00 horas (Elaboración propia). 150

Figura 4. 67 Distribución de presiones a las 20:00 horas (Elaboración propia). 150

Figura 4. 68 Distribución de presiones a las 24:00 horas (Elaboración propia). 151

Figura 4. 69 Ubicación de la colonia Rigoberto Quiroz en la ciudad de Chihuahua, Chih. 152

Figura 4. 70 Registradores Multilog ubicados en la colonia Rigoberto Quiroz. 152

Figura 4. 71 Medición del punto 2, en la colonia Rigoberto Quiroz. 153

Figura 4. 72 Ubicación y resultados de la medicion de presiones para la comprobación de aislamiento en la colonia Rigoberto Quiroz (Elaboración propia).....154

Figura 4. 73 Plataforma *NEBULALINK*, Sectorizacion JMAS Chihuahua.....155

Figura 4. 74 Puntos de la medicion de presiones en la colonia Rigoberto Quiroz (Elaboración propia).....156

Figura 4. 75 Lotificacion de la colonia Rigoberto Quiroz (Elaboración propia).....157

Figura 4. 76 Usuarios domésticos de la colonia Rigoberto Quiroz. 157

Figura 4. 77 Red en *Infoworks* de la colonia Rigoberto Quiroz (Elaboración propia).....158

Figura 4. 78 Asignación de elevaciones topográficas de la colonia Rigoberto Quiroz (Elaboración propia). 159

Figura 4. 79 Diagrama de demanda real obtenida a la entrada del sector (Elaboración propia). 159

Figura 4. 80 Temático de los datos en vivo, ubicación de los registradores de presión para calibración del modelo (Elaboración propia).....160

Figura 4. 81 Comportamiento de las presiones en el nodo N_1 (Elaboración propia).....161

Figura 4. 82 Comportamiento de las presiones en la *VRP* de entrada de suministro al *DH* (Elaboración propia).....162

Figura 4. 83 Comportamiento de las presiones en cada uno de los registradores instalados en la colonia Rigoberto Quiroz (Elaboración propia). 163

Figura 4. 84 Comportamiento de las presiones en los horarios de servicio establecidos (Elaboración propia). 164

Figura 4. 85 Simulación de presiones en el sector a las 11:00 *a.m.* (Elaboración propia).....165

Figura 4. 86 Simulación de presiones de operación registradas en la *VRP* (Elaboración propia).....165

Figura 4. 87 Comparativa de los valores de caudal y presión en los puntos de registro con suministro continuo (Elaboración propia).....166

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Cerca de mil millones de personas alrededor del mundo tienen acceso al agua a través de una red de tuberías que no cumplen con los preceptos de planeación y funcionamiento proyectados, como lo es estar presurizadas todo el tiempo (Laspidou & Spyropoulou, 2017). Esas redes se denominan como de suministro intermitente (IWS por sus siglas en inglés) y pueden contrastarse con las de suministro continuo (CWS o 24/7) que son el estándar en la mayoría de los países desarrollados (J. Taylor, H. Slocum, & J. Whittle, 2018).

Una red de distribución de agua potable (RDAP) desde un enfoque sistémico se compone de un conjunto de: tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde tanques de almacenamiento y/o regulación, o provenientes de una estación de bombeo o pozo, hasta la toma domiciliaria o usuario final. Su finalidad es proporcionar agua a los usuarios para uso doméstico, público, comercial, industrial y en condiciones extraordinarias para extinción de incendios (CONAGUA, 2015).

Cualquier RDAP debe estar diseñada para suministrar la cantidad suficiente de agua en los puntos de consumo con una presión mínima requerida (Goverdhanam, 2014), con la calidad que establece la normativa vigente (en el caso de México es la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1), además de tener disponibilidad del líquido las 24 horas, los 365 días del año.

En las RDAP con suministro continuo el abastecimiento de agua se provee las 24 horas del día y las necesidades del usuario se satisfacen de manera oportuna, con presiones

reguladas y acordes al esquema de demanda, permitiendo que el sistema trabaje presurizado todo el tiempo, absorbiendo los picos en las demandas horarias y diarias. Cuando una RDAP no entrega agua al usuario final las 24 horas al día se define como una red con suministro intermitente (IWS), conocido en México como tandeo u horario de servicio. En un sistema intermitente el servicio se realiza por ciclos, los cuales varían en horarios y en zonas, por lo que el usuario se ve obligado a almacenar agua para cubrir sus necesidades en los momentos en los que no se proporciona el servicio (Milanés García, 2011), normalmente se utilizan depósitos de almacenamiento domiciliarios como tinacos o cisternas (Cabrera-Béjar & Tzatchkov, 2012).

El informe Benchmarking Internacional de redes de agua y saneamiento del Banco Mundial, muestra que solo 16% de los organismos operadores del agua potable en países en vías de desarrollo cumplieron con un abastecimiento continuo de 24 horas y en promedio se estima que en esos países se provee un servicio de solamente 16 horas al día (Van den Berg C, 2011).

La creciente y más frecuente escasez física del agua que puede originarse por el cambio climático y/o el incremento de la población y consecuentemente de la demanda del líquido; lo que podría ocasionar un aumento en el número de sistemas con suministro intermitente (Tsegaye, Eckartj, & Vairavamoorthy, 2011). Partiendo del hecho que los organismos operadores cuentan con recursos limitados y casi siempre destinados a inversiones de nueva infraestructura y no en la rehabilitación o modificación de la existente, se hace necesario mejorar los sistemas de agua potable para que sean rentables, pero más aún sostenibles (Goverdhanam, 2014).

Debido a que cada vez el agua es más escasa y los costos de extracción son mayores (principalmente cuando la fuente es agua subterránea) y aunado a la existencia de una gran cantidad de sistemas que operan con un suministro intermitente, es indispensable conocer con mayor detalle el efecto que provoca este tipo de servicio, algunos de los indicadores que se pueden cuantificar para delimitar y visualizar los impactos de este tipo de operación en la incidencia de fugas asociada a la caracterización de la envolvente de presiones en la red. Ambos factores, (presión en la red y fugas) fueron observados y cuantificados en campo, asociados a la operación en el sistema intermitente.

El análisis de esta información permitirá proponer un manejo de operación que conlleve a evitar las pérdidas del vital líquido, o a la recuperación de caudales; así como mejorar el servicio, tanto en las presiones entregadas al usuario, como en el tiempo suficiente para satisfacer la demanda, mediante el incremento del horario de servicio donde se tenga la presión de operación suficiente. Así como ahorrar en costos asociados, además de reducir el impacto negativo al medio ambiente, como por ejemplo el volumen de agua fugado con el impacto económico de requerir nuevas fuentes y ser más costosa la operación

1.2 Definición del problema

Existe una serie de problemas asociados al suministro intermitente en las RDAP, de los cuales varios de ellos han sido abordados con frecuencia por diversos investigadores. Se ha documentado que las fallas en la infraestructura de la RDAP con servicio intermitente son más frecuentes que en un sistema continuo, debido a la operación del mismo (Charalambous, 2012), también se conoce que la presencia de aire atrapado entre dos columnas de agua sometidas a presión, puede provocar importantes sobrepresiones (Fuertes, Izquierdo, Iglesias, Cabrera, & García-Serra, 1997) y que se dificulta la localización de fugas en los

sistemas intermitentes (Ilaya-Ayza, Campbell, Pérez-García, & Izquierdo, 2015), sin embargo, se ha dejado de lado documentar, el hecho que la envolvente de presiones máximas y mínimas (sobrepresiones y presiones negativas) que se presentan en una red con suministro intermitente como posible consecuencia del vaciado y llenado total o parcial de las tuberías pudiera tener un efecto importante en la incidencia de fugas en las mismas. Existen muy pocas curvas generadas, analizadas o documentadas de envolventes de presión aun en los sistemas de abastecimiento 24/7; las envolventes de presión normalmente tienen como objetivo conocer las presiones máximas y mínimas en los puntos de conducción o donde se alimenta por bombeo para evaluar el efecto que producen los fenómenos transitorios, definir elementos de protección conducentes y para establecer la operación del sistema que satisfaga la demanda del usuario.

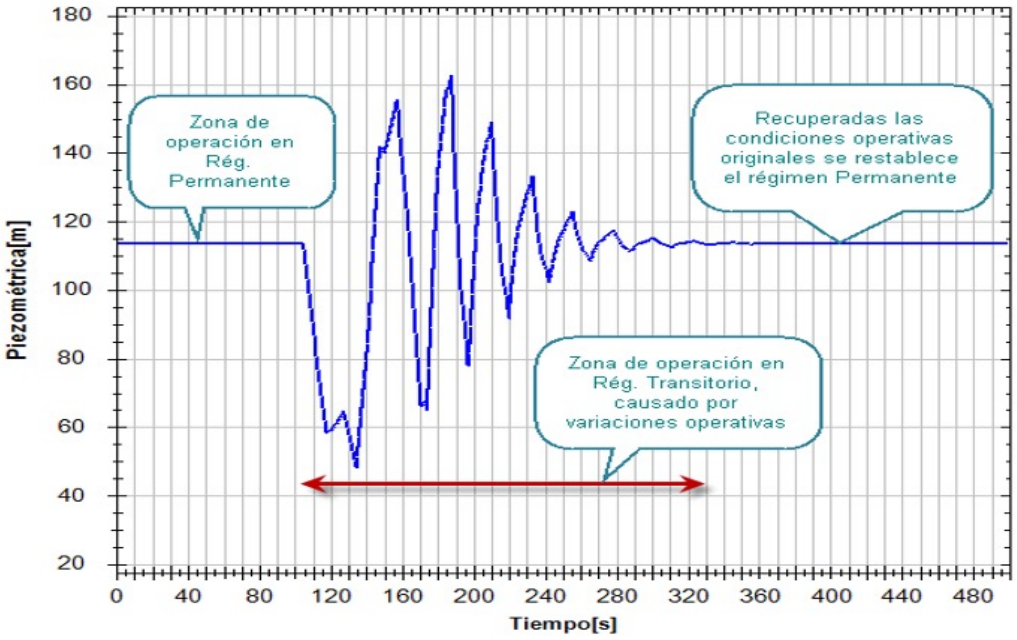


Figura 1. 1 Piezométrica en progresiva (Hidra-Software, 2020)

La *Figura 1.1*. Muestra la perturbación en la presión generada por la variación en las condiciones operativas, en un inicio la presión se mantiene estable mientras se presenta un régimen permanente, después se muestra un régimen transitorio que exhibe la envolvente de

presión, se tienen variaciones de mínimas y máximas, en donde se podría esperar sobrepresiones que excedan la presión nominal de la tubería considerada en el diseño.

A pesar de que existe abundante literatura para la planificación, diseño, operación y mantenimiento de los sistemas de suministro continuos, el funcionamiento de los sistemas de abastecimiento intermitentes se basa principalmente en la experiencia y el análisis de la oferta y la demanda de agua, sin que se consideren la variación de las presiones en la red (Faure & Pandit, 2010).

1.3 Objetivos

1.3.1 Hipótesis

La envolvente de presiones que se presenta en una red de agua potable con suministro intermitente, está asociada directamente con un aumento en la presencia de fugas.

1.3.2 Objetivo general

Determinar la relación entre la envolvente de presiones en una red de distribución de agua potable con suministro intermitente y la incidencia en la generación de fugas.

1.3.3 Objetivos específicos

1. Identificar las variables clave que inciden en la operación del sistema de distribución de agua potable con suministro intermitente.
2. Clasificar las diversas zonas de la ciudad de Chihuahua considerando las variables clave identificadas.

3. Caracterizar la envolvente de presiones en el sistema de distribución de agua potable con suministro intermitente.
4. Analizar el comportamiento y los tipos de fugas presentes en una red de distribución con suministro intermitente.
5. Determinar correlaciones, agrupamientos y comportamiento de las diversas variables clave en este tipo de sistemas mediante el uso de herramientas: geoestadísticas, estadísticas y numéricas.

1.4 Objeto de estudio

Como caso de aplicación, se desarrolla el análisis en la ciudad de Chihuahua, Chihuahua, México, ya que cuenta con diversas zonas de influencia y sectores hidrométricos bien definidos en donde se tiene servicio continuo y otros con operación intermitente.

Las *Figuras 1.2. y 1.3.* Muestran las superficies de la mancha urbana que ocupaba la ciudad en los años 1970 y 1990 respectivamente.



Figura 1. 2 Chihuahua, Chih. en 1970 (Elaboración propia).



Figura 1. 3 Chihuahua, Chih. en 1990 (Elaboración propia).

El organismo operador de la ciudad de Chihuahua periódicamente ha tenido que enfrentar una demanda de agua creciente, la cual rebasa la oferta y la disponibilidad, (tanto en términos de infraestructura, como en volúmenes de agua), particularmente para uso público urbano (Navarro Gómez, 2013). En la *Figura 1.4*. Se observa el incremento de un 30% del volumen suministrado a la ciudad durante el periodo comprendido entre 1970 y 1990; y del 100% en el mismo periodo respecto a su población.

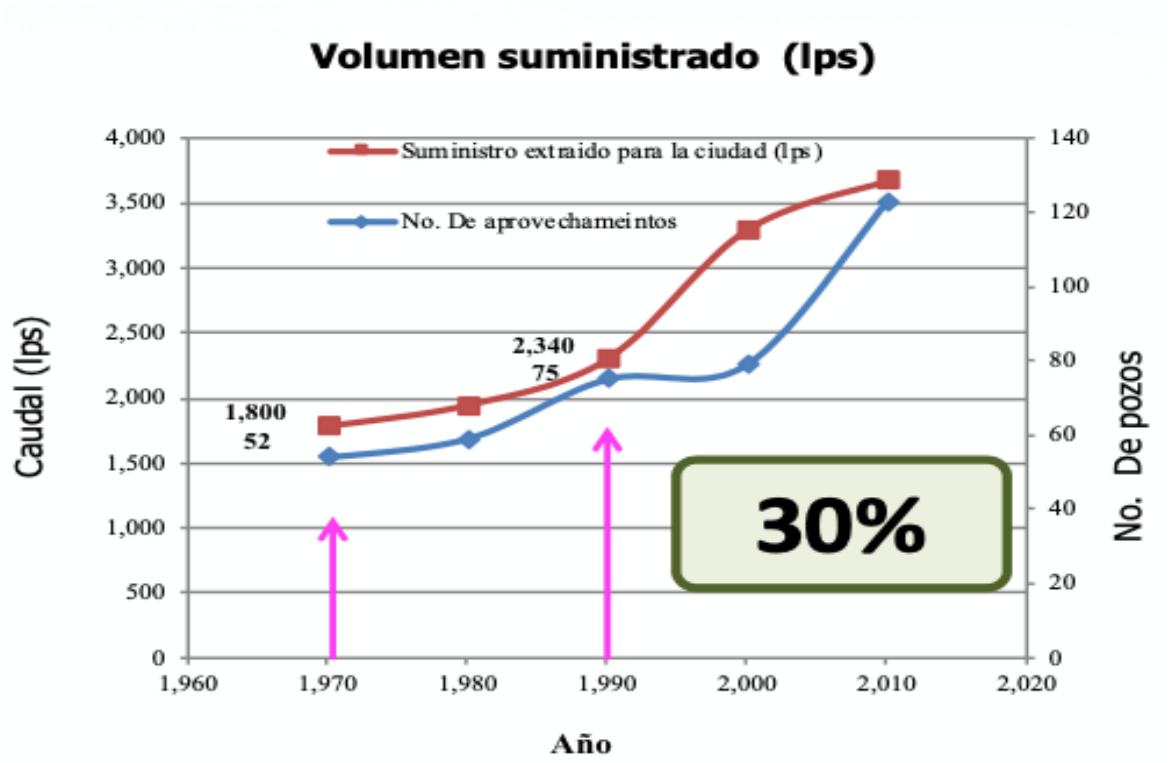


Figura 1. 4 Volumen extraído para abasto de agua potable (JMAS, 2020).

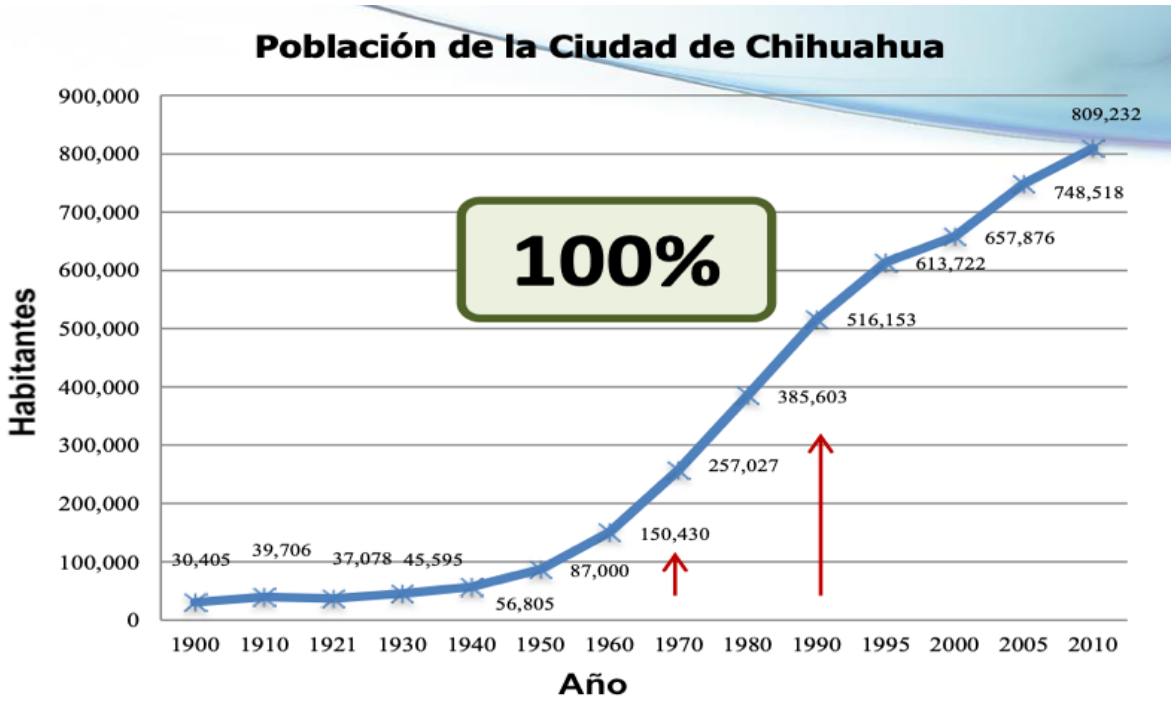


Figura 1. 5 Evolución de la población de la ciudad de Chihuahua (JMAS, 2020).

La ciudad de Chihuahua cuenta con una población de 937,674 habitantes al último Censo del 2020, distribuidos en 300,786 viviendas, de las cuales el 99% tienen acceso a agua entubada mediante una conexión a la RDAP (INEGI, 2020).

Como muestran las *Figuras 1.2, 1.3 y 1.5*, en el periodo entre 1970 y 1990, el crecimiento de la ciudad tanto en superficie como en número de habitantes condujo a la implementación de un suministro intermitente en diversas zonas mediante horarios de servicio, de los cuales según el informe "Diagnóstico, Modelación y Planeación de Sectores de la Red de Distribución de Agua Potable de Chihuahua, Chihuahua" se distinguen 18 zonas de influencia con diversos horarios de servicio que van desde 3 hasta 24 horas al día (JMAS/IMTA, 2008).

Según el Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores al 2020, los residentes de la ciudad de Chihuahua tienen en promedio 10.5 horas de suministro de agua potable al día y se cuenta con una eficiencia física del 55.00% (PIGOO, 2020) . En la *Figura 1.6* se pude apreciar el comportamiento de las diferentes eficiencias del sistema, del año 2002 al 2020.

La eficiencia física es importante ya que refleja la evidencia entre lo facturado y lo producido, siendo un parámetro significativo que nos muestra la presencia de pérdidas en la red.

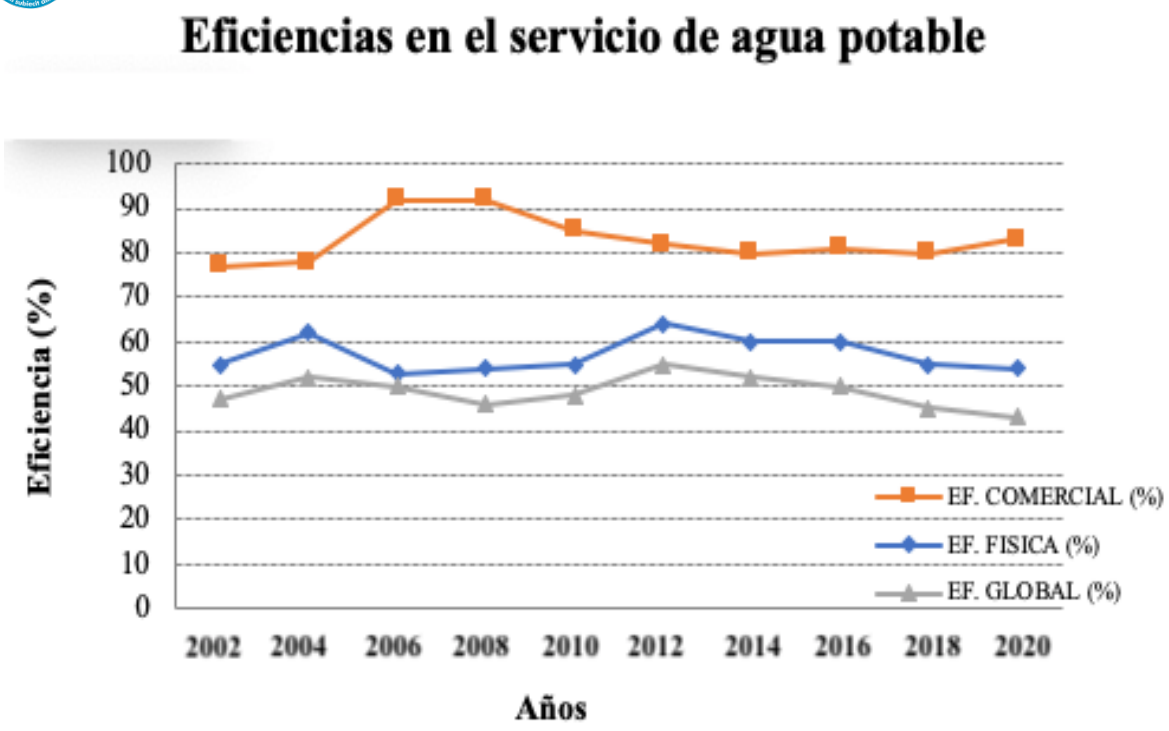


Figura 1. 6 Eficiencias en el servicio de agua potable en la ciudad de Chihuahua (PIGOO, 2020) (Elaboración propia).

En el año 2008, el Organismo Operador encargado de proveer el servicio de agua potable en la ciudad se propuso conocer la situación que se tenía del servicio y del aprovechamiento de la infraestructura existente, para lo cual llevó a cabo el proyecto de "Diagnóstico, Modelación y Planeación de Sectores en la Red de Distribución de Agua Potable de Chihuahua, Chihuahua", teniendo como objetivo la planeación de acciones para mejorar el funcionamiento hidráulico del sistema, para recuperar y controlar las pérdidas de agua. Se llevó a cabo una campaña de medición de presiones en 400 puntos distribuidos de manera uniforme sobre la mancha urbana de la ciudad, considerando diversos factores como la superficie de las zonas de influencia de los tanques, pozos y rebombeos, de manera que se abarcara las diferentes zonas de presión de la red y los diversos horarios de consumo (*Figura 1.7*).

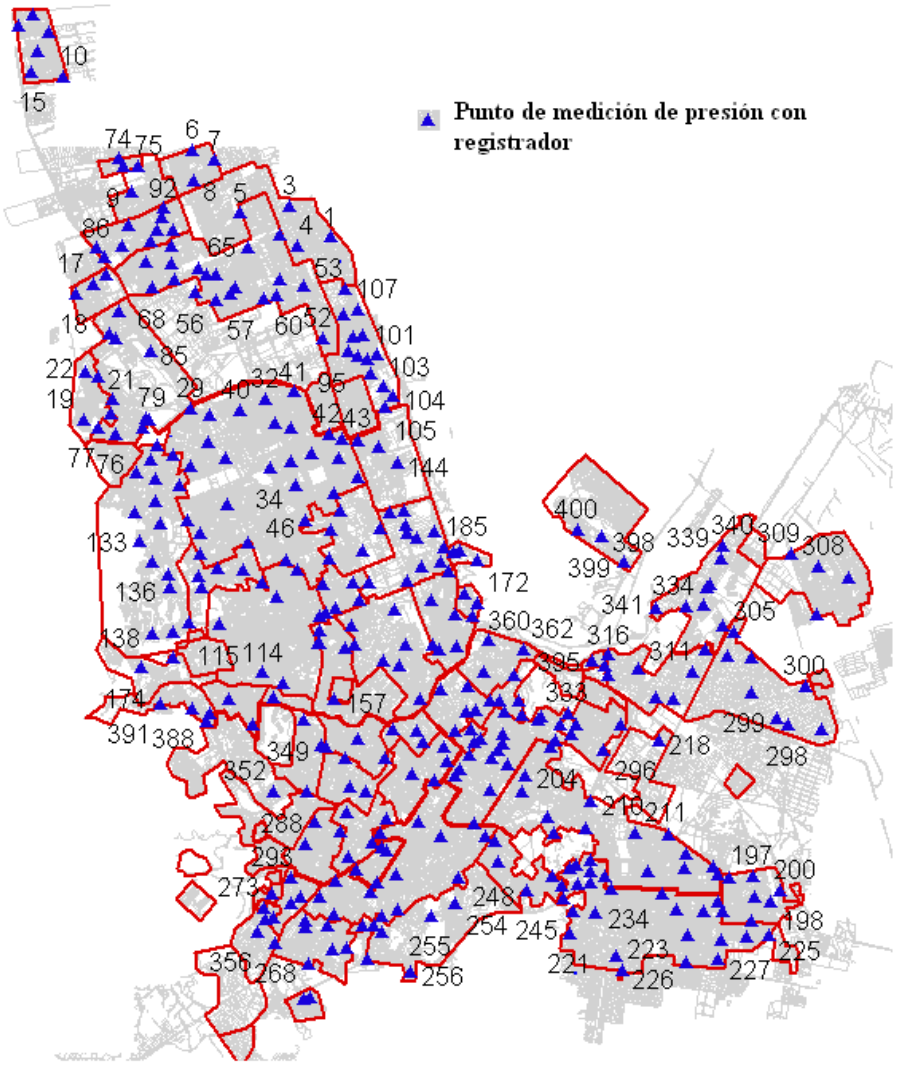


Figura 1. 7 Puntos de registro de presión en la ciudad de Chihuahua (JMAS/IMTA, 2008).

En la *Figura 1.8* se puede ver las variaciones de presión en algunos de los puntos de muestreo con suministro intermitente, estos datos sirvieron de punto de partida para

realización del presente estudio relativo al análisis del comportamiento y efectos de la envolvente de presiones que se presentan en la RDAP de la ciudad de Chihuahua.

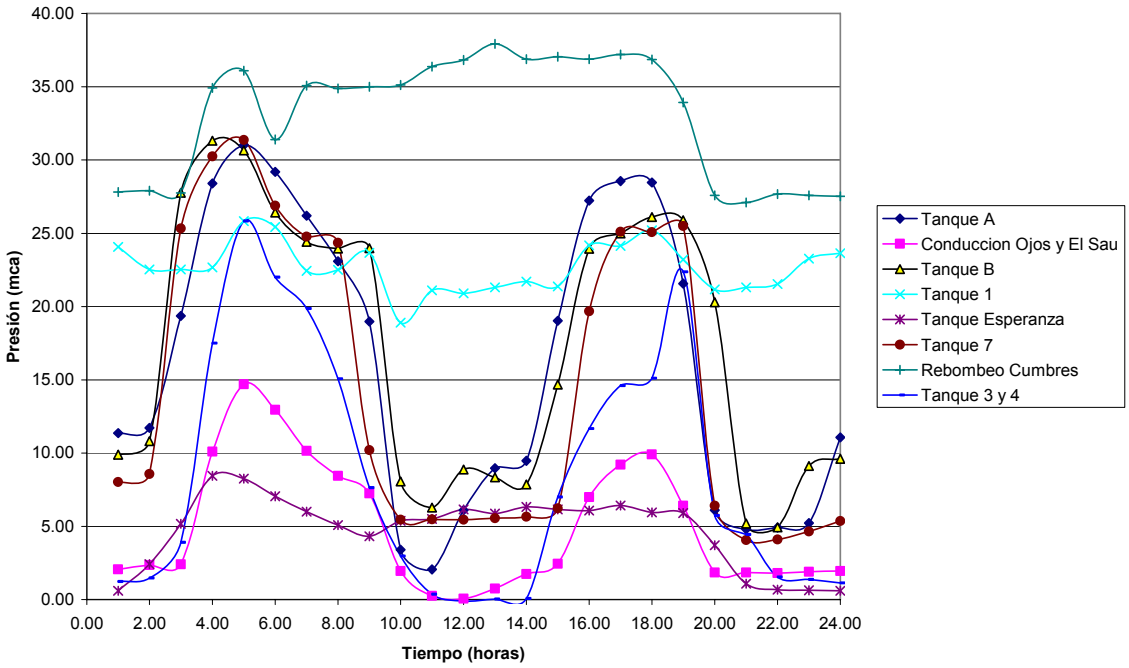


Figura 1. 8 Variación de presión promedio en zonas de influencia con suministro con horario de 5:00 a 10:00 horas y de 16:00 a 20:00 horas (JMAS/IMTA, 2008).

El objeto de estudio seleccionado tiene la característica de tener zonas con suministro continuo y otras con suministro intermitente, incluso en algunas ocasiones dentro de una misma zona hay días con agua las 24 horas y otros con tandeos; estas características peculiares son indispensables para identificar diferencias y similitudes entre los tipos de suministros y ayudarán a entender los problemas que de ellas se deriven.

1.4.1. Características generales del área de estudio.

El área de estudio se ubica en la ciudad de Chihuahua localizada en la porción central del estado de Chihuahua, en el norte de México, en las coordenadas **106º 05' 20''** longitud oeste y **28º 38' 07''** de latitud norte, a una altitud sobre el nivel del mar de **1,433 *m*** (*Figura 1.9).*

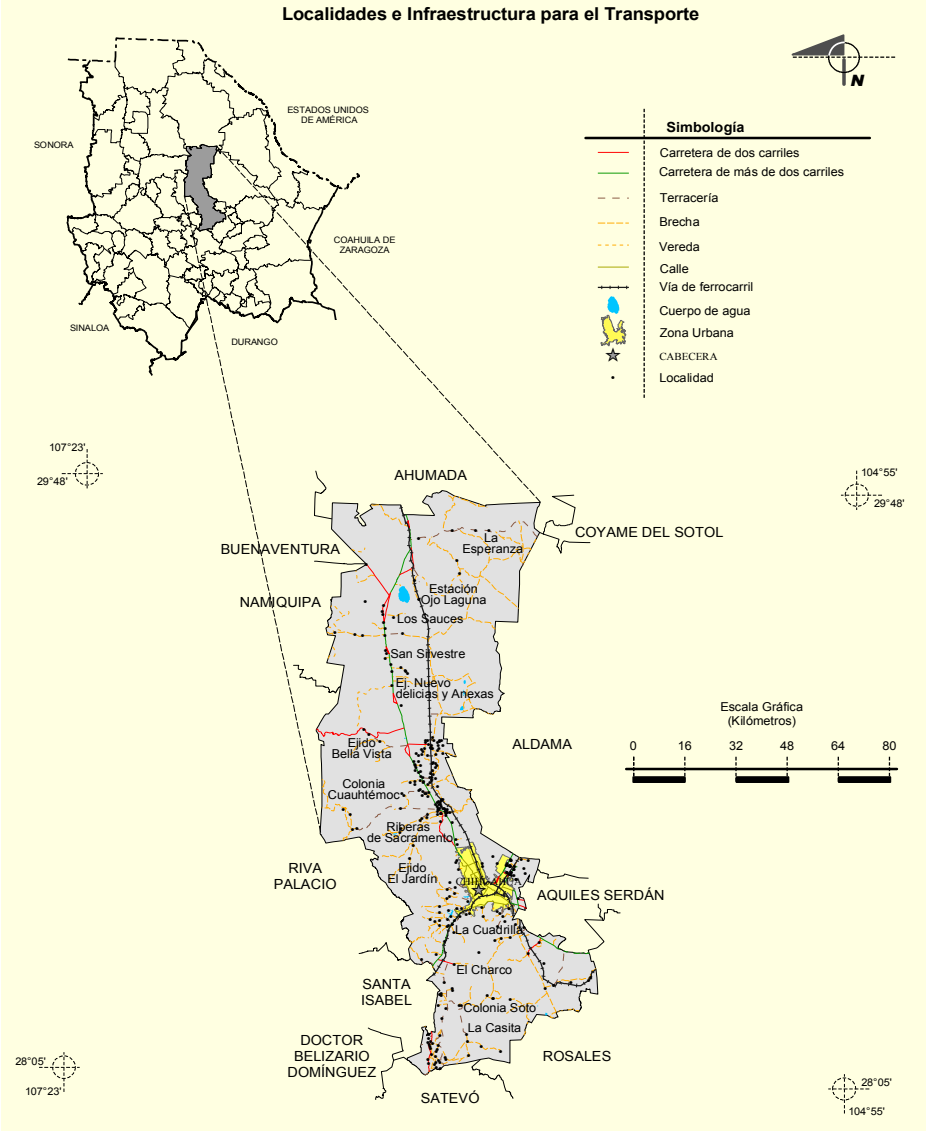


Figura 1. 9 Ubicación de la ciudad de Chihuahua, Chih., México (INEGI, 2005).

1.4.1.1. Clima

El clima de la zona es seco templado y su temperatura media anual varía entre 12.0º y 18.0^{o}C, la temperatura media del mes más frío entre -3.0º y 18.0^{o}C y la del mes más caliente es mayor de 18.0^{o}C, la precipitación total anual va de 300 a 500 *mm* de acuerdo a la clasificación oficial (INEGI, 2005).

1.4.1.2. Uso de suelo y vegetación

La vegetación que se desarrolla en estas condiciones es sobre todo pastizal natural, pero también hay algunas zonas de matorral desértico micrófito y en las sierras bosque de encino. Los meses con humedad suficiente para el crecimiento de vegetación son julio, agosto, septiembre y diciembre. La actividad agrícola de temporal que se puede realizar es muy azarosa debido a la escasa precipitación, esto hace necesaria la aplicación de riego complementario casi todos los años para hacer florecer dicha actividad (SIGE, 2000).

1.4.1.3. Hidrología

El área en estudio se ubica principalmente sobre el acuífero Chihuahua-Sacramento en la región hidrológica 24 denominada “Río Bravo-Conchos”, dentro de las cuencas Río Conchos – Presa El Granero y Río San Pedro.

El río Chuvíscar es su corriente principal; nace en la serranía La Mesa Montosa, a 35 *km* al oeste de la ciudad de Chihuahua, denominada Sierra Azul a una altitud de 2,300 *m*. Por su alta pendiente el agua precipitada casi en su totalidad se convierte en escurrimiento

superficial con escasa infiltración, generando avenidas importantes que son almacenadas en la presa Chihuahua.

El agua superficial fue la primera fuente de abasto con que contó la ciudad y en la década de los 60's se inició con el abasto a partir del agua subterránea primero con el acuífero Chihuahua-Sacramento (ACHS), incorporándose posteriormente los acuíferos de Tabalaopa-Aldama y Sauz-Encinillas. Siendo el ACHS el de mayor relevancia hasta la fecha por su ubicación subyacente a la mancha urbana y donde se ubican el 70% de los aprovechamientos de abasto de agua potable a la ciudad.

El acuífero Chihuahua – Sacramento es del tipo libre semi-confinado, heterogéneo y anisótropo, con espesores desde 350 a 750 metros (CONAGUA (D), 2020). En la *Figura 1.10.* se muestran las curvas del nivel estático, además se identifica la dirección de flujo, así como zonas convergentes (conos de abatimiento).

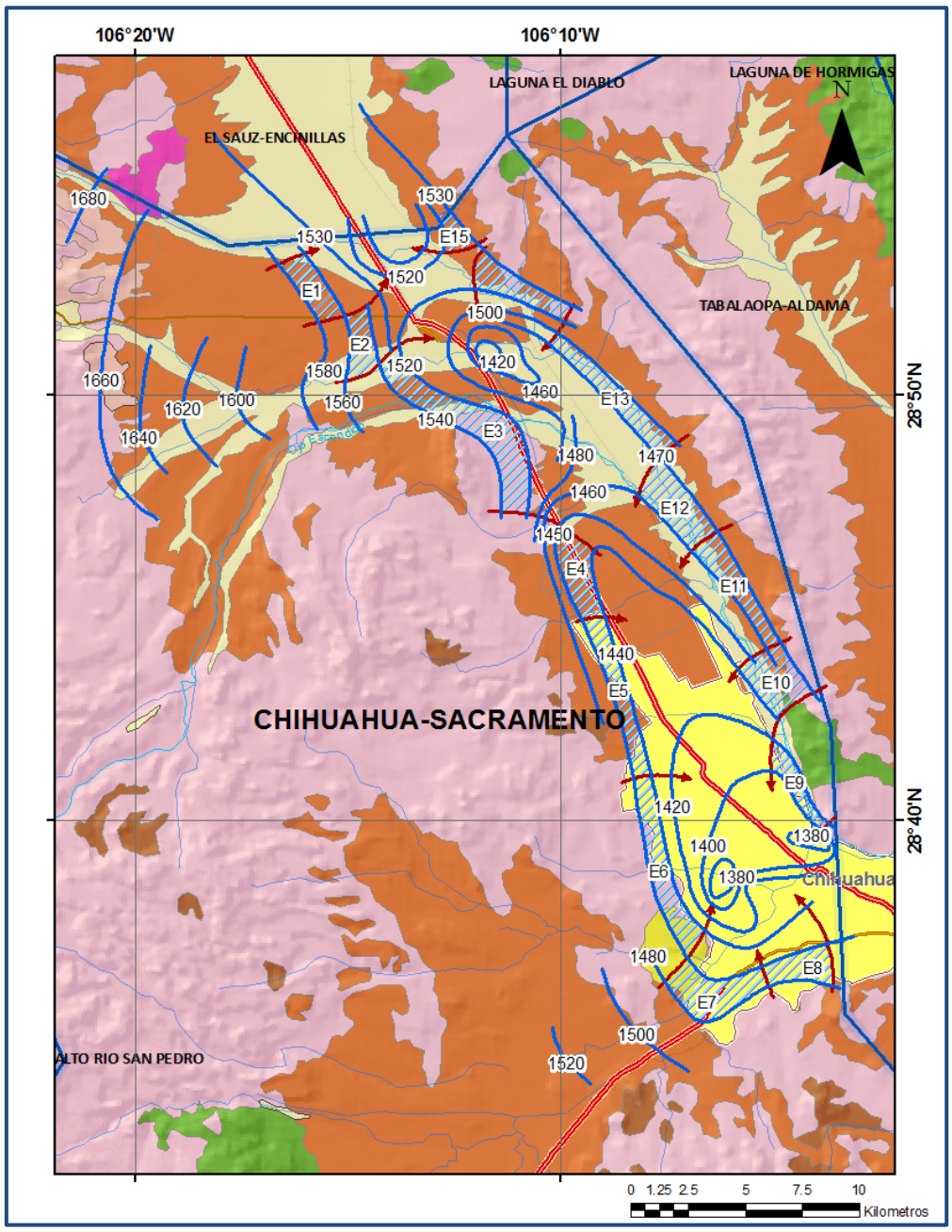


Figura 1. 10 Elevación del nivel estático en *msnm* (2009) (SUBTERRÁNEAS, 2020).

De acuerdo con los resultados, en la publicación en 2020 "Actualización de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Chihuahua-Sacramento, Estado de Chihuahua", se utilizó la información obtenida del censo más reciente realizado en 2009, en el acuífero existen un total de 602 aprovechamientos de aguas subterráneas; de los cuales 331 se

encuentran activos y los 271 restantes inactivos. Del total de obras 527 son pozos y 75 norias (CONAGUA (D), 2020).

Actualmente, en las publicaciones realizadas por la dependencia Normativa, CONAGUA, no existe disponibilidad de agua subterránea para otorgar nuevas concesiones. Por el contario su déficit es de -68.715980 hm^3 / año, los cuales se asumen se extraen a costa del almacenamiento no renovable del acuífero (CONAGUA (D), 2020).

El volumen de extracción total calculado y publicado de manera oficial es de 67.2 hm^3 anuales del acuífero Chihuahua Sacramento. Según el reporte de volumen alumbrado por el Organismo Operador para el año 2019 se tiene 64.7 hm^3 (98.9%) que se destinan al abastecimiento de agua potable, que representa un 47.7% del volumen total que extrae el Organismo de este acuífero para el abasto de la ciudad; con el 52% de los aprovechamientos activos para este uso (CONAGUA (D), 2020).

1.4.1.3. Agua potable

El agua potable suministrada a la ciudad proviene de 169 pozos profundos emplazados en los acuíferos Chihuahua-Sacramento, Tabalaopa-Aldama y Sauz-Encinillas, que suministran casi la totalidad del volumen producido (95.7% del volumen total suministrado), se cuenta con una fuente de abastecimiento superficial que es la presa Chihuahua que suministra sólo el 4.3 % del volumen de agua, aunque esta fuente de suministro se utiliza sólo en ciertos meses del año (entre junio y agosto).

El Organismo Operador encargado de prestar el servicio de agua potable, alcantarillado y saneamiento en la ciudad es la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS), la dependencia tiene la capacidad de extraer un caudal máximo de 4,700 litros por

segundo; sin embargo, por la complejidad de la red, la falta de infraestructura primaria, entre otros factores; muestra cada vez más la necesidad de implementar mayores zonas y ajustes en los horarios de servicio, que se traducen en tandeo en diversos sectores de la ciudad (*Figura 1.11 y Figura 1.12).*

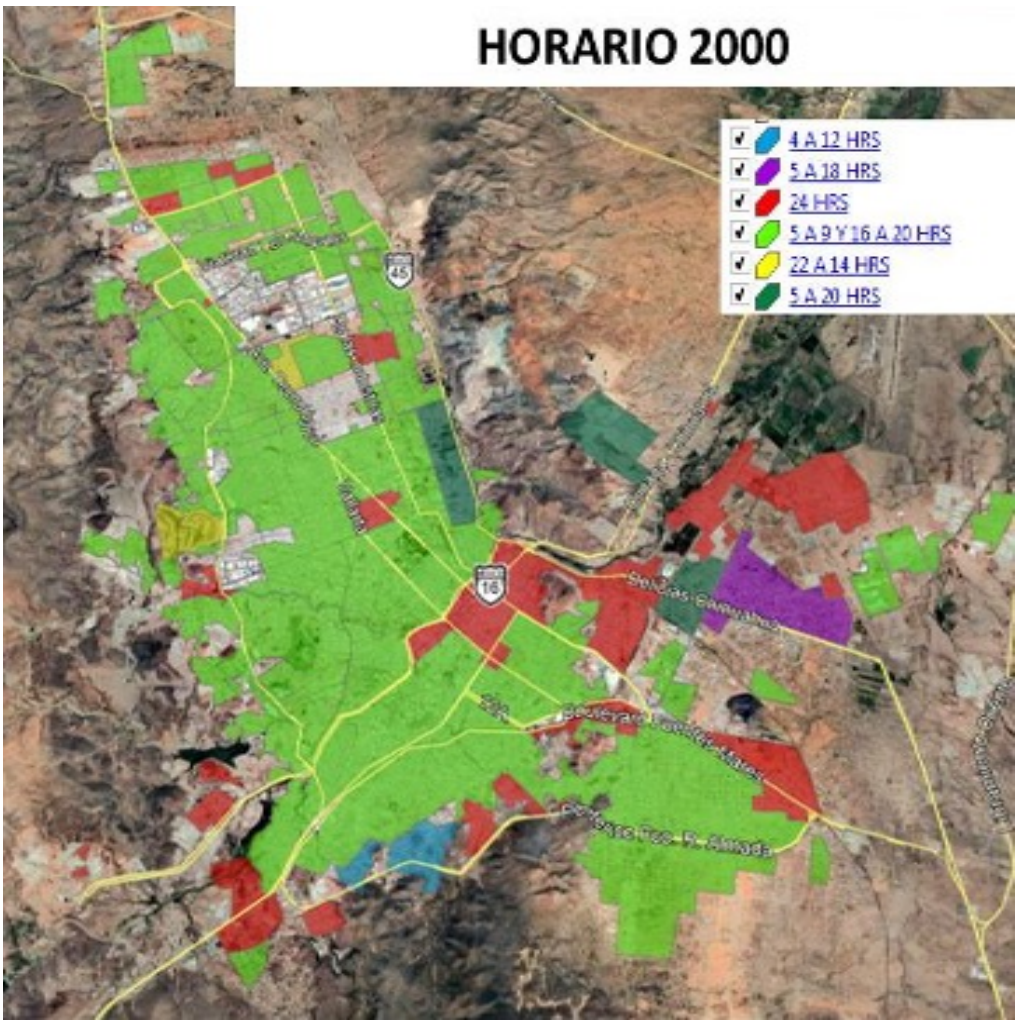


Figura 1. 11 Horarios de servicio en la ciudad de Chihuahua en el año 2000 (JMAS, 2020).

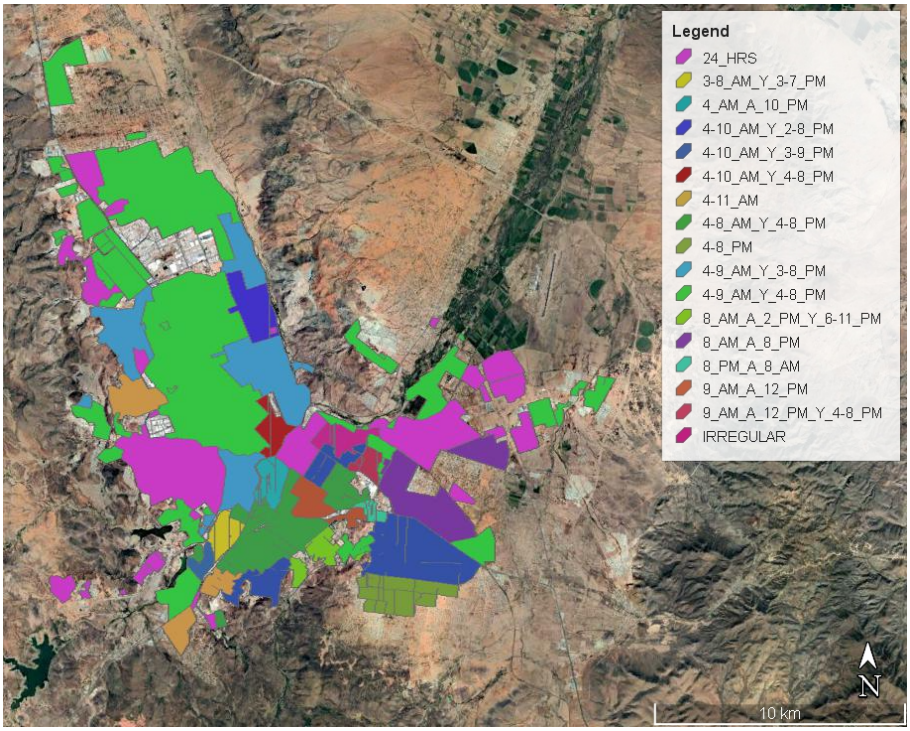


Figura 1. 12 Horarios de servicio en la ciudad de Chihuahua en el año 2018 (JMAS, 2020).

1.4.1.4. Estado de la red de distribución

Un indicador de la problemática de fugas en la red de distribución es el número de fugas por *km* de red de distribución al año (JMAS/IMTA, 2008), donde se define:

- Una red en buen estado, cuando se tiene menos de dos fallas por *km* de red al año.
- Se considera entre dos y cinco fallas por *km* de red al año se debe implementar un programa de detección y reparación de fugas.
- Cuando se tiene más de 5 fallas por *km* de red al año, se recomienda implementar un programa de sustitución o rehabilitación de la tubería.

Con base en el último diagnóstico realizado al sistema de agua potable en el 2008, se tiene que 62.32 % de la RDAP está en buen estado, un 23.24% requiere de un programa de detección y reparación de fugas y 14.44 % necesita rehabilitación.

Esta conclusión se dio considerando el indicador del número de fugas presentadas por longitud de tubería. Cabe señalar que en casi el 40% de la longitud de la red es necesario un análisis a detalle para jerarquizar la reposición de tramos de tuberías. También es visible que este problema se concentra en la parte centro-sur de la Ciudad, que es donde se tienen las líneas con mayor antigüedad, con su vida útil cumplida y es en donde se tiene mayor incertidumbre en el catastro (JMAS/IMTA, 2008).

En cuanto a los indicadores de evaluación contemplados por el Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores (PIGOO) al 2017 se presentan en la *Tabla 1.1*.

Tabla 1. 1 Indicadores de evaluación para la ciudad de Chihuahua 2017 (Elaboración propia)(PIGOO, 2020).

Indicador	Valor (2017)
Tomas con servicio continuo (%)	21.26
Padrón de usuarios (%)	100
Macromedición (%)	84.71
Micromedición (%)	92.92
Reclamaciones (Por cada mil tomas)	94.08
Usuarios con pago a tiempo (%)	48.47
Costos entre volumen producido *($/m³)*	7.08
Empleados por cada mil tomas	3.25
Empleados dedicados al control de fugas (Trabajadores/fuga)	4.83
Dotación (*l/h/d*)	424.72
Eficiencia física 1 (%)	49.69

Eficiencia comercial (%)	94.04
Eficiencia de cobro (%)	94.04
Eficiencia global (%)	50.96
Consumo (*l/h/d*)	211.06
Horas con servicio en zonas de tandeo	10.5
Usuarios abastecidos con pipas (%)	13.87
Cobertura de agua potable (%)	96
Pérdidas por toma (m^3/*toma*)	198.99
Pérdidas por longitud de red (m^3/*km*)	17

1.5 Justificación

El suministro de agua de manera intermitente es un tipo de servicio que rara vez se presenta en países desarrollados, pero es muy común en muchos países en desarrollo (Totsuka, Trifunovic, & Vairava-Moorthy, 2004) (Lee & Schwab, 2005), entre ellos México, en muchas de sus ciudades.

La presencia del suministro intermitente en una RDAP puede ser analizado desde dos puntos de vista:

1. El primero asume que las fuentes de abastecimiento tienen la suficiente cantidad de agua, por lo cual la "necesidad" de un horario de servicio se atribuye a la falla en la administración del líquido, la cual puede deberse a uno o a la suma de los siguientes factores: una condición de inadecuadas estructuras tarifarias, desperfectos en los sistemas de conducción o distribución que implican pérdidas físicas del líquido, deficiente medición y

operación de la infraestructura, alto consumo de agua asociado a la falta de cultura por el cuidado del agua por parte de los usuarios.

2. Cantidad de agua insuficiente: la cual se mide según los hidrólogos por la relación entre agua/población (WWAP, 2012), ya sea por condición de escasez física del agua o por el elevado costo (escasez económica) en que se incurriría para suministrar la cantidad necesaria para proveer el servicio las 24 horas (Totsuka, Trifunovic, & Vairava-Moorthy, 2004).

La escasez física del recurso hídrico da como origen del suministro intermitente y como efecto la escasez económica, en pocas ocasiones son causa y efecto entremezcladas (WWAP, 2012), la *Figura 1.13* muestra que, en México, aún no se tiene una clarificación, donde se da la interacción de la escasez física con la económica; por ejemplo, en Cd. Juárez, Chih., donde se tiene casi el doble de población que en Chihuahua, Chih., además de una dotación de 341.32 *l/h/día* (menor a la de Chihuahua 424.72 *l/h/día* (PIGOO, 2020)) y una mayor limitación física del recurso hídrico según las fuentes de abastecimiento existentes para el uso público urbano, no se requiere el tandeo (Cervera Gómez, 2007); sin embargo, en Chihuahua, el horario de servicio se implementó hace más de 40 años, lo que hace evidente que las pérdidas de agua y la falta de planeación/construcción de infraestructura de cabeza son el factor clave en la implementación de un servicio intermitente.

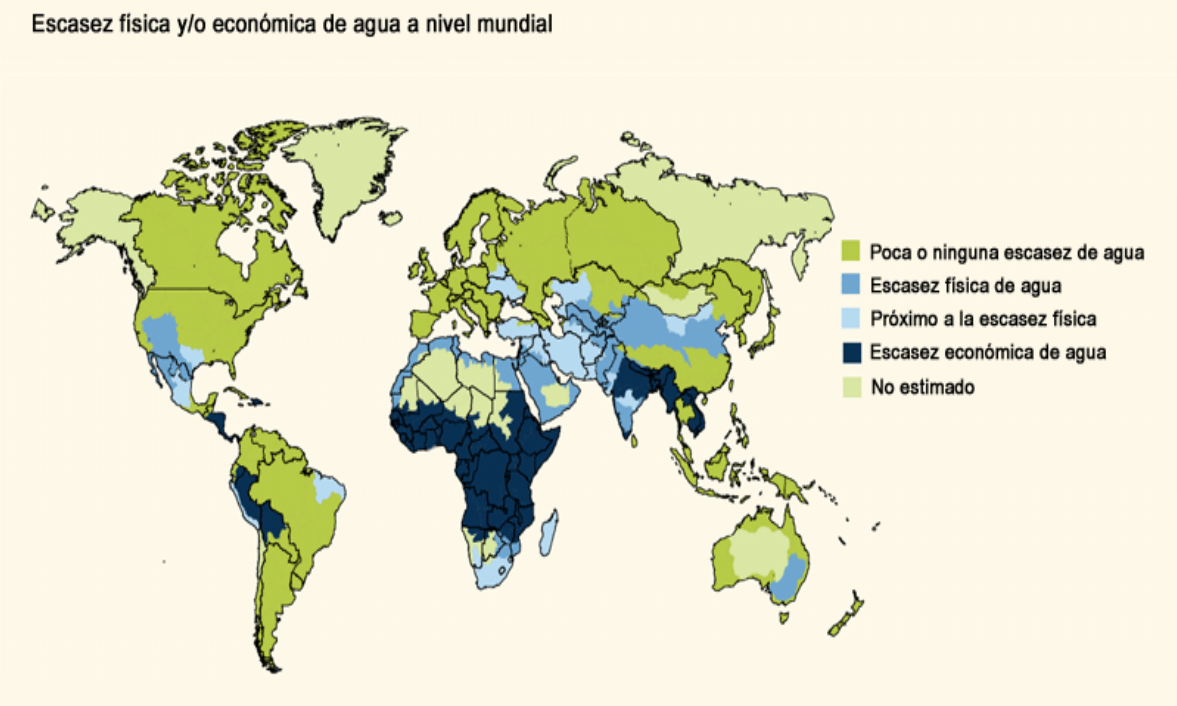


Figura 1. 13 Escasez física y/o económica de agua a nivel mundial (WWAP, 2012).

El incremento en la tasa de desarrollo urbano y semiurbano, la falta de inversión en infraestructura en la RDA, así como una menor disponibilidad de los recursos hídricos, hacen aún más notorio este problema (Van der Bruggen, Borghgraef, & Vinckier, 2010).

Por otro lado, la infraestructura hidráulica con la que cuentan varias de las ciudades en el mundo, está al límite de su vida útil, ocasionando constantes fugas y pérdidas de agua, contribuyendo al aumento en la extracción para cubrir los volúmenes faltantes (Goulet, Coutu, & Smith, 2013), las pérdidas en las redes de distribución presentan rangos entre 10 y 70% del total del volumen (Xu, Liu, Chen, & Li, 2014).

En el informe de Indicadores de Gestión Prioritarios en Organismos Operadores, es posible apreciar que de un total de 76 ciudades de México, al 2016 se tiene un promedio de 11.28 horas de suministro de agua potable al día (*Figura 1.14*) y el rango de pérdidas en la red oscila entre 40 y 45 % (Saavedra, Rodríguez, & Hansen, 2017).



Figura 1. 14 Horas promedio a nivel nacional con servicio de agua potable (PIGOO, 2020).

El suministro de agua de manera intermitente es impredecible en sus efectos y difícil o casi imposible de evaluar, para una satisfacción de la demanda del usuario, por lo que buscar cambiar a un suministro continuo es la mejor solución, pero es necesario considerar que conforme se va entremezclando más la escasez física y económica el sistema se va haciendo más complejo, por lo cual no siempre es una opción viable a corto plazo y fácil de revertir.

La intermitencia en la distribución de agua origina una serie de problemas como:

- Posible distribución inequitativa del agua entre los usuarios.
- Presiones inferiores o superiores a las mínimas y máximas deseables.

- Ineficiencia energética debida entre varios factores como son una redistribución de volúmenes no equilibrada, altas presiones, los equipos de bombeo no operan de manera óptima.
- Al existir presiones negativas o bajas en el vaciado periódico de las tuberías, es fácil incurrir en la contaminación por agua del nivel freático o aguas residuales por fisura o uniones en tuberías (Totsuka, Trifunovic, & Vairava-Moorthy, 2004).
- La administración, operación y mantenimiento del sistema de agua potable con suministro intermitente es más compleja y costosa, según un análisis realizado en Perú, el número de empleados por cada mil conexiones de agua se incrementa en proporción inversa a las horas de servicio (Yepes & Ringskogk, 2001).
- El grado de satisfacción de los usuarios a los cuales no se les proporciona el servicio de manera adecuada, genera un descontento generalizado el cual repercute en las tareas de cobro.
- Durante los primeros minutos de suministro, se produce el lavado inicial de la red, en este periodo la calidad del agua es baja (Kumpel & Nelson, 2013).
- El esquema de intermitencia exige grandes cantidades de almacenamiento (Dahasahasra, 2007), además de la existencia ineludible de depósitos domiciliarios, los cuales están propensos a sufrir contaminación del agua; según un análisis de la calidad del agua en dichos depósitos realizado en Estambul, Turquía, cerca del 24% de las muestras resultaron tener presencia de *coliformes* (Yepes & Ringskogk, 2001). Además, en la mayoría de los casos el volumen almacenado en los depósitos supera el consumo demandado por los usuarios, por lo que se ocupa más agua de la realmente es necesaria.
- Las fallas en la infraestructura hidráulica son más frecuentes y se ven reflejadas con fugas de agua; para ello es importante mencionar que las válvulas que se utilizan para

realizar los tandeos sufren un mayor desgaste debido a la apertura y cierre constante de las mismas (Dahasahasra, 2007).

- Las tuberías en una red que presenta intermitencia se pueden llegar a vaciar, parcial o completamente, lo que ocasiona espacios vacíos que pueden ser ocupados por el aire; el cual a medida que es restablecido el suministro puede producir una sobrepresión debido a la rápida desaceleración del líquido en el instante en que el aire es totalmente expulsado (Cabrera-Béjar & Tzatchkov, 2012). En algunos casos al no existir mecanismos para el desalojo del aire este puede causar un estrangulamiento del flujo o propiciar picos elevados de presión. Está demostrado que el índice de roturas puede subir hasta 10 veces en correspondencia de picos elevados de sobrepresiones (Tavera, 2013)(*Figura 1.15).*
- Por otra parte, tenemos el caso inverso en el que al momento del vaciado de la tubería esta pueda llegar a ser sometida a presiones negativas generando un fuerte estrés en las paredes de la tubería que puede originar roturas o desperfectos en uniones, conexiones y otras piezas especiales y consecuentemente la presencia de fugas.
- La presencia de aire en las tuberías puede causar inexactitud en las lecturas de los medidores.

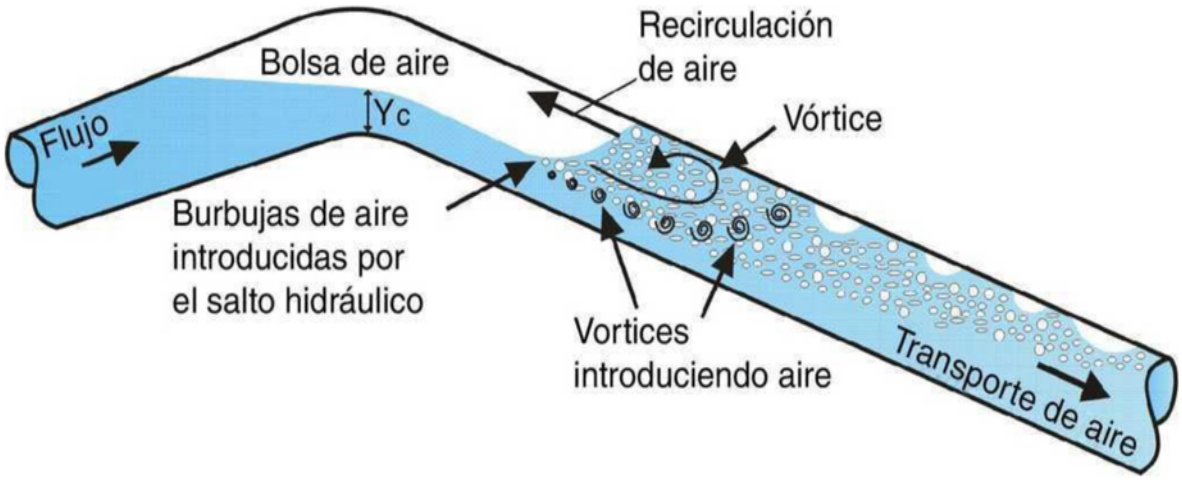


Figura 1. 15 Tubería con perfil accidentado y bolsa de aire estacionaria (Pozos-Estrada, Fuentes, Sánchez, Rodal, & de Luna, 2017)

Desde siempre los sistemas de agua potable se han diseñado y analizado como sistemas de suministro continuo, pero cuando el servicio es intermitente, es más complejo analizar con exactitud ese comportamiento.

1.5.1. Motivación

Las redes de distribución de agua potable con suministro intermitente han adquirido gran relevancia y presencia global tanto para los organismos operadores como para el usuario (*Figura 1.16*). El motivo principal de este estudio son los múltiples beneficios que se pueden obtener con un correcto manejo y gestión de este tipo de sistemas, con lo que se puede lograr: reducción de caudal fugado, aumento de la calidad de servicio ofrecido a usuarios, ahorro de agua inyectada al sistema (favorable en casos de escasez de disponibilidad de agua), aumento de la vida útil de infraestructura por disminución de roturas y deterioro, ahorro energético, entre otros beneficios (Fantozzi & Lambert, 2010) . Para ello es indispensable primero conocer el comportamiento del agua en sistemas intermitentes, priorizando en la caracterización de la envolvente de presiones, ya que es el común denominador con efecto en todas las variables del sistema.



Figura 1. 16 Número de publicaciones científicas por año referentes a redes con suministro intermitente (IWS) (Mokssit, De Gouvello, Chazerain, Figuères, & Tassin, 2018)

Independientemente de la naturaleza de la fuga, se sabe que existe una relación directa entre caudal fugado y la presión, que se puede resumir como: a mayor presión en la red mayor será el caudal fugado, pero en este tipo de sistemas existe una variación en la presión y que en ocasiones llega a tener valores negativos, es por eso que, una caracterización de la envolvente de presiones permitirá dimensionar la magnitud y la correlación existente que tiene este tipo de servicio con la generación de fugas.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Principios básicos

Para el análisis de una RDAP es necesario el estudio de la mecánica de fluidos, los cuales se basan en la mecánica del medio continuo, en la que se aplican principios básicos o leyes de la física como: conservación de la materia (principio de continuidad), la segunda ley de Newton (impulso y cantidad de movimiento) y conservación de la energía (primera ley de la termodinámica) (Sotelo Ávila, 1996).

2.1.1. Conservación de la materia (principio de continuidad)

La ecuación de continuidad se deriva del principio de conservación de la masa o de la materia, e implica que en un flujo permanente e incompresible la masa de fluido que pasa por cualquier sección transversal del flujo por unidad de tiempo es constante, es decir:

$$\rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2 \qquad \text{Ecuación 1}$$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \qquad \text{Ecuación 2}$$

$$Q_1 = Q_2 \qquad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

Q= caudal (m^3/s)

ρ = densidad del fluido (kg/m^3)

V= velocidad media en las secciones 1 y 2 (m/s)

A= área de la sección transversal en los puntos 1 y 2 (m^2)

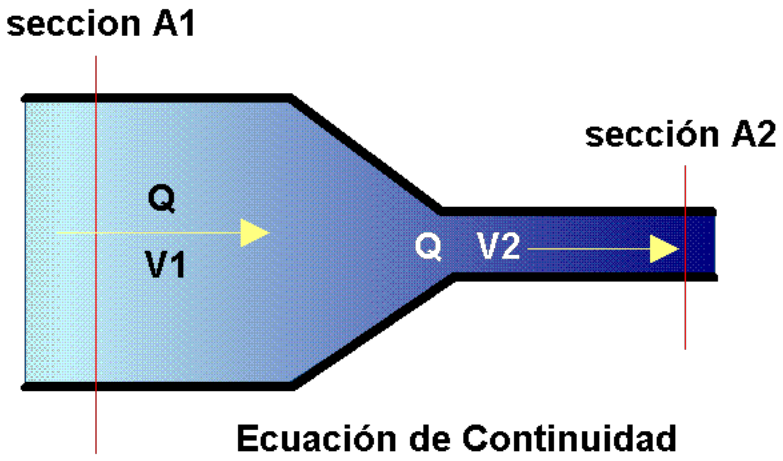


Figura 2. 1 . Principio de continuidad (DCA.ULPGC, 2018)

2.1.2. Conservación de la cantidad de movimiento

Se deriva de la segunda ley de Newton. La suma vectorial de todas las fuerzas F, que actúan sobre una masa de fluido es igual al producto de la densidad del flujo, por el caudal y la variación de velocidad que existe entre los puntos escogidos.

$$\sum_{i=1}^{n} F_i = \rho Q \Delta V \qquad \text{Ecuación 4}$$

en donde:

F = fuerza externa (N)

ρ = densidad del fluido (kg/m^3)

Q = caudal (m^3/s)

ΔV = variación de velocidad (m/s)

$\rho * Q * \Delta V$ = cambio de cantidad de movimiento por unidad de tiempo entre dos puntos.

2.1.3. Conservación de la energía

La energía que entra en un sistema es igual a la que sale, se debe de tomar en cuenta que en todo sistema se pueden generar pérdidas locales y por fricción.

$$Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + h_f \qquad \text{Ecuación 5}$$

$$h_f = \frac{fl}{D}\frac{V^2}{2g} \qquad \text{Ecuación 6}$$

Siendo:

h_f = pérdidas por fricción en metros.

f = El factor de fricción para la ecuación de Darcy-Weisbach, el cual puede ser calculado con la ecuación de Coolebrook-White para cualquier valor de *Re*.

l= La longitud de la línea de la conducción en metros.

z= La carga de posición en el punto dado en metros.

$\frac{V^2}{2g}$= La carga de velocidad en metros.

$\frac{P}{\rho g}$= La carga de presión en metros.

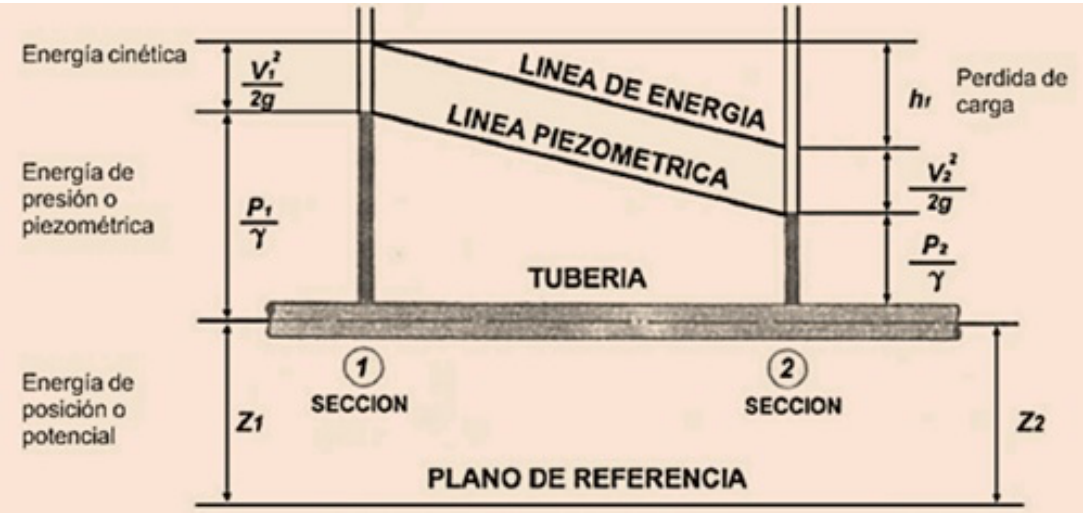


Figura 2. 2. Pérdida de energía en una conducción a presión (Monge R., 2017).

2.1.4. Tipos de flujo

El flujo del agua puede ser permanente o no permanente y uniforme o no uniforme. Es flujo permanente si la velocidad media en una sección se mantiene constante con el tiempo $^{\partial v}/_{\partial t} = 0$. Por otro lado es flujo uniforme si la velocidad media permanece constante en cualquier sección $^{\partial v}/_{\partial x} = 0$ (Giles, Evett, & Liu, 1994).

El movimiento de un fluido usualmente es extremadamente complejo. Un flujo es estacionario si la velocidad, presión y sección de la corriente, aun pudiendo variar de un punto a otro, no varían con el tiempo. Pero si las condiciones varían con el tiempo, se dice que el flujo es transitorio o variable (Arias & Zabala, 2013).

Existen tres tipos de transitorios hidráulicos:

1) Transitorio muy lento o cuasi-estático (en referencia a la variable del tiempo), es el cual se define que las variables del flujo varían de manera muy lenta con el tiempo (con intervalos de varias horas y hasta de varios días). Como ejemplo más significativo se tiene el comportamiento normal de una RDAP a presión, en donde la aplicación sucesiva del modelo estático permite su análisis.

2) Transitorio lento (en referencia a la variación de masa de la materia transportada), que se relaciona ante todo con el movimiento de la masa de agua en la conducción, semejante a la oscilación de dos vasos comunicantes. Los cambios en las variables en este tipo de transitorio son significativos, con periodos de varios minutos a varias horas. Este tipo de fenómeno es analizado bajo la teoría de la *columna rígida* donde se asume que el fluido es incompresible y que la conducción es una frontera rígida.

3) Transitorio rápido o golpe de ariete, es ocasionado por variaciones repentinas o bruscas en la velocidad del flujo dentro de la tubería, como consecuencia de paros repentinos

de equipos de bombeo o cierres rápidos de válvulas. Estas variaciones rápidas se acompañan de cambios bruscos en la presión (sobrepresiones), generando ondas en periodos muy cortos (segundos o fracciones de segundo)(CONAGUA (B), 2015) (Sañudo V., 2017).

Una línea de conducción de agua potable al igual que una RDAP están diseñadas para operar en condiciones de flujo permanente, es decir que los gastos que circulan en las tuberías no cambien con el tiempo (red estática) (CONAGUA, 2015), sin embargo, en líneas de conducción se analiza de manera imprescindible los transitorios que pudieran generarse, lo cual en una red de distribución normalmente no se lleva a cabo por considerarse que los transitorios son muy lentos o inexistentes.

En el caso de una RDAP con suministro intermitente, son inevitables los regímenes de transición de un flujo permanente a otro, debido a que funciona a presión, se suministran gastos variables en el tiempo (por ejemplo, para proporcionar más caudal a usuarios que lo solicitan a cierto momento del día), lo que corresponde a una red con flujo no permanente o una red dinámica (CONAGUA, 2015), en donde las tuberías tienen que ser llenadas y vaciadas total o parcialmente, generando fenómenos transitorios de lentos a rápidos, que pueden producir sobrepresiones o depresiones fuertes, que originen una falla en el sistema, o que reduzcan la vida útil por fatiga de los materiales. Debido al poco o nulo estudio de las RDAP con suministro intermitente no se conoce con certeza la magnitud y el tipo de transitorios hidráulicos que se pudieran presentar.

2.2 Taxonomía de una red de distribución agua potable con suministro intermitente (IWS).

El término suministro de agua intermitente (IWS por sus siglas en inglés) se refiere a las redes de distribución que entregan agua a los clientes menos de 24 horas al día (Taylor, Slocum, & Whittle, Demand Satisfaction as a Framework for Understanding Intermittent Water Supply Systems, 2019). Las RDAP con IWS a menudo se usan para reducir el consumo de agua en áreas afectadas por la sequía, pero también son el modo de operación estándar en los sistemas que atienden a aproximadamente mil millones de personas en todo el mundo (Bivins, Sumner, Kumpel, G., & O., 2017) (Laspidou & Spyropoulou, 2017). El agua distribuida por IWS se divide de manera desigual entre los clientes (De Marchis, Freni, & Milici, 2016) . La entrada de agua a IWS es a menudo potable, pero su calidad se degrada sustancialmente durante la distribución intermitente (Kumpel & Nelson, , 2017).

En una RDAP con suministro intermitente se presentan diversas condiciones de flujo, en varias etapas que se comportan de manera cíclica cada día o varias veces al día, pero cada ciclo (*duty cycle*) presenta características diversas de magnitud y tiempo, lo cual dificulta su estudio. En la *Figura 2.3* se ejemplifican las cuatro etapas que se pueden presentar en una red con suministro intermitente, en cada una de ellas el fluido se comporta de una manera particular y diferente, requiriendo un estudio independiente por etapa.

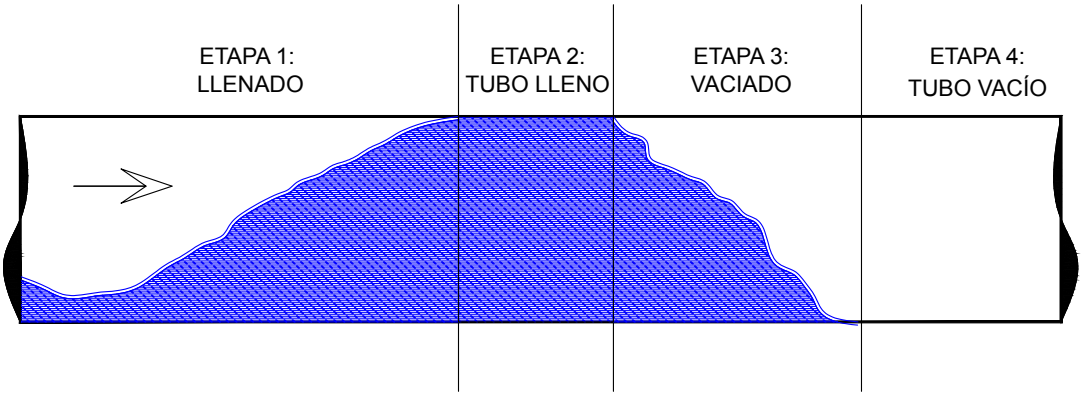


Figura 2. 3. Etapas de flujo en una red de agua potable con suministro intermitente (Elaboración propia).

Durante el llenado de la tubería (etapa 1) el fluido se encuentra a presión atmosférica, funcionando como un canal a superficie libre; en la etapa 2, la tubería se encuentra llena y el fluido ejerce presión sobre las paredes de la misma, durante esta etapa se puede llegar a presentar un flujo estacionario, sin embargo, al momento de iniciar el vaciado de la tubería (etapa 3), el flujo se convierte en transitorio y las condiciones cambian volviendo a operar como canal con sección circular, durante esta transición se pueden presentar depresiones (*Figura 2.4*) debido a que con el transitorio se puede generar un vacío (presión menor que la atmosférica) que se manifestará como una presión sobre las paredes de la tubería hacia adentro; finalmente se presenta la etapa 4 en la cual la tubería se encuentra vacía de agua pero puede aparecer otro fluido como lo es el aire.

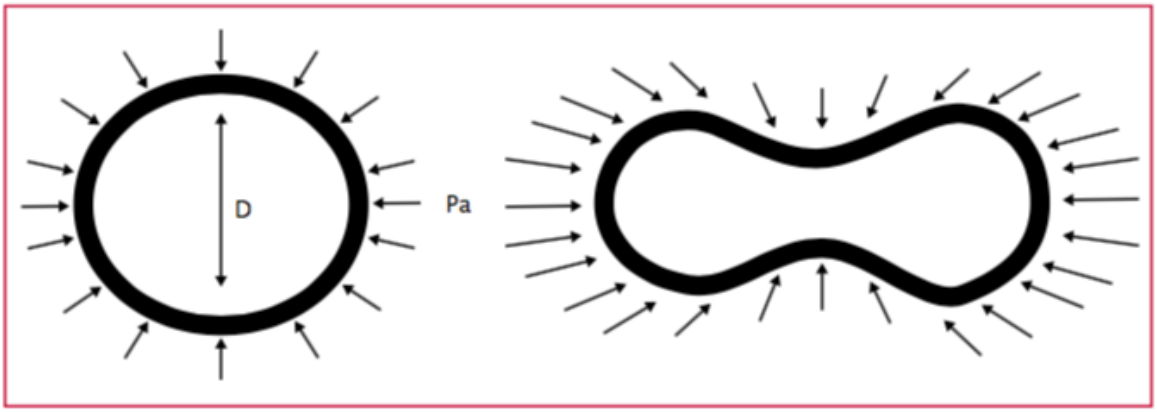


Figura 2. 4 Tubería en depresión (CONAGUA, 2015).

El caudal o gasto dentro de una RDAP con suministro intermitente, es variable y se dificulta su cuantificación tanto en: tiempo de permanencia con valores de presiones y velocidades; debido a las constantes variaciones en las velocidades del flujo y en el porcentaje del área ocupada por el fluido dentro de la tubería, como se muestra en la *Figura 2.5*, si tenemos en cuenta que el gasto está dado por $Q = (Velocidad\ del\ flujo\ (V))(Área\ de\ la\ sección\ (A))$, y que en las etapa 1, 3 y 4 estos valores son desconocidos.

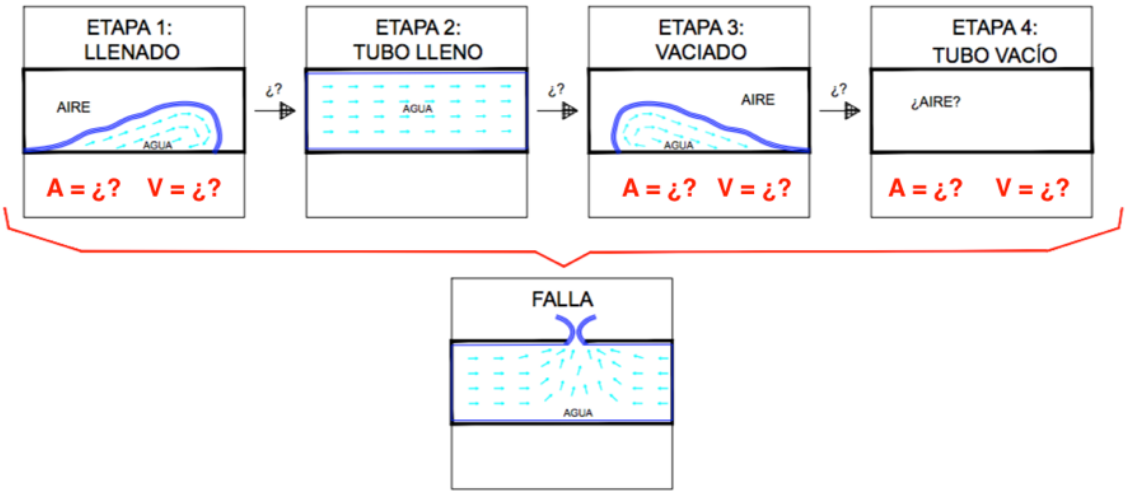


Figura 2. 5. Flujo del volumen de agua a través de las diferentes etapas en una RDAP con suministro intermitente (Elaboración propia).

Las redes con suministro intermitente son diversas y se pueden clasificar de varias maneras:

- **Por su previsibilidad** (Galaitsi, y otros, 2016).
  1. Previsible. - los consumidores conocen el volumen de agua que van a recibir, así como el horario de entrega.
  2. Irregular. - se conoce el volumen de agua, pero el horario es incierto.
  3. No previsible. - tanto el volumen, como el horario son inciertos.
- **Mediante sus métodos de control** (Erickson, Smith, Goodridge, & Nelson, 2017)
  1. Alimentación por gravedad. - cuando una red con IWS termina de entregar agua una vez que el tanque de almacenamiento o la fuente se cierra o se queda vacía.
  2. Alimentación por bombeo. - cuando una red con IWS termina de entregar agua una vez que el equipo de bombeo se apaga (intencionalmente o por la falta de energía) o cuando el depósito de agua de la bomba se acaba.
  3. Operación mediante válvulas. - cuando las diferentes sub-redes del sistema intermitente entregan agua de manera rotativa a los diferentes sectores mediante la operación de válvulas.
- **Por sus causas** (Totsuka, Trifunovic, & Vairava-Moorthy, 2004).

1. Escasez técnica. - una red con IWS se puede convertir en continua mediante la reparación de fugas y de estrategias de operación.
2. Escasez económica. - lo que ocasiona el IWS es la falta de capacidad en la potabilización o en la distribución para "optimizar" el tiempo que se tiene para la entrega a los distintos sectores (ej. Si se aumentan los diámetros de las tuberías se elimina ese factor).

Escasez absoluta. - cuando los consumidores demandan más recurso del que se encuentra disponible.

2.3 Modelación de una red de distribución

Las RDAP son parte fundamental en el bienestar y desarrollo de la población, desgraciadamente en ocasiones se presentan problemas de escasez y mala calidad del agua, distribución irregular, entre otros; propiciando el desarrollo de diversas técnicas para resolver esos problemas y llevando a la aplicación de modelos de simulación matemática.

Actualmente estos modelos son la base para el cálculo hidráulico y de calidad del agua en diferentes estados en la RDAP (CONAGUA (C), 2015). En la *Figura 2.6* se muestran los componentes de un modelo para una RDAP, los cuales toman como punto de partida el hecho de que existirá un servicio de agua continuo, en donde si el usuario necesita agua, sólo basta con que abra la llave y reciba el líquido que necesita, operando como un modelo "dependiente de la demanda". En su contraparte cuando el servicio es intermitente solo hay agua en periodos limitados de tiempo a lo que se le conoce como "dependiente del suministro" (Cabrera-Béjar & Tzatchkov, 2012).

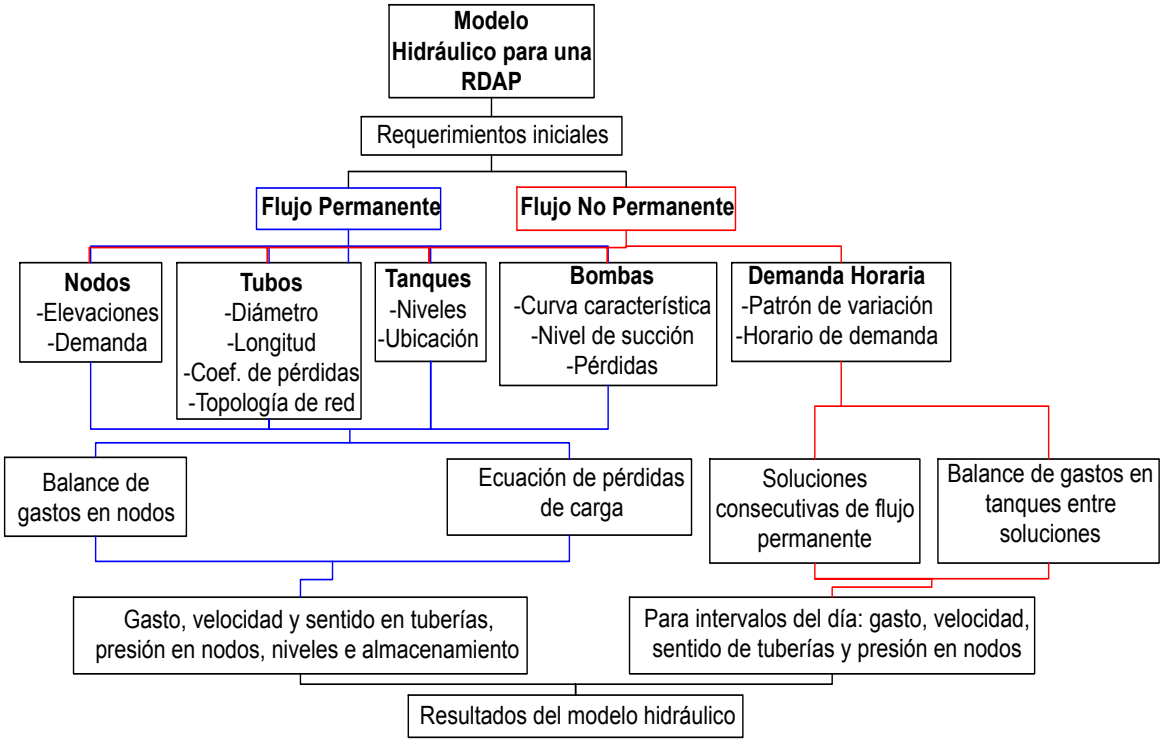


Figura 2. 6. Modelo Hidráulico para una Red de Distribución de Agua Potable (Elaboración propia).

Debido a las características particulares de una RDAP que opera con suministro intermitente, no es posible su modelación utilizando modelos convencionales, ya que no toman en cuenta los constantes vaciados y llenados de las tuberías, así como los momentos en los que solo hay presencia de aire, aun no existen muchos estudios documentados sobre esta problemática, mucho menos softwares que trabajen con estas condiciones.

Es un hecho que cualquier simulación, es tan efectiva como la calidad y cantidad de información de campo disponible, sin embargo, para un IWS la cantidad de variables y los puntos de monitoreo necesarios hacen más compleja la obtención de datos.

2.3.1 Métodos actuales para modelar redes con suministro intermitente

En simulaciones con flujo de agua las 24 horas del día, los consumidores demandan y reciben una cantidad de agua que varía con el tiempo; dicha demanda se emplea como condición de frontera en los modelos hidráulicos (Tanyimboh & Templeman, 2010). En un sistema con suministro intermitente cuando la presión es baja o ausente (ej. durante la etapa de no suministro) los consumidores no pueden recibir el agua que ellos demandan de la red. Esos usuarios recurren a almacenar agua en sus hogares, modificando el comportamiento del sistema (Abu-Madi & Trifunovic, 2013). Sin importar las diferencias entre los sistemas continuos e intermitentes, al momento de diseñar o modelar una red, el estándar en la industria es modelar IWS como si fuera continuo, pretendiendo que pronto va a operar de manera continua (Vairavamoorthy & Elango, 2002).

Para modelar los efectos de las presiones bajas o nulas, varios recurren a la inclusión de la demanda dependiente de la presión (PDD por sus siglas en inglés) en simulaciones hidráulicas de IWS (referencia). En su forma más simple los modelos PDD, el flujo a cada consumidor es modelado como salida a través de un orificio, lo cual aumenta con la presión. Esta PDD escenifica el comportamiento de los usuarios que dejan sus llaves abiertas y aquellos con depósitos de almacenamiento domiciliarios que no se han llenado antes de que culmine la etapa de suministro (James Taylor, 2018). Los efectos de los depósitos domiciliarios pueden ser modelados incluyendo pequeños tanques en la simulación hidráulica, estos se llenan considerándolos como dependientes de la presión (*PDD*), una vez lleno el depósito los consumidores obtienen agua del almacenamiento en un volumen dependiente de la demanda (*VDD*) (Macke & Batterman, 2001).

El comportamiento hidráulico de un modelo dependiente de la presión es muy diferente de un modelo dependiente de la demanda. Las tuberías en RDAP con suministro continuo siempre están llenas de agua y con IWS pueden estar vacías en diversos lapsos de tiempo a lo largo del día y hay que considerar que el llenado y vaciado no pueden ser modelados como dependientes de la demanda. Muchas redes son diseñadas basándose en suministro continuo, pero son operadas como sistemas intermitentes, propiciando una gran disparidad entre la modelación y operación real del sistema (Cabrera-Béjar & Tzatchkov, 2012) .

Actualmente no existen modelos públicamente disponibles para simular una RDAP con suministro intermitente, si bien varios investigadores como: Vairavamoorthy (2002), Elango (2002), Cabrera-Béjar (2012), Tzatchkov (2012), De Marchis (2016) y James Taylor (2019) han propuesto diversos acercamientos, no hay ejemplos debidamente calibrados o validados en campo y se centran principalmente en aspectos académicos.

2.4 Fugas

Una fuga es una salida de agua no controlada en cualquiera de los componentes del sistema de distribución de agua potable (*Figura 2.7*); con mayor frecuencia ocurren en uniones de tuberías, codos, roturas de conductos y válvulas y que, por lo tanto, no es aprovechada para ningún uso. Dependiendo de su magnitud, se puede medir en litros por segundo (*l/s*) o en litros por minuto (*l/min*) (Romero Chapa, 2013).

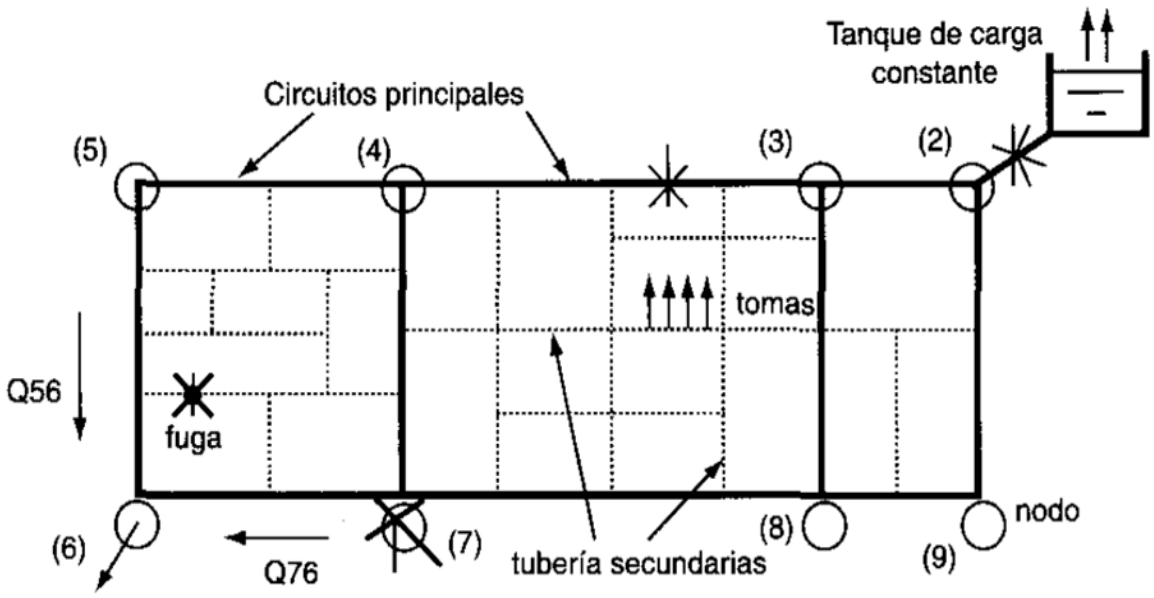


Figura 2. 7. Esquema de una red con fugas (Ochoa Alejo & Bourguett Ortiz, 2001)

Existen dos tipos de fugas: visibles e invisibles, esta clasificación las podemos identificar como perdidas reales (Ochoa Alejo & Bourguett Ortiz, 2001). Las fugas visibles emergen hacia la superficie del terreno o pavimento, aunque pueden estar localizadas a una distancia considerable del punto donde fueron descubiertas, siendo también consideradas dentro de esta clasificación los derrames en tanques. En su mayoría las fugas visibles son descubiertas por los usuarios, operadores y lecturistas.

Las fugas invisibles se infiltran en el suelo o pueden drenar hacia tuberías del alcantarillado o canales.

Según el lugar donde ocurren, las fugas pueden clasificarse en seis categorías:

1. Fugas en depósitos. - Ocurren por agrietamiento en las estructuras o por el rebose de los niveles de agua. En general, son de gran magnitud, esporádicas y de corta duración.
2. Fugas en conducciones, líneas principales y secundarias (*Figura 2.8*) Se deben principalmente al efecto de la corrosión, instalaciones defectuosas,

cargas superficiales, cambios bruscos en la operación del sistema (golpe de ariete) y defectos de fábrica en el material de las tuberías.

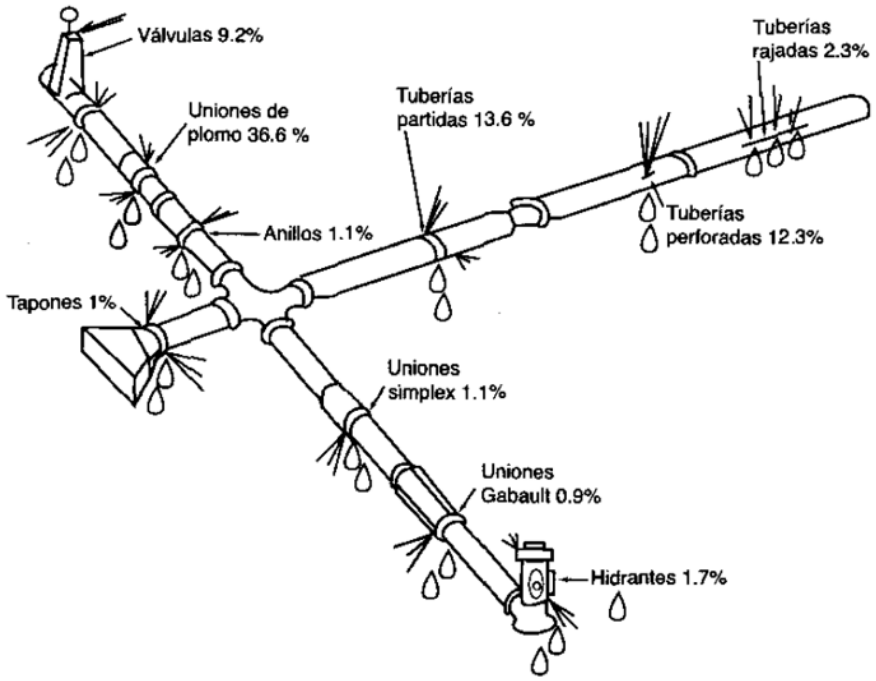


Figura 2. 8. Ubicación y frecuencia de fugas en líneas principales y secundarias (CEPIS, 1983)

3. Fugas en conexiones domiciliarias (*Figura 2.9*). Suelen presentarse como: rajaduras, perforaciones, cortes o piezas flojas y se asocian a instalaciones deficientes, mala calidad de los materiales empleados o por factores externos.

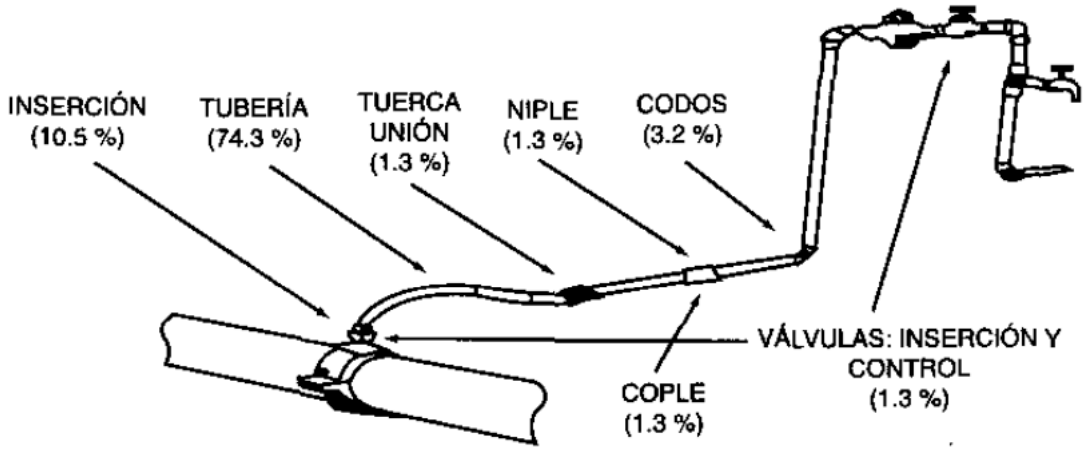


Figura 2. 9. Ubicación y frecuencia de fugas en tomas domiciliarias (Ochoa Alejo & Bourguett Ortiz, 2001)

4. Fugas en el cuadro medidor. - Básicamente son producidas por piezas flojas y falta de hermeticidad en el micromedidor.
5. Fugas en cajas de válvulas. - Se producen por la rotura de empaques o volantes de las válvulas.
6. Fugas intradomiciliarias. - Principalmente se presentan en los herrajes o el "sapito" de los sanitarios (*WC*) o bien en los empaques de las regaderas y llaves.

En general, las principales causas de ocurrencia de fugas son:

- Las presiones altas que contribuyen a la presencia de fugas y la descarga aumentará proporcionalmente a la raíz cuadrada de la presión (Babbit & Dolan, 1962) (Rago, 1974) (BVSDE, 2016)**.**
- Corrosión interna o externa.
- Mala calidad de los materiales y accesorios.
- Instalación defectuosa.
- Efecto del tráfico de vehículos.
- Edad de las tuberías.
- Movimientos del suelo (sismos).
- Fatiga.

Las fugas son parte esencial del agua no contabilizada, la cual está definida como la diferencia entre el agua suministrada por un sistema y la cantidad de agua que se vende a los usuarios (World Bank, 1996) y se estima que tiene valores entre el 37% y el 41% en países en desarrollo (WHO & UNICEF, 2000).

Para la evaluación de pérdidas reales de agua en una RDAP varias metodologías, la más usual es la utilizada por la IWA, para determinar un balance hídrico del ciclo hidráulico urbano. La cual consiste en calcular el volumen total de agua perdida por fugas, a partir de muestreos en campo (inspección y aforo).

También se utilizan las mediciones de consumos realizadas en sectores aislados de la red, calculando la diferencia entre el volumen suministrado menos el volumen consumido por los usuarios, así cuantifica el volumen perdido por fugas. Otra fase posterior es identificar, las pérdidas por medición incorrecta, mediante el error determinado en la verificación de campo de la muestra de micromedidores. Finalmente, la diferencia entre el volumen entregado a la red y la suma de las perdidas anteriores, representan una estimación global de las pérdidas (Ochoa Alejo & Bourguett Ortiz, 2001).

2.5 Relación presión – fugas

Las fugas en redes de agua potable son directamente proporcionales a la presión de operación, a mayor presión se tienen más fugas y viceversa (Germanopoulos, 1985) (Martínez, Conejos, & Vercher, 1999).

En caso particular de fugas en tuberías de agua potable, éstas se consideran como la salida de agua a través de un orificio; contempladas por medio de la ecuación 7:

$$Q_{fugas} = Cp^{e} \qquad \text{Ecuación 7}$$

Donde Q_{fugas} es el gasto perdido en fugas, p es la presión, C es una constante cuyo valor se determina con base en el área del orificio, y e es otra constante (exponente) que depende del tipo de descarga. La presión es posible obtenerla mediante la modelación de la red, con valores para cada nodo. La constante C cambia en los nodos siendo mayor en aquellos donde

hay mayor volumen de fugas y el exponente *e* tendrá el mismo valor para todos los nodos. El valor internacionalmente establecido tras diversos experimentos es *e* =1.18, relacionado con el hecho de que las fugas corresponden a una descarga de orificio de área variable. En la *Figura 2.10* podemos observar el comportamiento de la relación presión-fugas con un valor de *e* =1.18, en el cual al presentarse presiones muy altas en la red, las fugas y por lo tanto el volumen de agua perdido, se incrementan en una proporción parecida a la de la presión, llegándose al extremo de que con presiones extremadamente altas se reventarían las tuberías y se perdería todo el caudal en fugas (Tzatchkov, Alcocer, Bourguett, & Felipe, 2014).

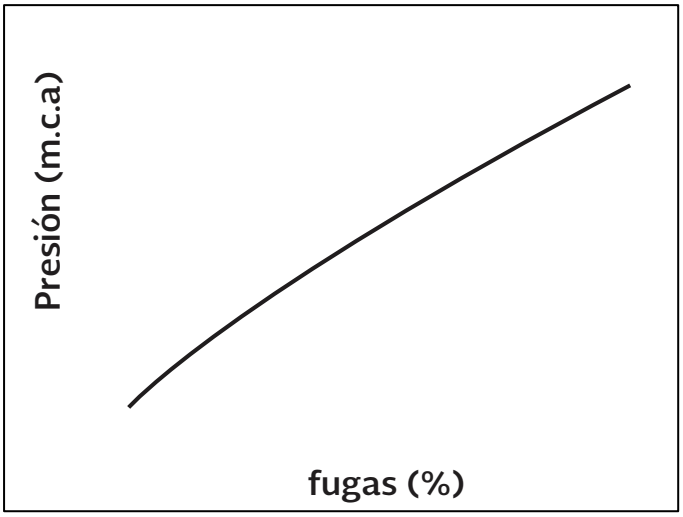


Figura 2. 10. Relación presión-fugas para *e= 1.18* (Tzatchkov, Alcocer, Bourguett, & Felipe, 2014)

2.6 Relación presión - consumo

El consumo final en los usuarios es un aspecto muy complejo de relacionar con la presión, Giustolisi y Walski (2012) dividen los consumos de los usuarios basándose en tres tipos de demandas:

1. Demanda controlada por el volumen **(totalmente independiente de la presión)**. - Se asocia a aquellos tipos de usos, aparatos, electrodomésticos, cuyo consumo está

limitado por un determinado volumen de agua; es decir, cada vez que se hace uso de este tipo de dispositivos se consume el mismo volumen de agua independientemente de la presión de la red: lavadoras, lavavajillas, inodoros, tanques industriales, etc.

2. Demanda no controlada, con coeficiente de descarga estándar (**totalmente dependiente de la presión**) – Este tipo de usos, los cuales pueden tener una duración predefinida o no, se corresponden con orificios de dispositivos que se abren o cierran y cuyo caudal fluyente depende de la presión de la red. La relación caudal consumido/presión depende del coeficiente de descarga del surtidor. Suelen estar asociados a usos exteriores como sistemas de riego o sistema de protección contra incendios.
3. Demanda controlada por el usuario **(parcialmente dependiente de la presión**) – Son aquellos usos cuyo control viene determinado por el usuario variando el grado de apertura del grifo/surtidor, hasta alcanzar el caudal deseado. Los ejemplos más evidentes de este tipo de demanda son los relativos a grifos domésticos o duchas. En el caso de que el servicio sea deficiente (poca presión), pueden llegar a ser totalmente dependientes de la presión (Vicente González, 2017).

2.7 Tipo de presiones en tuberías

2.7.1 Presión de trabajo.

Presión es la fuerza que actúa sobre una superficie determinada, en el caso particular de las tuberías, nos referimos a presión de trabajo o presión nominal a la presión máxima, que habrá de soportar la tubería en condiciones normales de trabajo, sin tomar en cuenta los movimientos transitorios, (ya que estos son fenómenos transitorios son eventos

extraordinarios normalmente), esto está relacionado directamente con el tipo de material del tubo y el espesor de la pared, es decir, a mayor espesor mayor es la resistencia.

La capacidad para soportar la presión por parte de una tubería está en función de su espesor y éste es manejado por los fabricantes como: clase de una tubería, relación de dimensiones (RD) o cédula (cuando se refiere a tuberías de acero) y en ella se expresa la presión máxima garantizada a soportar en condiciones normales de trabajo, en la *Figura 2.11* se muestra un ejemplo de la relación presión – clase.



Dimensiones en milímetros.
Para mayor información de otras Clases, contacte al Asesor Comercial de Zona.

DIÁMETRO NOMINAL (DN)	DIÁMETRO EXTERIOR De	DIÁMETRO EXTERIOR Tol (+)	Clase 5 5kgf/cm²	Clase 7 7 kgf/cm²	Clase 10 10 kgf/cm²	Clase 14 14 kgf/cm²
			ESPESOR DE PARED MÍNIMO (e)			
100	100	0.3	2.0	2.8	4.2	5.3
160	160	0.5	3.2	4.4	6.2	8.5
200	200	0.6	3.9	5.4	7.7	10.6
250	250	0.8	4.9	6.8	9.6	13.3
315	315	1.0	6.2	8.6	12.1	16.7
355	355	1.1	7.0	9.7	13.6	18.8
400	400	1.2	7.9	10.9	15.3	21.2
450	450	1.4	8.8	12.3	17.2	23.9
500	500	1.5	9.8	13.6	19.1	26.5
630	630	1.9	12.4	17.2	24.1	33.5
800	800	2.0	15.7	21.8	30.6	42.4

Figura 2. 11. Presión nominal para diferentes diámetros en tuberías de PVC (PTM, 2018).

Además de la presión de trabajo es importante conocer la presión de prueba, la cual es varias veces mayor que la clase del producto dependiendo de la normatividad correspondiente. La relación entre la presión de prueba y la clase de la tubería representa el factor de seguridad del producto.

2.7.2 Sobrepresión

Está demostrado que cualquier cambio instantáneo en la velocidad del flujo a presión *(Δv)* en un punto de una tubería, genera una variación instantánea *(ΔH)* de la carga hidráulica en el mismo punto según la siguiente ecuación:

$$\Delta H = \frac{a}{g}\,\Delta v \qquad \text{Ecuación 8}$$

donde:

g = aceleración de la gravedad = 9.81 m/s^2

a = velocidad de propagación de la onda en m/s

La *Ecuación 8* tiene por nombre 'fórmula de Zhukovski' y a la sobrepresión instantánea *(ΔH)* obtenida se le conoce como pulso de Zhukovski.

Los pulsos se propagan como una onda de presión con una celeridad "*a*", a lo largo de las tuberías en una RDAP, hasta que encuentren un punto de cambio (diámetro, material, unión con otros tramos o un extremo de la tubería) (CONAGUA (B), 2015).

Las altas presiones que se producen, pueden llegar a ser superiores a la resistencia de la tubería hasta provocar su reventamiento o avería.

2.7.3 Presiones negativas

En una RDAP con suministro intermitente se presentan diversos ciclos de llenado y vaciado (*duty cycle*) de las tuberías, durante la transición de tubo lleno a vacío se pueden

presentar presiones negativas (depresiones). También pueden ocurrir al presentarse cambios en el flujo debido a la operación de válvulas o variaciones en los equipos de bombeo. Cada cambio en el caudal genera picos de altas y bajas presiones o transitorios, con lo que se podrían presentar presiones negativas en los conductos.

La presión atmosférica es de 760 *mm* de columna de mercurio a nivel del mar, equivalente en la práctica a 1 kg/cm^2 (10.33 *mca*). Por tanto, presiones absolutas inferiores a 1 kg/cm^2 se consideran como presiones negativas o de vacío.

Cuando en una tubería, la presión interior comienza a caer por debajo de la presión atmosférica se inicia el vacío, esto no indica que deje de haber flujo de agua, sino que esto significa que la presión absoluta es inferior a 10.33 *mca* y, mientras tanto, el agua sigue circulando. A medida que desciende la presión, el espacio es ocupado por aire, hasta que la presión descienda más y se puede considerar, que no hay fluido ocupando el área de la tubería, dándose el vacío y las succiones.

Un líquido puede pasar a vapor debido a dos circunstancias, o bien porque aumente su temperatura, o bien porque disminuya su presión. La mínima presión (vacío absoluto), que físicamente se puede alcanzar en el agua, tomando como nivel de referencia la presión atmosférica, es de una atmósfera con signo negativo, equivalente a *-10.33 mca* (Monge R., 2017).

La cavitación, es una ebullición prematura del agua, donde se vaporiza a temperaturas muy inferiores a los 100° *C* (punto de ebullición normal).

Esto se explica ya que, cada líquido hierve cuando su presión de vapor, se iguala a la presión exterior que soporta, cuando por cualquier circunstancia, la presión desciende por

debajo de la presión atmosférica y alcanza el valor de la presión de vapor. Se considera que, para agua pura, expuesta una temperatura de 20º *C*, la presión de vapor es de 9.75 *mca*. En la práctica, este valor puede ser un poco más bajo debido al contenido de aire disuelto en el agua (CONAGUA (B), 2015).

La presión relativa, es igual a la presión absoluta menos la presión atmosférica, si el resultado es un valor positivo, es una presión manométrica y en caso de ser inferior a cero será una presión de vacío o succión.

La presencia de presiones negativas dentro de una tubería, provoca que las paredes del tubo se vean sometidas a una presión externa aplicada de manera radial a su periferia, lo cual tiende a aplastarla o colapsarla (*Figura 2.4*). Los fabricantes de tuberías rara vez realizan pruebas de estas condiciones, siendo un fenómeno menospreciado, pero que se presenta y puede ocasionar fallas estructurales.

2.7.4 Envolvente de presión

En líneas de conducción o redes de agua potable se hace referencia a envolvente de presión, al comportamiento ya sea de los valores máximos o los mínimos (según corresponda) de presión con respecto al tiempo y espacio (*Figura 2.12*).

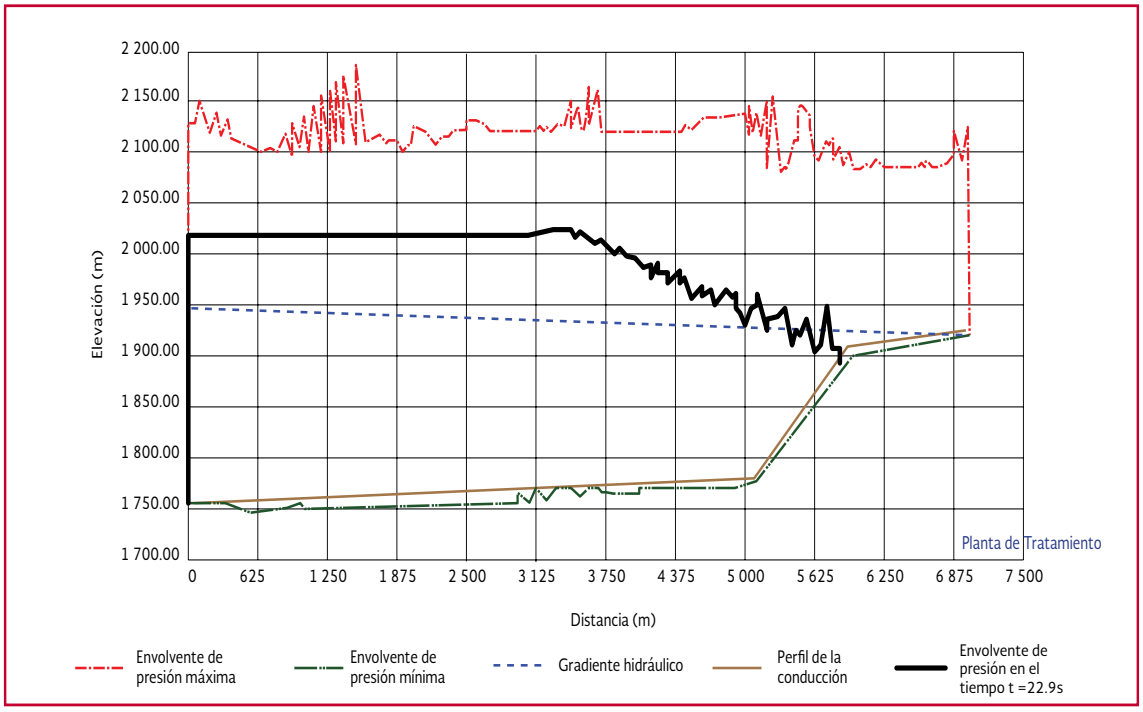


Figura 2. 12. Envolventes de presión presentes en una línea de conducción (CONAGUA (B), 2015).

2.8 Fatiga

Las variaciones en el servicio dentro de una RDAP con suministro intermitente ocasionan que durante el día se puedan presentar uno o varios llenados y vaciados de las tuberías como se ejemplifica en la *Figura 2.13*. Dentro de cada ciclo de llenado y vaciado existen variaciones en la presión y el caudal, estas acciones repetidas durante un periodo de tiempo prolongado pudieran ocasionar pérdida en la resistencia del material del que está constituida la tubería, así como sus accesorios. El deterioro progresivo gradual de un material que está sometido a un gran número de esfuerzos variables cíclicos de cierta magnitud, se conoce como fatiga del material (Tzatchkov, Alcocer, Bourguett, & Felipe, 2014).

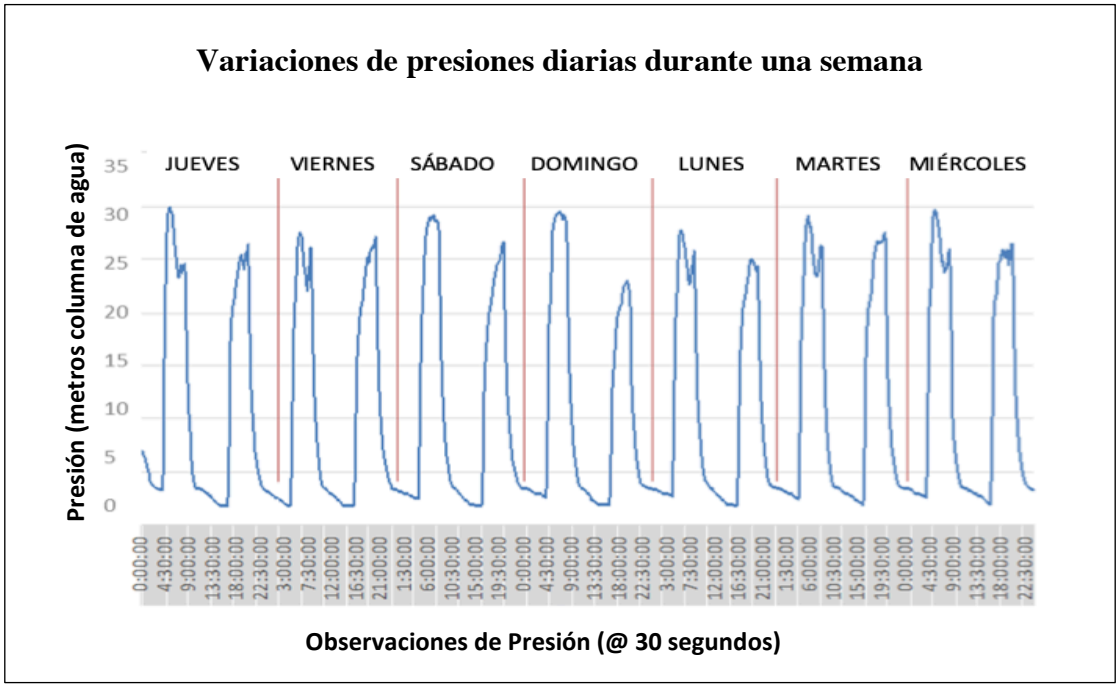


Figura 2. 13. Comportamiento de las presiones en una RDAP con suministro intermitente durante una semana (*datos del fraccionamiento Quinta Sebastián, en la ciudad de Chihuahua, Chih)* (Elaboración propia).

La vida útil de las tuberías de la red es bastante larga usualmente mayor a 20 años, pero esta se puede acortar significativamente debido a fatiga en el material y otros efectos anormales en el sistema. Las roturas nuevas que se generan con un suministro intermitente en la red en comparación con un suministro continuo tienden a aumentar 10 veces o más (Lambert, 2000). En la *Figura 2.14* se muestra la frecuencia de rotura de tuberías para varios países con suministro de agua continuo e intermitente (World Bank, 2006).

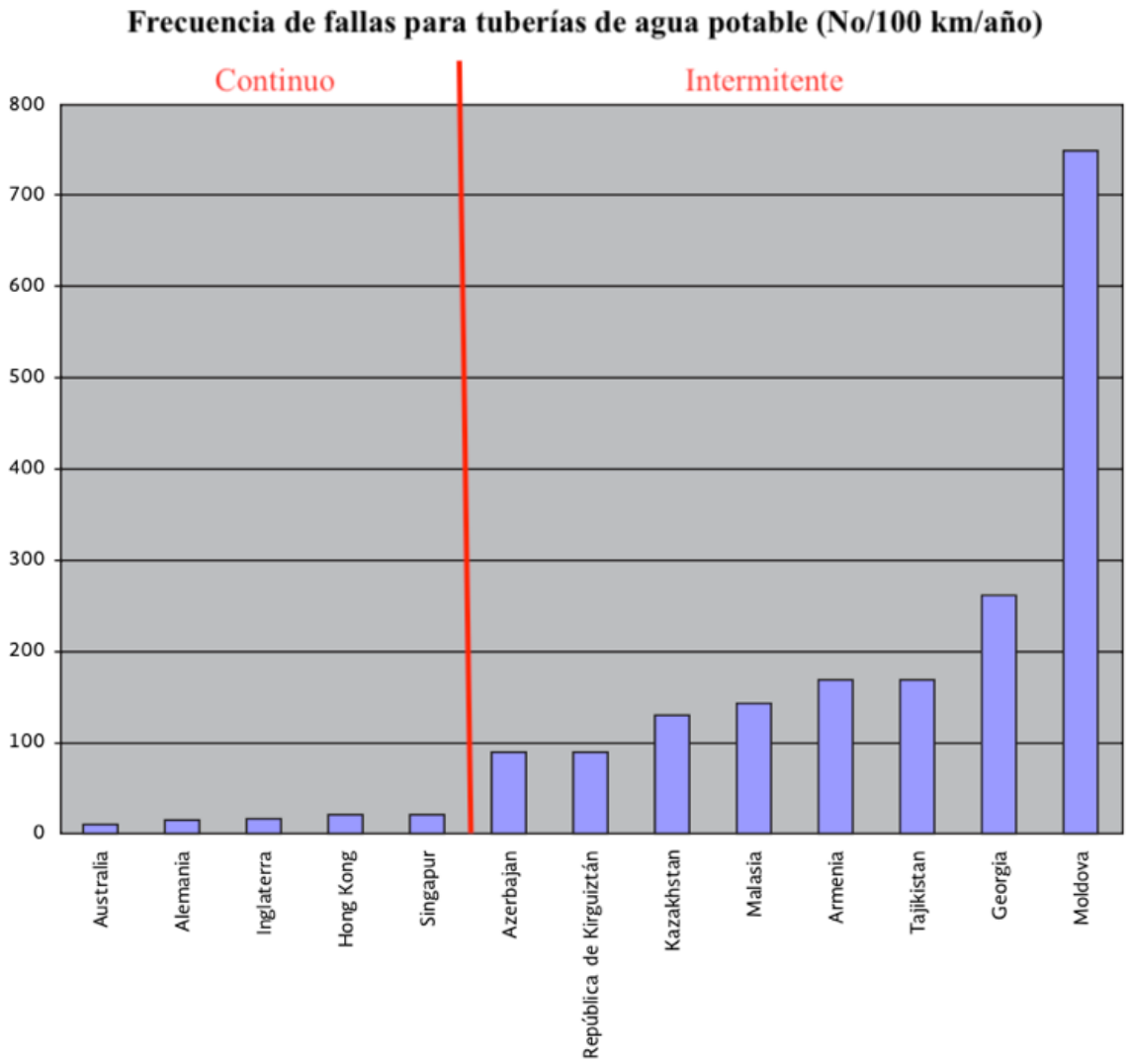


Figura 2. 14. Frecuencia de roturas de tuberías en países con suministro continuo e intermitente (World Bank, 2006).

La “American Water Works Asssociation” (AWWA) presentó en el 2016 una forma simple de calcular el número de ciclos de presión que llevan a la falla por fatiga en tuberías de PVC (*Figura 2.15*). La información clave requerida para extrapolar en la gráfica son la amplitud del esfuerzo y el esfuerzo medio, una vez obtenido el número de ciclos hasta la falla del gráfico, la cantidad de años de vida de la tubería se calcula con la siguiente fórmula:

Años hasta la falla = *Número de ciclos permitidos / (FS x Número de ciclos esperados en un año)*

FS es un Factor de Seguridad que debe ser igual a 2 según AWWA C900 (AWWA, 2006) .

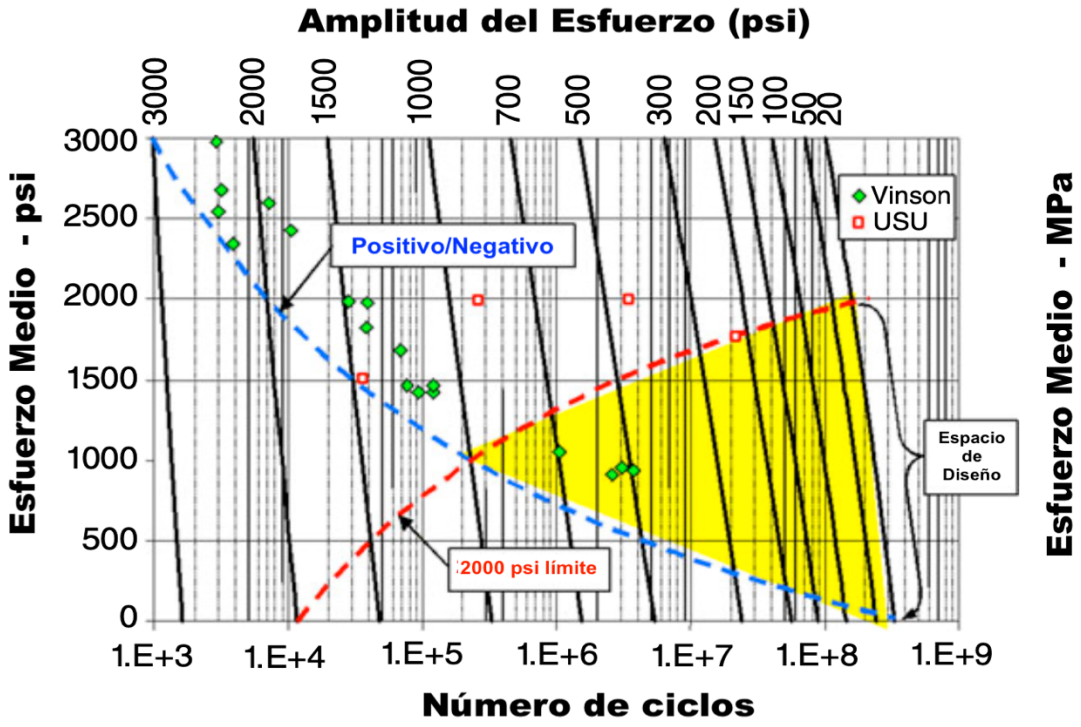


Figura 2. 15. Curva de diseño contra fatiga en tuberías de PVC (AWWA, 2006).

El número de ciclos esperados en un año, se debe calcular considerando el número de ciclos de presión transitoria, así como el número de veces en que se llenan y vacía la tubería.

En la *Figura 2.16* se muestra un ejemplo del número de ciclos de presión transitoria en un acueducto en México, observándose más de 30 ciclos en el paro de un equipo de bombeo.

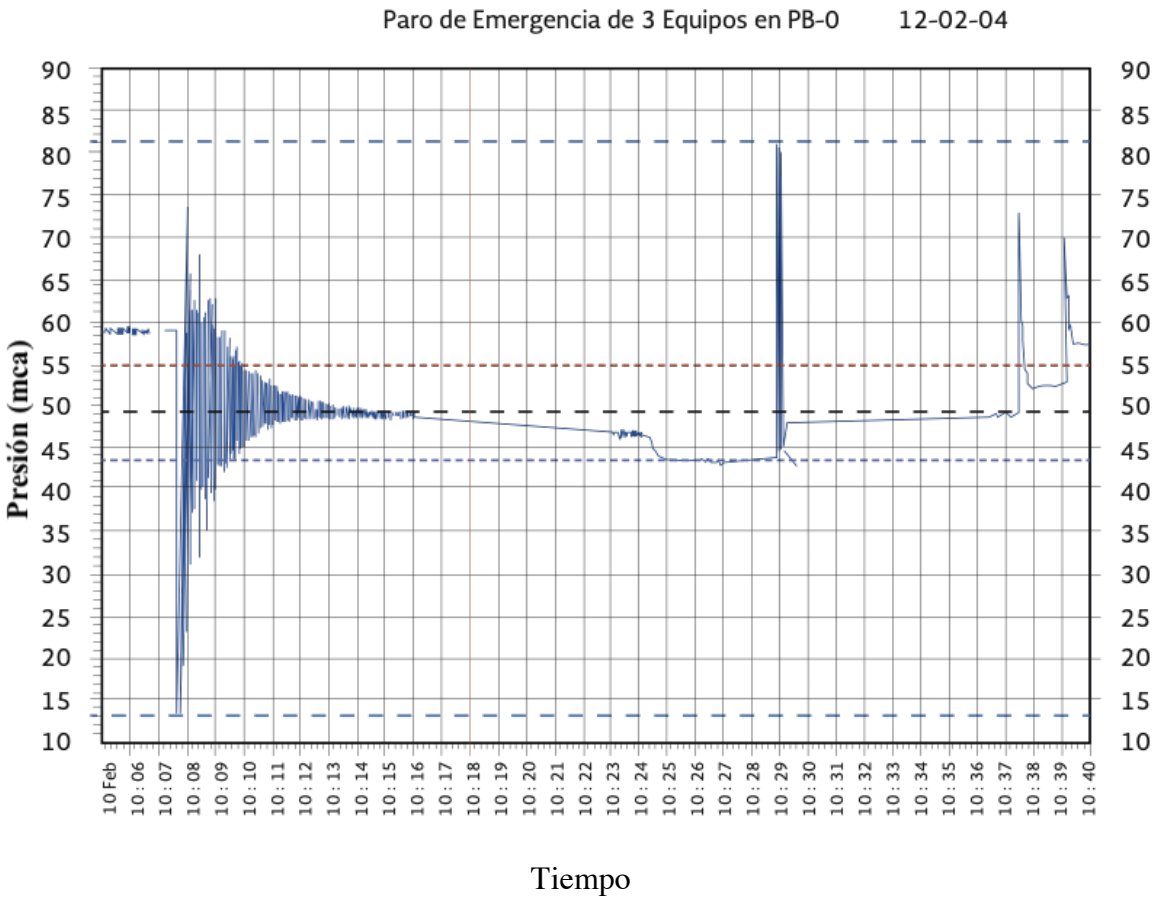


Figura 2. 16. Variación de la presión en el paro de los equipos de bombeo, registrada en un acueducto en operación en México (Tzatchkov, Alcocer, Bourguett, & Felipe, 2014).

El deterioro gradual del material de las tuberías como resultado de un gran número de esfuerzos variables cíclicos incluso sin ser eventos de gran magnitud, es real y este no se ha considerado como un factor limitante para el diseño y selección del tipo de tubería (JANA, 2012).

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Introducción

En los capítulos anteriores se han analizado el origen, causas y los principales problemas asociados al suministro intermitente en redes de distribución de agua potable. Se ha puesto de manifiesto la relevancia de este tipo de sistemas y la complejidad de los mismos.

Para un correcto análisis es necesario considerar un gran número de factores: variables inherentes a la red, características de la zona y operación del sistema, por mencionar algunos.

A este punto se dispone del contexto necesario para abordar el objetivo principal de esta tesis: determinar la relación entre la envolvente de presiones en una red de distribución de agua potable con suministro intermitente y la incidencia en la generación de fugas. La metodología a seguir tiene diversos pasos meticulosamente razonados que se muestran en el siguiente esquema *(Figura 3.1):*

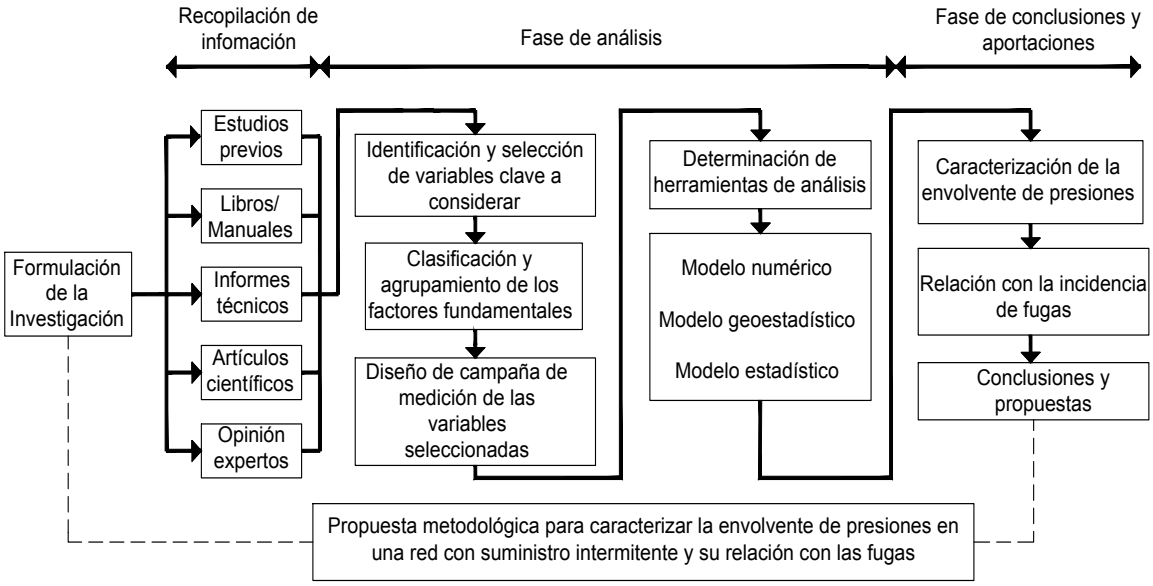


Figura 3. 1. Metodología de la investigación (Elaboración propia).

3.2 Formulación de la investigación

Los objetivos planteados en capítulos anteriores se resolvieron de la manera siguiente:

- Identificar las variables clave que inciden en la operación del sistema de distribución de agua potable con suministro intermitente.
- Clasificar las diversas zonas de la ciudad de Chihuahua con base en las variables clave identificadas.
- Caracterizar la envolvente de presiones en el sistema de distribución de agua potable con suministro intermitente (caso de estudio).
- Analizar el comportamiento y tipos de fugas presentes en el sistema.
- Determinar correlaciones, agrupamientos y comportamiento de las diversas variables clave en este tipo de sistemas mediante el uso de herramientas estadísticas.

3.3. Recopilación de información

Para obtener una perspectiva global de una red de distribución de agua potable con suministro intermitente y su comportamiento enfocado a la relación presión - fugas es necesario consultar diversa información desde libros y manuales técnicos hasta informes de proyectos reales, pasando por artículos científicos y entrevistas con expertos en la materia. Se resumen a continuación las principales fuentes:

- Estudios previos. - Se ha prestado especial atención al estudio de casos reales realizados en la ciudad de Chihuahua referentes a la red de distribución, líneas de conducción y fuentes de abastecimiento; principalmente enfocados en el diagnóstico actual de la infraestructura hidráulica disponible, la modelación del sistema, manejo de presiones, distribución de caudales y la planificación de los distintos sectores hidrométricos.

- Libros y manuales. - Los libros académicos y manuales técnicos han sido la base para comprender los fundamentos teóricos relativos a los fenómenos físicos presentes en una red de distribución de agua potable. Primordialmente se han tomado como referencia los manuales publicados por las dependencias gubernamentales encargadas de regular y controlar las cuestiones relacionadas con el agua.
- Informes técnicos. - Este grupo lo componen diversos tipos de documentación como lo son: guías, hojas de especificaciones técnicas, patentes, entre otras. Con este tipo de información se ha tratado de adquirir conocimiento sobre la tecnología disponible y las técnicas o estrategias de implantación.
- Artículos científicos. - Para consultar los últimos avances en materia de la investigación de redes de distribución de agua potable con suministro intermitente, sus causas, consecuencias y derivados es imprescindible revisar los artículos publicados en revistas especializadas en la materia, además de conferencias y talleres. Los artículos especializados ayudan a tener un enfoque en un tema en especial, lo cual ayuda a comprender a fondo y de manera detallada diversos fenómenos.
- Opinión de expertos en el tema. - Se han consultado a diversos profesionales de varias áreas de la ingeniería alrededor de mundo, principalmente expertos en redes de distribución de agua potable, sus conocimientos proporcionan un punto de partida de ¿qué? y ¿cómo? debe ser abordados los diversos temas relacionados con las redes presurizadas. Personajes de la talla del Dr. Armando Di Nardo y el Dr. Velitchko Tzatchkov expertos internacionales en temas de sectorización y redes de distribución de agua con suministro intermitente han compartido sus puntos de vista y estrategias para este tipo de

sistemas; en el ámbito nacional diversos expertos del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua como lo son los Maestros Rodrigo Santos y Manuel Rodríguez han facilitado diversos casos de estudio sobre implantación de gestión de presiones, así como modelos de redes de distribución. Localmente el Dr. Humberto Silva y la Dra. Carmen Navarro conocedores a fondo de la operación del sistema de distribución de agua de la ciudad de Chihuahua hicieron posible el estudio detallado y la formulación de estrategias para llevarlo a cabo.

3.4. Fase de Análisis

Partiendo de la recopilación de la información disponible, el siguiente paso a seguir es la fase de análisis mediante los siguientes pasos:

1. Identificación y selección de variables clave a considerar en una red de distribución con suministro intermitente.
2. Diseño de la campaña de medición y obtención de información de las variables seleccionadas.
3. Análisis del comportamiento de las variables en el tiempo y espacio.
4. Clasificación y agrupamiento de los factores fundamentales.
5. Determinación de las herramientas de análisis

3.4.1. Variables clave a considerar en una red de distribución con suministro intermitente

En capítulos anteriores se ha descrito qué es una red de distribución de agua potable y sus componentes (*Figura 3.2*). Para el presente estudio los más relevantes son:

a) Tuberías. - Pueden ser principales o alimentadoras y secundarias. En la ciudad de Chihuahua las primeras generalmente están constituidas por tubos de diámetros mayores a 4 pulgadas (*Figura 3.3*) y cualquier tubería menor a ese diámetro se considera como secundaria (*Figura. 3.4*).

   i. Dentro de las tuberías encontramos diversas características importantes a considerar, como son: el material, diámetro, tipo de unión (por acoplamiento o por termo fusión).

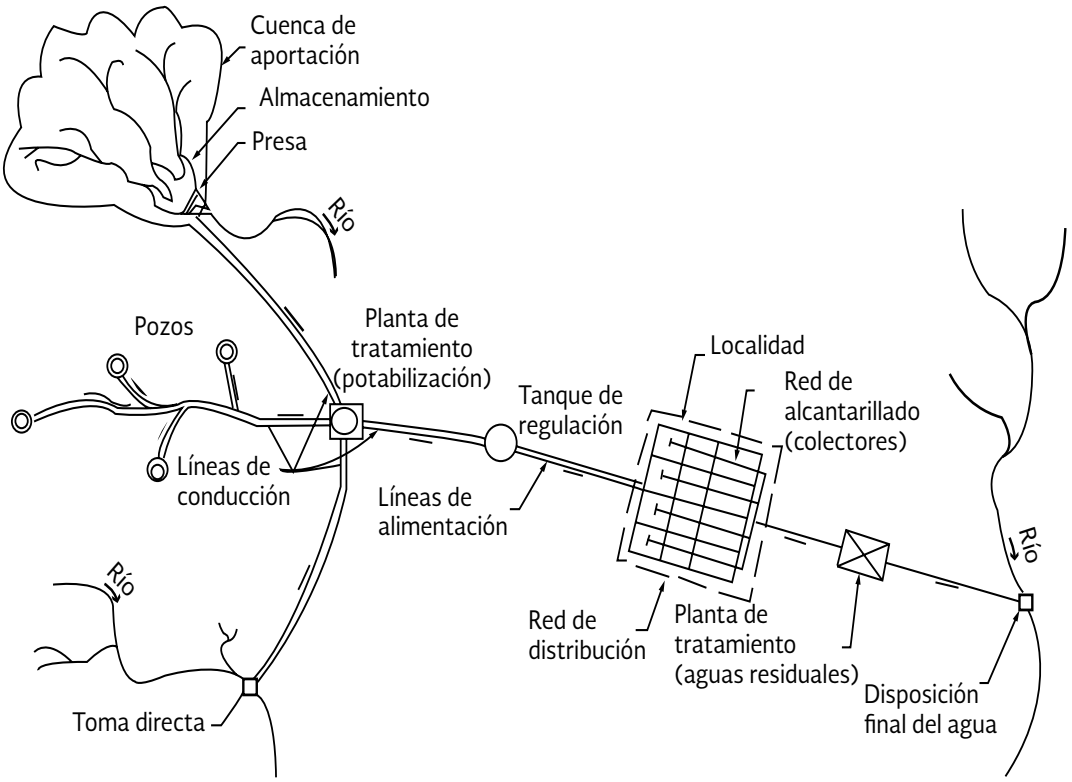


Figura 3. 2. Configuración típica de un sistema de abastecimiento de agua en localidades urbanas (CONAGUA, 2015).

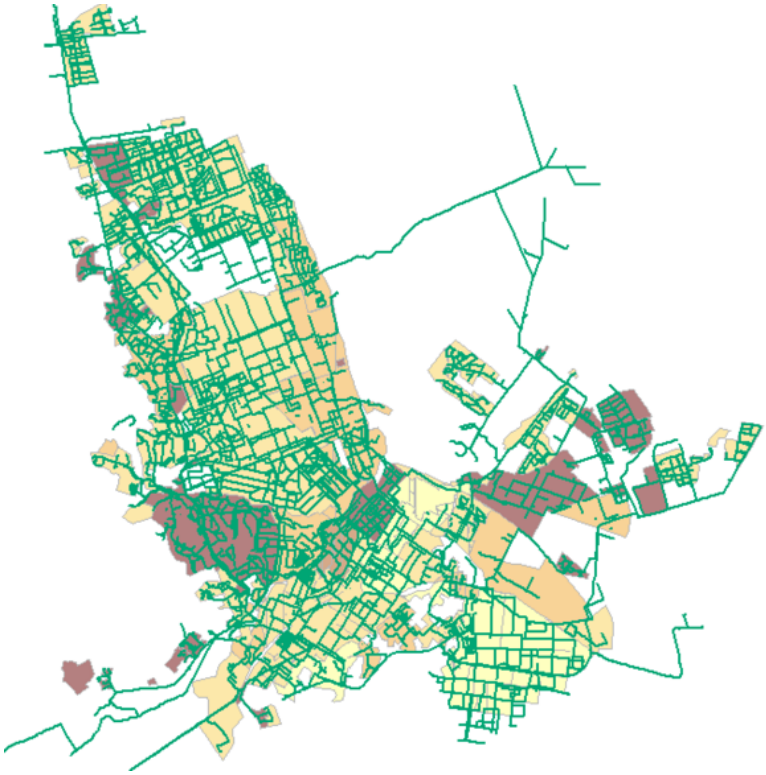


Figura 3. 3. Tuberías principales de 4 pulgadas o mayor diámetro en la ciudad de Chihuahua (Elaboración propia).



Figura 3. 4. Tuberías secundarias con diámetros de 3 pulgadas o menores (Elaboración propia).

b) Piezas especiales. - Todo accesorio que se emplea para llevar a cabo ramificaciones, intersecciones, cambios de dirección, modificaciones de diámetro, uniones de tubería de diferentes materiales o diámetro y terminales de red, entre otros.

c) Válvulas. - Accesorio de control o seccionamiento, se utilizan para disminuir el flujo a través de la tubería o la presión.

d) Tanques de almacenamiento y/o regulación. - Depósitos para almacenar el agua proveniente de la fuente y para facilitar la regulación en horas del día donde la demanda en la red sobrepasa el volumen suministrado por la fuente.

e) Tomas domiciliarias. - Es el conjunto de accesorios y tubos que permiten abastecer al usuario final desde la red de distribución. Aquí se encuentra instalado el medidor del consumidor.

f) Fuente de suministro. - Pozos, galerías filtrantes, manantiales, presas, tanques de almacenamiento, rebombeos, etc.

Cualquier componente tiene relevancia en el análisis de una RDAP, sin embargo, para el presente estudio enfocado en caracterizar la envolvente de presión y su relación con las fugas se dejará para posteriores investigaciones la interacción de las piezas especiales y válvulas de seccionamiento. Dado que lo que se analiza es una distribución de fluido a presión.

La presión es la fuerza que actúa perpendicularmente sobre una superficie (frontera) determinada (*Figura 3.5*). La presión que se suministra al inicio del tramo de tubería, varía conforme el fluido transita en la red, y esta variación, es dependiente de: el material de la tubería, de la elevación (energía potencial), del tipo de flujo (velocidad, energía cinética) y la distancia que recorre el fluido.

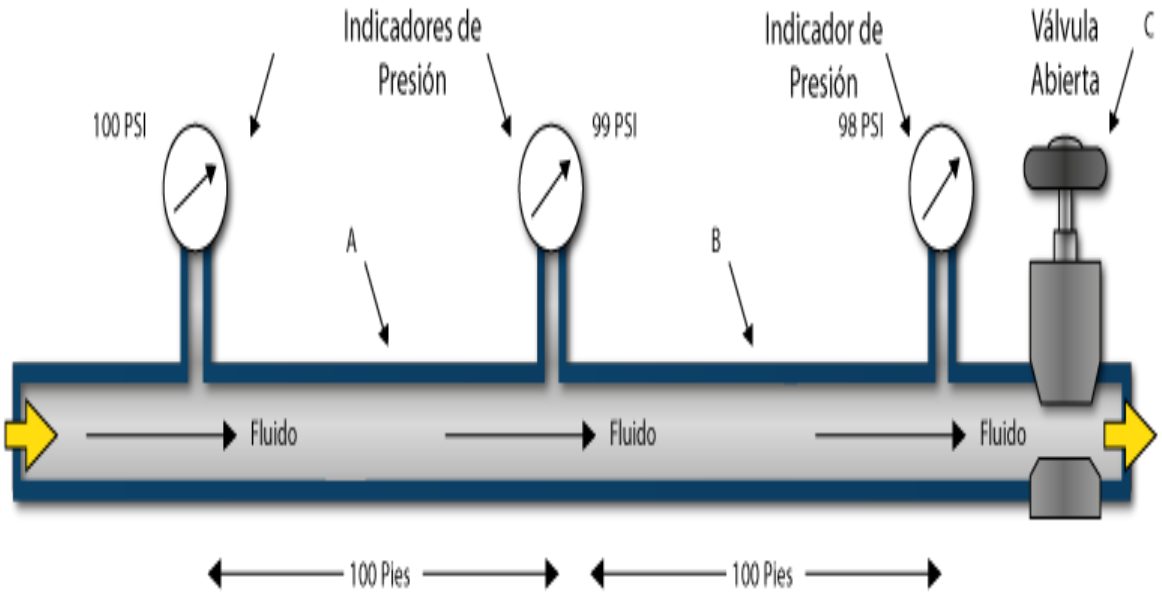
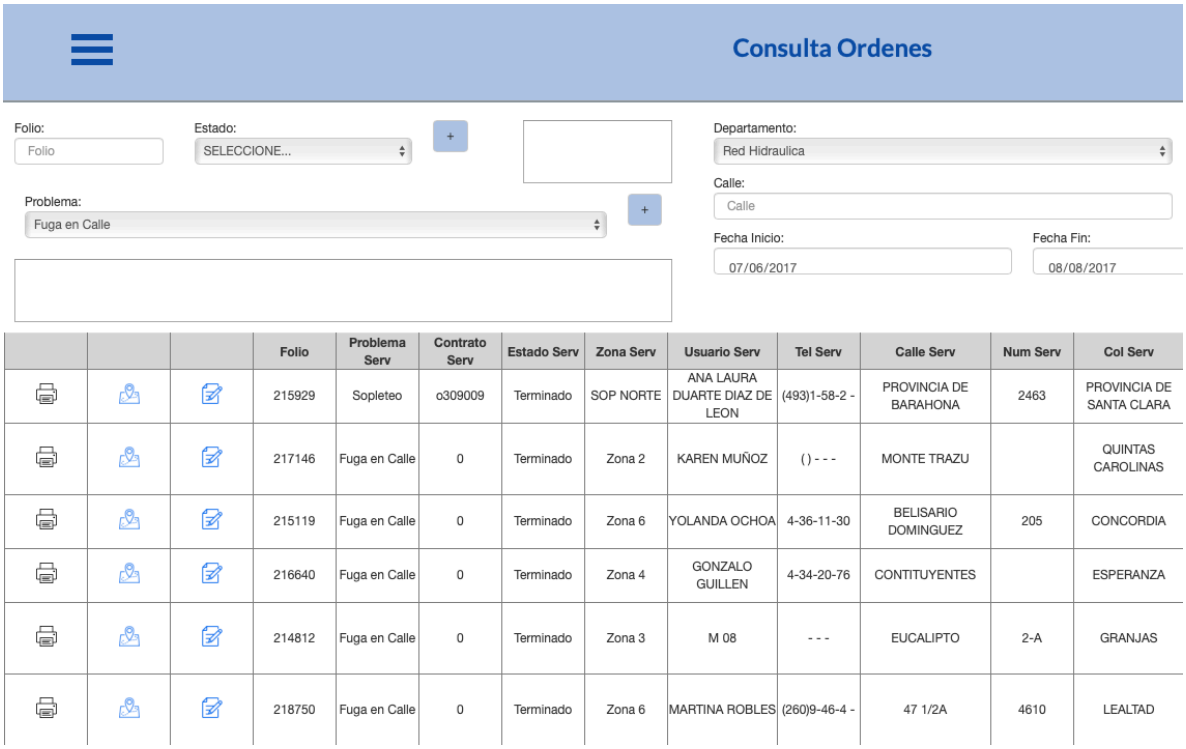


Figura 3. 5. Efecto que se tiene en la presión a lo largo del flujo de un fluido en una tubería (ASHM, 2015).

En cambio, el comportamiento de una RDAP a gravedad, muestra que las variables con mayor injerencia en la presión son: la elevación piezométrica (tirante o altura del agua en la tubería) y el diámetro de la tubería.

Otro punto que se analiza, en el presente estudio está relacionado con las fugas, en la ciudad de Chihuahua se cuenta con el Centro de Información y Servicios (CIS) dependiente de la JMAS, el cual tiene entre sus funciones, registrar y dar respuesta a reportes de fugas de agua en la red de la ciudad (*Figura 3.6*).



			Folio	Problema Serv	Contrato Serv	Estado Serv	Zona Serv	Usuario Serv	Tel Serv	Calle Serv	Num Serv	Col Serv
			215929	Sopleteo	o309009	Terminado	SOP NORTE	ANA LAURA DUARTE DIAZ DE LEON	(493)1-58-2 -	PROVINCIA DE BARAHONA	2463	PROVINCIA DE SANTA CLARA
			217146	Fuga en Calle	0	Terminado	Zona 2	KAREN MUÑOZ	( ) - - -	MONTE TRAZU		QUINTAS CAROLINAS
			215119	Fuga en Calle	0	Terminado	Zona 6	YOLANDA OCHOA	4-36-11-30	BELISARIO DOMINGUEZ	205	CONCORDIA
			216640	Fuga en Calle	0	Terminado	Zona 4	GONZALO GUILLEN	4-34-20-76	CONTITUYENTES		ESPERANZA
			214812	Fuga en Calle	0	Terminado	Zona 3	M 08	- - -	EUCALIPTO	2-A	GRANJAS
			218750	Fuga en Calle	0	Terminado	Zona 6	MARTINA ROBLES	(260)9-46-4 -	47 1/2A	4610	LEALTAD

Figura 3. 6. Ejemplo de captura de reporte de fuga en el CIS (JMAS, 2020).

En el CIS se tienen catalogadas los siguientes tipos de fallas al 2017, con el porcentaje de reportes asentados en el sistema: (*Tabla 3.1*):

Tabla 3. 1 Tipos de fallas registradas por el organismo operador (Elaboración propia).

Tipo de Falla	**Clave**	**%**
Fuga en red	A1	32%
Fuga en medidor / toma	A2/A3	46%
Fuga en caja de válvulas	A4	2%
Fuga en casa sola	A5	1%
Detectar fuga y/o línea gral.	A6	6%
Falta agua sector	B1	2%
Falta agua domicilio	B2	11%
Baja presión	B3	0%
Aire en línea	B5	0%
		100%

Como muestra la *Tabla 3.1* el porcentaje del tipo de fuga, las fugas en red y en medidor/toma representan casi el 80% del total de fugas registradas por el organismo, la falta de agua es representativa pero no se considera como una fuga hasta que se realice el análisis correspondiente.

Se podría decir que las variables a considerar para el presente estudio son:

1) Presión relacionada con la elevación piezométrica.
2) Diámetros de las tuberías, divididos en 2 grupos: principales o de 4 pulgadas y mayores y secundarias de 3 pulgadas o menores.
3) Tipo de fuente de suministro.
4) Fugas en red y en medidor/toma.

Y por supuesto las variables inherentes al suministro intermitente como lo son

5) Los horarios de servicio y la cantidad de horas de suministro.

3.4.2. Clasificación y agrupamiento de los factores fundamentales

Con base en las variables clave se llevó a cabo una determinación de áreas de influencia principalmente delimitadas por los horarios de servicio y fuentes de suministro.

Los horarios de servicio hacen referencia a la hora del día en que se inicia el suministro de agua a la red, así como su finalización; además de considerar el total de horas de suministro diario y el número de periodos en que se lleva a cabo la presurización de la red.

Las fuentes de suministro en la ciudad de Chihuahua se clasificaron de acuerdo a lo manejado por el organismo operador, considerando tres tipos: pozo, tanque y rebombeo; esta clasificación por tipo de fuente de suministro, es importante porque permite determinar

condiciones de operación como: presión, velocidad de tránsito (saturación de la red), calidad del agua de mezcla que se da por zonas *(Figura 3.7 y Figura 3.8)*.

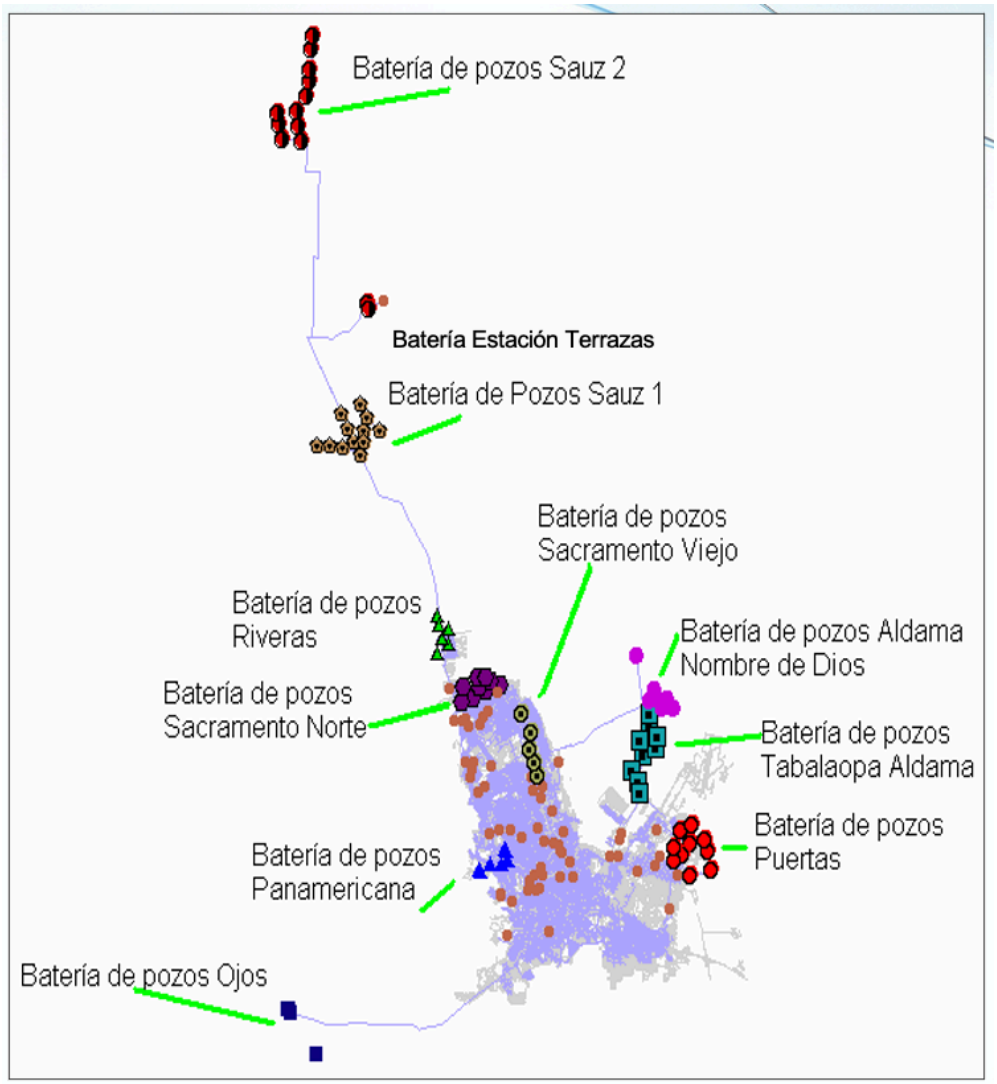


Figura 3. 7. Fuentes de suministro de la ciudad de Chihuahua, ubicación de pozos (JMAS, 2020).

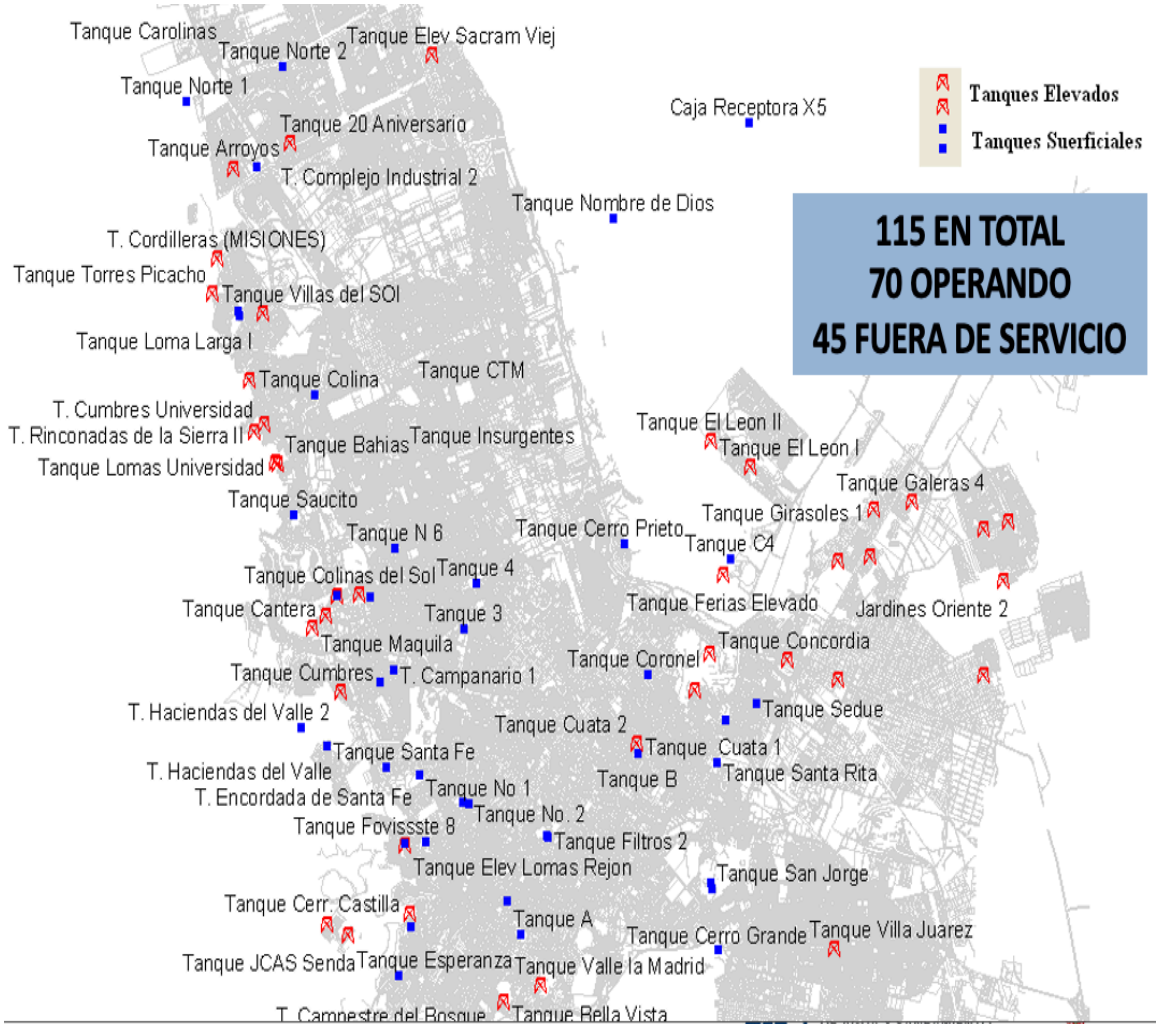


Figura 3. 8. Fuentes de suministro de la ciudad de Chihuahua, ubicación de tanques y rebombeos (JMAS, 2020).

Como muestra en la *Figura 3.8* donde se ubican los tanques, existen gran cantidad de estos que están fuera de operación, por condiciones de manejo de la red y por haber cumplido su vida útil, es decir el operario ha decidió trasvasar por la propia red y no utilizar los tanques para esta distribución, lo que incide en la falta de regulación de las presiones de operación y caudales reales suministrados a las zonas.

En el caso específico de la presión se procedió con la siguiente clasificación para identificar la satisfacción de la demanda del usuario, así como la "seguridad" para la red, para evitar fallas por mala operación:

- Presión mínima en cada punto de monitoreo y mínima promedio por área de influencia.
- Presión máxima en cada punto de monitoreo y máxima promedio por área de influencia.
- Presión promedio en cada punto de monitoreo y valor promedio por área de influencia.
- Presiones negativas (menores a 0.00 metros de columna de agua (*mca*)) registradas en cada punto de monitoreo, porcentaje del número de registros con dichos valores, por cada estación y promedio en área de influencia.
- Presiones bajas (0 a 7 *mca*) registradas en cada punto de monitoreo, porcentaje del número de registros con dichos valores, por cada estación y promedio en área de influencia.
- Presiones adecuadas (7.01 a 15 *mca*) registradas en cada punto de monitoreo, porcentaje del número de registros con dichos valores, por cada estación y promedio en área de influencia.
- Presiones altas (15.01 a 30 *mca*) registradas en cada punto de monitoreo, porcentaje del número de registros con dichos valores, por cada estación y promedio en área de influencia.
- Sobrepresiones (mayores a 30.01 *mca*) registradas en cada punto de monitoreo, porcentaje del número de registros con dichos valores, por cada estación y promedio en área de influencia.

Los rangos de presiones fueron determinados con base en los parámetros establecidos por el organismo encargado del servicio de agua potable en la ciudad de Chihuahua.

Para la clasificación de fugas, se hizo distinción de dos grandes categorías:

1. Fugas en medidor (toma domiciliaria) *

   *La toma domiciliaria es la línea que conecta desde la red general hasta el arco, donde se encuentra el medidor.

2. Fugas en red.

Como se mencionó anteriormente, es dentro de estas dos categorías donde se encuentra casi la totalidad de fugas presentes en el sistema.

La clasificación de tuberías se tomó con base en el diámetro de la misma, ya que es el factor más determinante en cuanto a presión se refiere.

1. Tuberías principales aquellas con diámetros de 4" y mayores.
2. Tuberías secundarias con diámetros de 3" y menores.

Es importante mencionar que no se consideró el material de la tubería ya que no existe información disponible.

3.4.3. Campaña de medición y recopilación de datos

Con base en información proporcionada por la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS) de la ciudad de Chihuahua, que funge como el organismo operador de la ciudad, se identificaron 18 áreas de servicio, cada una de ellas corresponde a un diferente horario de servicio, con diversas cantidades de horas de suministro diario.

Se diseñó una campaña de medición de presiones con la finalidad de tener puntos de monitoreo que abarquen todas las áreas de servicio y por consiguiente los diferentes horarios de suministro.

3.4.3.1. Equipo de medición empleado

Las mediciones de presión se realizaron empleando registradores de datos multifuncionales (Dataloggers) tipo Multilog (*Figura 3.9)*. Este tipo de registrador de datos multicanal tiene elevadas prestaciones y versatilidad que permite monitorear presiones y caudales, mediante pulsos configurados hasta un segundo en intervalos de tiempo, además con comunicación remota y envío de información a un puesto central utilizando tecnología GPRS o 3G.



Figura 3. 9. Registradores de presión instalados en toma domiciliaria y medidor.

3.4.3.2. Registros de presión

Se seleccionaron 347 puntos distribuidos en todas las áreas de suministro en la ciudad de Chihuahua (*Figura 3.10*). Para la ubicación e instalación de estos puntos de monitoreo de presión, se consideraron los diversos horarios de servicio, horas de suministro y la superficie de las áreas de influencia de las distintas fuentes de suministro. El diseño de muestreo, fue determinado para que la cantidad de puntos fuera representativa y tuviera una potencia estadística de una confiabilidad del 95%, además de cubrir la mancha urbana garantizando una distancia máxima entre puntos de un *km* a la redonda.

En cada punto de monitoreo se registraron presiones a intervalos de 15 minutos durante una semana completa; los registradores fueron colocados en las tomas domiciliarias para facilitar el acceso.

Para documentar posibles transitorios hidráulicos y cambios abruptos en la presión, se registraron valores de presión a intervalos de 30 segundos durante una semana completa en 10 puntos adicionales, donde previamente se pudo observar altas y bajas presiones o cambios repentinos en la presión. Estos puntos se encuentran en 5 colonias de la ciudad: Montecarlo (3 puntos), Quinta Sebastián (2 puntos), Cumbres II (2 puntos), Zaragoza (1 punto) y Rigoberto Quiroz (2 puntos) (*Figura 3.11)*.

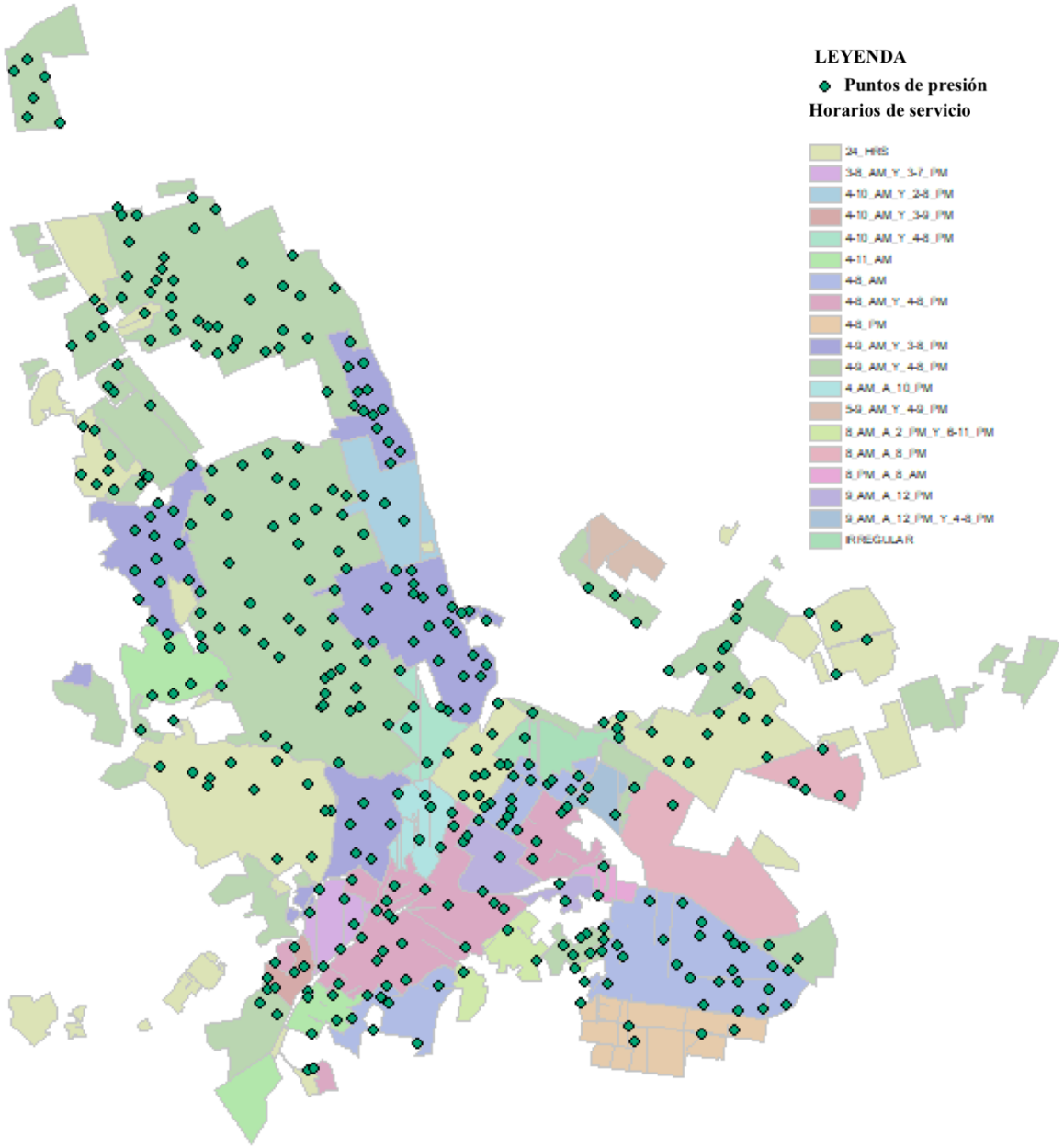


Figura 3. 10. Puntos de presión en áreas de influencia (Elaboración propia).

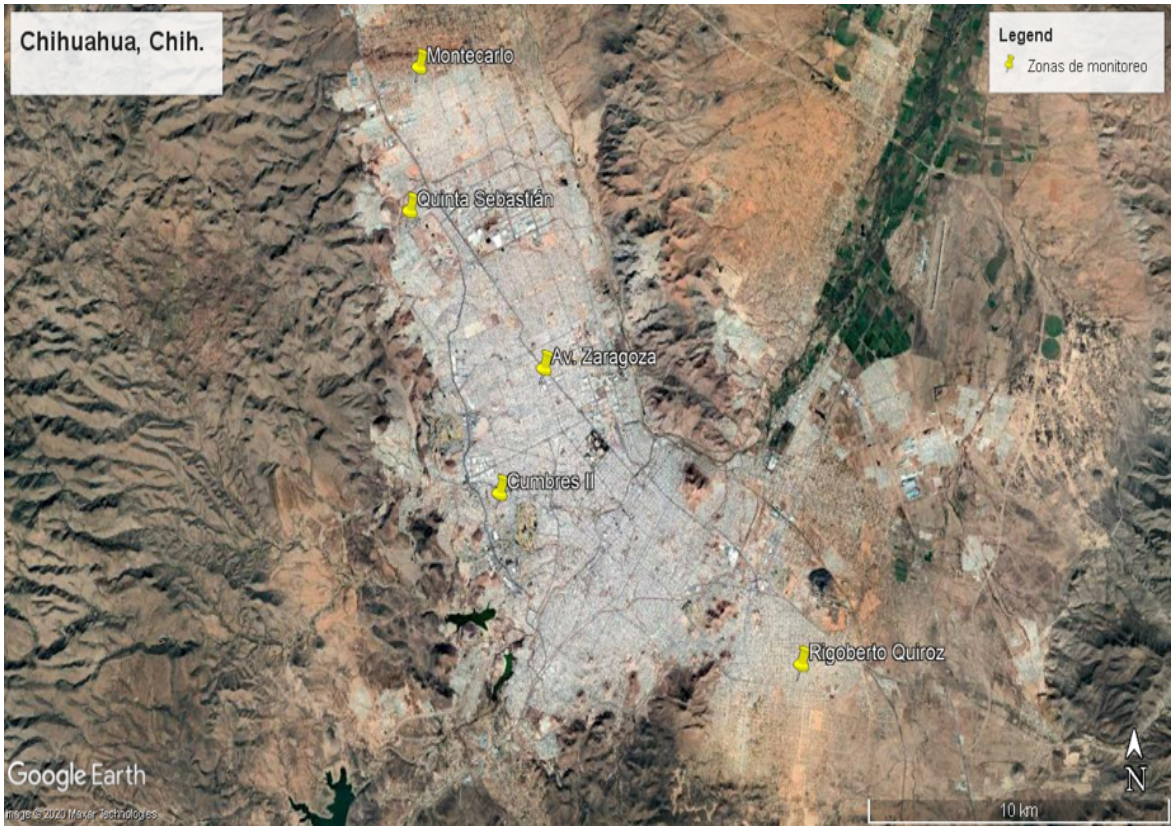


Figura 3. 11. Zonas para análisis de cambios repentinos en la presión (Elaboración propia).

3.4.4. Determinación de herramientas de análisis

Para la caracterización de la envolvente de presión en la red de distribución de agua potable con suministro intermitente y su relación con las fugas se usaron tres herramientas de análisis:

1. **Modelo geoestadístico**. - mediante el uso del software ArcGIS®, se pudo recopilar, organizar, administrar y analizar información geográfica. Siendo la plataforma líder a nivel mundial, permitió: elaborar mapas con la información recopilada, realizar análisis zonales y de densidad de puntos y magnitudes, además de correlaciones espaciales.

2. **Modelo estadístico**. - mediante el uso de los programas de computadora Minitab® y SPSS®, los cuales están diseñados ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas, se construyó un modelo estadístico, que es una expresión matemática o representación vectorial empleada en diseños experimentales, para indicar los diferentes factores que se correlacionan, asocian o inciden en la variable respuesta, así como determinar cuáles son las variables más importantes o influyentes de un fenómeno (Pan, 1999).
3. **Modelo numérico**. - mediante el uso del software InfoWorks® , el cual permite la construcción del modelo computacional avanzado de un sistema de suministro de agua. Todos los aspectos relevantes del sistema real pueden ser representados mediante controles, por ejemplo, las demandas y fugas que les afectan. Permite ver el comportamiento de la red bajo un rango amplio de condiciones, además de proporcionar una serie de reportes para la visualización y análisis de los resultados, mediante una serie análisis para alcanzar la calibración se puede obtener una representación adecuada de la operación de la RDAP.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la presentación de los resultados y su posterior discusión, primero se llevó a cabo la campaña de monitoreo de presiones en el periodo de 5 de marzo del 2017 al 30 de mayo del 2018. Se recopilaron de las bases de datos del CIS los reportes de fugas de los años 2015, 2016 y 2017, la información fue clasificada por tipo de fuga y georreferenciada en ArcGIS®.

4.1 Análisis geoestadístico

4.1.1. Análisis de las presiones

Derivado de lo comentado en capítulos anteriores, donde el diseño de muestreo tomó en cuenta diferentes características de las zonas de influencia de las fuentes de suministro, la ubicación de los 347 puntos de monitoreo se distribuyó de la siguiente manera (*Tabla 4.1*):

Tabla 4. 1. Análisis de horarios de servicio y asignación de puntos de monitoreo (Elaboración propia).

No.	Horario de servicio	Horas de suministro	No. de puntos de monitoreo	Superficie (m2)	% Superficie	Usuarios	% Usuarios
1	8_AM_A_2_PM_Y_6-11_PM	11.0	4.0	1,909,560.28	1.12%	5,199	1.83%
2	24_HRS	24.0	45.0	29,859,036.96	17.52%	33,613	11.83%
3	3-8_AM_Y_3-7_PM	9.0	3.0	1,677,444.20	0.98%	4,003	1.41%
4	4_AM_A_10_PM	18.0	4.0	2,052,819.54	1.20%	3,521	1.24%
5	4-10_AM_Y_2-8_PM	12.0	3.0	3,408,344.52	2.00%	3,454	1.22%
6	4-10_AM_Y_3-9_PM	12.0	5.0	866,384.36	0.51%	1,821	0.64%
7	4-10_AM_Y_4-8_PM	10.0	4.0	1,764,714.63	1.04%	2,349	0.83%
8	4-11_AM	7.0	8.0	5,247,988.43	3.08%	2,940	1.03%
9	4-8_AM	4.0	40.0	12,576,321.14	7.38%	22,755	8.01%
10	4-8_AM_Y_4-8_PM	8.0	27.0	10,663,120.01	6.26%	23,003	8.10%
11	4-8_PM	4.0	5.0	4,548,198.25	2.67%	2,026	0.71%
12	4-9_AM_Y_3-8_PM	10.0	52.0	17,714,568.81	10.39%	28,606	10.07%
13	4-9_AM_Y_4-8_PM	9.0	126.0	63,935,321.96	37.51%	140,688	49.51%
14	8_AM_A_8_PM	12.0	6.0	8,059,658.96	4.73%	466	0.16%
15	8_PM_A_8_AM	12.0	2.0	644,365.73	0.38%	995	0.35%
16	9_AM_A_12_PM	3.0	6.0	2,495,159.44	1.46%	5,362	1.89%
17	9_AM_A_12_PM_Y_4-8_PM	7.0	3.0	1,079,579.44	0.63%	1,861	0.65%
18	IRREGULAR	Variable	4.0	1,931,001.39	1.13%	1,499	0.53%
			347.00	170,433,588.04	100.00%	284,161.00	100.00%

De la *Tabla 4.1*. se pudo determinar diversos promedios de horas de suministro de agua al día en la ciudad, el primero de ellos sería el aritmético, consistente en simplemente promediar las horas de suministro de los horarios establecidos, el cual resulta en un valor de 10.1 horas de suministro al día.

El segundo es un promedio ponderado relacionado con la superficie que abarca cada horario de servicio y nos arroja un valor de 11.30 horas de suministro.

El tercero y el más significativo es un promedio ponderado con base en la cantidad de usuarios en cada horario de servicio, el cual tiene un valor de 10.39 horas de suministro al día, este valor nos otorga un acercamiento a las cantidades reales percibidas por el usuario y que está ligado directamente con la satisfacción del servicio que reciben.

Se puede observar que los tres valores son muy cercanos al reportado en el PIGOO en ese año de 10.5 horas en promedio de suministro al día y deja en evidencia que sólo el

11.83% de los usuarios de la red tienen agua las 24 horas. Para facilitar la visualización de las horas de suministro en la ciudad, se decidió agrupar las 18 áreas de influencia en 5 zonas (*Figura 4. 1*).

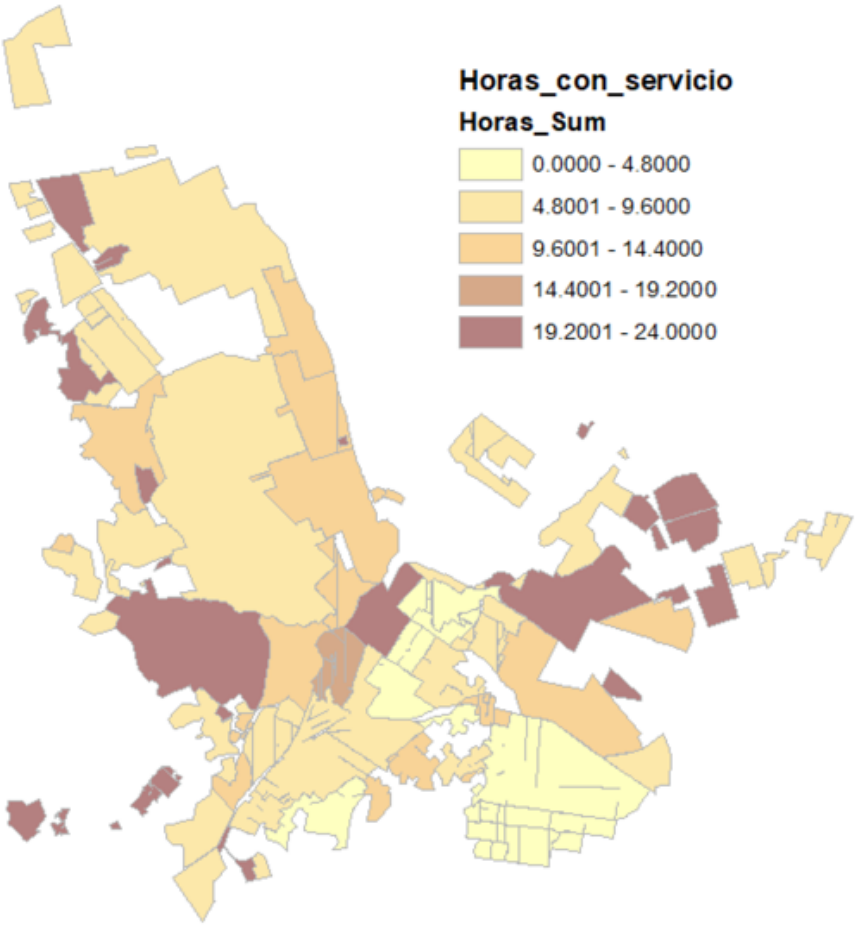


Figura 4. 1. Clasificación por número de horas de suministro al día (Elaboración propia).

Cada uno de los 347 puntos de monitoreo, se agruparon en su área de suministro y sector correspondiente para la JMAS, se registró: su dirección, fecha de monitoreo, elevación, coordenadas *UTM* y los valores de presión cada 15 *min*; ordenados desde las 00:00 horas hasta las 23:45, generando 96 lecturas de presión por cada día expresados en metros de columna de agua (*mca*), de las cuales se obtuvo su presión máxima, mínima y promedio para cada punto (*Tabla 4.2*).

Tabla 4. 2. Ejemplo del registro de datos de presión obtenidos por el monitoreo (Elaboración propia).

No.	DESCRIPCIÓN	HORAS SUM.	PUNTOS DE PRESIÓN	ID	DIRECCIÓN	ZFECHA	ELEVA	DATOS	X_COORD	Y_COORD	PRES_MAX	PRES_MIN	PRES_PROM
5	4-10_AM_Y_2-8_PM	12	1	144	Avellanas y Av. De los Nogales # 5502	26/marzo	1,420.13	96	394,196.37	3,174,325.83	33.20	0.00	25.71
			2	145	Carlos Armendariz # 108 y H. Colegio Milit	26/marzo	1,430.00	96	393,794.87	3,174,691.83	20.40	11.10	14.08
			3	146	Albaniles esq. Cadeneros # 9119	26/marzo	1,438.72	96	393,322.07	3,174,844.13	18.10	1.00	6.56
6	4-10_AM_Y_3-9_PM	12	1	273	30 de Abril # 2511 esq. Av. Lujan	09/abril	1,510.12	96	391,223.17	3,164,375.53	22.80	0.00	9.69
			2	274	Presa de Rio Grijalva esq. Rio Lerma # 150	09/abril	1,487.51	96	391,810.87	3,164,497.23	34.00	0.10	21.39
			3	292	Rio San Pedro # 8401 esq. Rio Usumacinta	11/abril	1,486.45	96	392,012.97	3,164,625.23	18.20	-0.10	7.32
			4	293	Rio Conchos esq. Rio Papigochi # 8010	11/abril	1,465.79	96	391,822.07	3,165,059.93	11.50	-0.20	2.62
			5	354	19 Marzo esq. 30 Abril # 1904	18/abril	1,480.00	96	391,406.27	3,164,170.43	17.10	-0.30	8.33
7	4-10_AM_Y_4-8_PM	10	1	160	Garcia Conde # 1315 esq. 21	28/marzo	1,414.33	96	394,696.67	3,169,062.53	37.80	0.20	21.92
			2	161	Sor Juana Ines de la Cruz # 2500 esq. 25	28/marzo	1,430.36	96	394,258.37	3,169,804.23	24.80	4.40	12.11
			3	162	Bustamante # 3304 esq. 33	28/marzo	1,425.85	96	394,389.87	3,170,255.93	30.50	9.50	18.03
			4	166	Industrias esq. Michoacan # 5	28/marzo	1,415.79	96	394,991.57	3,170,281.23	4.50	-0.10	4.25
8	4_11_AM	7	1	138	Paseo de la Palma # 3805 esq. Country Club	24/marzo	1,548.14	96	388,717.87	3,170,531.83	52.50	-0.10	48.28
			2	139	Palmilla # 3604 esq. Av. Fransisco Villa	24/marzo	1,508.15	96	389,098.27	3,171,549.93	62.60	42.40	53.91
			3	140	Valle del Silencio esq. Valle Verde # 5758	24/marzo	1,520.00	96	389,165.97	3,170,561.83	62.70	52.10	60.38
			4	142	Valle Escondido esq. Lateral Periferico de	24/marzo	1,501.94	96	389,550.47	3,170,765.73	77.10	0.10	73.57
			5	261	Vicente Mendoza # 9216 esq. 94	09/abril	1,513.30	96	392,739.87	3,163,455.33	29.00	3.50	16.13
			6	266	Av. Los Pinos # 8810 esq. Calpulalpan	09/abril	1,480.17	96	392,635.97	3,163,989.63	25.90	3.80	19.78
			7	267	Roberto Fierro esq. 94 # 1400	09/abril	1,481.33	96	392,125.47	3,163,948.13	57.20	5.00	38.41
			8	268	104 esq. Fernando Orozco # 10226	09/abril	1,497.76	96	392,199.67	3,163,146.73	36.80	1.30	19.98

Se obtuvieron 233,184 registros de presión en total, durante una semana completa de medición, sin embargo, para un análisis condensado, se presentan en el promedio de valores por día, obteniendo 33,312 registros para procesar; con un valor máximo de presiones igual a 78.10 *mca*, mínimo de -3.90 *mca* y promedio de 19.27 *mca*. Las presiones máximas, mínimas y promedio se distribuyen de manera agregada (clúster) con índices de Moran de 0.154268, 0.345118 y 0.227365 respectivamente y existe menos de 1% de probabilidad que su distribución sea resultado de valores aleatorios (*Figura 4.2, 4.3 y 4.4*). es decir que si da representativa y consistencia a las mediciones obtenidas en campo.

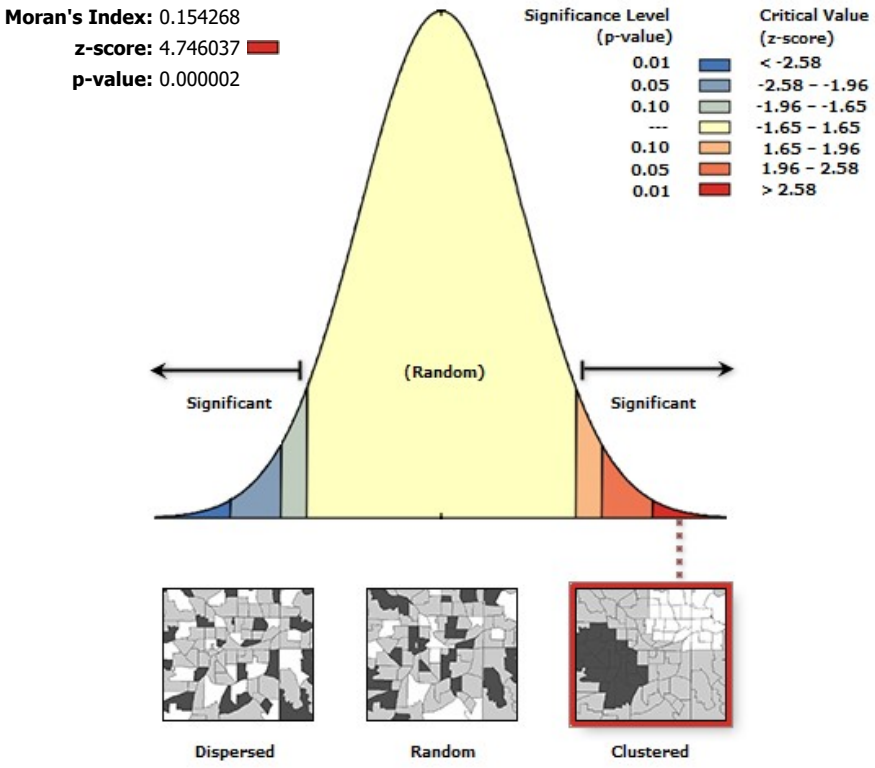


Figura 4. 2. Correlación espacial de presiones máximas en puntos de monitoreo (Elaboración propia).

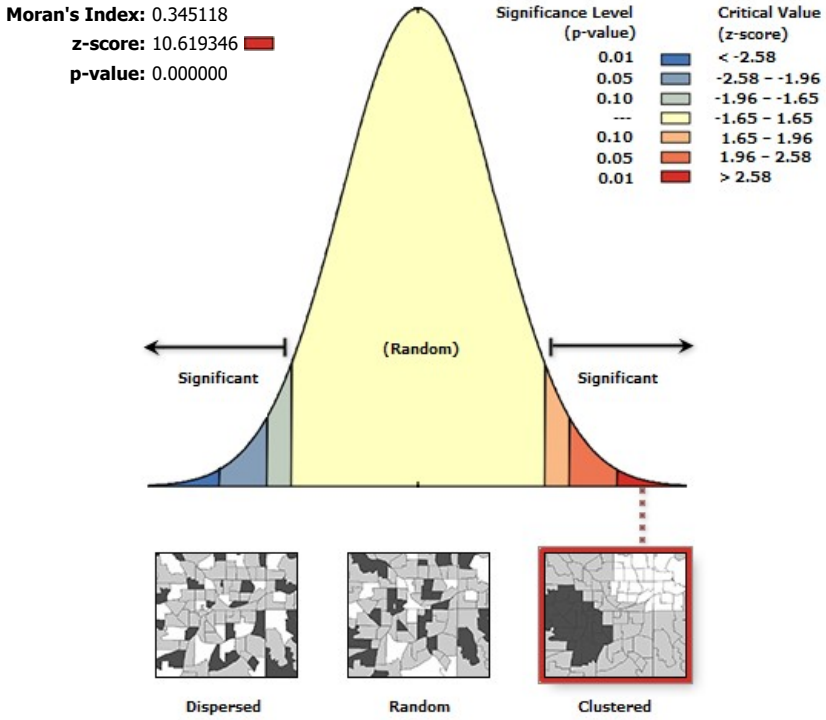


Figura 4. 3. Correlación espacial de presiones mínimas en puntos de monitoreo (Elaboración propia).

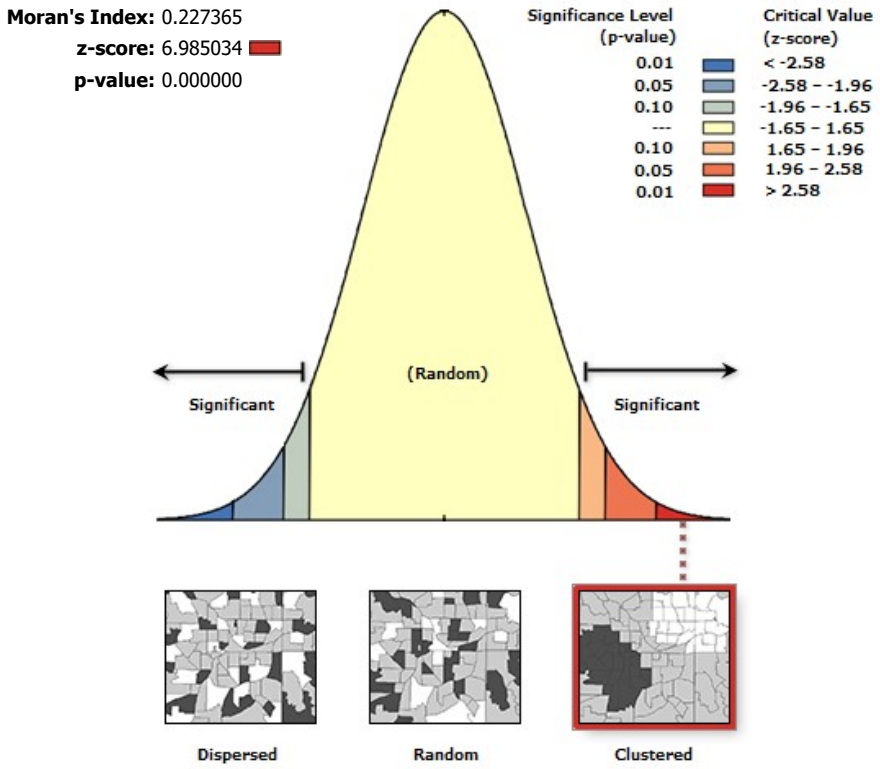


Figura 4. 4. Correlación espacial de presiones promedio en puntos de monitoreo (Elaboración propia).

Para facilitar el análisis y observación de los valores de presiones máximas, mínimas y promedios registrados en cada punto de monitoreo se realizó una interpolación mediante inversa ponderada (IDW por sus siglas en inglés), este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra (Watson & Philip, 1985).

En el caso de la presión máxima se pueden apreciar concentraciones de altas presiones en la región noroeste y sureste de la ciudad con valores superiores a los 38 *mca* (*Figura 4.5*). Por su parte las presiones mínimas presentan valores inferiores a cero en la región centro-este y sureste de la ciudad con niveles de hasta -2.79 *mca*; solo en la parte norte y oeste de la ciudad no se presentan presiones mínimas por debajo de los 5 *mca* (*Figura 4.6*).

Las presiones promedio presentan pequeñas zonas con valores elevados como lo es el oeste de Chihuahua con rangos superiores a los 51.41 *mca* (*Figura 4.7*).

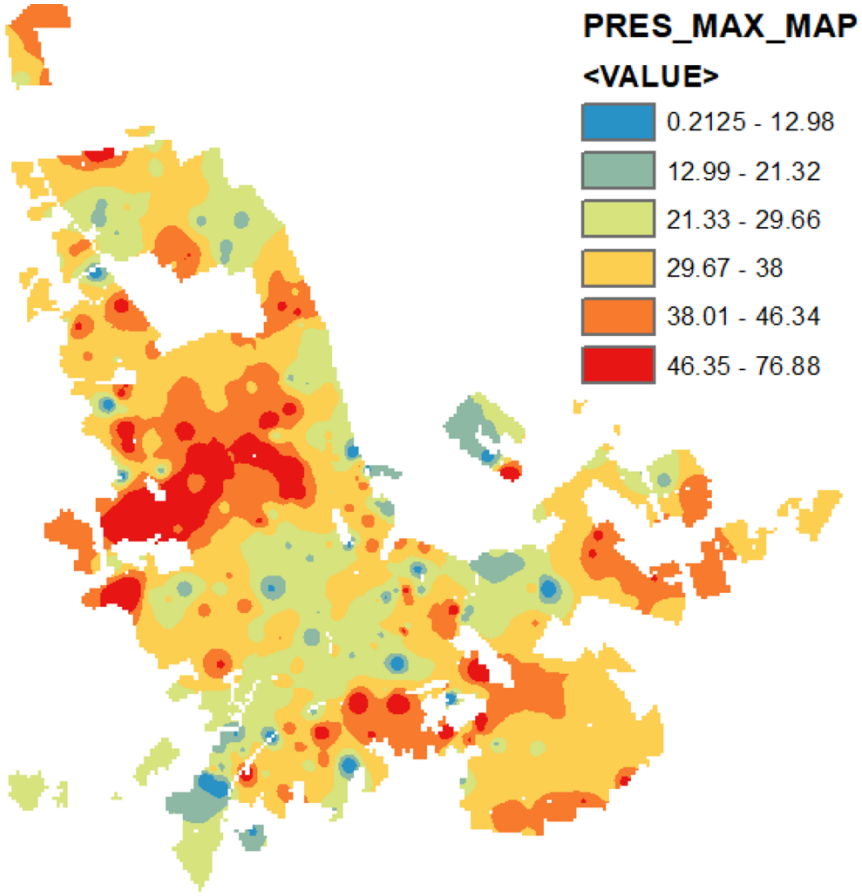


Figura 4. 5. Interpolación de los valores de presión máxima en *mca* de los puntos de monitoreo (Elaboración propia).

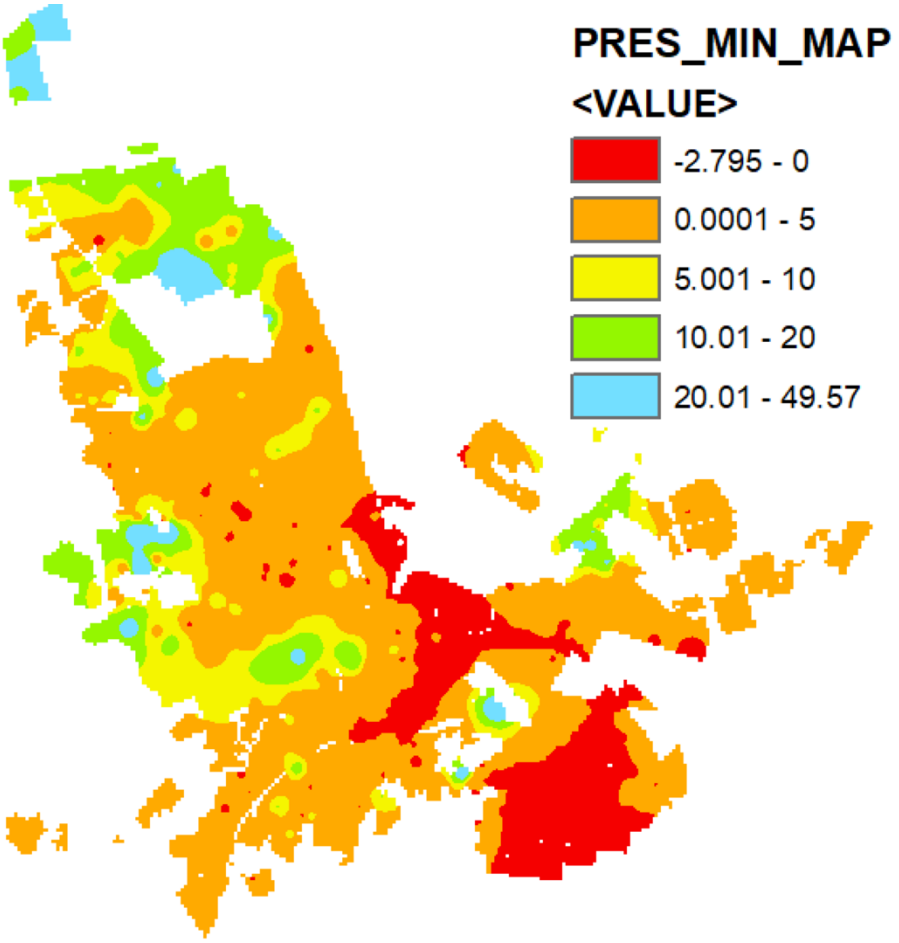


Figura 4. 6. Interpolación de los valores de presión mínima en *mca* de los puntos de monitoreo (Elaboración propia).

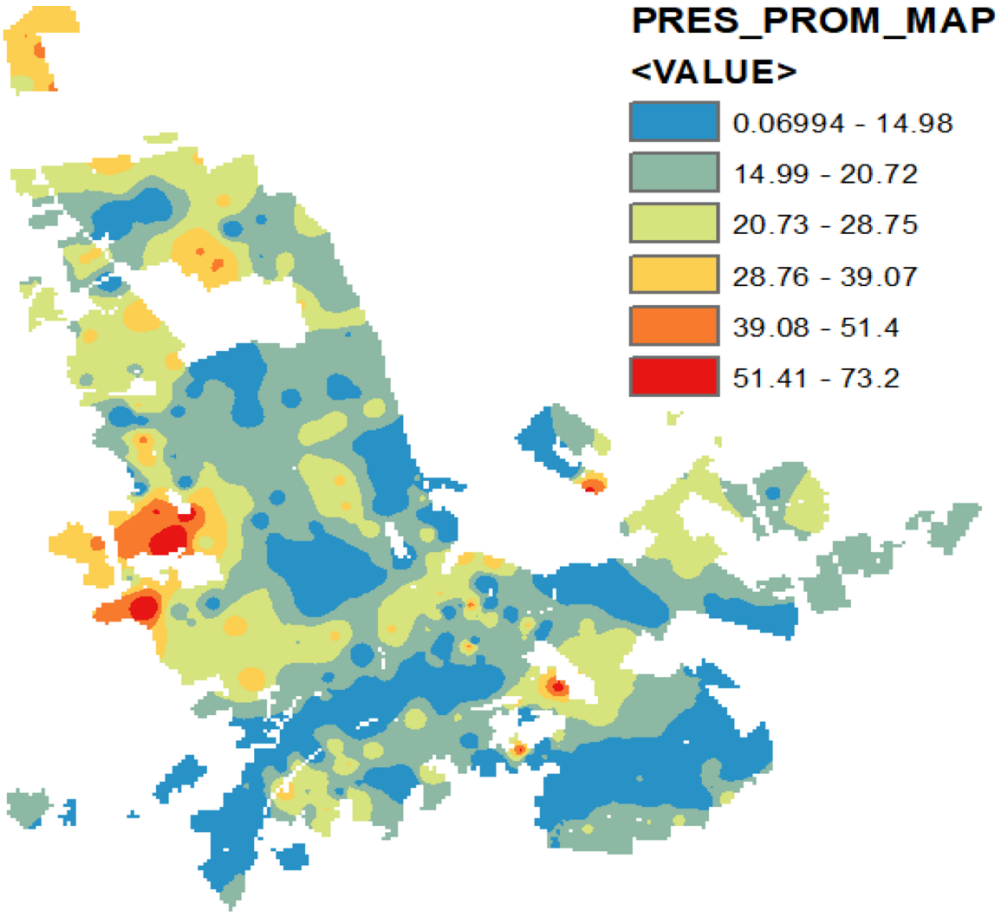


Figura 4. 7. Interpolación de los valores de presión promedio en *mca* de los puntos de monitoreo (Elaboración propia).

Con los datos de presión máxima, mínima y promedio en cada punto monitoreado se procedió a realizar un análisis por área de suministro, arrojando los valores máximos, máximos promedio, mínimos, mínimos promedio y la presión media para cada horario de servicio (*Tabla 4.3*) (*Figuras 4.8 y 4.9*).

Tabla 4. 3. Análisis de presiones máximas, mínimas y promedio (*mca*) por horario de servicio (Elaboración propia).

No.	Descripción	Horas de suministro	Cantidad de puntos de registros	Presión Máxima Promedio	Presión Mínima Promedio	Presión Máxima registrada	Presión Mínima registrada	Presión Promedio
1	8_AM_A_2_PM_Y_6-11_PM	11.0	4	36.68	1.88	43.60	-2.10	13.20
2	24_HRS	24.0	45	31.65	3.33	78.10	-0.70	20.90
3	3-8_AM_Y_3-7_PM	9.0	3	28.00	1.93	32.30	0.00	13.10
4	4_AM_A_10_PM	18.0	4	28.53	11.18	34.40	0.00	22.53
5	4-10_AM_Y_2-8_PM	12.0	3	23.90	4.03	33.20	0.00	15.45
6	4-10_AM_Y_3-9_PM	12.0	5	20.72	-0.10	34.00	-0.30	9.87
7	4-10_AM_Y_4-8_PM	10.0	4	24.40	3.50	37.80	-0.10	14.08
8	4-11_AM	7.0	8	50.48	13.51	77.10	-0.10	41.30
9	4-8_AM	4.0	40	34.61	0.24	62.70	-1.10	16.79
10	4-8_AM_Y_4-8_PM	8.0	27	34.26	1.16	60.00	-1.10	15.95
11	4-8_PM	4.0	5	38.28	-0.46	47.60	-1.30	17.70
12	4-9_AM_Y_3-8_PM	10.0	52	32.87	1.74	63.90	-3.90	17.28
13	4-9_AM_Y_4-8_PM	9.0	126	35.22	7.47	63.40	-2.40	20.91
14	8_AM_A_8_PM	12.0	6	37.55	-0.08	46.80	-0.30	16.26
15	8_PM_A_8_AM	12.0	2	46.70	25.55	65.20	8.30	38.43
16	9_AM_A_12_PM	3.0	6	17.08	0.13	34.80	-0.10	7.87
17	9_AM_A_12_PM_Y_4-8_PM	7.0	3	18.40	-0.10	25.90	-0.20	14.73
18	IRREGULAR	3.0	4	24.63	-0.08	57.40	-0.50	17.50
			347					

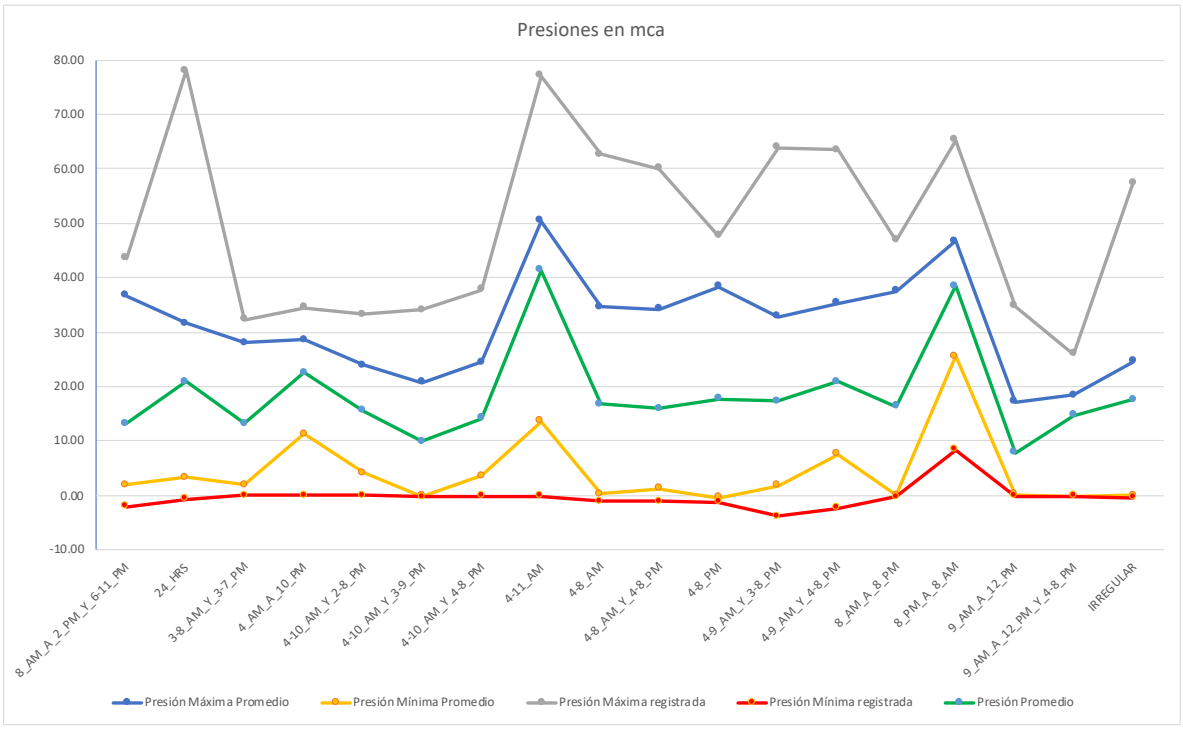


Figura 4. 8. Gráfica de los valores de presión máxima, mínima y promedio por área de suministro (Elaboración propia).

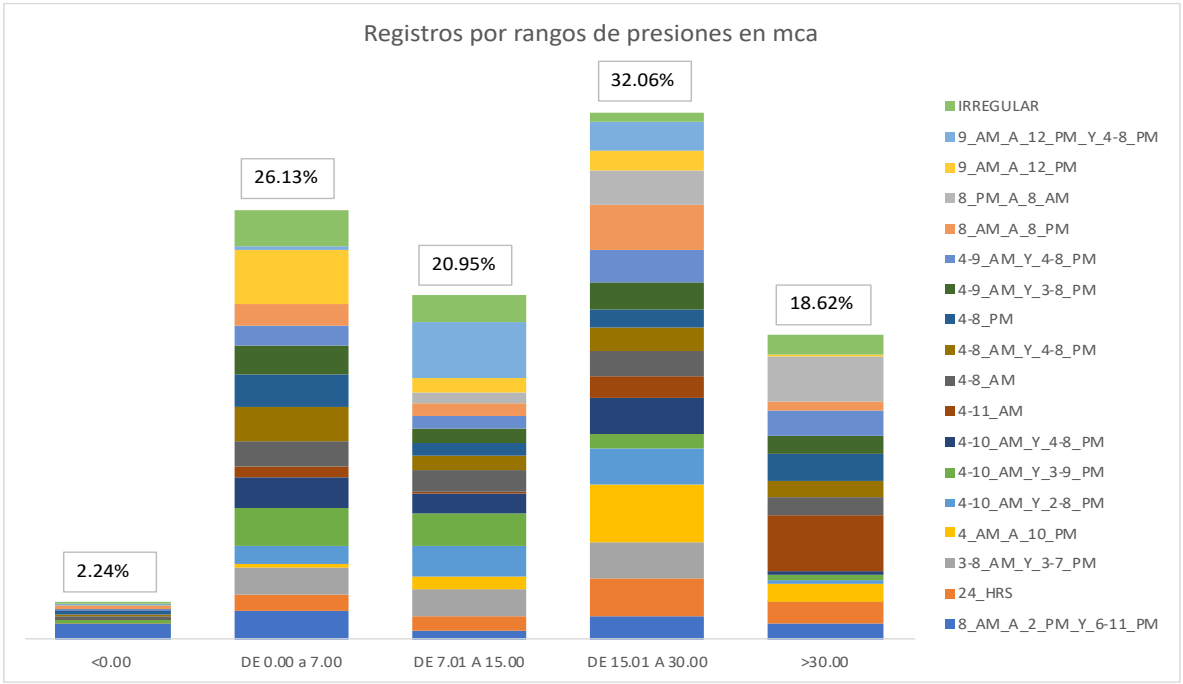


Figura 4. 9. Porcentaje acumulado de los diversos rangos de presión tomando en cuenta su área de influencia (Elaboración propia).

Adicionalmente a los 347 puntos de monitoreo se estudiaron 10 más distribuidos en zonas donde se consideraba pudiera existir una sobrepresión, depresión, cambios repentinos y en general se pudiera presentar un posible transitorio rápido.

En el fraccionamiento Montecarlo se instalaron 3 puntos de monitoreo: los primeros dos registradores el No.11 y el No.14 (aguas arriba y aguas abajo respectivamente *Figuras 4.11 y 4.12*) se colocaron una semana completa iniciando el viernes 1ro y terminando el 8 de septiembre del 2017; el tercer punto se instaló del 15 al 18 de septiembre del 2017 *(Figura 4.13*), en la zona con más reportes de falta de agua.



Figura 4. 10. Colocación de registrador de presiones en el fraccionamiento Montecarlo.

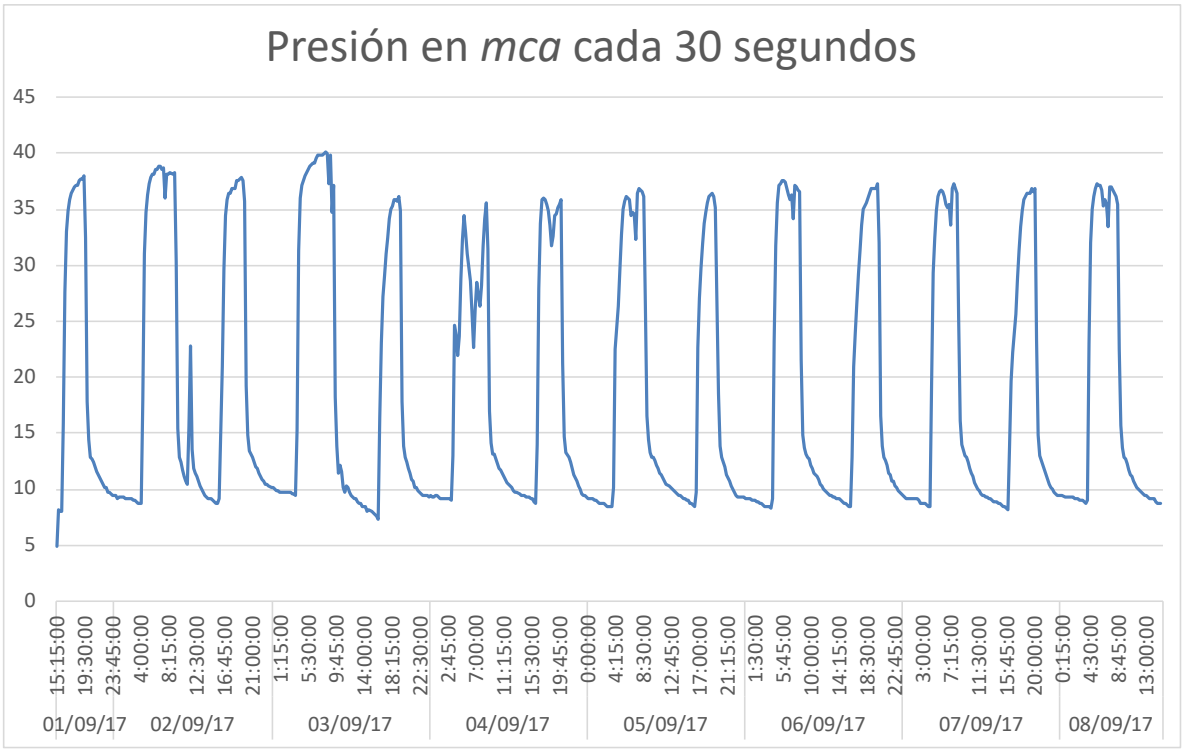


Figura 4. 11. Comportamiento de las presiones en el registrador No.14 en Montecarlo (Elaboración propia).

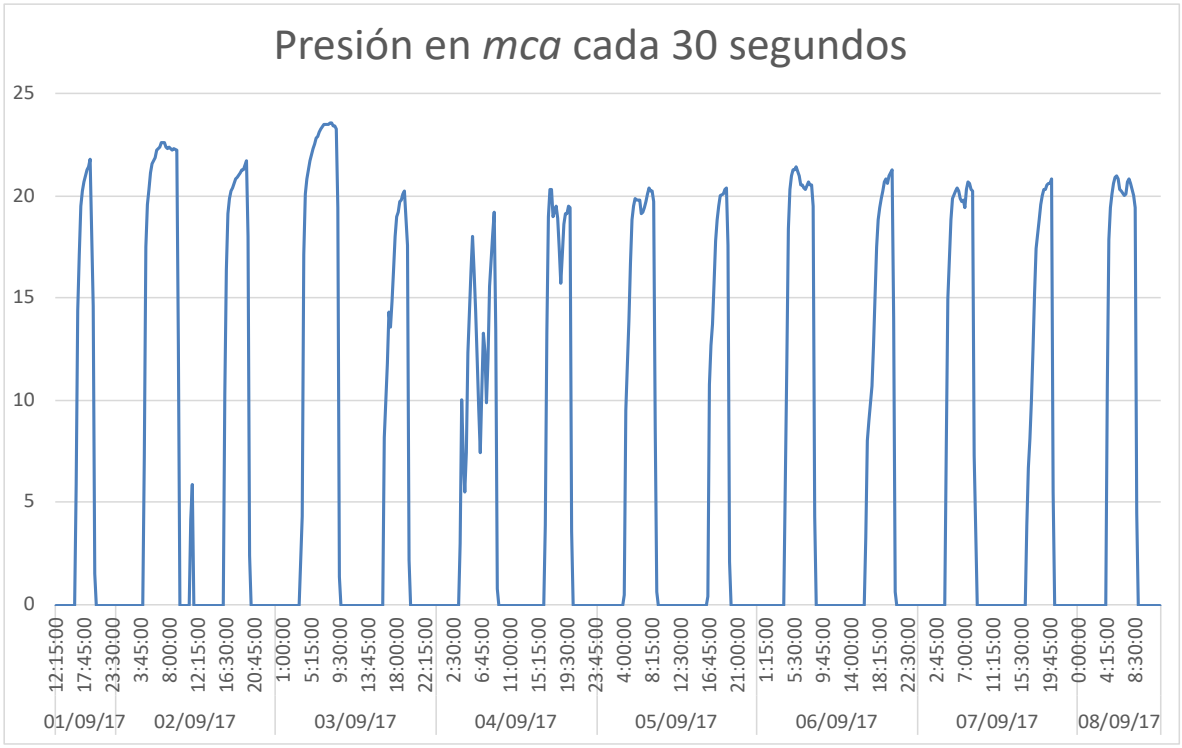


Figura 4. 12. Comportamiento de las presiones en el registrador No.11 en Montecarlo (Elaboración propia).

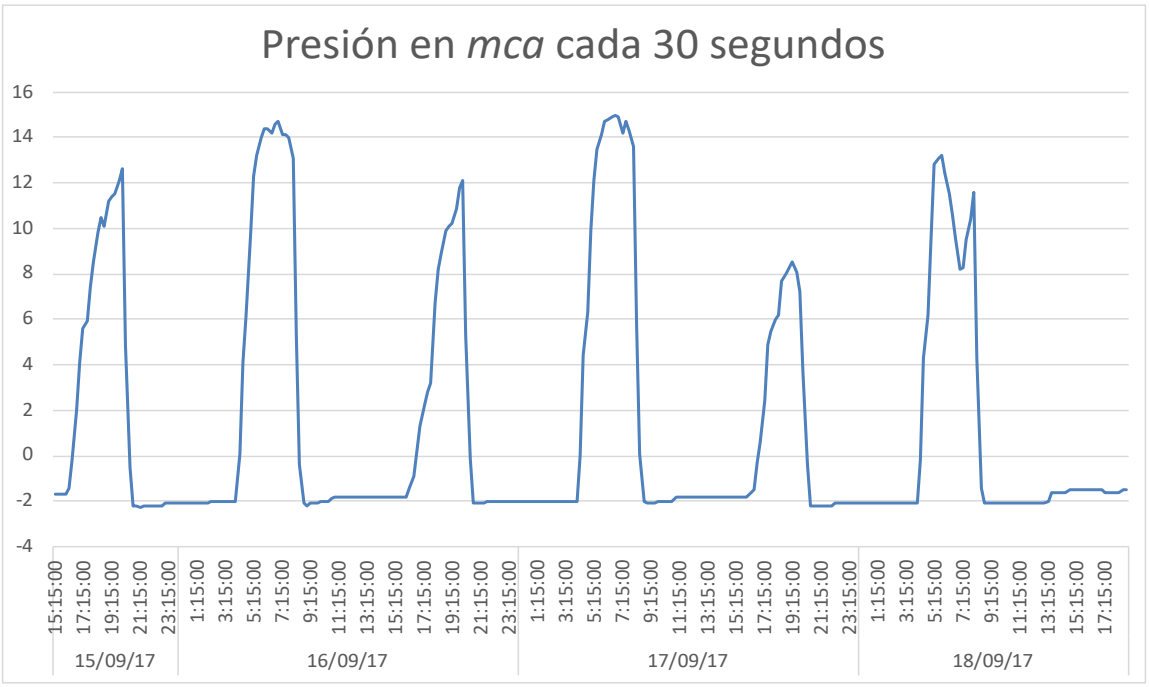


Figura 4. 13. Comportamiento de las presiones en el registrador No.13 en Montecarlo (Elaboración propia).

En la calle Zaragoza se instaló el registrador No.5 en la zona de mayor elevación *(Figura 4.14)*. Se obtuvieron datos de una semana completa iniciando el día miércoles 10 y terminando el 17 de octubre del 2017.

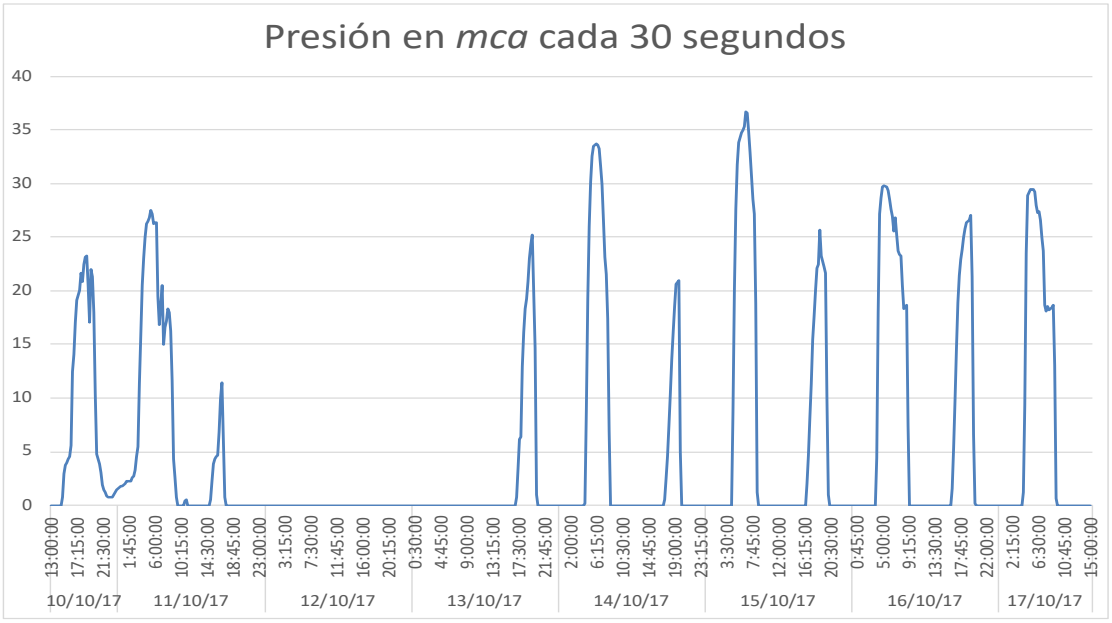


Figura 4. 14. Comportamiento de las presiones en el registrador No.5 en Zaragoza (Elaboración propia).

En el residencial Cumbres II se instaló el registrador No.30 en la parte alta. Se obtuvieron datos de una semana completa iniciando el día miércoles 25 y terminando el 31 de marzo del 2018 *(Figura 4.15)*.

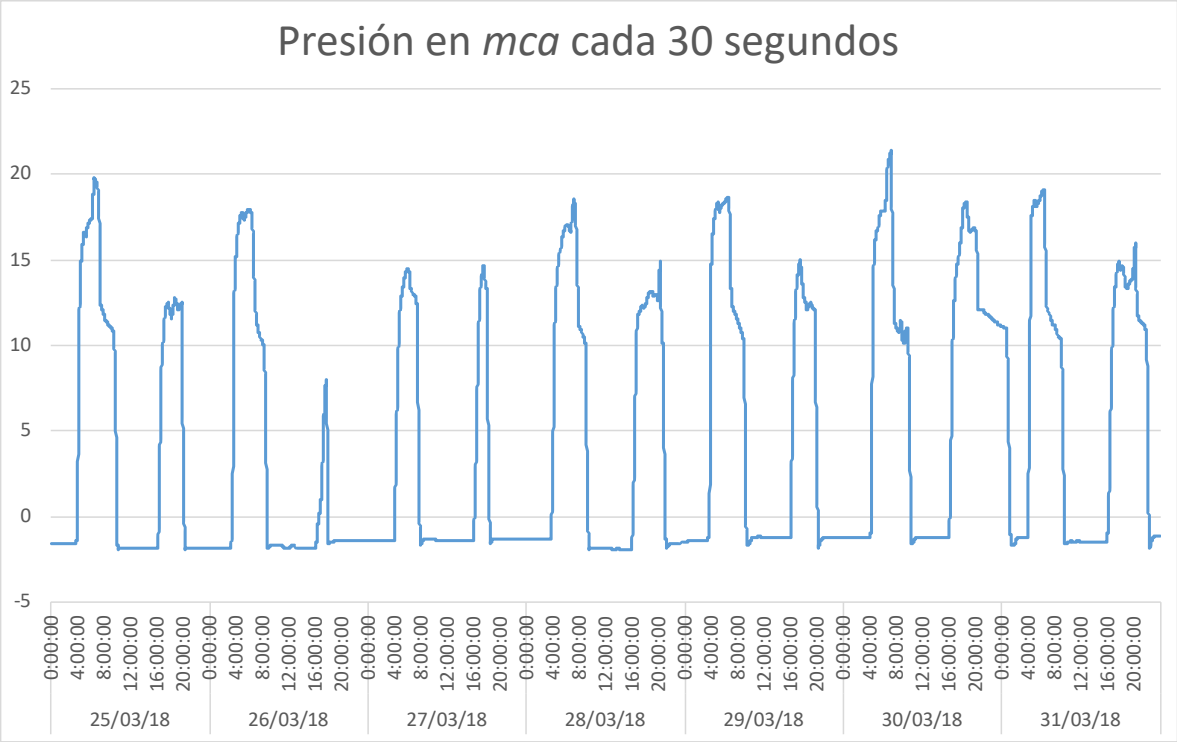


Figura 4. 15. Comportamiento de las presiones en el registrador No.30 en Cumbres II (Elaboración propia).

Al observar en directo la presencia de presiones negativas mediante el uso de un manómetro/vacuómetro digital (*Figura 4.17*) en el fraccionamiento Cumbres II, se procedió a estudiar con un rango más holgado el comportamiento de las presiones en el punto más elevado, instalando el registrador No.1 del 12 al 30 de mayo del 2018 *(Figura 4.16)*.

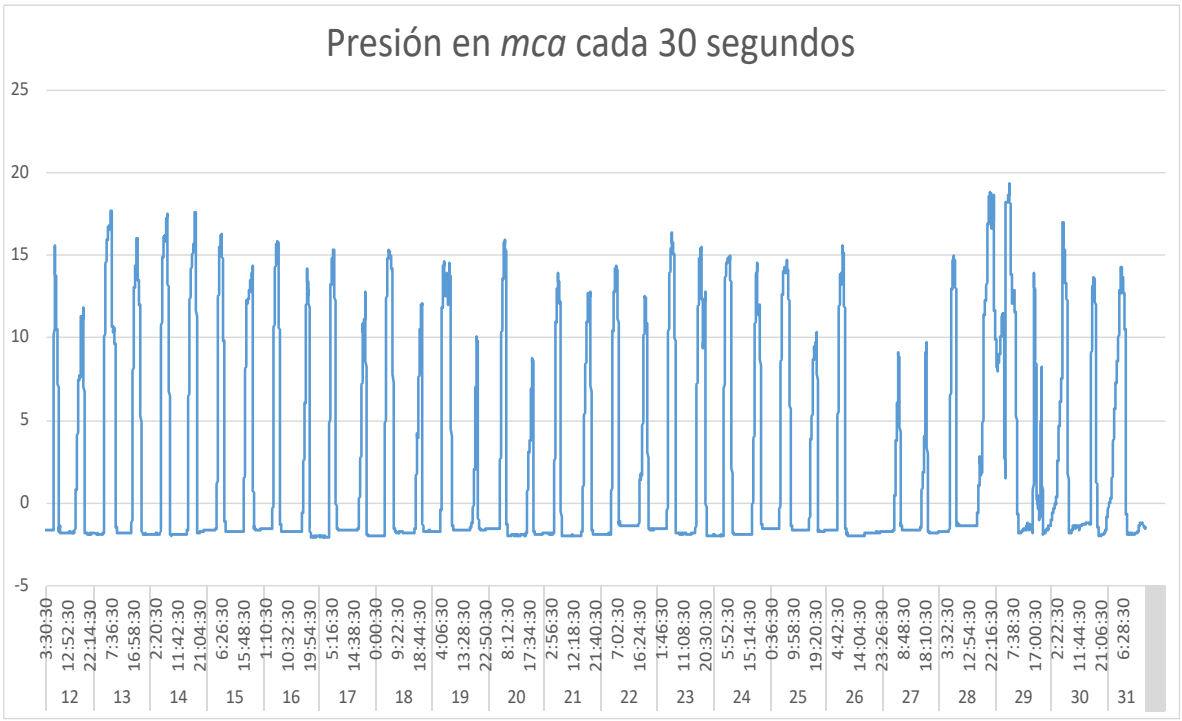


Figura 4. 16. Comportamiento de las presiones en el registrador No.1 en Cumbres II (Elaboración propia)



Figura 4. 17. Presencia de presiones negativas utilizando un manómetro/vacuómetro digital en el fraccionamiento Cumbres II.

En el fraccionamiento Quinta Sebastián se instalaron 2 puntos registradores de presión: el No.34 y el No.39, el primero aguas abajo y el segundo aguas arriba *(Figuras 4.18 y 4.19)*. Se obtuvieron datos de una semana completa iniciando el jueves 14 y terminando el 20 de septiembre del 2017.

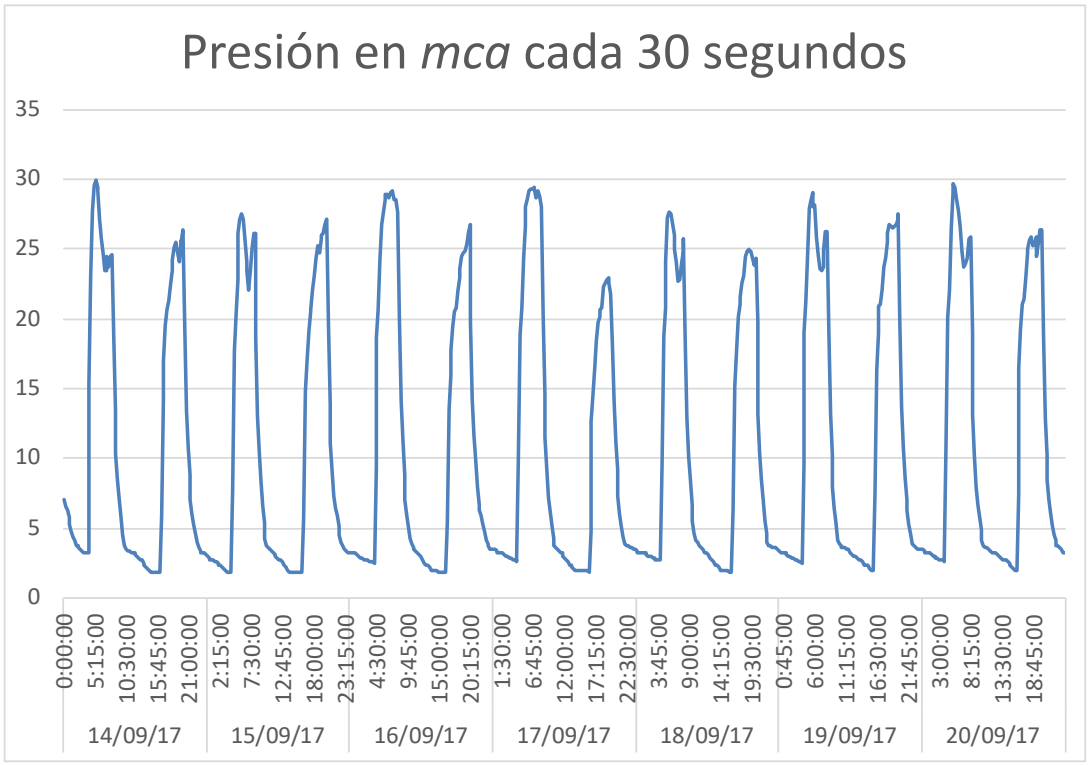


Figura 4. 18. Comportamiento de las presiones en el registrador No.34 en Quinta Sebastián (Elaboración propia).

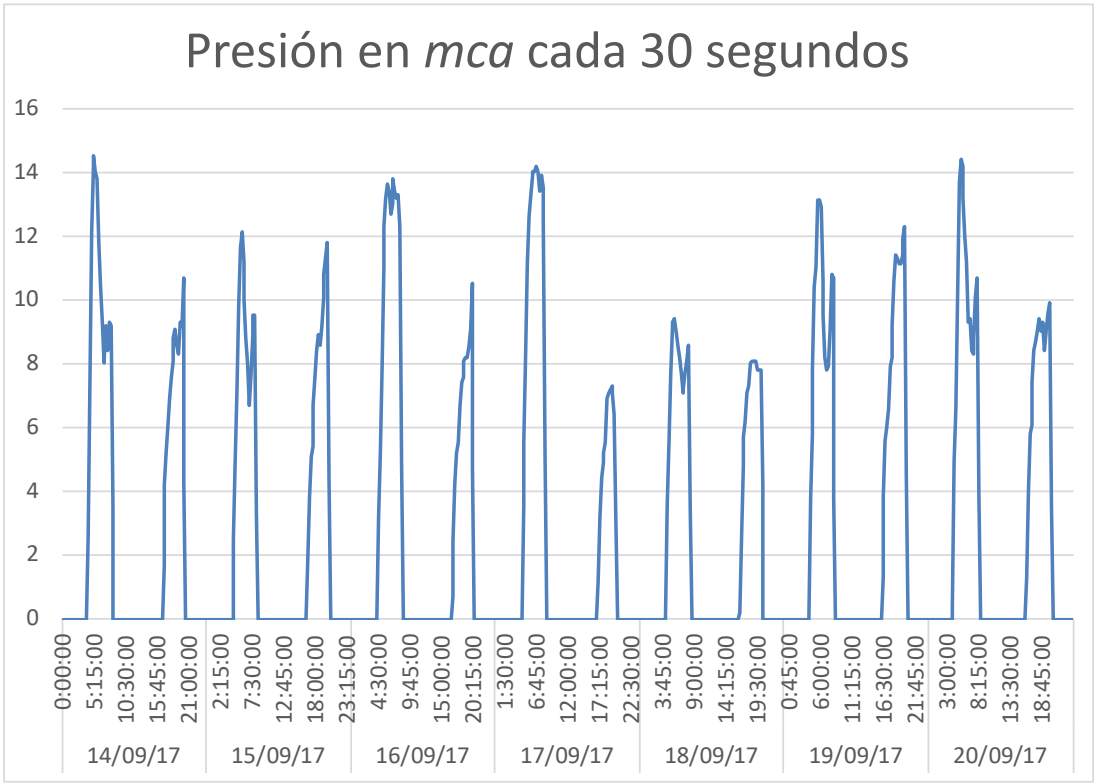


Figura 4. 19. Comportamiento de las presiones en el registrador No.39 en Quinta Sebastián (Elaboración propia).



Figura 4. 20. Registrador No.39 colocado en el fraccionamiento Quinta Sebastián.

En la colonia Rigoberto Quiroz se instalaron 2 registradores de presión: el No.19 y el No.24 en puntos aleatorios *(Figuras 4.21 y 4.22)*. Se obtuvieron datos de una semana completa iniciando el lunes 7 y terminando el 14 de mayo del 2018.

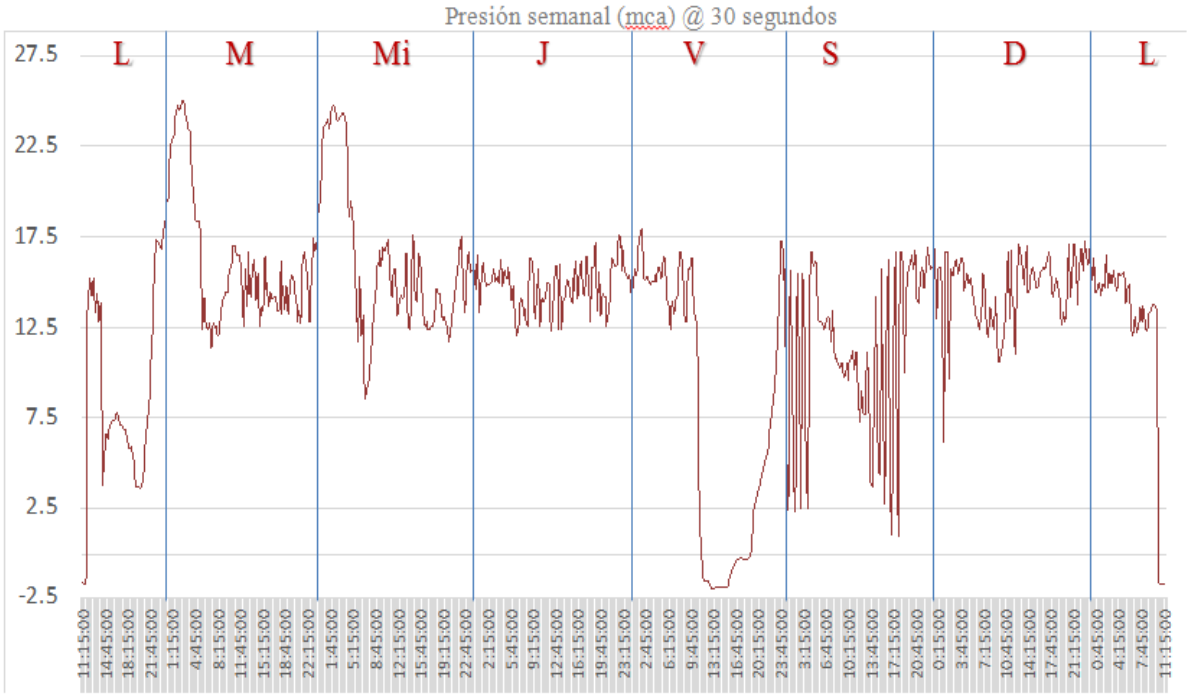


Figura 4. 21. Comportamiento de las presiones en el registrador No.19 en Rigoberto Quiroz (Elaboración propia).

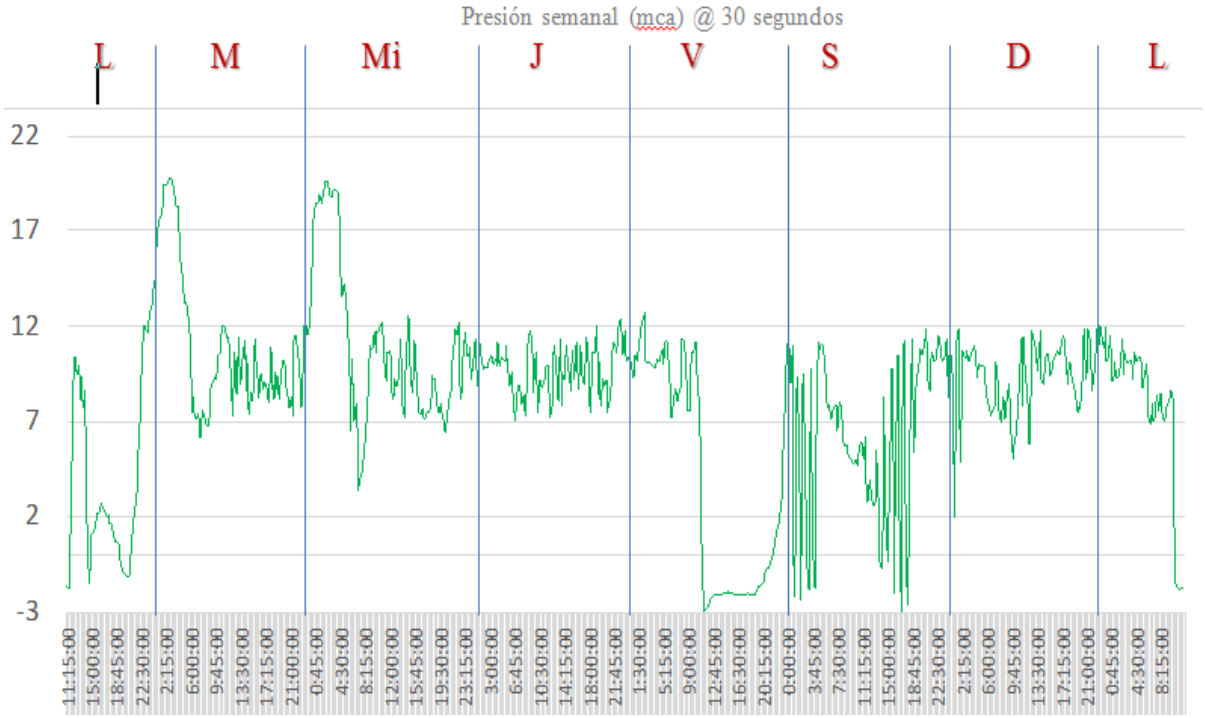


Figura 4. 22. Comportamiento de las presiones en el registrador No.24 en Rigoberto Quiroz (Elaboración propia).

Tabla 4. 4. Resumen de puntos de monitoreo adicionales (Elaboración propia).

No.	Ubicación	Número de registrador	Presión mínima (mca)	Presión máxima (mca)	Presión promedio cuando hay servicio (mca)	Rango máximo de presión (mca) en un intervalo de 15 min	Promedio de horas de suministro al día
1	Montecarlo	No.11	0.00	23.60	16.98	18.00	8.97
2	Montecarlo	No.14	4.90	40.10	18.75	19.00	24
3	Montecarlo	No.13	-2.30	15.00	9.08	7.80	7.45
4	Zaragoza	No.5	0.00	36.70	16.13	17.60	7.99
5	Cumbres II	No.30	-1.90	21.40	12.60	13.81	9.82
6	Cumbres II	No.1	-2.10	19.30	10.01	12.17	7.35
7	Quinta Sebastián	No.34	1.90	29.90	10.86	12.00	24
8	Quinta Sebastián	No.39	0.00	14.50	8.33	7.70	8.00
9	Rigoberto Quiroz	No.19	-2.00	25.10	13.89	13.90	22.65
10	Rigoberto Quiroz	No.24	-2.90	19.90	9.38	12.20	21.40

Los resultados de los puntos de monitoreo adicionales arrojaron datos importantes como son: rangos de presión de 0 a 36.7 *mca*, presencia de presiones negativas y presurización rápida de la red (19 *mca* en menos de 15 *min*). Sin embargo, con los dispositivos actuales de medición no fue posible apreciar transitorios en las tuberías.

Para visualizar transitorios rápidos en la red de la ciudad fue necesario un aparato especializado denominado "Tritón IT" *(Figura 4.23)* capaz de detectar y registrar surgimiento de presión con frecuencia de hasta 1000 lecturas por segundo, el registrador comprueba la señal de presión contra el umbral de ajuste 10 veces por segundo y una vez activado comienza a registrar datos a tasas de registro de 10 *Hz*, 100 *Hz* o 1 *KHz*.

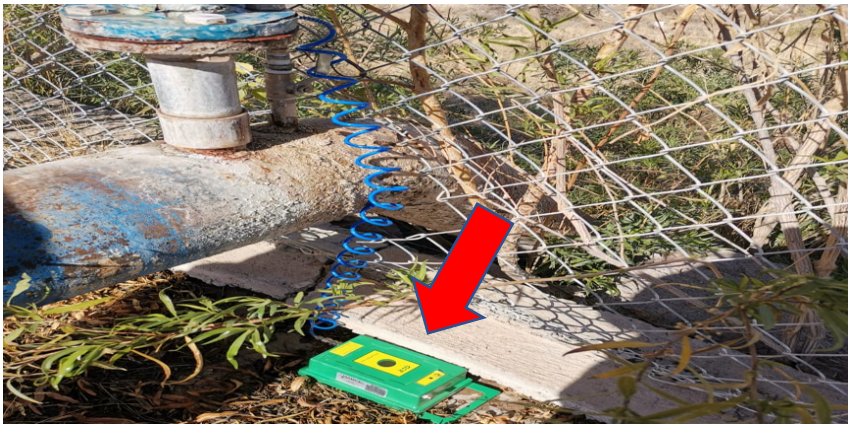


Figura 4. 23. Registrador de Transitorios "Tritón IT".

En colaboración con el Departamento de Red Hidráulica de la JMAS se llevó a cabo el análisis de las presiones en el Fraccionamiento Quinta Versalles (*Figura 4.24*), en donde se han registrado más de 21 reportes de fallas en la red en un periodo de 6 meses. El transitorio rápido pudo ser generado por cambios bruscos de la velocidad en la tubería derivados de maniobras rápidas como el paro repentino la bomba o el cierre rápido de una válvula. Los cambios bruscos en la velocidad se acompañan de cambios bruscos en la presión que se propagan por la tubería, generando ondas de presión de periodo muy corto (apenas varios segundos).

El dispositivo de registro se colocó en la salida de la fuente de abastecimiento del fraccionamiento que en este caso en particular es un rebombeo.

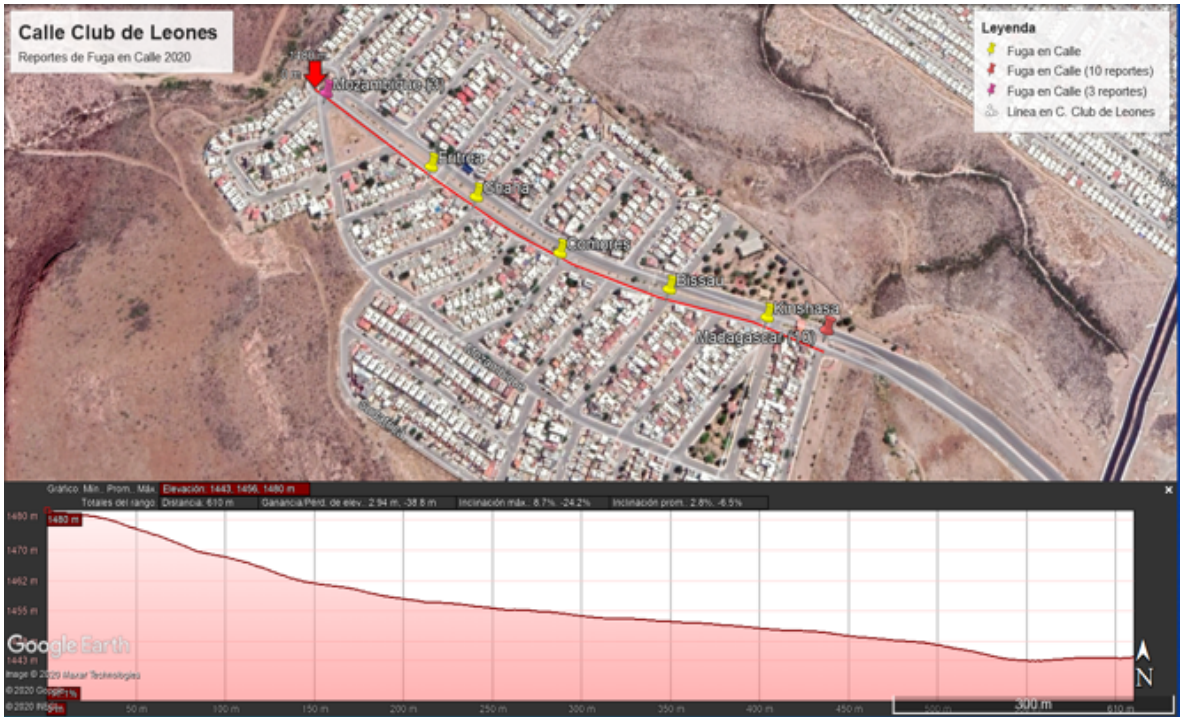


Figura 4. 24. Fraccionamiento Quinta Versalles (Elaboración propia).

En el primer día de datos, el dispositivo registró 4 transitorios rápidos (*Figura 4.25*).

I. 3:06 *a.m.* ➔ Transitorio registrado de 3.8 a 6.7 Kg/cm^2 = 2.9 Kg/cm^2

II. 3:15 *a.m.* ➔ Transitorio registrado de 0.7 a 5.9 Kg/cm^2 = 5.2 Kg/cm^2

III. 3:32 a.*m.* ➔ Transitorio registrado de 3.7 a 7.1 Kg/cm^2 = 3.4 Kg/cm^2

IV. 3:41 *a.m.* ➔ Transitorio registrado de 0.7 a 5.9 Kg/cm^2 = 5.2 Kg/cm^2

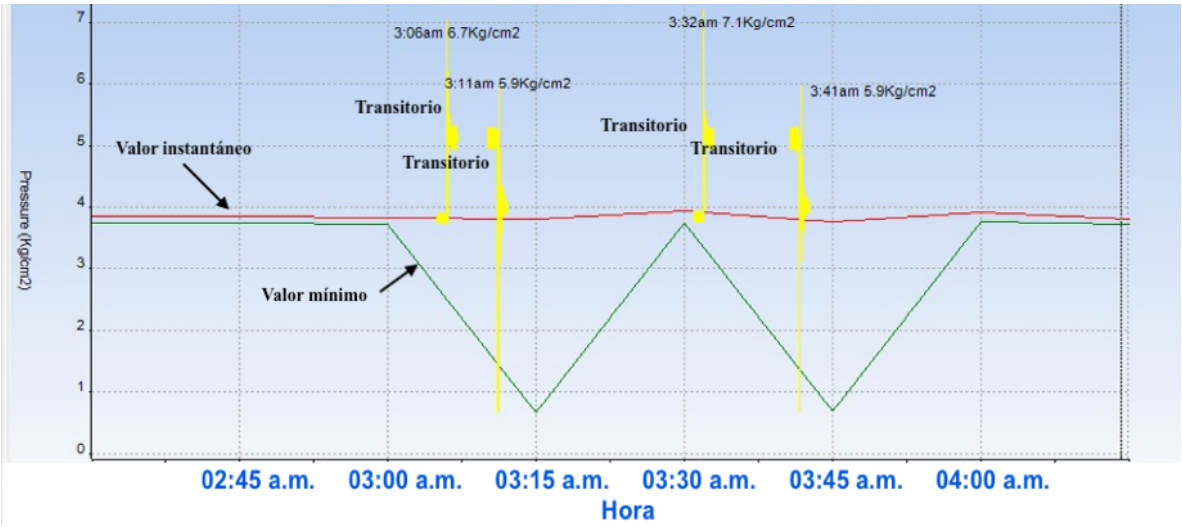


Figura 4. 25. Transitorios rápidos del día 18 de diciembre en el fraccionamiento Quinta Versalles (Elaboración propia).

La *Figura 4.25* muestra en las líneas amarillas las oscilaciones de la variación que se consideran transitorios, la línea verde es como se ve el comportamiento "general" de la presión en el punto de medición, y la línea roja es como debería ser el comportamiento estable en el tiempo de la presión de operación.

Haciendo un acercamiento al transitorio presentado a las 3:32 *a.m.* (*Figura 4.26*) podemos apreciar el comportamiento de las presiones, que pasa de un régimen permanente a uno transitorio y regresa a permanente después de unos segundos.

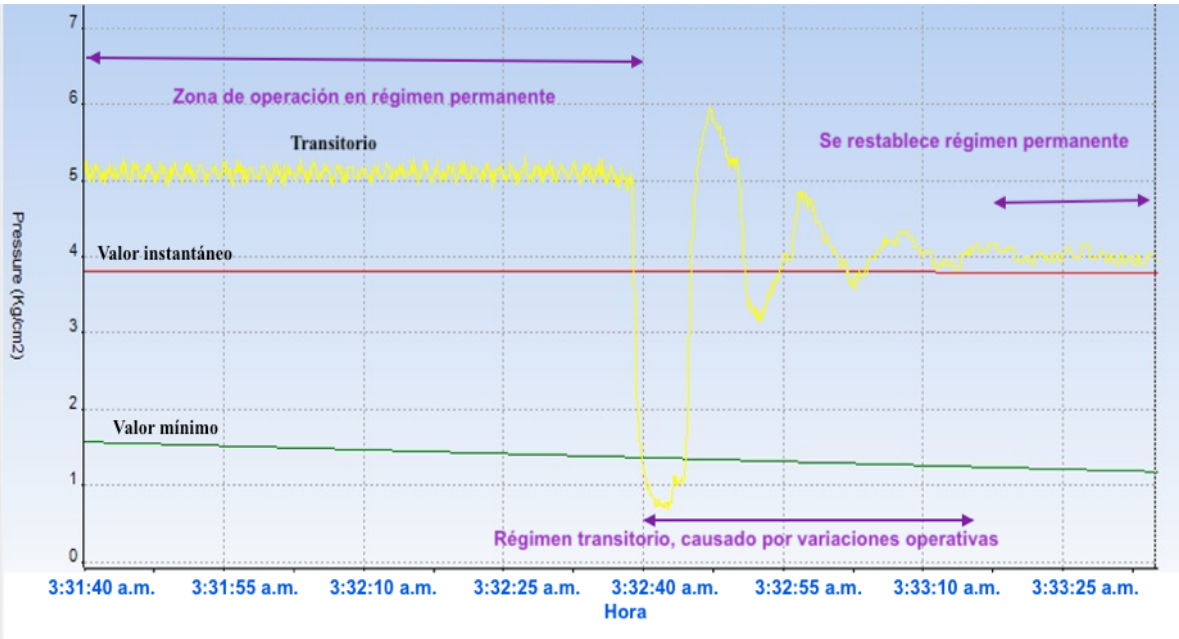


Figura 4. 26. Acercamiento al transitorio rápido presentado a las 3:32 a.m. en el Fraccionamiento Quinta Versalles (Elaboración propia).

Se observa la presencia de transitorios rápidos de hasta **7.7 *Kg/cm*²** (*Figura 4.27*) además de un desnivel [Punto más alto "Tanque El León 2" = 1,504.04 *m.s.n.m.*, punto más bajo (cerca de la caseta de entrada) 1,443 *m.s.n.m.* = 61 *m*] que pudiera ocasionar un aumento de la presión superior a la presión de trabajo de 10 *Kg/cm*² de la tubería existente.

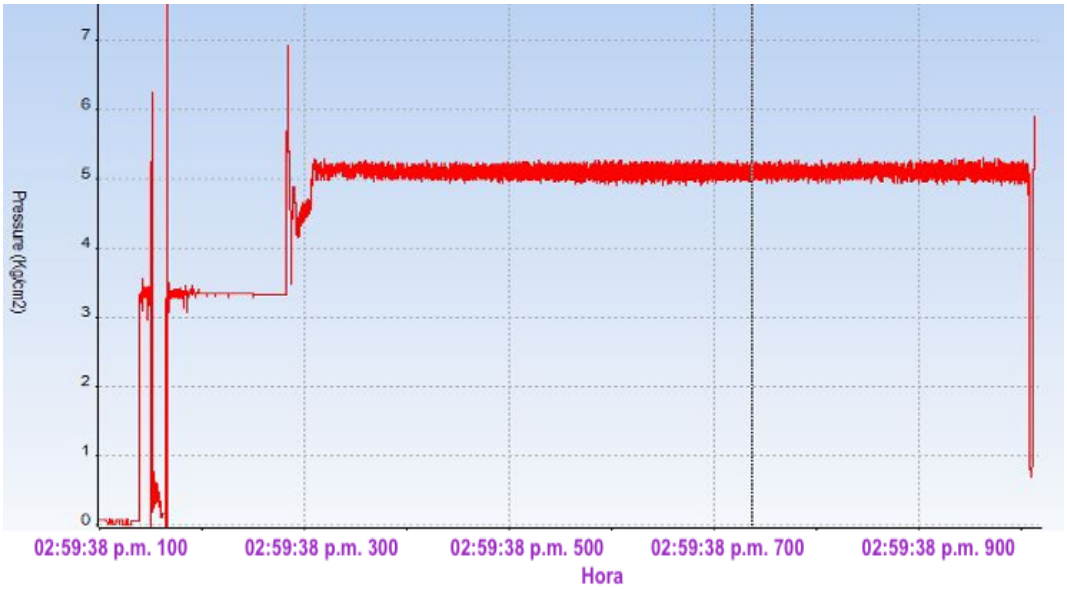


Figura 4. 27. Transitorio de mayor magnitud registrador por el dispositivo (7.7 Kg/cm^2) (Elaboración propia).

4.1.2. Fugas

Análisis de fugas reportadas mes con mes del año 2015 al 2017 en el CIS.

Tabla 4. 5. Análisis de fugas reportadas en el CIS del 2015 al 2017 (Elaboración propia).

AÑO	TIPO DE FUGA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUBTOTALES	%	TOTAL
2015	RED	680	574	573	572	557	525	489	457	573	681	584	750	7,015	47.73%	14,697
		9.69%	8.18%	8.17%	8.15%	7.94%	7.48%	6.97%	6.51%	8.17%	9.71%	8.33%	10.69%			
	MEDIDOR	672	506	807	488	387	564	609	634	773	798	688	756	7,682	52.27%	
		8.75%	6.59%	10.51%	6.35%	5.04%	7.34%	7.93%	8.25%	10.06%	10.39%	8.96%	9.84%			
2016	RED	663	600	591	495	537	494	592	798	627	813	702	759	7,671	45.81%	16,746
		8.64%	7.82%	7.70%	6.45%	7.00%	6.44%	7.72%	10.40%	8.17%	10.60%	9.15%	9.89%			
	MEDIDOR	541	628	597	505	944	1,003	871	850	776	764	821	775	9,075	54.19%	
		5.96%	6.92%	6.58%	5.56%	10.40%	11.05%	9.60%	9.37%	8.55%	8.42%	9.05%	8.54%			
2017	RED	614	536	552	445	510	512	733	714	543	631	612	596	6,998	51.72%	13,531
		8.77%	7.66%	7.89%	6.36%	7.29%	7.32%	10.47%	10.20%	7.76%	9.02%	8.75%	8.52%			
	MEDIDOR	643	781	582	528	524	447	569	489	436	483	526	525	6,533	48.28%	
		9.84%	11.95%	8.91%	8.08%	8.02%	6.84%	8.71%	7.49%	6.67%	7.39%	8.05%	8.04%			
	RED	1,957	1,710	1,716	1,512	1,604	1,531	1,814	1,969	1,743	2,125	1,898	2,105			
	MEDIDOR	1,856	1,915	1,986	1,521	1,855	2,014	2,049	1,973	1,985	2,045	2,035	2,056			
	TOTALES	**3,813**	**3,625**	**3,702**	**3,033**	**3,459**	**3,545**	**3,863**	**3,942**	**3,728**	**4,170**	**3,933**	**4,161**			
	POR MES =	8.48%	8.06%	8.23%	6.74%	7.69%	7.88%	8.59%	8.77%	8.29%	9.27%	8.75%	9.25%			

Se vaciaron todos y cada uno de los puntos reportados con fuga y su tipo al ArcMap ® (ej. *Figura 4.28)*, en donde se determinó a que área de influencia corresponde cada reporte.

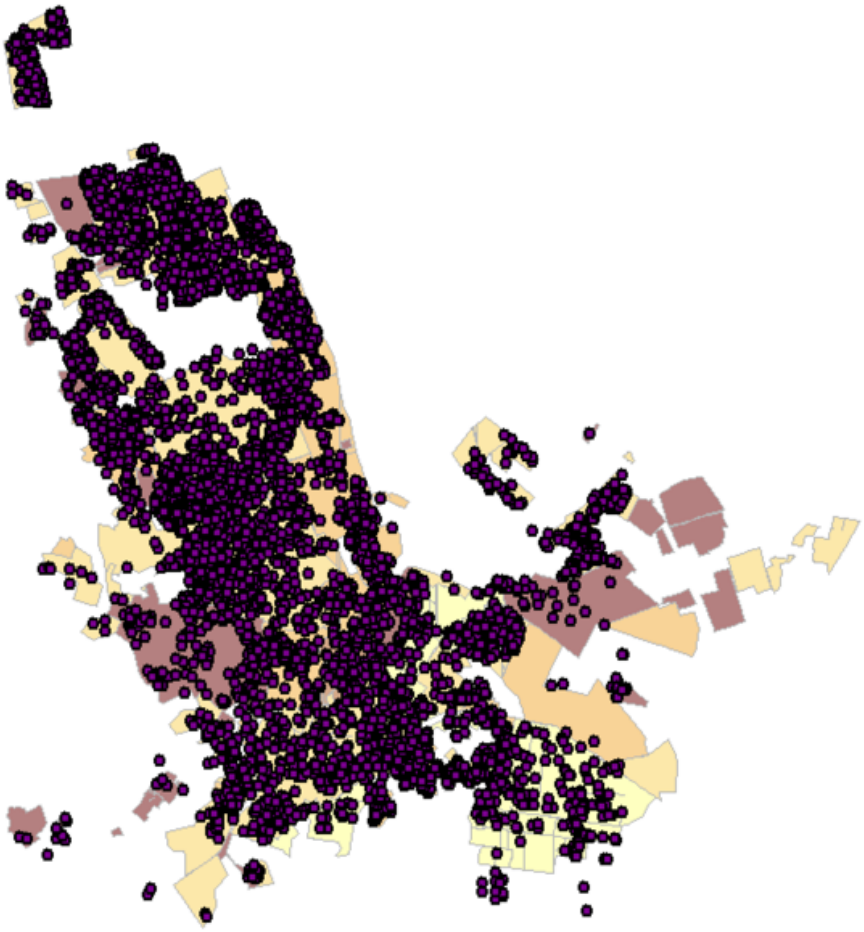


Figura 4. 28 Puntos con fugas en medidor en el 2015 (Elaboración propia).

Tabla 4. 6 Cantidad de fugas por área de influencia (Elaboración propia).

No.	Horario de servicio	Horas de suministro	No. de puntos de monitoreo	Fugas Red 2015	Fugas Medidor 2015	Fugas Red 2016	Fugas Medidor 2016	Fugas Red 2017	Fugas Medidor 2017
1	8_AM_A_2_PM_Y_6-11_PM	11.0	4	142	206	163	88	128	119
2	24_HRS	24.0	45	849	621	840	841	840	649
3	3-8_AM_Y_3-7_PM	9.0	3	107	40	139	46	123	92
4	4_AM_A_10_PM	18.0	4	122	81	86	61	173	59
5	4-10_AM_Y_2-8_PM	12.0	3	219	162	116	76	131	63
6	4-10_AM_Y_3-9_PM	12.0	5	48	41	98	30	77	60
7	4-10_AM_Y_4-8_PM	10.0	4	65	48	66	54	68	150
8	4-11_AM	7.0	8	136	49	223	97	195	84
9	4-8_AM	4.0	40	501	271	765	505	673	533
10	4-8_AM_Y_4-8_PM	8.0	27	493	436	940	1,174	588	330
11	4-8_PM	4.0	5	193	59	134	33	138	38
12	4-9_AM_Y_3-8_PM	10.0	52	724	832	750	999	682	889
13	4-9_AM_Y_4-8_PM	9.0	126	2,669	4,420	2,651	4,586	2,403	3,138
14	8_AM_A_8_PM	12.0	6	24	35	25	12	29	7
15	8_PM_A_8_AM	12.0	2	22	34	40	28	44	15
16	9_AM_A_12_PM	3.0	6	240	126	204	149	216	82
17	9_AM_A_12_PM_Y_4-8_PM	7.0	3	159	91	104	40	121	48
18	IRREGULAR	3.0	4	51	14	77	48	76	17
			347	**6,764**	**7,566**	**7,421**	**8,867**	**6,705**	**6,373**

Se determinó su densidad de fugas en cantidad por kilómetro cuadrado (*Figuras 4.29, 4.30 y 4.31*)

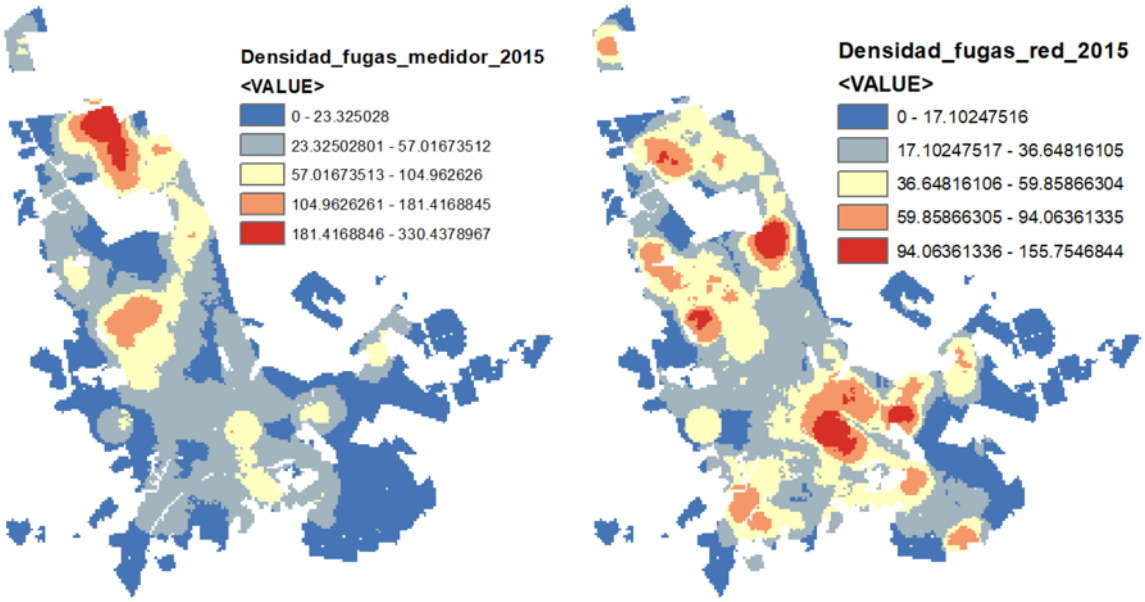


Figura 4. 29 Densidad de fugas por km^2 en medidor y en red en el 2015 (Elaboración propia).

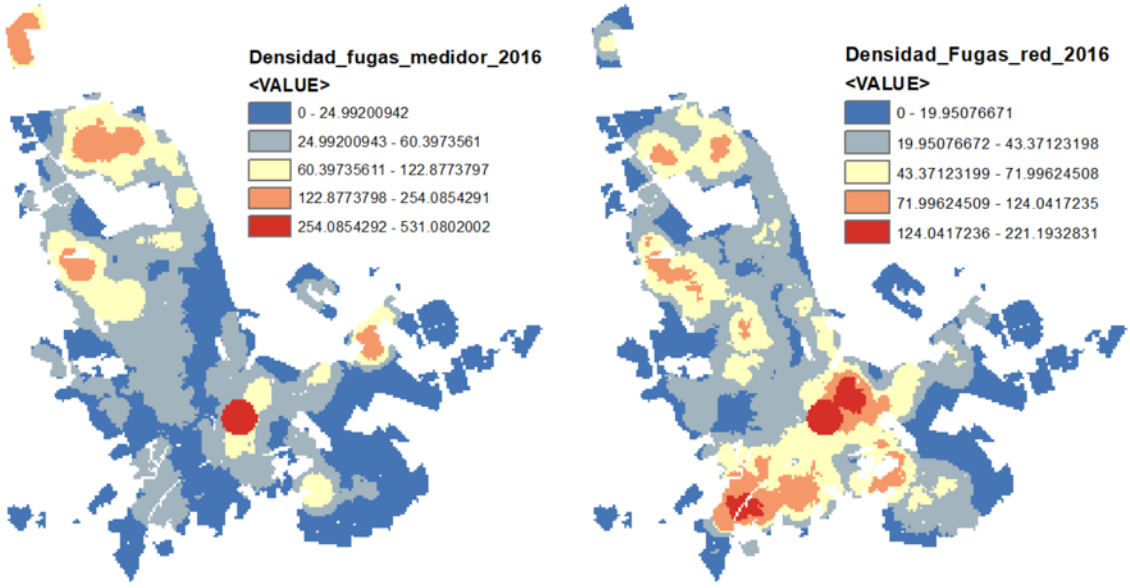


Figura 4. 30 Densidad de fugas por km^2 en medidor y en red en el 2016 (Elaboración propia).

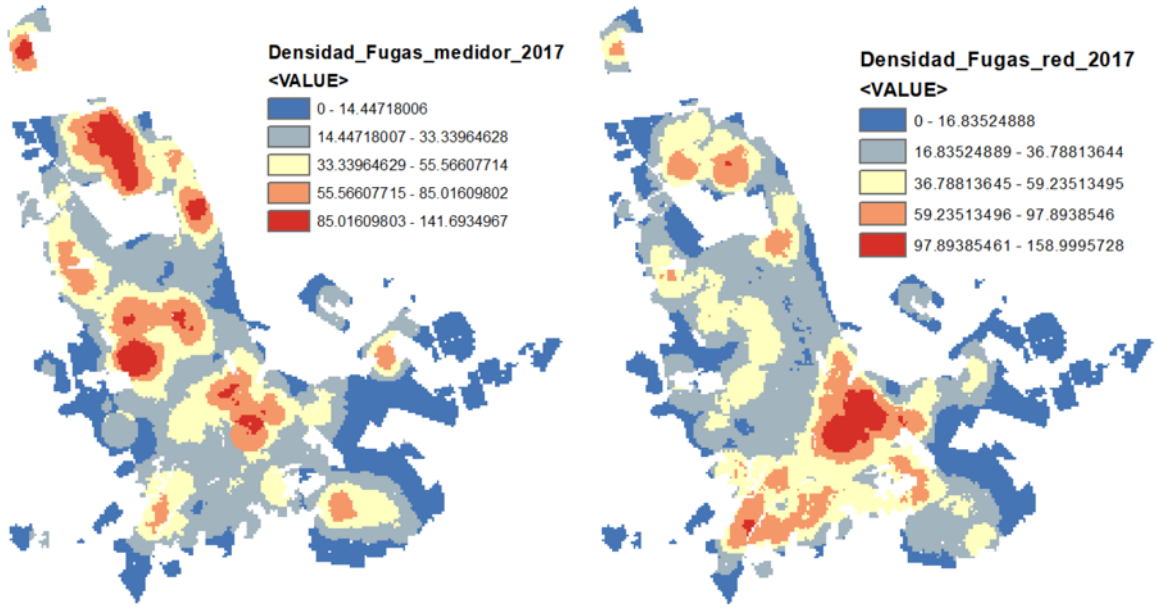


Figura 4. 31 Densidad de fugas por km^2 en medidor y en red en el 2017 (Elaboración propia).

4.1.3. Análisis en tuberías principales y secundarias

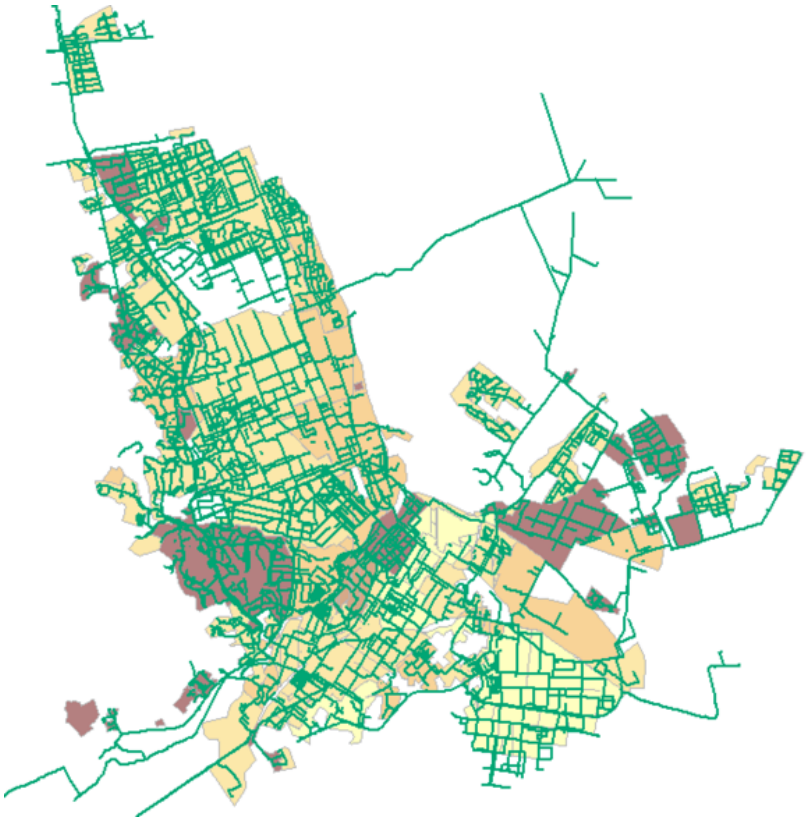


Figura 4. 32 Tuberías principales por horario de servicio (Elaboración propia).

Tabla 4. 7. Análisis de tuberías principales y secundarias por área de influencia (Elaboración propia).

				SECUNDARIAS	PRINCIPALES
No.	Horario de servicio	Horas de suministro	No. de puntos de monitoreo	Tuberías de 3" y menores (m)	Tuberías de 4" y mayores (m)
1	8_AM_A_2_PM_Y_6-11_PM	11.0	4	34,088.31	13,381.14
2	24_HRS	24.0	45	274,044.77	304,119.24
3	3-8_AM_Y_3-7_PM	9.0	3	25,335.29	20,946.93
4	4_AM_A_10_PM	18.0	4	42,291.38	26,726.13
5	4-10_AM_Y_2-8_PM	12.0	3	36,599.56	21,830.48
6	4-10_AM_Y_3-9_PM	12.0	5	13,631.54	15,303.90
7	4-10_AM_Y_4-8_PM	10.0	4	25,042.00	18,034.30
8	4-11_AM	7.0	8	43,702.41	40,475.10
9	4-8_AM	4.0	40	207,273.32	99,081.27
10	4-8_AM_Y_4-8_PM	8.0	27	174,006.75	98,971.08
11	4-8_PM	4.0	5	52,601.66	34,928.63
12	4-9_AM_Y_3-8_PM	10.0	52	231,791.35	180,110.19
13	4-9_AM_Y_4-8_PM	9.0	126	894,377.00	589,779.79
14	8_AM_A_8_PM	12.0	6	28,704.69	33,728.08
15	8_PM_A_8_AM	12.0	2	10,214.94	13,262.84
16	9_AM_A_12_PM	3.0	6	37,325.85	24,764.46
17	9_AM_A_12_PM_Y_4-8_PM	7.0	3	18,521.68	9,863.72
18	IRREGULAR	3.0	4	17,693.88	18,112.88
			347	**2,167,246.38**	**1,563,420.16**

Como conclusión de este análisis se destaca que solo el 11.83% de los usuarios de la ciudad tiene agua las 24 horas y un 11.79% recibe agua menos de 7 horas al día, teniendo un promedio de suministro por usuario de 10.39 horas al día. Los valores de la cuantificación y distribución de presión fueron sometidos a un análisis invariado que trae el software (ArcGIS), lo que arroja que tiene menos de 1% de probabilidad que su valor fuera aleatorio, dándole certidumbre a la cuantificación y su distribución.

Se puede observar que un problema de sobrepresiones se focaliza en la zona de influencia del tanque Colina, tanque Chihuahua 2000 y las anexas del Saucito, desde 38 a 79 *mca*. Curiosamente esta zona destaca en las fugas catalogadas en medidor/toma y solo un año (2015) presenta índices elevados de fugas en red; en la zona que delimita la influencia del tanque A, en las que sobresalen las fugas en red por sobrepresión.

En cuanto a presiones menores o succión se muestran más en la superficie que tienen un horario de 0 a 4 horas, que se focalizan en tres zonas de influencia: tanque A, tanque San

Jorge, tanque Cerro Grande, representando aproximadamente un 11% de la superficie de la mancha urbana, en estas zonas las fugas que más se presentan son las de red. Una cuestión aparte es la zona centro de la ciudad, pues tiene altos índices de fuga tanto de medidor/toma como de red; sin embargo, la variación de las presiones máximas y mínimas no es muy grande; por lo que es posible que la vida útil de la tubería es el factor principal de estas fugas recurrentes en los tres años de observación, a pesar que ha habido programas de cambio en la red secundaria (3" de diámetro), entonces también es posible que por ser la parte baja donde concurren los escurrimientos de otras zonas, esas fugas no sean originarias ahí y que solo afloran por esta razón; o que sea en las conexiones de la tomas domesticas a la red secundaria, o que algunas tomas viejas no se desarticularon cuando se hizo el cambio de red.

Es posible observar variaciones en la presión de hasta 19 *mca* en intervalos de 15 minutos, además de rangos desde -3.90 *mca* hasta 78.10 *mca* en diversos puntos del área de estudio, el 2.24% de los registros presentan presiones menores a cero y un 18.62% son superiores a 30 *mca*, esto representa un reto importante para el organismo operador que maneja valores con una importante disparidad y que deberían ser regulados para evitar fallas en las tuberías.

4.2. Análisis Estadístico

4.2.1. Tratamiento de Datos

Como ya se ha manifestado en capítulos anteriores, se tienen 18 áreas de suministro reconocidas por fuente de abastecimiento y horarios de servicio, de acuerdo al tamaño, características topográficas y nivel socioeconómico de estas áreas se determinó el número de puntos de toma de datos.

Se contó con 50 equipos para medición de presión que se configuraron para registro de datos cada 15 minutos, éste registro se efectuó por 7 días de forma simultánea en la clasificación de áreas de suministro, con la finalidad de obtener el comportamiento diario "normal" de la envolvente de presión acorde a su horario de servicio asignado; se obtuvieron 7 matrices (una por cada día) con 96 observaciones en 347 puntos.

Con la finalidad de tener una medida de la asociación de variables y determinar que factor es el que tiene más peso para realizar una propuesta "cuantitativa" en la mejora del servicio de agua potable en la ciudad considerando que se debe tener: una variación de presión en un horario de servicio suficiente, que permita responder a la demanda del agua por parte del usuario, así mismo minimizar fugas para evitar pérdidas de volúmenes de agua.

Hasta aquí está definido como ***variable principal de análisis la variación de la presión en los diferentes puntos de la red,*** que su distribución está influenciada por dos factores: tiempo y espacio. El primero por la variable identificada con ***"cantidad de horas de suministro de agua asignado"*** y el segundo por las características topográficas como ***"elevación del terreno", "diámetro de tuberías"*** (clasificadas en red secundaria de 3" o menores y red primaria con diámetros mayores o iguales a 4") y ***tipo de fuente*** que las alimenta (pozos, tanques y rebombeos).

Los factores o variables que se enuncian en el párrafo anterior, son los que se consideran importantes para determinar el valor de presión, que se tiene como comportamiento en cada polígono definido por el horario de servicio y su fuente de suministro; esto nos permite determinar la calidad del servicio y la satisfacción del usuario.

La finalidad de medir la asociación y la influencia de estas variables, es identificar el efecto que se da en la aparición de otras variables, como es el impacto del servicio (las variables descritas, no han tenido una variación significativa, por no existir cambios en delimitación física de sectores y cambios en la política de operación).

Se tuvieron en cuenta los registros en los últimos tres años de las fugas en la base de datos del Centro de Información y Servicio (CIS), suponiendo la clasificación de "fugas en red" y "fugas en medidor".

Con este modelo conceptual, que representa el sistema analizado de forma estadística, se procedió a realizar los análisis de asociación entre las distintas variables, para lo cual se utilizaron los softwares Excel, Minitab 19, y SPSS 19.

4.2.2. Análisis de Potencia Estadística

Se construyó la matriz de datos originales en Minitab 19, obteniendo la significación y potencia estadística, para niveles de significación α igual o menor a 0.05. La potencia estadística en la matriz de datos es mayor al 80 %, por lo tanto, se cumple para la aplicación de las técnicas de análisis de asociación de variables (Devore, 2008).

En este caso de estudio se formularon matrices donde se asume que, en uno de los casos, la respuesta son las presiones y en el otro enfoque la respuesta son las fugas.

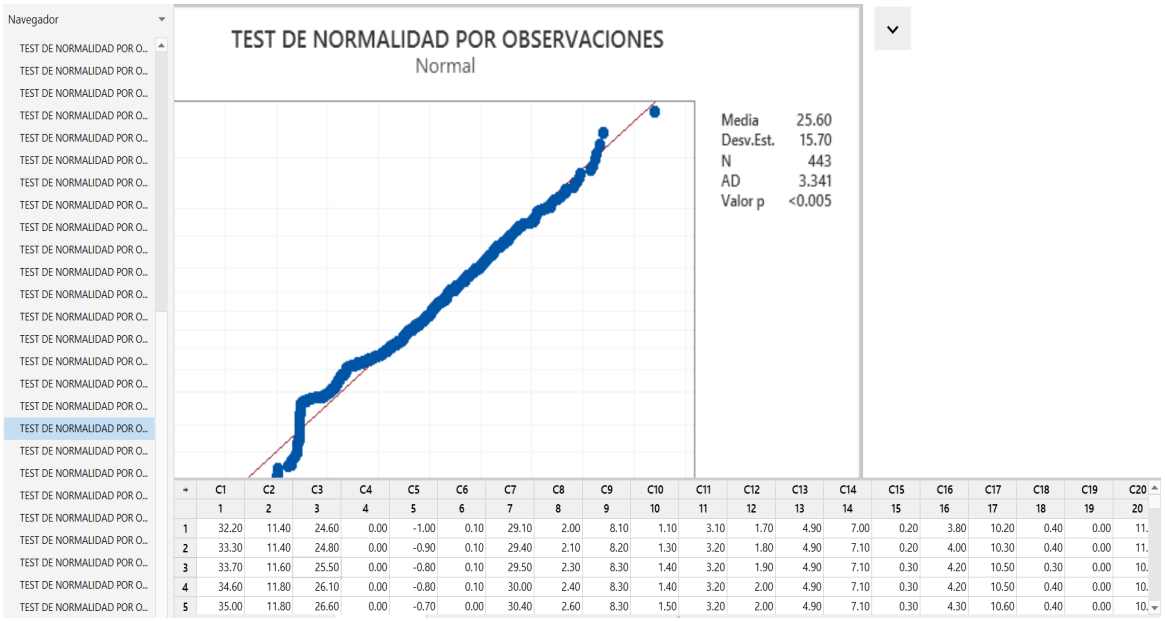
Este paso preliminar permite determinar que los análisis realizados por el tamaño de la muestra, generen datos representativos de la variabilidad de los datos y el nivel de significancia de la prueba o del fenómeno/modelo estadístico objeto de estudio.

Para cada grupo de datos u observaciones de las variables descritas en el cuarto párrafo del apartado 4.2.1 (Tratamiento de datos), se corroboró que cumplieran con los

supuestos de las pruebas estadísticas clásicas (normalidad, homogeneidad, independencia). A continuación, se describen los resultados de estas pruebas estadísticas.

Como se tiene documentado, el comportamiento de la demanda del servicio de agua potable por el usuario, origina que el suministro tenga un patrón de una curva normal (gaussiana) (CONAGUA (C), 2015), de forma diaria, y horaria; por eso se calculan los coeficientes de variación horaria y diaria para determinar. La demanda en el patrón del tiempo sin importar las características de ubicación del usuario, es por ello que en el servicio 24/7 se consideran las curvas de demanda máximas horarias y diarias para definir la operación de los sistemas de distribución de agua potable a las comunidades.

Para determinar la validez del análisis estadístico, se realizaron primero los test de normalidad por observaciones (se considera observación a la medición de las presiones que se dan en un punto), entonces se realizó el test para 347, (con 96 registros cada uno) *(Figura 4.33)*.



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	32.20	11.40	24.60	0.00	-1.00	0.10	29.10	2.00	8.10	1.10	3.10	1.70	4.90	7.00	0.20	3.80	10.20	0.40	0.00	11.
2	33.30	11.40	24.80	0.00	-0.90	0.10	29.40	2.10	8.20	1.30	3.20	1.80	4.90	7.10	0.20	4.00	10.30	0.40	0.00	11.
3	33.70	11.60	25.50	0.00	-0.80	0.10	29.50	2.30	8.30	1.40	3.20	1.90	4.90	7.10	0.30	4.20	10.50	0.30	0.00	10.
4	34.60	11.80	26.10	0.00	-0.80	0.10	30.00	2.40	8.30	1.40	3.20	2.00	4.90	7.10	0.30	4.20	10.50	0.40	0.00	10.
5	35.00	11.80	26.60	0.00	-0.70	0.00	30.40	2.60	8.30	1.50	3.20	2.00	4.90	7.10	0.30	4.30	10.60	0.40	0.00	10.

Figura 4. 33 Test de normalidad por observaciones del punto P18 de monitoreo de los 347 (Elaboración propia).

El estadístico de bondad de ajuste de Anderson-Darling (AD) mide el área entre la línea ajustada (basada en la distribución normal) y la función de distribución empírica (que se basa en los puntos medidos o datos). El estadístico de Anderson-Darling es una distancia elevada al cuadrado que tiene mayor ponderación en las colas de la distribución (MINITAB, 2017), en las siguientes graficas se ve de forma visual la práctica del “lápiz grueso" colocado sobre la línea ajustada, la forma de interpretar es la siguiente:

- Si este cubre todos o la mayoría de los puntos de los datos en la gráfica, probablemente los datos son normales.
- Si los puntos están lo suficientemente distantes de la línea ajustada como para verse más allá de los bordes del lápiz grueso, es probable que se trate de datos que no se aproximan a la distribución normal.

Los resultados de este análisis, arroja que 10 puntos de muestreo, de los 347 presentan un patrón de comportamiento que se aleja de la línea de “normalidad’, y estos 10 puntos se ubican en los horarios de servicio menores a 4 horas, y cuyas fuentes de suministro son los Tanque B y Cerro Grande, dando un comportamiento lognormal (*Figura 4.34*) u otro no identificado (*Figura 4.35*).

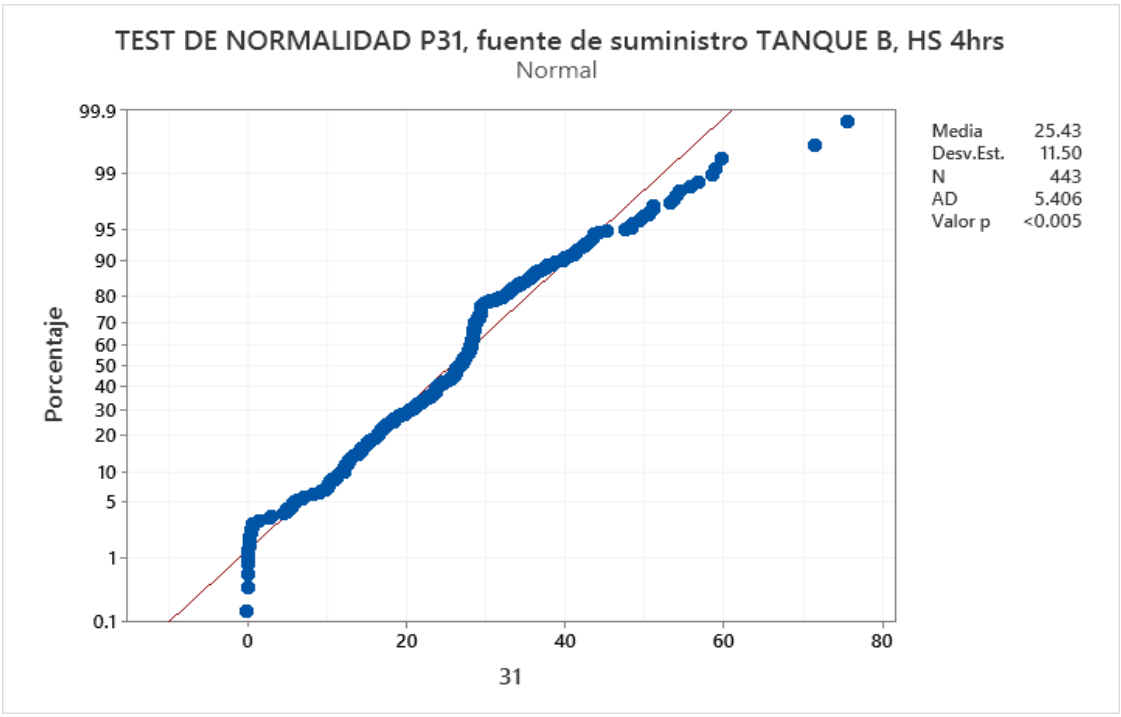


Figura 4. 34 Test de normalidad P31, fuente de suministro Tanque B (Elaboración propia).

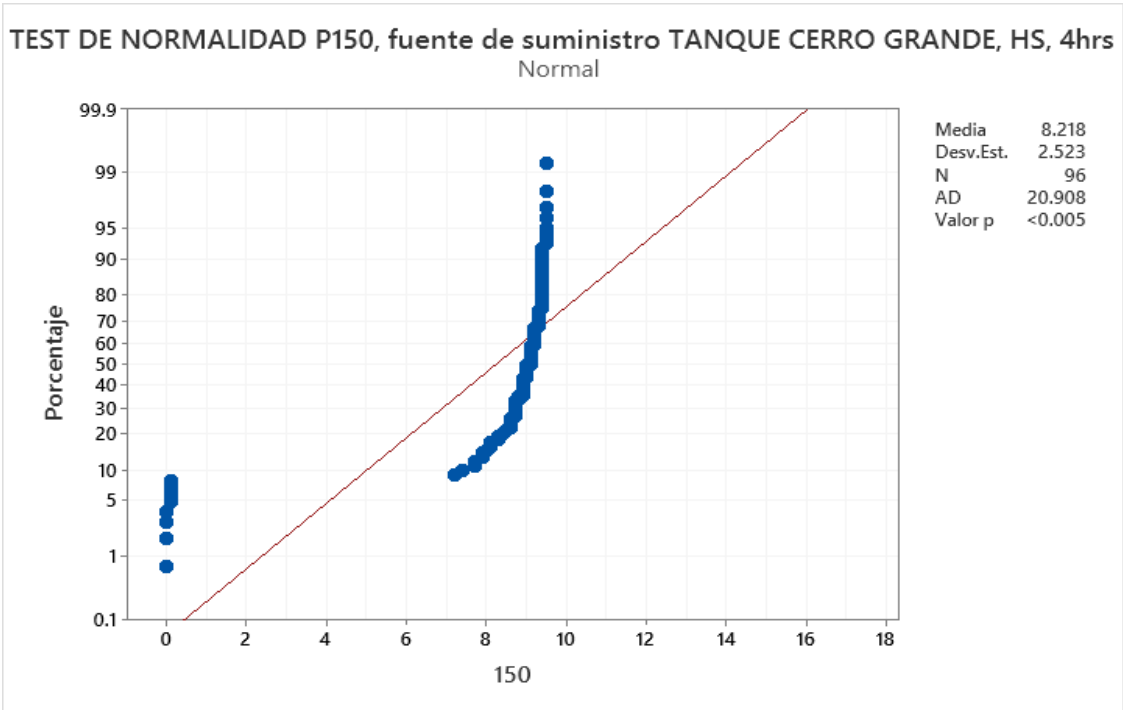


Figura 4. 35 Test de normalidad P150, fuente de suministro Tanque Cerro Grande (Elaboración propia).

Dado que aún dentro de estas áreas definidas por fuentes de suministro y horarios de servicio (Tanque B y Cerro Grande), se tienen 45 puntos que cumplen con el comportamiento de "normalidad", adicionales a los 10 que no cumplen; lo que representa más de un 80% de potencia estadística de certidumbre para el procedimiento. Se procedió a realizar las pruebas por factores o variables, pues se considera una muestra suficiente para ello.

Además de revisar la homogeneidad por observaciones (presiones medidas) de los 347 puntos, y clarificando que esta revisión, se hizo de forma estructurada y ordenada por fuente de suministro. Como se mencionó en los párrafos arriba, dando solo dos zonas de las 18, donde se presentaron 10 puntos no cumplieran con el padrón "normal ".

Se determinó también el comportamiento de normalidad y homogeneidad por factores o variables (identificadas en el 4.2.1 párrafo cuarto), para determinar si tienen una dispersión similar e independencia; en el caso de que el p-valor (significancia) asociado al estadístico de Levene sea mayor que 0.05, se concluye, que no se viola este supuesto de homogeneidad de varianzas, o lo que es lo mismo, las muestras analizadas por ***p y q*** (observaciones y factores/variables) *(Figura 4.36 y 4.37)*, se comportan de la misma manera en cuanto a variabilidad o dispersión (MINITAB, 2017). Para ilustrar lo anterior, se procedió a realizar el análisis pareado, tanto por observaciones como por factores, como se ejemplifica en las siguientes figuras.

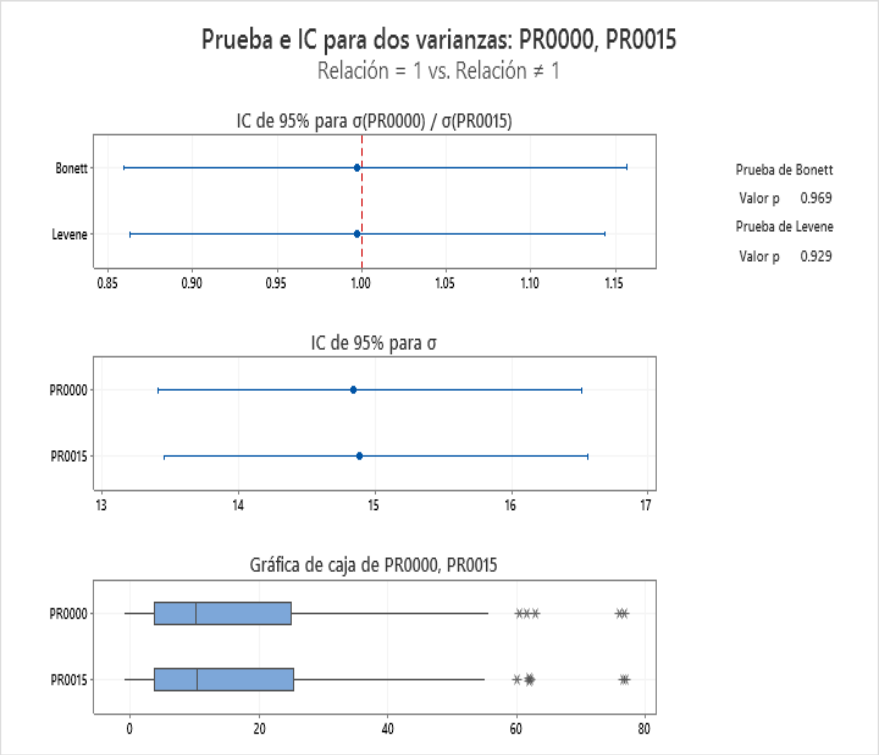


Figura 4. 36 Análisis de dispersión u homogeneidad por observaciones (Elaboración propia).

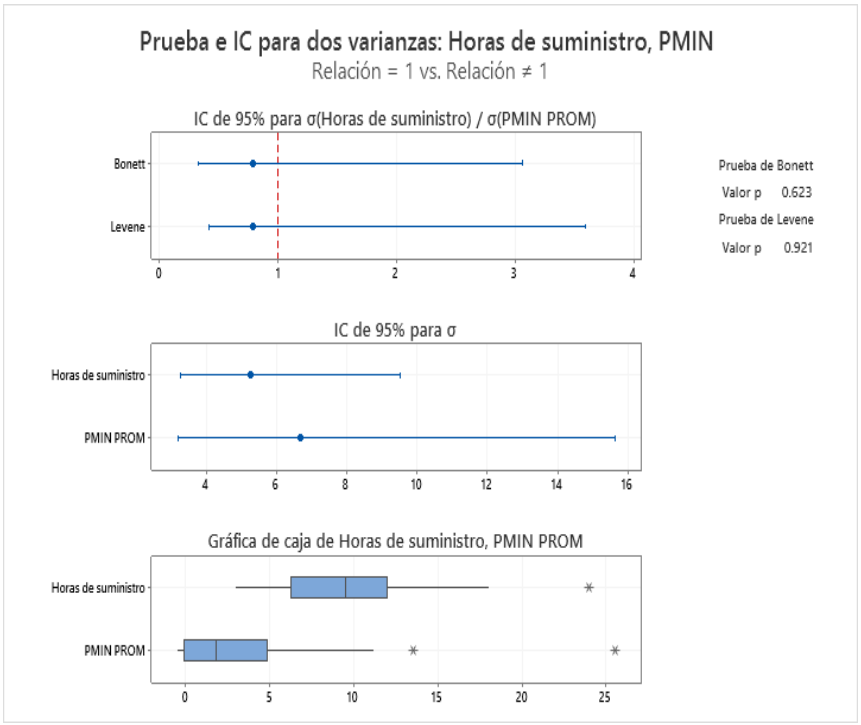


Figura 4. 37 Análisis de dispersión u homogeneidad por factores (Elaboración propia)

Teniendo la certidumbre que los valores obtenidos del muestreo, pueden ser utilizados para el análisis de la envolvente de presión en forma estadística, mediante pruebas paramétricas, se plantea lo siguiente:

- H_{01}.- Existe relación entre la presión "considerada suficiente para el servicio (de 7 a 30 *mca*)" con la fuente de suministro y el horario determinado.
- H_{02}.- Existe relación entre la presión máxima y el tipo de fuga presentada.

Por lo cual se obtuvo el diagrama de Pareto (*Figura 4.38*) de los efectos o variables independientes para comparar la magnitud relativa y la significancia estadística de los términos, esto del total de datos.

Una tabla de Pareto de los efectos permite determinar la magnitud y la importancia de un efecto. El gráfico muestra el valor absoluto de los efectos y dibuja una línea de referencia en el gráfico. Cualquier efecto que se extienda más allá de esta línea de referencia es potencialmente importante.

El método que se utiliza depende de si existe un término de error (Lenth, 1989):

- Si no existe un término de error, se utiliza el método de Lenth para dibujar la línea y muestra los efectos no estandarizados.
- Si existe un término de error, se usa el valor p correspondiente que se muestra en la ventana Sesión para identificar efectos importantes y muestra los efectos estandarizados.
- Se grafican los términos o variables en el orden decreciente de sus valores absolutos. La línea de referencia en la gráfica indica cuáles variables son significativas. Por opción predeterminada, se utiliza un nivel de significancia α de 0.05 para dibujar la línea de referencia. α es el nivel de riesgo máximo aceptable para rechazar una hipótesis nula verdadera (error tipo *I*) y se expresa como una probabilidad que varía entre 0 y 1.

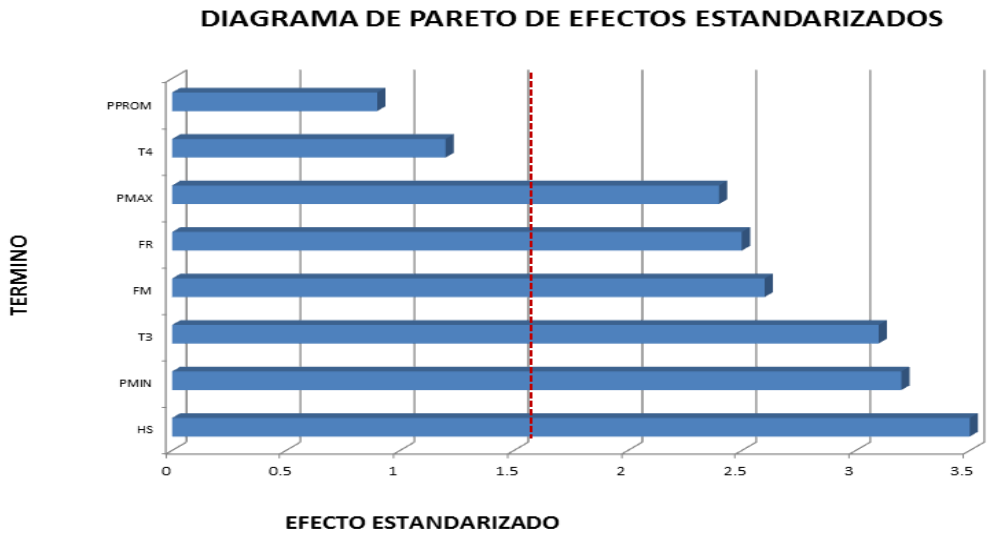


Figura 4. 38 Diagrama de Pareto de Efectos Estandarizados (Elaboración propia).

En estos resultados, los efectos para 6 términos son estadísticamente significativos ($\alpha = 0.05$). Los efectos significativos son: Horas de suministro (*HS*), Presión mínima (*PMIN*), Longitud de tubería de 3" de diámetro (*T3*), Fugas en Medidor (*FM*), Fugas en Red (*FR*) y Presión máxima (*PMAX*). Los efectos de Longitud de tubería de 4" de diámetro (*T4*) y Presión promedio (*PPROM*), no son estadísticamente significativos.

El efecto más grande es el tiempo o las horas de servicio que se suministra a la red.

4.2.3. Análisis Multivariado

El Análisis Multivariado (*AM*), en esencia, se dedica al estudio de varias variables de modo simultáneo, es decir, se toma una variable (Presión o Fugas) y no sólo se mide un aspecto suyo (cuantitativa o serie de tiempo), sino que se consideran varios aspectos y se trata de determinar la relación entre las demás variables del modelo estadístico.

Antes de definir las técnicas de estadísticas multivariables, se comprobó la aplicabilidad de las técnicas mediante el análisis de la Potencia estadística, en todo el capítulo del AM, la metodología e interpretación de los datos, tuvieron como base de las referencias de los libros (Surendra, 2005) (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2012) (Hair, Anderson, Black, & Tatham, 1999) (Devore, 2008) y el soporte de artículos que vienen en el (MINITAB, 2017).

Definido la aplicabilidad de la técnica de multivariante, se procedió a seleccionar las más adecuadas de acuerdo al objetivo; que es determinar cuáles son las variables importantes, para que se presente la presión mínima suficiente que hay que considerar para definir que el usuario tiene servicio el horario asignado. La técnica *AM* se eligió con dos posibles criterios:

1. Los Métodos Independientes, se usan cuando se está interesado en investigar las asociaciones que se presentan entre variables *sin distinción de tipos entre ellas. T*ienen un interés descriptivo más bien.

2. Los Métodos Dependientes, se utilizan cuando se está interesado en la asociación entre las distintas variables, es decir, en las relaciones entre las variables, donde parte de estas variables dependen o se miden en función de las otras. Subyace en ellos siempre un interés predictivo.

En los métodos independientes se puede distinguir entre dos objetivos principales para las técnicas explicativas: **asociar o comparar**. Ambos buscan establecer relaciones (semejanzas o diferencias) entre elementos, pero, a diferencia de las pruebas de asociación, las pruebas de comparación evalúan estas relaciones entre uno o varios grupos. Para clarificar más el procedimiento y la elección de los métodos se define de la siguiente manera:

- **Asociación**. - ¿Existe algún tipo de relación significativa entre las variables?, ¿cómo es esta relación (positiva o negativa) ?, ¿qué tan fuerte es la relación (magnitud)?, ¿la relación se mantiene si controlamos la influencia de terceras variables?, para responder lo anterior se realizaron los siguientes procedimientos: ***Análisis Factorial, Matriz de Correlación, Análisis de Componentes Principales***.

- **Comparación.** - ¿Cuál es el promedio/variabilidad de la variable de estudio en la población?, dado un conjunto de poblaciones ¿son similares?, ¿entre cuáles de ellas hay diferencias significativas?, ¿qué variables explican esas diferencias? y ¿existe interacción entre las variables explicativas?, para responder esto se realizó el análisis de la varianza ***(ANOVA).***

El proceso fue, determinar primero por medio del análisis factorial las variables o factores que tienen: asociación, relación o que impactan en la respuesta esperada "presión considerada suficiente para el servicio (de 7 a 30 *mca*), para lo cual se realizaron: Matriz de Correlación (*MC*), Análisis de Componentes Principales (*ACP)* y Análisis Factorial *(AF)* con rotación de factores. Con ello se identifica la asociación entre variables y permite reducir el número de variables de las cuales depende con confiabilidad la respuesta (Jöreskog, 1977) esto para responder al planteamiento H_{01}.

Después se aplica el Análisis de Regresión Múltiple, para obtener en cada año: 2015, 2016 y 2017, el peso de las variables predictivas que respondan al planteamiento H_{02}.

4.2.3.1. Análisis Factorial (AF)

Este análisis es una técnica de reducción de dimensionalidad de los datos, su propósito final, consiste en buscar el mínimo de factores o variables que expliquen la información contenida en los datos muestreados, a diferencia del análisis de regresión, en el análisis factorial todas tienen el mismo papel, ya que todas ellas se consideran independientes, en el sentido que a priori no existe una dependencia conceptual de una de las variables de las otras.

Requisitos para su utilización:

- Selección de variables que formen conjuntos correlacionados.
- Variables deben estar en escala métrica.
- Un mínimo de 100 casos.

Lo anterior se cumple y se agrupan los factores o variables en: *PMIN, PMAX, P0, P7, P15, P30, Pm30*, obtenidas de los 347 puntos de observación, para asociar a las variables (horas de suministro, fuente de suministro, fugas medidor, fugas en red, tuberías de 3" de diámetro, tuberías de 4"de diámetro y mayores,).

La metodología del *AF* consistió de la siguiente manera:

- Calcular la matriz de correlaciones entre todas las variables.
- Análisis de Componentes Principales (*ACP).*
- Rotación de los factores con objeto de facilitar la interpretación (representación gráfica vectorial).

4.2.3.2. Matriz de Correlación

Se generó la Matriz de Correlaciones entre las variables, que calcula los coeficientes de correlación Pearson de todos los pares posibles; el criterio fue considerar una correlación

fuerte para valores superiores a 0.5 y la probabilidad de dispersión entre 0 y 0.05 (Jolliffe, 1986).

- Matriz = *N x V*, donde *N*= número de muestras (347 observaciones) y *V*= variables (16 parámetros)
- Variables: Horas de suministro, Tuberías de 3" (*m*), Tuberías de 4" (*m*), *PMAX, PMIN*, Presión <0, Presión de 0 A 7 (*mca*), Presión de 7 a 15 (*mca*), Presión de 15 a 30(*mca*), Presión >30(*mca*), Fugas Red 2015, Fugas Medidor 2015, Fugas Red 2016, Fugas Medidor 2016, Fugas Red 2017 y Fugas Medidor 2017.

Como ya se mencionó en el documento, que además de la campaña de medición realizada durante este proyecto para la tesis, fue complementada con la información o datos que se tenían en el organismo operador.

En la *Tabla 4.8*. se puede observar, que los valores en color amarillo son los que tienen una relación o asociación fuerte entre las variables, determinados por el coeficiente de correlación de Pearson, con magnitudes mayores a 0.5 y un valor ***p*** menor a 0.05, los subrayados en azul, carece de importancia en el análisis ya que es "lógico" su estrecha asociación consigo mismo.

Tabla 4. 8. Matriz de correlaciones concentradas (Elaboración propia).

	HS	T3	T4	PMAX	PMIN	P0	P7	P15	P30	Pm30	FR15	FM15	FR16	FM16	FR17	FM17
HS	0.195 0.439															
T3	0.739 0.001	0.982 0.000														
T4	0.561 0.001	0.995 0.000	0.976 0.000													
PMAX	0.129 0.611	0.591 0.038	0.431 0.074	0.949 0.013												
PMIN	0.121 0.631	-0.352 0.152	-0.355 0.148	-0.341 0.166	0.027 0.915											
P0	0.007 0.978	-0.760 0.041	-0.067 0.791	-0.099 0.697	-0.093 0.715	-0.271 0.276										
P7	-0.754 0.046	-0.081 0.746	-0.051 0.841	-0.084 0.710	-0.104 0.460	-0.439 0.069	0.146 0.562									
P15	0.624 0.001	-0.224 0.371	-0.198 0.431	-0.212 0.399	-0.587 0.01	-0.021 0.935	-0.175 0.486	-0.064 0.800								
P30	0.671 0.002	0.131 0.606	0.086 0.735	0.127 0.616	-0.144 0.569	0.186 0.459	-0.198 0.430	-0.598 0.009	-0.099 0.694							
Pm30	0.010 0.968	0.171 0.467	0.155 0.538	0.172 0.495	0.775 0.000	0.336 0.172	-0.077 0.762	-0.431 0.074	-0.628 0.005	-0.106 0.674						
FR15	0.084 0.741	0.979 0.000	0.996 0.000	0.976 0.000	0.394 0.106	-0.393 0.138	-0.074 0.770	-0.039 0.879	-0.164 0.515	0.076 0.765	0.126 0.617					
FM15	0.038 0.881	0.943 0.000	0.412 0.000	0.934 0.000	0.306 0.217	-0.309 0.212	-0.048 0.852	-0.053 0.835	-0.160 0.525	0.079 0.754	0.127 0.615	0.879 0.000				
FR16	0.039 0.878	0.958 0.000	0.986 0.000	0.954 0.000	0.459 0.055	-0.372 0.129	-0.064 0.801	0.005 0.985	-0.200 0.426	0.023 0.829	0.155 0.540	0.980 0.000	0.945 0.000			
FM16	0.032 0.900	0.951 0.000	0.484 0.000	0.945 0.000	0.375 0.125	-0.328 0.184	-0.081 0.740	-0.015 0.953	-0.185 0.433	0.053 0.533	0.140 0.579	0.954 0.000	0.985 0.000	0.981 0.000		
FR17	0.082 0.747	0.977 0.000	0.997 0.000	0.974 0.000	0.446 0.064	-0.365 0.136	-0.077 0.761	-0.038 0.880	-0.191 0.447	0.070 0.785	0.153 0.545	0.993 0.000	0.959 0.000	0.992 0.000	0.979 0.000	
FM17	0.051 0.842	0.962 0.000	0.490 0.000	0.857 0.000	0.371 0.129	-0.350 0.153	-0.060 0.813	-0.044 0.863	-0.172 0.496	0.077 0.781	0.133 0.599	0.989 0.000	0.888 0.000	0.965 0.000	0.983 0.000	0.981 0.000

De este análisis, *se corrobora que la cantidad de horas suministradas son las más importantes para mantener las presiones que se plantean en el supuesto* H_{0}, también son importantes, aunque en menor magnitud y en sentido contrario las presiones mínimas y presiones hasta 30 *mca*.

Una asociación fuerte y de forma peculiar es la que se presenta en las presiones mayores de 30 *mca*, con las presiones mínimas; y con la presión hasta 30 *mca*, pues presenta un valor negativo.

En cuanto, a las asociaciones de las fugas en red y en medidor, planteadas en el supuesto H_{02} en los tres años se presentan que se deben básicamente a las tuberías de 3". Sin embargo, la relación fuerte con las tuberías de 4" para la presencia de fugas solo se da con las de red. Asimismo, en todos los casos con las presiones máximas presentadas.

4.2.3.3. Análisis de Componentes Principales (ACP)

El ACP, es una transformación lineal que escoge un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto original de datos, en el cual la varianza de mayor tamaño del conjunto de datos es capturada en el primer eje (llamado el Primer Componente Principal), la segunda varianza más grande es el segundo eje.

Una de las ventajas del *ACP* (análisis de componentes principales, o simplemente Componentes Principales (*CP*) para reducir la dimensionalidad de un grupo de datos, es que retiene aquellas características del conjunto de datos, que contribuyen más a su varianza, manteniendo un orden de bajo nivel de los componentes principales e ignorando los de alto nivel. En la *Figura 4.39* se agrupan en variables influyentes en los dos primeros componentes.

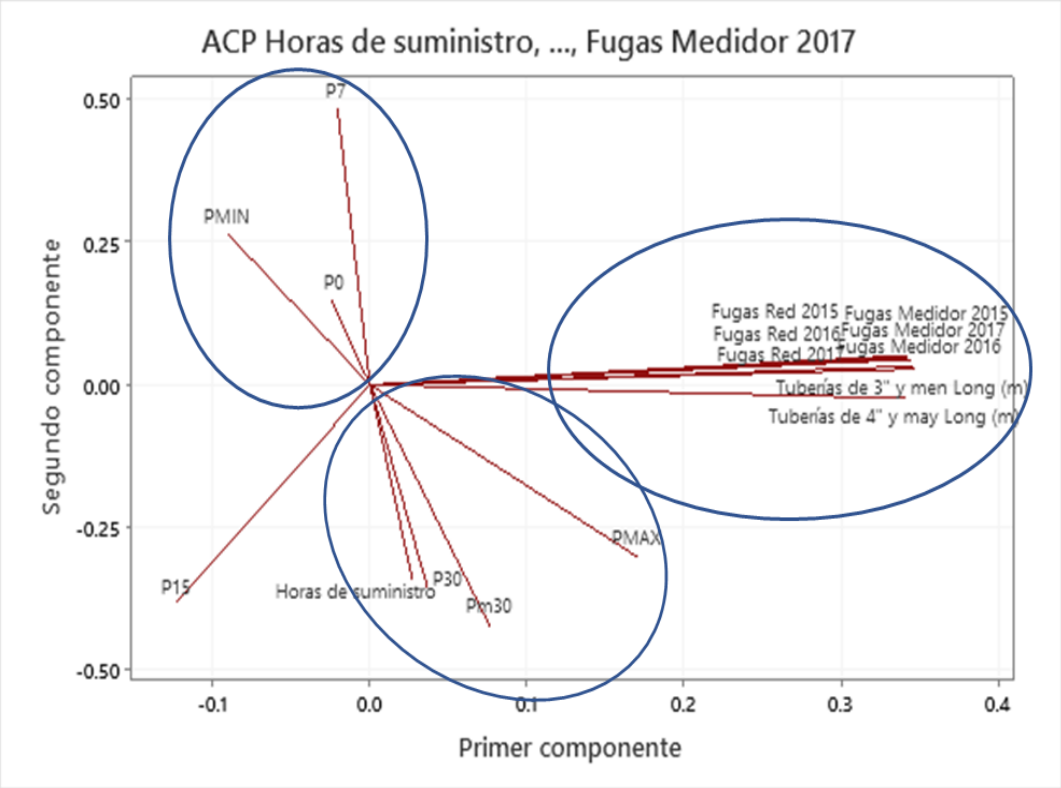


Figura 4. 39 Gráfica de Análisis de Componentes Principales (Elaboración propia).

Se puede observar, que los factores se agrupan en tres conjuntos (*Figura 4.39*), donde las mayores magnitudes son: la presencia de fugas tanto de red como en medidor/toma es el diámetro de tubería de 3', seguido del de la tubería de 4". Confirma la importancia de las presiones máximas y mayores de 30 *mca*, en los horarios de servicio, como el factor que incide para la presión suficiente de suministro entre 15 y 30 *mca*, así mismo de forma antagónica, se muestran de igual magnitud el horario de servicio con presiones de 0 a 7 *mca*, curiosamente las presiones entre 7 y 15 *mca* no presentan relación alguna, por lo cual puede deberse a un factor externo como la topografía.

La ecuación numérica queda de la siguiente forma, mostrando en rojo los valores de mayor importancia en ambos componentes:

$$PC1 = 0.437HS + 0.383T4 + 0.417T3 + 0.472PMAX + 0.038PMIN - 0.038P0 - 0.351P15 + 0.265P7 + 0.171P30 + 0.210Pm30$$

Ecuación 9

$$PC2 = -0.358HS + 0.301T4 + 0.262T3 + 0.153PMAX - 0.453PMIN + 0.186P0 - 0.112P15 - 0.479P7 - 0.452P30 + 0.0.37Pm30$$

Ecuación 10

El primer componente principal, tiene varianza (valor propio) de 8.26 y explica 51.7% de la varianza total, el segundo componente principal, tiene una varianza de 2.60 y explica 16.3 % de la variabilidad de los datos. Teniendo entre los dos componentes la explicación de la variabilidad de la varianza en más del 68 %, de esta manera, la mayor parte de la estructura de datos puede capturarse en dos dimensiones subyacentes.

El criterio de contraste de caída, plantea que las mayores dependencias de los componentes principales (*CP*) están en las mayores pendientes de los valores propios consecutivos, así como el criterio de la raíz latente plantea que las componentes principales más influyentes están en los valores propios por encima de la unidad.

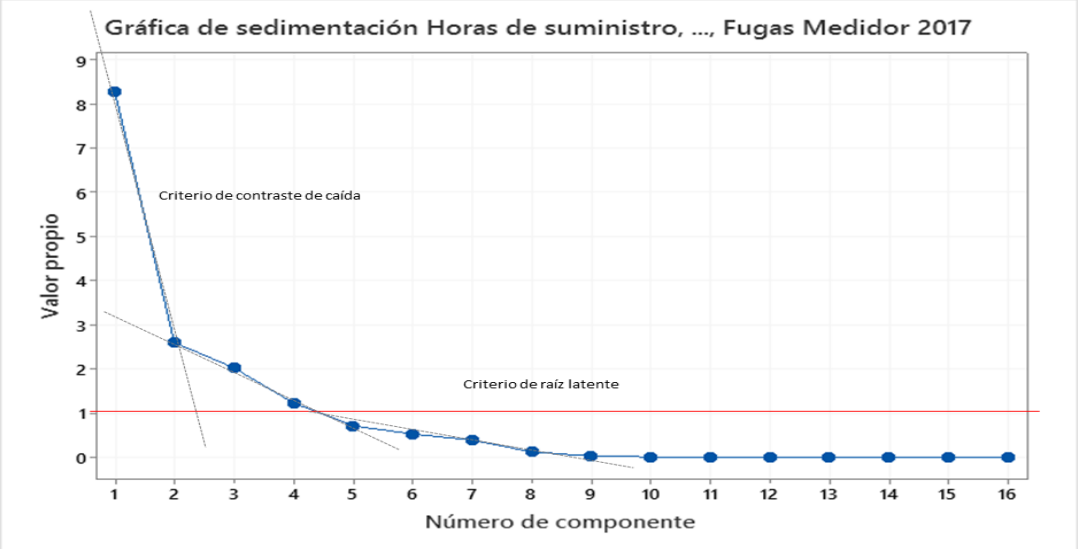


Figura 4. 40 Gráfica de sedimentación (Elaboración propia).

Se puede observar en la gráfica de sedimentación *(Figura 4.40)* que son 4 los factores más importantes, corroborando los factores o variables de importancia obtenidas en el *ACP*, para la presión considerada suficiente para el servicio (de 7 a 30 *mca*), que son: *T3, T4, PMAX y HS*.

4.2.3.4. Análisis Factorial (AF) Rotación de Factores

El método utiliza, fue el *Varimax*, el cual es una de las transformaciones ortogonales más utilizada, que maximiza la diferencia de varianzas entre las variables, conservando la independencia estadística de los factores y sirve de nexo entre ellos y su significado físico; además minimiza el número de variables con cargas factoriales altas y se aplica cuando se consideran todas las variables independientes.

Al rotarse los factores, las variables con mayores cargas factoriales y que tienen asociación con la presión considerada suficiente para el servicio (de 7 a 30 *mca*), son: las

presiones máximas y mayores a 30 *mca*, de la misma magnitud reduciéndose el impacto del horario de servicio suministrado, siguen presentándose como una relación directa de las fugas el *T3*, como el más importante.

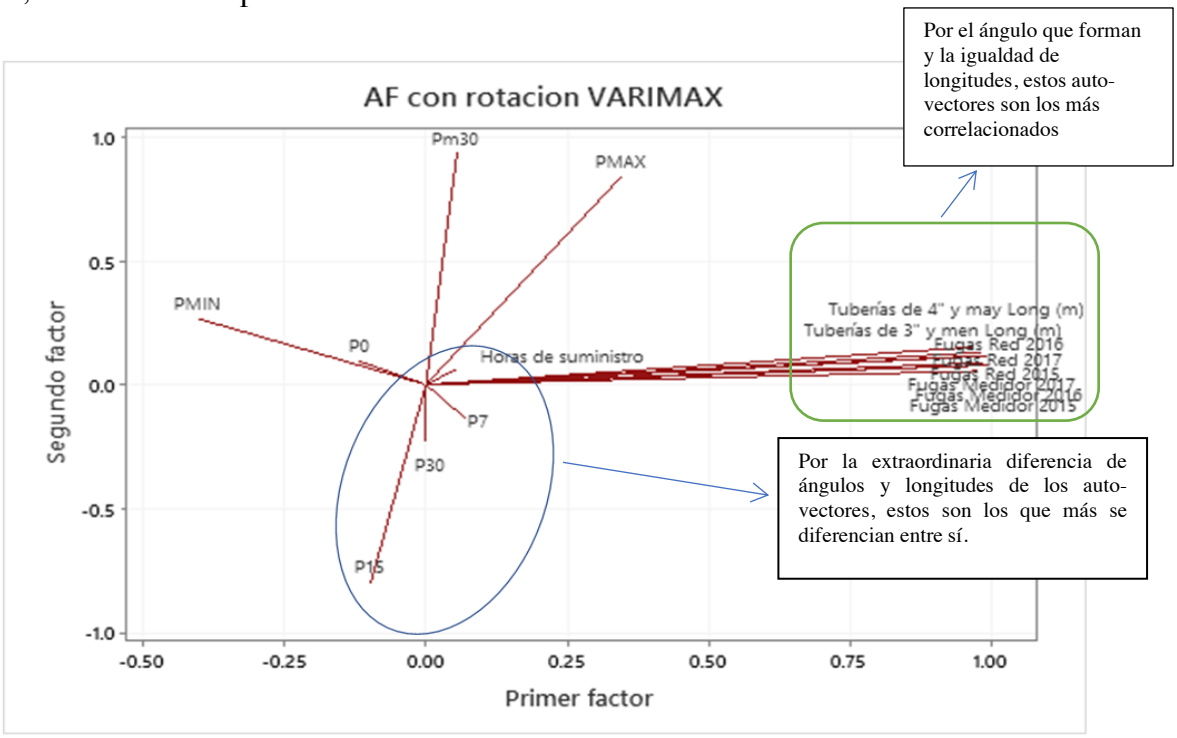


Figura 4. 41 Gráfica de Análisis Factorial con rotación *VARIMAX* (Elaboración propia).

Por lo tanto, la permanencia de una presión suficiente es debido a las presiones máximas otorgadas y el tiempo de permanencia de esta presión, durante el horario de servicio.

Del análisis factorial (auto vectores) se observa que las cargas de las primeras componentes (auto valores), las cuales predicen en mayor medida las presiones suficientes de operación son: *T3* (96.6%), *T4* (93.3%) y *HS* (79.8%). En cuanto a las fugas son consecuencia de *T3* (99.2%)

En conclusión, de las asociaciones podemos ver que hay fuertes relaciones entre el diámetro de tubería y las fugas, así también existe una relación fuerte entre el horario de suministro y la presencia de la magnitud de la presión.

4.2.3.5. ANOVA

Un resultado, es estadísticamente significativo cuando no es probable que haya sido debido al azar. Una "diferencia estadísticamente significativa" solamente significa que hay evidencias estadísticas de que hay una diferencia y que no son parte de la misma población.

En el estudio de un modelo de diseño de experimentos, al igual que en el estudio de cualquier modelo estadístico, se debe contrastar que el análisis las diferencias de los valores experimentales con los resultados del modelo aplicado tiene una confiabilidad alta (para considerar un contraste significativo la probabilidad debe ser menor al valor de α definido, que en este caso fue de 0.05).

La técnica del Análisis de la Varianza (*ANOVA*), es una de las técnicas más utilizadas en los análisis de los datos de los diseños experimentales. Se utiliza cuando queremos contrastar más de dos medias de grupos muestreados (en este caso los grupos de los resultados de las presiones contra los grupos de los horarios de servicio).

En este caso se agruparon las presiones de la siguiente manera:

- *P0*➔presiones negativas hasta 0 *mca.*
- *P7*➔presiones desde 0 hasta 7 *mca.*
- *P15*➔presiones desde 7.01 hasta 15 *mca.*
- *P30*➔presiones desde 15.01 hasta 30 *mca.*
- *Pm30*➔presiones mayores de 30 *mca.*

En cuanto a los tratamientos, se determinó y clasificaron los horarios de servicio, de acuerdo a las aperturas de la fuente de suministro para el sector analizado, el Organismo considera como su política de operación más común asignar los siguientes horarios de suministro:

- *H4*➔ hasta 4 horas (generalmente en un solo bloque)
- *H8*➔hasta 8 horas (repartidas en dos bloques, matutino y vespertino)
- *H12*➔hasta 12 horas (repartidas en dos bloques, matutino y vespertino)
- *H16*➔hasta 16 horas (repartidas en dos bloques, matutino y vespertino)
- *H24*➔servicio continuo las 24 horas.

Tabla 4. 9. Resumen para la aplicación de los *ANOVAs* (Elaboración propia).

Factor o variable	Niveles	Valores
Presión	5	*P0, P7, P15, P30, Pm30*
Horario de servicio	5	*4H, 8H, 12H, 16H, 24H*

Primero se construyó la tabla, que formaría el modelo de Respuesta al Factor y al Tratamiento, siendo las respuestas las réplicas por rangos de presiones en los diferentes horarios de servicio como se muestra.

Tabla 4. 10. Porcentaje de presencia del rango de presión en los distritos de medición (Elaboración propia).

	Rangos de presión (metros de columna de agua)				
Horas de Servicio	***P0***	***P7***	***P15***	***P30***	***Pm30***
4H	0.26	26.59	22.03	27.84	19.48
	0.69	33.96	14.58	20.00	28.33
	3.13	59.03	16.67	22.22	1.39
	4.11	39.06	28.13	9.64	0.00

8H	2.08	4.86	61.80	31.25	0.00
	1.36	21.68	13.98	35.90	27.08
	1.16	39.35	15.97	25.31	18.21
	1.06	30.90	28.47	39.24	1.39
12H	4.34	23.96	12.97	48.44	10.58
	0.00	20.83	35.07	39.93	4.17
	3.33	41.46	33.75	15.85	5.63
	16.93	31.77	8.85	24.48	17.97
16H	0.00	3.13	13.80	63.54	19.53
	0.50	3.00	14.00	63.00	19.00
	1.00	2.80	13.50	64.00	20.00
	1.20	3.50	13.20	63.20	19.50
24H	1.39	16.74	17.27	42.22	22.38
	1.40	16.00	17.50	43.00	23.00
	1.50	17.10	17.30	41.20	22.00
	1.30	16.80	17.80	42.00	22.50

Para realizar el *ANOVA* entre-grupos, se revisaron los siguientes procedimientos:

I. *ANOVA-ONE-WAY*.- considerando ***presiones y tratamientos independientes,*** **el análisis unidireccional** de la varianza prueba la igualdad de las medias poblacionales cuando la clasificación es por una variable. La variable de clasificación, o factor, generalmente tiene tres o más niveles (presión).

II. *ANOVA-TWO-WAY*. El **análisis de varianza bidireccional** realiza un análisis de varianza para evaluar la igualdad de las poblaciones cuando la clasificación de los tratamientos se realiza por dos variables o factores.

I. ANOVA-ONE-WAY,

Considerando presiones y tratamientos independientes, se asumieron variaciones iguales para el análisis, con nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

Tabla 4. 11. Análisis para la integración de *ANOVA* (Elaboración propia).

Análisis	Tipo	Niveles	Valores
Presión	Aleatorio	5	*1, 2, 3, 4, 5* *(P0, P7, P15, P30, Pm30)*

Horarios	Fijo	5	*1, 2, 3, 4, 5* *(H4, H8, H12, H16, H24)*

Este procedimiento se utilizó mediante el análisis por Factor (Presión) y por Tratamientos (Horarios).

a) Resultados considerando como respuesta las presiones:

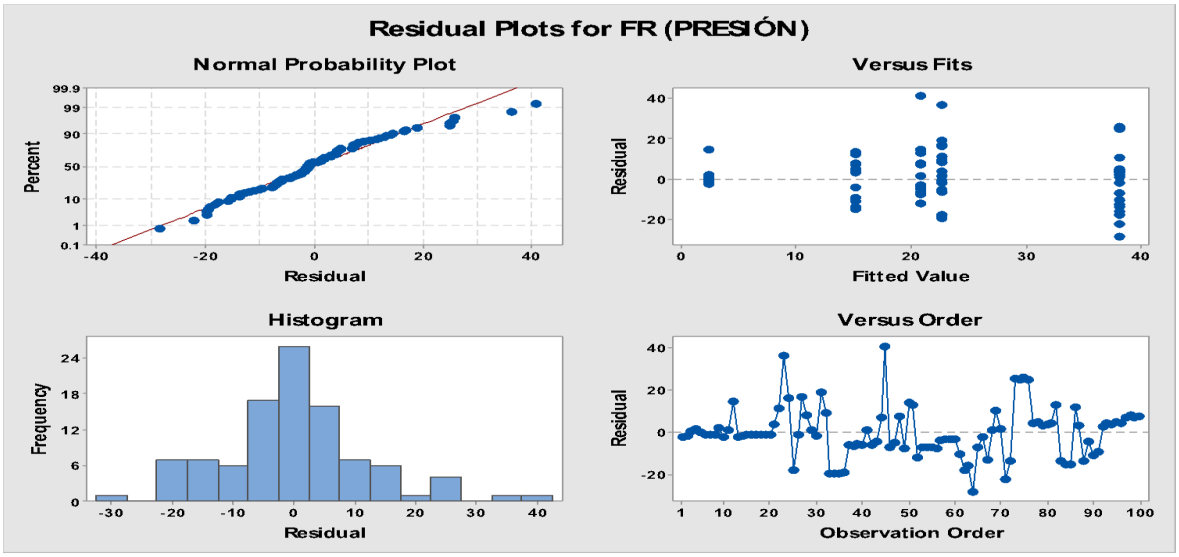


Figura 4. 42 Resultados de *ANOVA-ONE-WAY* (presiones) (Elaboración propia).

El comportamiento de las presiones es completamente Gaussiano. En los gráficos de interacción entre *Presión, Tratamiento y Función de Respuesta* son los mismos para *FR* vs *Presiones* y para *FR* vs *Tratamientos*, en los cuales se observan diferencias significativas entre las presiones trabajadas por Tukey y Fisher:

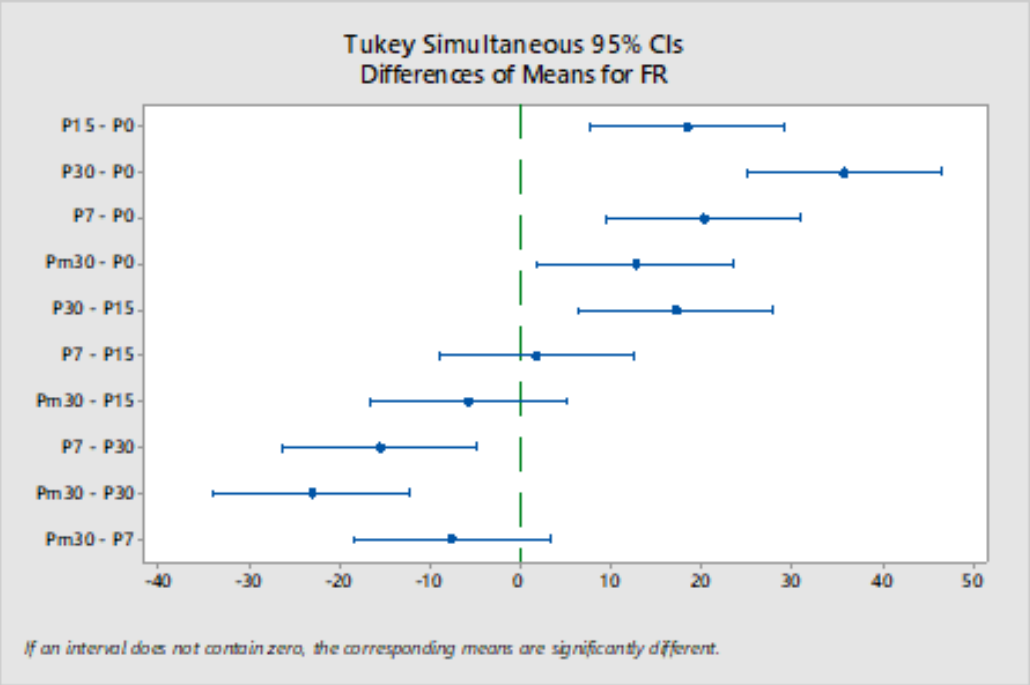


Figura 4. 43 Resultados de presiones mediante Tukey (Elaboración propia).

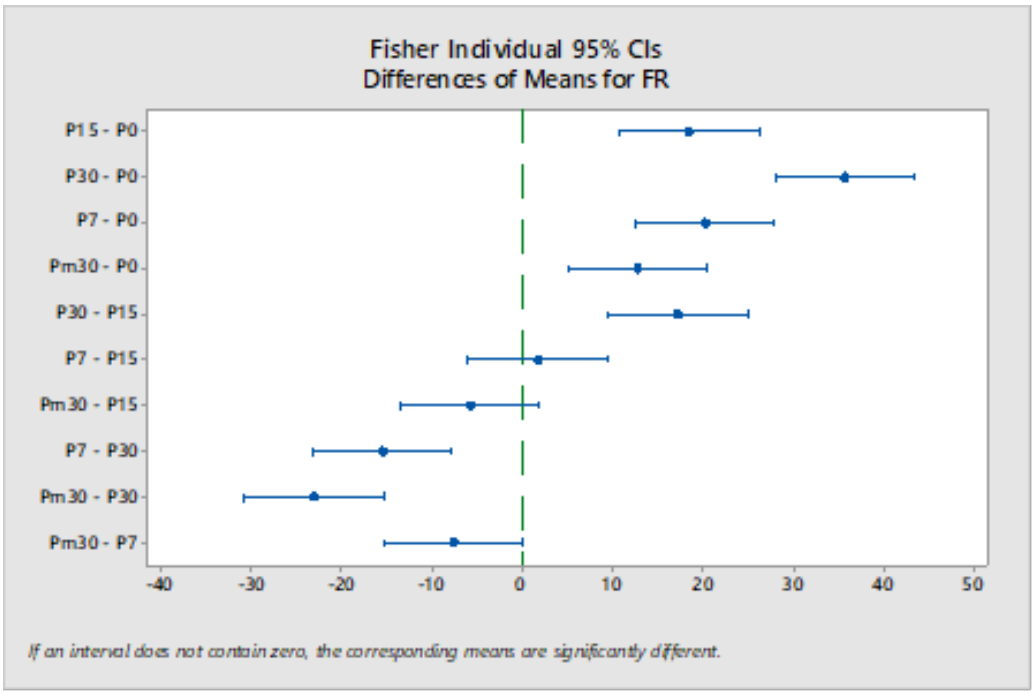


Figura 4. 44 Resultados de presiones mediante Fisher (Elaboración propia).

b) Resultados de Tratamientos:

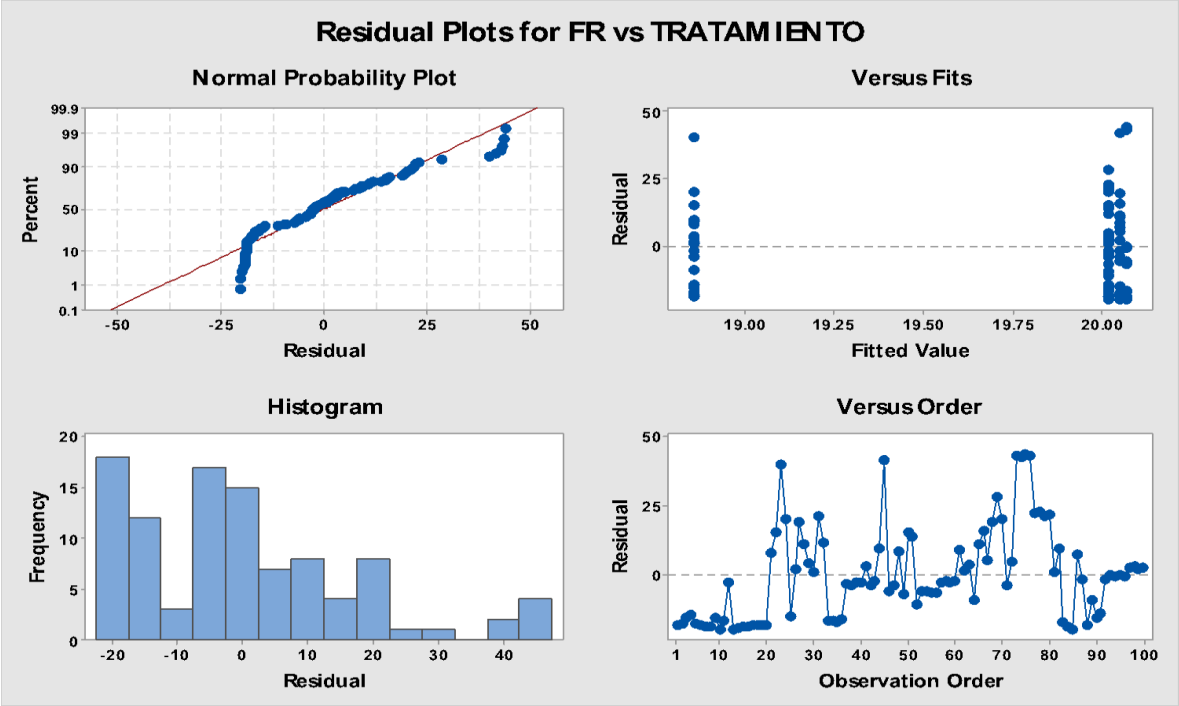


Figura 4. 45 Resultados de tratamientos (Elaboración propia).

En resumen, los resultados de este ejercicio muestran que el comportamiento de los Tratamientos no es Gaussiano, más bien es comportamiento de Poisson, ya que se alejan de la recta Gaussiana (semilog) en una gran cantidad de puntos a los extremos. Así mismo que los efectos principales de los Tratamientos (horarios) indican que no existen diferencias, en cambio sí existen diferencias significativas en los factores (presiones). El ajuste del modelo del Análisis de Varianza no cumple con el 50%.

II. ANOVA-TWO-WAY

Procedimiento considerando presiones y tratamientos **Correlacionados**. Para el desarrollo del ejercicio y pudieran aparecer los gráficos de **Contorno y Superficie** se codifican los valores de Factor (presión) y Tratamientos (horarios), de la siguiente manera:

1- P0 *1- H4*

2- P7 *2- H8*

3- P15 *3- H12*

4- P30 *4- H16*

5- Pm30 *5- H24*

Los resultados del ejercicio que arroja el MINITAB son los siguientes;

Tabla 4. 12. *ANOVA TWO WAY: FR* versus Factor, Tratamiento (Elaboración propia).

Factor	Tipo	Niveles	Valores
Factor	Aleatorio	5	1, 2, 3, 4, 5
Tratamiento	Fijo	5	1, 2, 3, 4, 5

Tabla 4. 13. Análisis de Varianza para *FR* (Elaboración propia)

Fuente	DF	SS	MS	F	P
Factor	4	13,424.81	3,356.20	6.41	0.003
Tratamiento	4	22.45	5.61	0.01	1.000
Factor*Tratamiento	16	8,383.75	523.98	6.59	0.000
Error	75	5,959.02	79.45		
Total	99	27,790.04			

***S* = 8.91368** ***R-Sq* = 78.56%** ***R-Sq(adj)* = 71.70%**

Como se puede observar en los resultados del modelo del Análisis de la Varianza (*Tabla 4.13*), tiene un ajuste aceptable de 71.7 %, y con una dispersión de los valores muy baja *S* = 8.91368. En este ejercicio se corrobora que, la significación del Tratamiento sigue siendo insignificante y que los **Efectos Principales** importantes son debido al Factor.

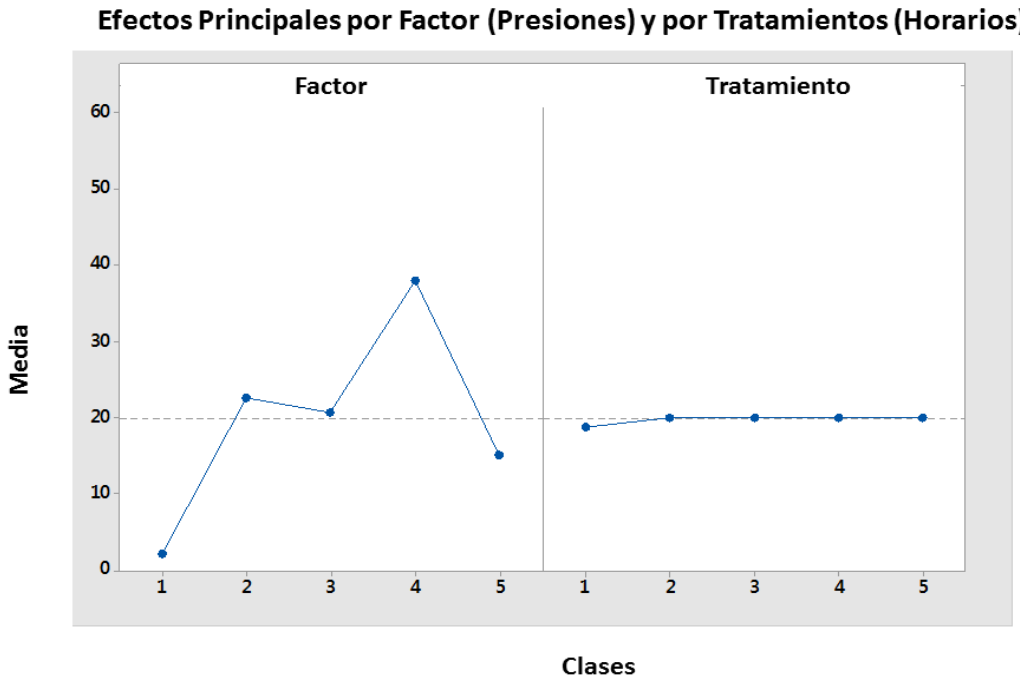


Figura 4. 46 Resultados de Efectos Principales (Elaboración propia).

En el análisis de la interacción entre la Presión (Factor) y el Tratamiento (Horario), muestra que la más importante es la interacción entre el tratamiento 4 y el factor 4, curiosamente no corresponden a los máximos valores en ambos casos.

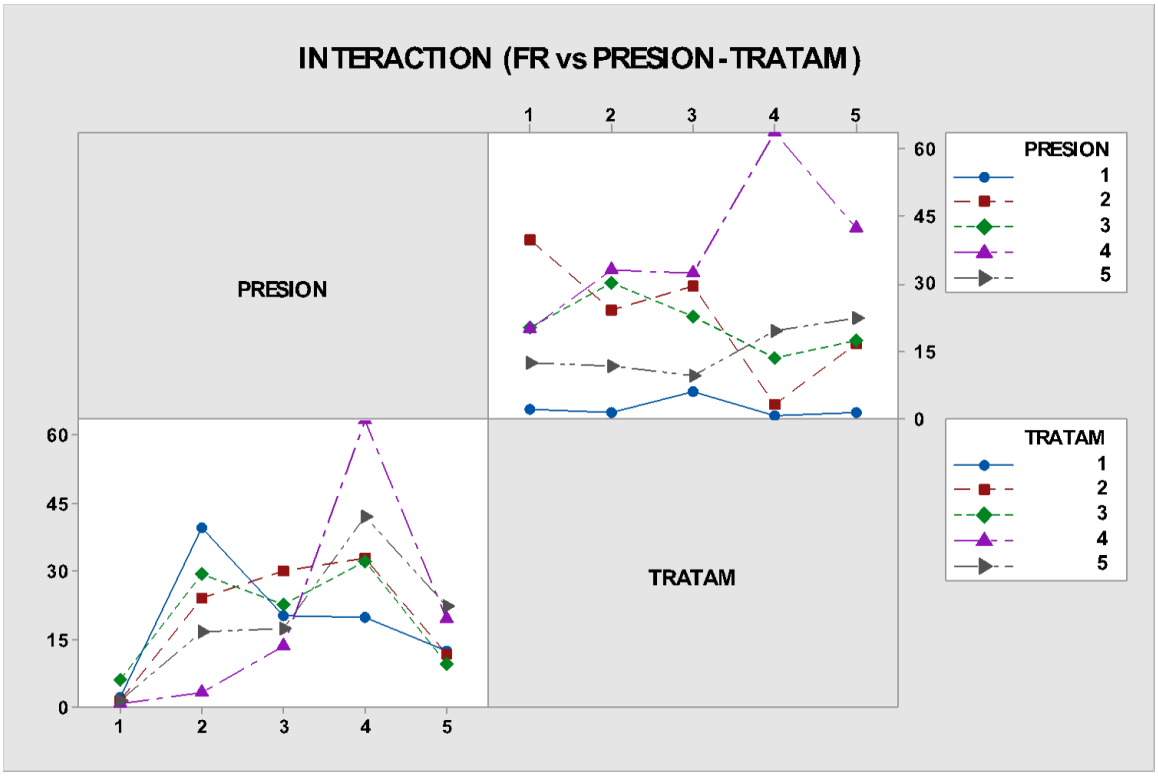


Figura 4. 47 Interacción entre la presión y el tratamiento (Elaboración propia).

Esto se puede observar en los gráficos de contorno y de superficie, en el primero muestran una superficie de una curva cerrada color verde oscuro y el pico en la superficie en 3D.

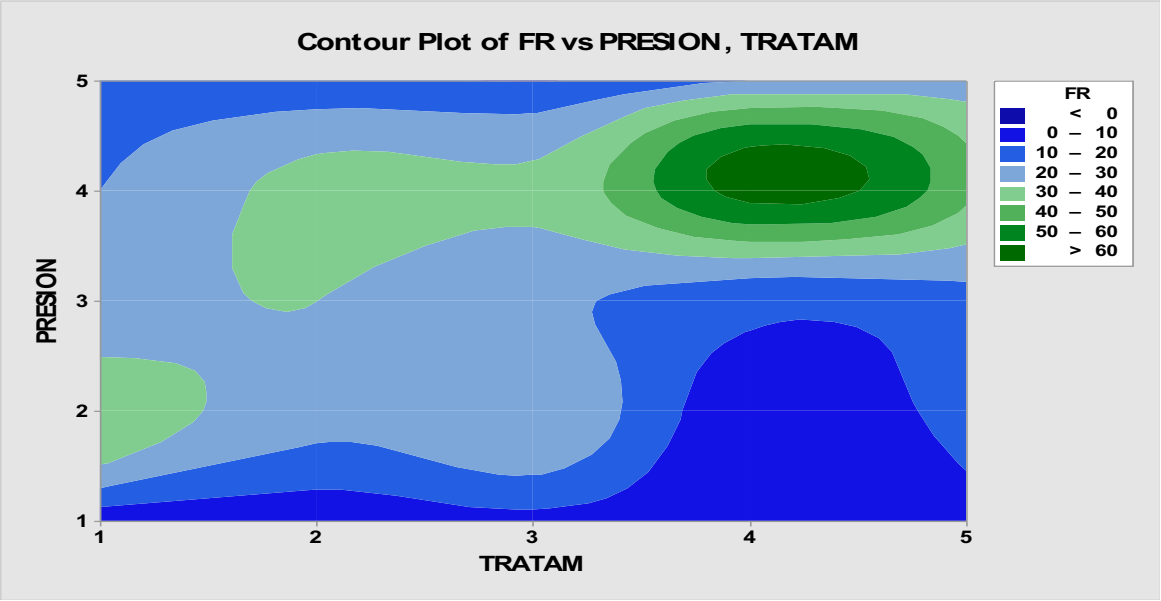


Figura 4. 48 Gráfico de contorno (Elaboración propia).

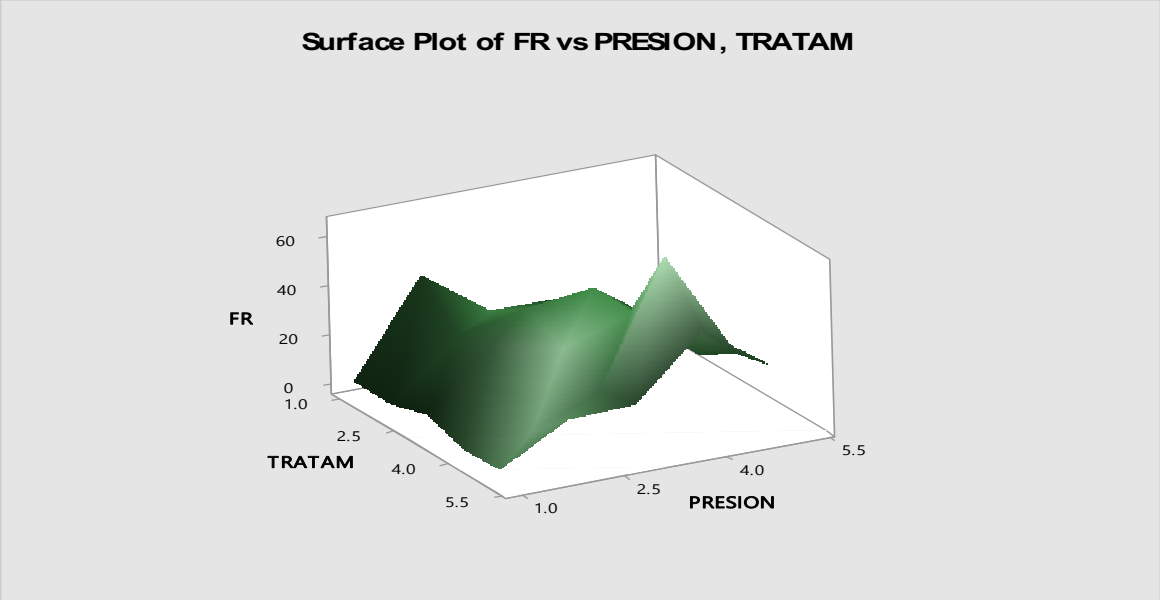


Figura 4. 49 Gráfico de superficie (Elaboración propia).

En conclusión, de la aplicación de los *ANOVA's* se pueden contrastar los efectos de los Tratamientos (horarios), por medio del análisis de las medias de varias agrupaciones (sectores/replicas) de una única variable o factor dependiente (Presión), también nos da

información sobre las interacciones entre los factores y los tratamientos. En el estudio se presenta un modelo equilibrado.

El *ANOVA TWO WAY*, tuvo el mejor ajuste, donde el valor de regresión del modelo de los datos observados (*R-Sq* = 78.56%) y el valor de regresión del modelo de los datos ajustados (*R-Sq (adj)* = 71.7%), siendo similares los valores de regresión en ambos modelos.

Se hizo un análisis de Normalidad a los residuos estandarizados de los datos observados y ajustados, mediante la prueba de Anderson-Darling; esta prueba permite definir si los datos de una muestra provienen de una distribución específica y en específico, si estos modelos tienen una distribución de tipo Gaussiana o normal.

Se encontró que ambos modelos (observados y ajustados) tienen un comportamiento de distribución normal en cuanto a las presiones, lo cual nos permite tener la certeza que el valor de regresión experimental y ajustada es confiable sobre la significación de los factores, sin embargo, en cuanto a los tratamientos se encontró que el comportamiento de los tratamientos muestra una distribución de Poisson o exponencial.

En el *ANOVA*, se presentan las pruebas de Fisher y Tukey para comparar las medias y las varianzas de dos muestras, de lo cual se deduce que los tratamientos no tienen significación importante de acuerdo a los efectos principales, esto debido a que su comportamiento no es Gaussiano y que no puede ser interpretada mediante una ecuación de regresión.

Se deduce que el factor principal que más influye es la presión de 30 *mca* y el que menos influye es la presión igual y menor a 0, de las interacciones la que más influye es la

combinación entre el 4 factor y el 4 tratamiento (*P30, H16*). Las diferencias significativas entre las medias de los grupos fueron obtenidas con una confiabilidad del 95%.

Se muestran las ecuaciones obtenidas de estos ejercicios

Ecuación ajustada marginal

$$FR = 19.80 + 0.22\,TRAT._H12 + 0.27\,TRAT._H16 + 0.22\,TRAT._H24 - 0.95\,TRAT._H4 + 0.25\,TRAT._H8$$

Ecuación 11

Ecuación ajustada condicional,

$$FR = 19.80 - 16.64\,PRES_P0 + 0.98\,PRES_P15 + 17.45\,PRES_P30 - 2.69\,PRES_P7 - 4.48\,PRES_Pm30 + 0.22\,TRAT._H12 + 0.27\,TRAT._H16 + 0.22\,TRAT._H24 - 0.95\,TRAT._H4 + 0.25\,TRAT._H8$$

Ecuación 12

Aquí lo importante a destacar es que inciden de forma negativa el tratamiento (*H4*) y los factores (*P0, P7, Pm30*).

Aportación

Cómo se observó, los tratamientos tienen un comportamiento característico de la distribución de Poisson, es por ello que se utilizó los valores de la gráfica de los residuos de los tratamientos, para la búsqueda de la ecuación o el modelo de ajuste a estos. Basándose en que los valores medios en cada una de las barras del histograma tienen un comportamiento exponencial de 1er grado, o sea no es gaussiano, pero se le ajusta bien una caída exponencial según el *ORIGIN-V5*.

4.2.3.6. Ajuste del Residuo de los Tratamientos

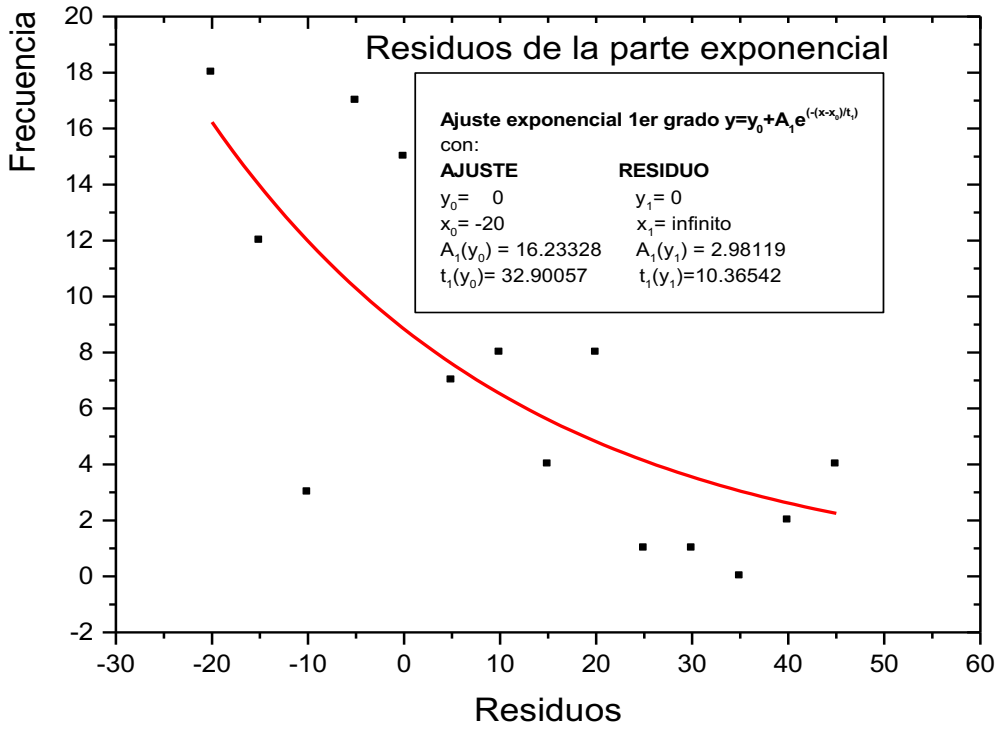


Figura 4. 50 Ajuste de residuos de los tratamientos (Elaboración propia).

Esto se interpreta que a pesar que, las horas de servicio sean por bloques de 4 horas y que en esa forma se va incrementando o disminuyendo el suministro a los sectores de forma lineal, por parte del Organismo Operador, en realidad la calidad del servicio no se comporta de manera lineal como la política de operación define, sino que el decremento en la calidad del servicio es de manera exponencial.

2. Métodos dependientes

El haber analizado por los métodos independientes, mostró cuáles términos contribuyen más a la variabilidad en la(s) respuesta(s) tanto para los supuestos H_{01} y H_{02},

utilizando un diagrama de Pareto de los efectos para comparar la magnitud relativa y la significancia estadística de los términos. Para determinar si la asociación entre la respuesta y el término es estadísticamente significativa (Matriz de Correlación), con estos procedimientos analíticos se compararon las respuestas buscadas en los supuestos H_{01} y H_{02}, revisando los valores de coeficientes de Pearson y valor p, entre las repuestas y los demás términos. Considerando que α: =0.05.

Valor $p \leq \alpha$: La asociación es estadísticamente significativa

Si el valor p es menor que o igual al nivel de significancia, usted puede concluir que hay una asociación estadísticamente significativa entre la variable de respuesta y el término.

Valor $p > \alpha$: La asociación no es estadísticamente significativa

Es por ello que con el análisis de las matrices de correlaciones (general y concentrada), y el apoyo de *ACP* y *AF*, se seleccionaron solo los elementos que presentan una asociación estadísticamente significativa con la respuesta, por lo que se reduce el modelo eliminando términos. Es decir, se fue adicionando las variables que "suman" para un mayor ajuste al modelo (*R-Sq*) y se dejaron fuera las que no adicionan valor para el ajuste.

A continuación, se muestran los resultados de los términos, que suman mayor ajuste para los modelos de regresión múltiple, con una probabilidad de significancia estadística menor o igual a 0.05.

Supuesto H_{01}

$$\boldsymbol{PRESION\ 7\ A\ 15} = 0.464 - 0.00130\ HS + 0.000001\ T3 - 0.00496\ PMAX$$

Ecuación 13

R-Sq = 65.1% *R-Sq(adj) = 61.2%* *p=0.04*

Para tener una presión entre 7 y 15 *mca*, los términos por orden de magnitud son: las presiones máximas, el horario de suministro y el diámetro de tubería de 3".

$$\boldsymbol{PRESION\ 15\ A\ 30} = 0.153 + 0.0237\,HS + 0.000001\,T3 - 0.000002T4 - 0.00117\,PMAX$$

Ecuación 14

R-Sq = 79.6% *R-Sq(adj) = 77.2%* *p=0.013*

Para tener una presión entre 15 y 30 *mca*, los términos por orden de magnitud son: el horario de suministro, la presión máxima suministrada, el diámetro de tubería de 4", y el diámetro de tubería de 3".

En las siguientes gráficas de Pareto *(Figuras 4.51 y 4.52)*, que representan una función de acumulación de los valores analizados por horas de análisis, se visualiza como crece la influencia de los términos para la segunda ecuación.

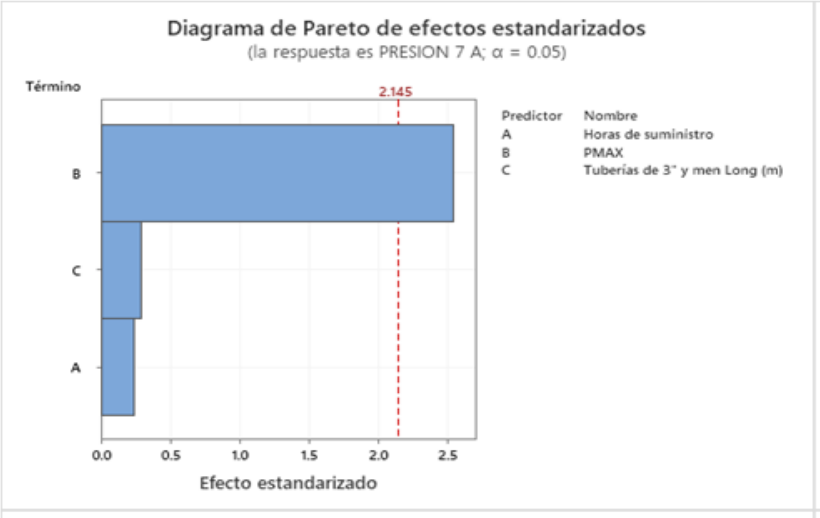


Figura 4. 51 Diagramas de Pareto de efectos estandarizados variable respuesta “Presión 7 a 15 *mca”* (Elaboración propia).

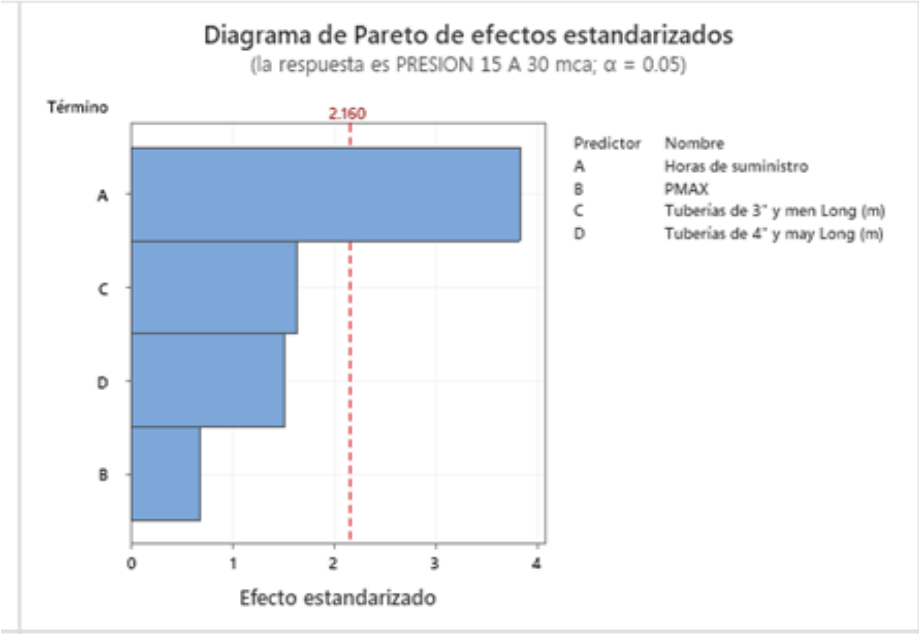


Figura 4. 52 Diagramas de Pareto de efectos estandarizados, variable respuesta “Presión 15 a 30 *mca”* (Elaboración propia).



Figura 4. 53 Gráficas de residuos para “Presión 7 a 15*mca”* (Elaboración propia).

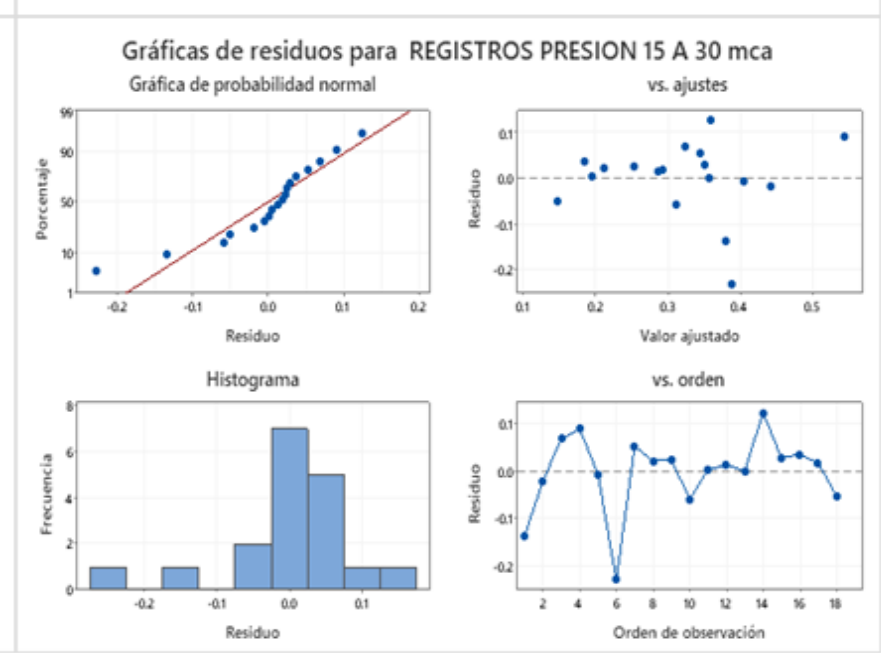


Figura 4. 54 Gráficas de residuos para "Presión 15 a 30 *mca"* (Elaboración propia).

En las gráficas de residuos *(Figuras 4.53 y 4.54)*, aparece para la segunda ecuación un "fuera de serie o *outlier*", que es el incide en el ajuste del modelo, pero dado que no se tiene experiencia de mediciones anteriores, se conservó para la interpretación.

En conclusión, dado que por encima de un 50 % de regresión se considera una tendencia, ambos modelos cumplen esta premisa, aunque los coeficientes de los términos *HS, T3* y *PMAX* son bastante bajos suman para el ajuste del modelo. En el caso de las presiones entre 15 y 30 *mca*, ya aparece el *T4*, lo cual habla del tiempo de tránsito y permanencia que facilita para que esta presión esté presente en los sectores.

Supuesto H_{02}

A continuación, se muestran las ecuaciones de regresión para la respuesta a fugas en red de los años 2015, 2016 y 2017.

$$\boldsymbol{FR15} \;=\; 94.4 - 0.46\,HS + \;0.002992T3 + 1.669PMAX$$

Ecuación 15

R-Sq = 99.5% R-Sq(adj) = 99.8% p=0.000

$$\boldsymbol{FR16 =}\; 25 - 5.96HS + 0.002937T3 + 1.84\;PMAX$$

Ecuación 16

R-Sq = 97.9% R-Sq(adj) = 97.0% p=0.000

$$\boldsymbol{FR17 =}\; 21.8 - 0.48HS + 0.002659T3 + 0.835\;PMAX$$

Ecuación 17

R-Sq = 99.4% R-Sq(adj) = 99.2% p=0.000

En las siguientes graficas de residuos *(Figuras 4.55, 4.56 y 4.57)*, se resume el comportamiento de los tres años.

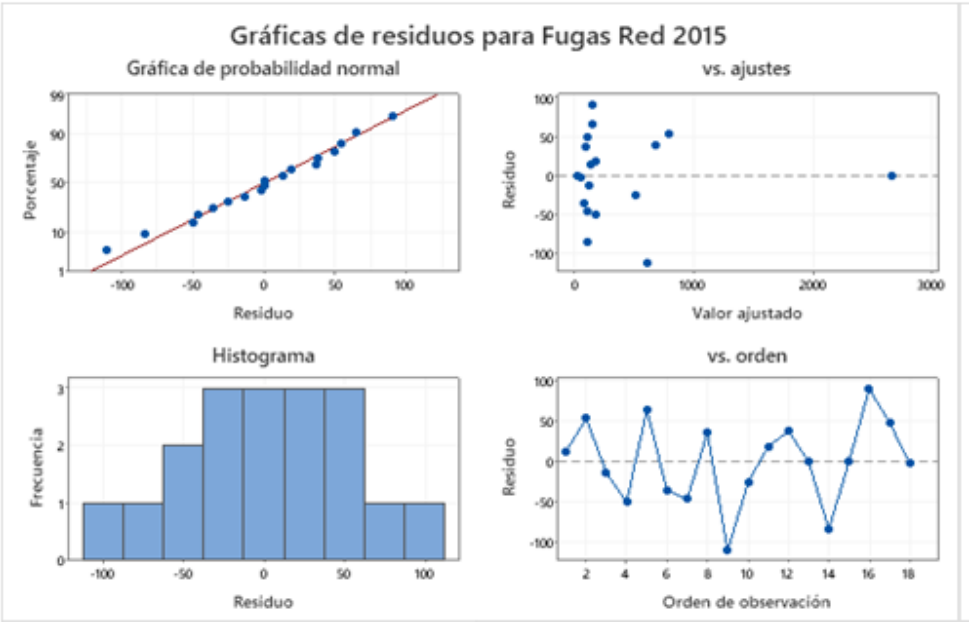


Figura 4. 55 Gráficas de residuos para Fugas en Red 2015 (Elaboración propia).



Figura 4. 56 Gráficas de residuos para Fugas en Red 2016 (Elaboración propia).

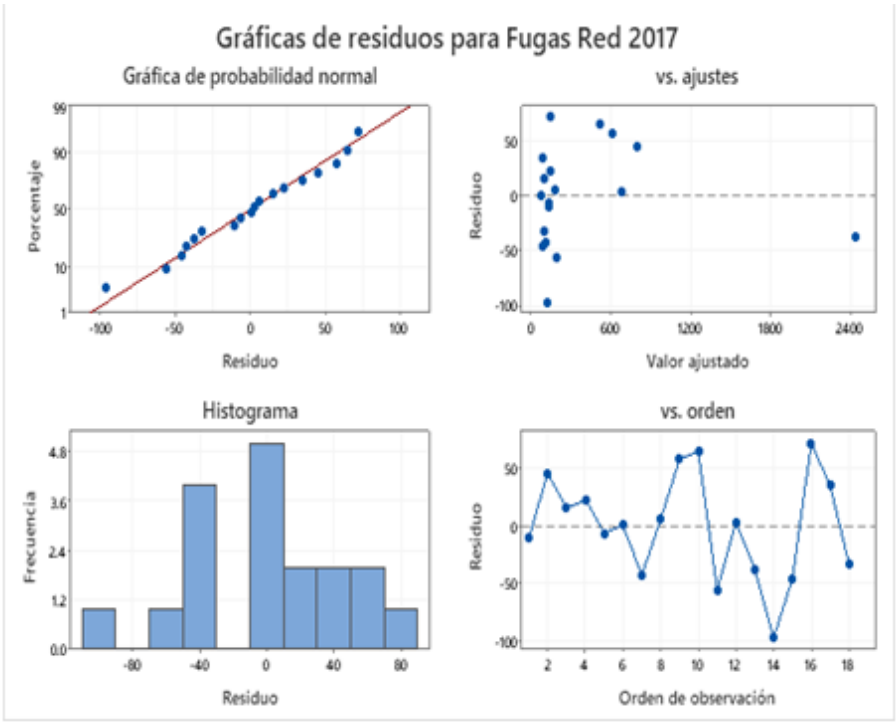


Figura 4. 57 Gráficas de residuos para Fugas en Red 2017 (Elaboración propia).

En el supuesto H_{02} los resultados de ajuste del modelo mejoran con respecto a los presentados en las ecuaciones de respuesta a las presiones. Lo queda claro es que el horario de suministro juega en contra para la presencia de fugas en red, es decir entre menos horas mayor cantidad de fugas, por eso el signo negativo, y que entre mayor presión esta incide más en la aparición de fugas en la red, es por ello la acumulación de los residuos hacia la izquierda de los valores de ajuste.

A continuación, se muestran las ecuaciones de regresión para la respuesta a fugas en medidor de los años 2015, 2016 y 2017.

$$\boldsymbol{FM15} = 197 - 9.13HS + 0.003456T3 - 6.58PMAX + 35.2PMIN + 1.7363FR15$$

Ecuación 18

R-Sq = 97.3% R-Sq(adj) = 96.2% p=0.000

$$\boldsymbol{FM16} = 170 - 6.37HS + 0.00296T3 - 6.01\,PMAX + 27.4\,PMIN + 0.819\,FR16$$

Ecuación 19

R-Sq = 98.1% R-Sq(adj) = 97.4% p=0.000

$$\boldsymbol{FM17} = 130 - 4.40HS + 0.00598T3 - 2.35\,PMAX + 21.1\,PMIN - 0.901\,FR17$$

Ecuación 20

R-Sq = 98.7% R-Sq(adj) = 98.2% p=0.000

Para que se presentaran fugas en medidor en estos años se ve que los términos más importantes por orden de magnitud son: la variación existente entre la presión mínima y máxima, el horario de suministro, las fugas en red y las tuberías de diámetro de 3". En las gráficas de residuos *(Figuras 4.58, 4.59 y 4.60)* se ve el mismo patrón que para las fugas en red.

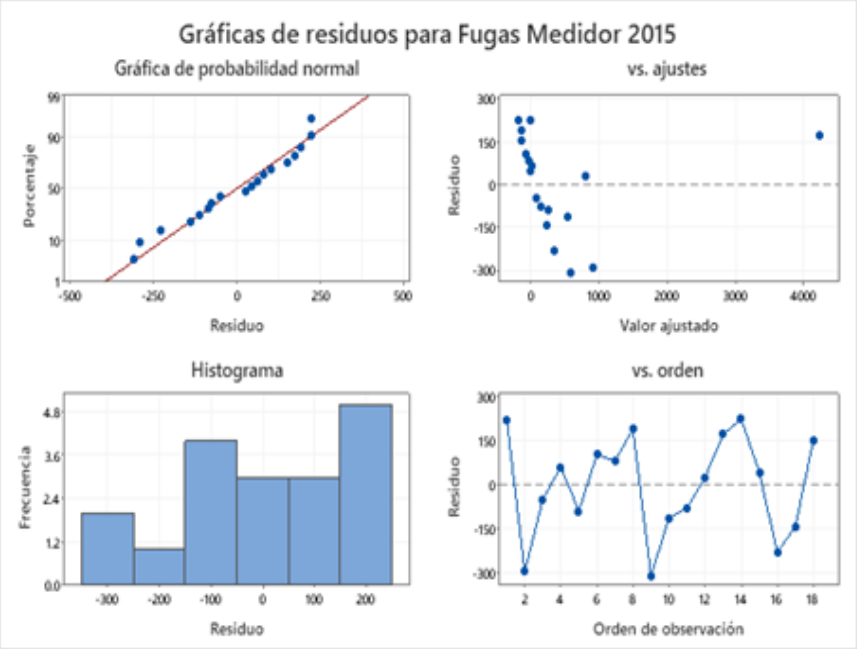


Figura 4. 58 Gráficas de residuos de Fugas Medidor 2015.

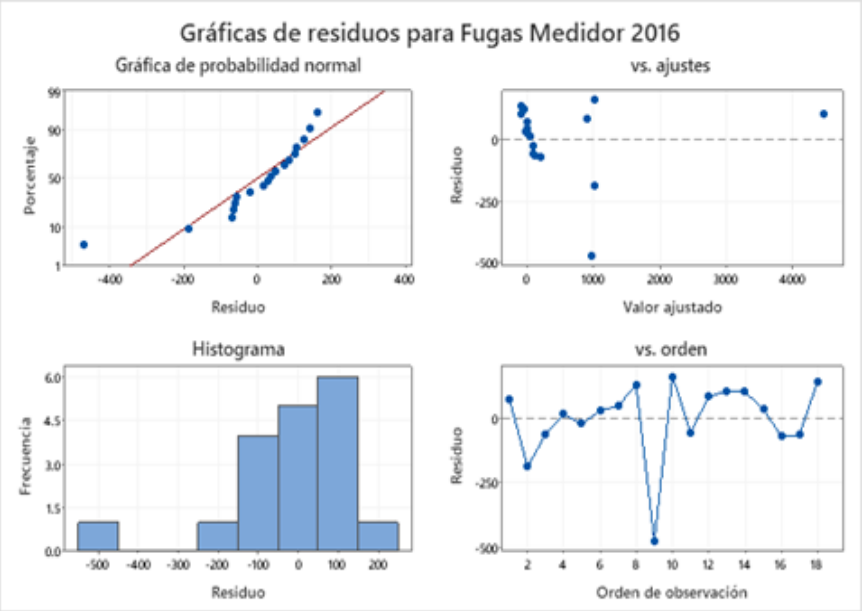


Figura 4. 59 Gráficas de residuos de Fugas Medidor 2016 (Elaboración propia).

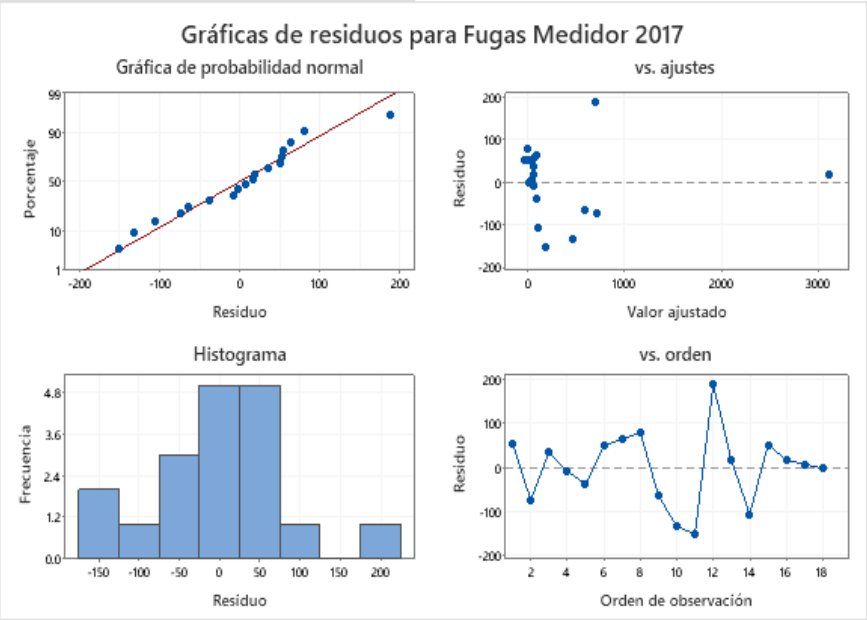


Figura 4. 60 Gráficas de residuos de Fugas Medidor 2017 (Elaboración propia).

Es importante notar que la *PMIN* tiene mayor impacto para la presencia de fugas, dado que se presenta el fenómeno de succión y cuando mayor es la magnitud de la variación del horario de servicio, es mayor el valor de la presión mínima, es de ahí su valor positivo. En cambio, la *PMAX* incide si mayor es por ello su magnitud negativa, es decir es contraria entre más incrementa hay mayores fugas en medidor.

4.3 Análisis numérico

Desde la propuesta de Hardy Cross en 1936 sobre el uso de modelos matemáticos para el análisis de sistemas de distribución hidráulica, los modelos han evolucionado de una metodología de aproximaciones sucesivas mediante iteraciones que partía de la suposición de caudales iniciales en los tramos, basadas en las leyes de continuidad y conservación de la energía a utilizar herramientas computacionales para la solución de diversos sistemas de ecuaciones diferenciales.

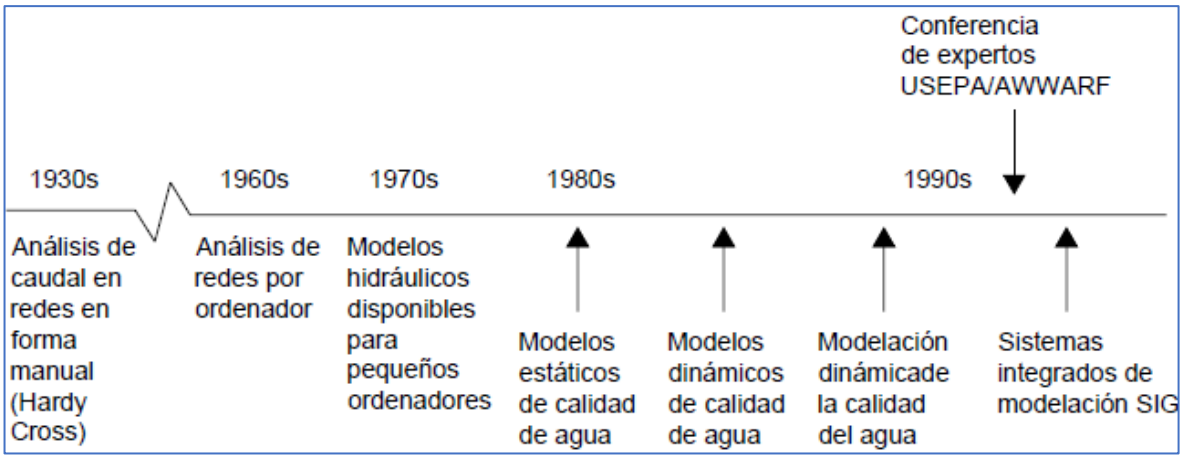


Figura 4. 61 Representación de la evolución histórica de los modelos de sistemas de distribución de agua (García C., 2003)

Existen varias clasificaciones para los modelos matemáticos enfocados a las redes de distribución de agua, por ejemplo, en libro de Modelación Hidráulica y de Calidad del Agua en Redes de Distribución, de la serie Manual de Agua Potable y Saneamiento (CONAGUA (C), 2015), elaborado en forma conjunta por el IMTA y CONAGUA define los tipos de modelos de la siguiente manera:

- Aplicaciones
- De planificación
- De diseño o de operación
- Grado de detalle
- Modelos estratégicos o arteriales
- Detallados
- Variación en el tiempo
- Estáticos o de flujo permanente
- Dinámicos o de flujo no permanente
- Inerciales

- No inerciales

García en el 2003 en su tesis doctoral, clasificó los tipos de modelos de la siguiente manera:

- Aplicaciones
- De planificación
- De operación
- Grado de detalle
- Modelos estratégicos o arteriales
- Detallados
- Variable del tiempo
- Estáticos
- Dinámicos
- Variables del sistema que sean de interés
- Hidráulicos
- De calidad

De forma simplificada se determina que la selección del tipo de modelo a realizar depende del objetivo, alcances del modelo que a su vez está limitada de la cantidad y calidad de datos con que se cuentan.

Los modelos de simulación actualmente son sistemas completos que permiten, analizar y mostrar los parámetros hidráulicos y de calidad del agua dentro de un sistema de distribución de agua potable.

En 2008 la JMAS realizó un convenio de prestación de servicios con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) para llevar a cabo el estudio del "Diagnóstico, Modelación y Planificación de Sectores en la Red de Distribución de Agua Potable" (JMAS/IMTA, 2008) y con ello contar con un análisis cuantitativo y cualitativo de la infraestructura. Una parte del proyecto fue realizar la "Modelación y Planificación de Sectores ", donde se analizó el funcionamiento hidráulico de la red, mediante el uso del programa *Infoworks WS*, los resultados de este trabajo, son la base para el presente apartado.

Infoworks es un software de última generación que permite la construcción de un sistema de suministro de agua mediante un modelo computacional, que posibilita la solución de las ecuaciones de forma iterativa. En el programa es posible representar todos los aspectos de un sistema de agua potable como: sus controles, demandas y fugas que les afectan; permitiendo el análisis del comportamiento de la red bajo diversas condiciones, además de facilitar su visualización mediante reportes y análisis de resultados.

Para llevar a cabo el análisis mediante el uso de *Infoworks* el primer paso es crear una red estática, a través de cuatro elementos: fuentes, nodos, enlaces y demanda.

- Fuentes. - Depósitos de almacenamiento o regularización, carga establecida o pozos.
- Nodos. - representan un punto específico en la red: nodo, carga establecida, depósito, pozos, hidrantes, etc.
- Enlaces. - son las estructuras que conectan los nodos: tuberías, estaciones de bombeo, válvulas y medidores

- Demanda. - es asignada a los nodos y determina como el agua es entregada por el sistema.

A partir de una red estática se incorpora la topografía mediante el uso de sistemas de información geográfica, de los cuales se extraen modelos de elevación que permiten asignar cotas a cada nodo. En la *Figura 4.62* se muestra la red de distribución de la ciudad de Chihuahua.

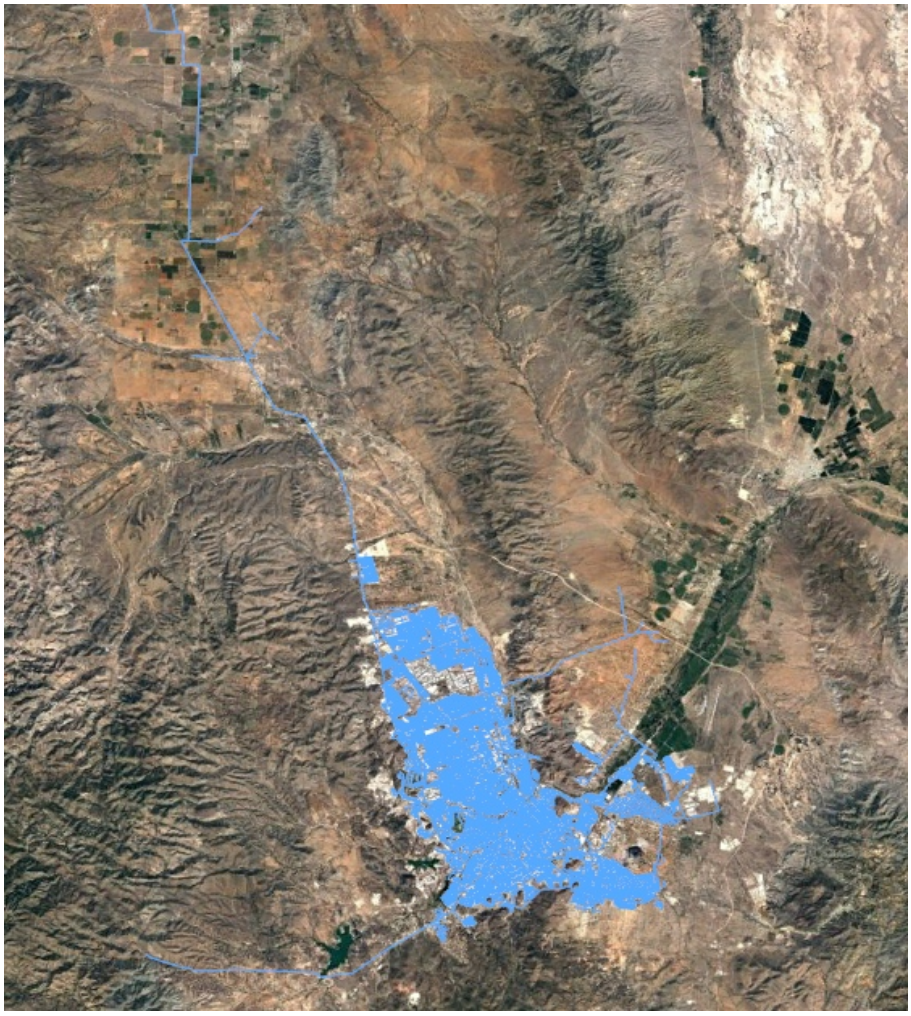


Figura 4. 62 Sistema de abastecimiento y distribución de agua potable de la ciudad de Chihuahua (Elaboración propia).

A continuación, se presenta una sucesión de imágenes de la corrida, de forma estática del modelo integrado de la red de distribución de agua potable de la ciudad, donde se tienen identificados alrededor de 280,000 cuentas domésticas. Este modelo está basado en el modelo del IMTA 2008 y modificado con los datos de los registradores de presión, que fueron colocados durante la realización de este trabajo de investigación.

En estas imágenes se representan las presiones clasificadas en metros (*mca*), los rangos de presiones van: menor de 0, 0, mayor de 0 hasta 7, mayor de 7 hasta 15, mayor de 15 hasta 25, mayor de 25 hasta 30 y mayor de 30 hasta 45. Que, de acuerdo a las clasificaciones de tipo de modelos, podemos establecer que este es un modelo de operación y por su objetivo, en la búsqueda de evaluar la satisfacción de la demanda, mediante la presencia de rangos y duración de presiones en las zonas. Se muestra el comportamiento de la presión en intervalos de 4 horas a lo largo del día.

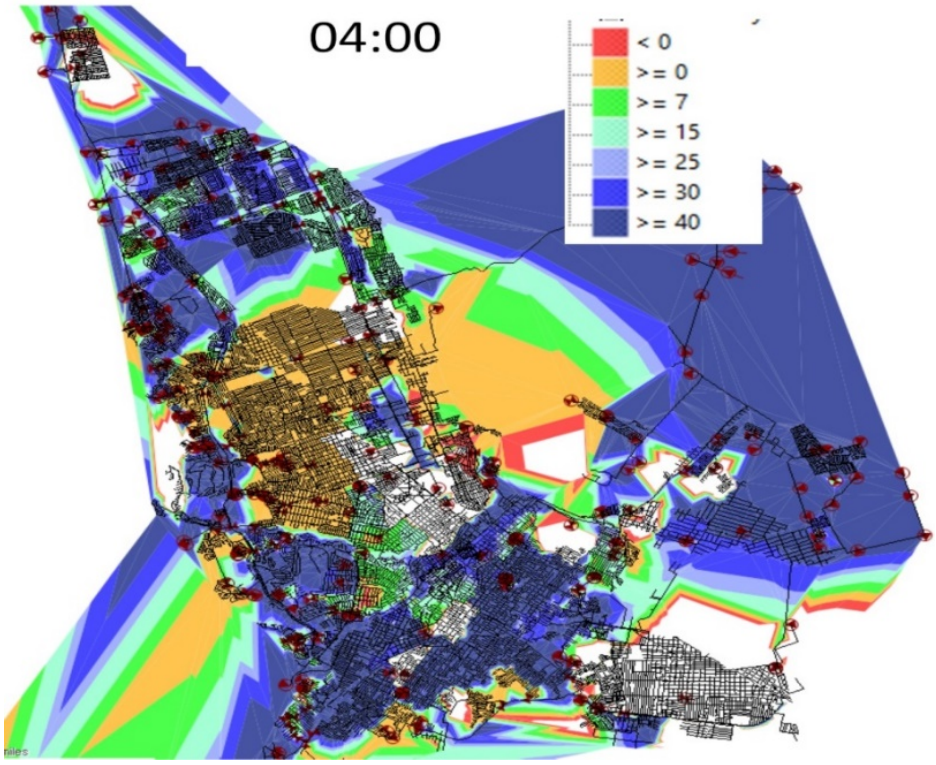


Figura 4. 63 Distribución de presiones a las 4:00 horas (Elaboración propia).

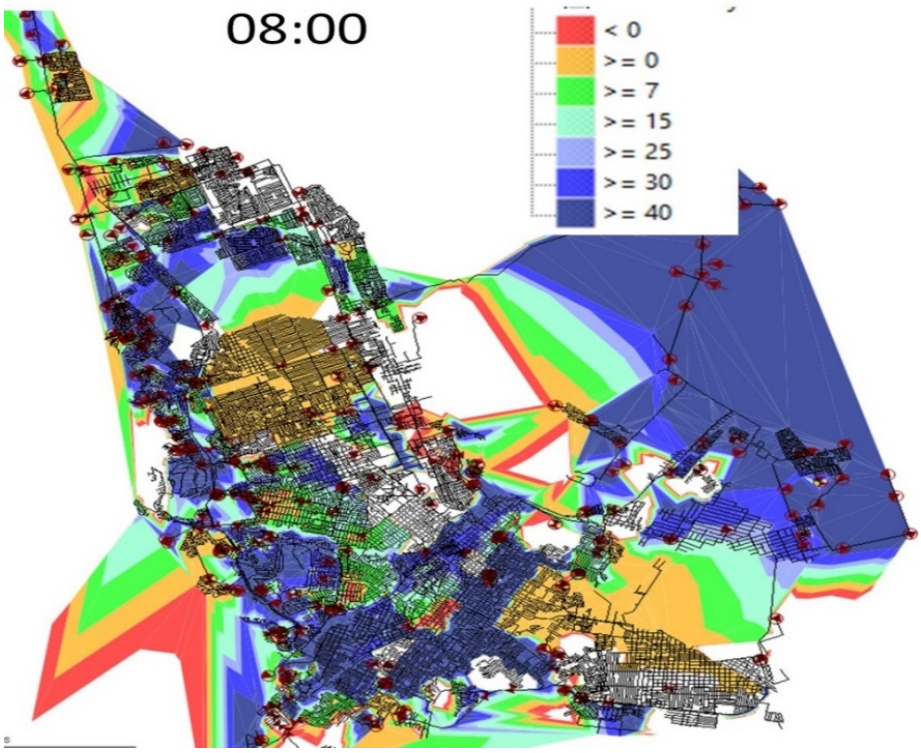


Figura 4. 64 Distribución de presiones a las 8:00 horas (Elaboración propia).

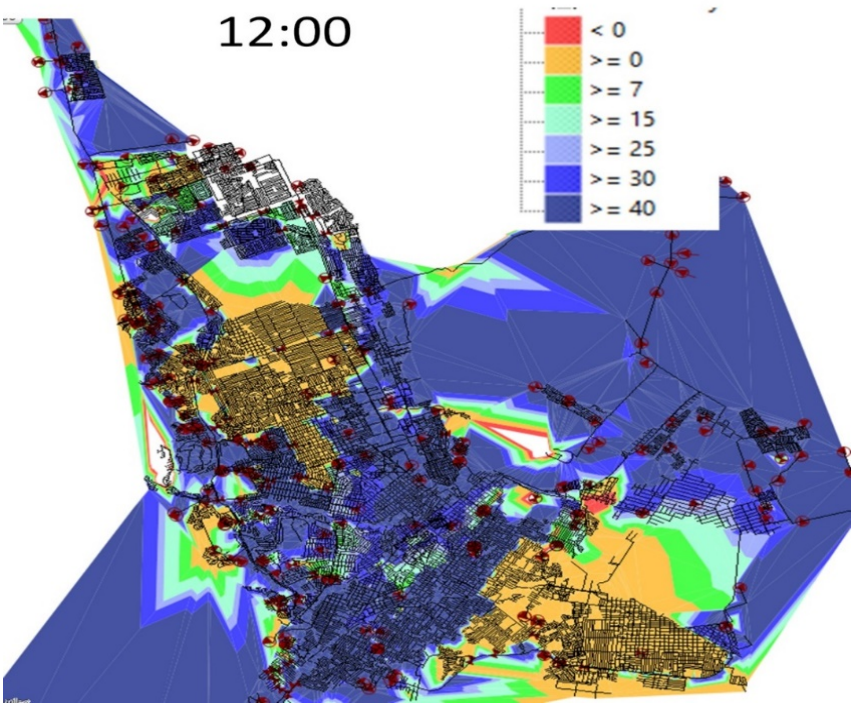


Figura 4. 65 Distribución de presiones a las 12:00 horas (Elaboración propia).

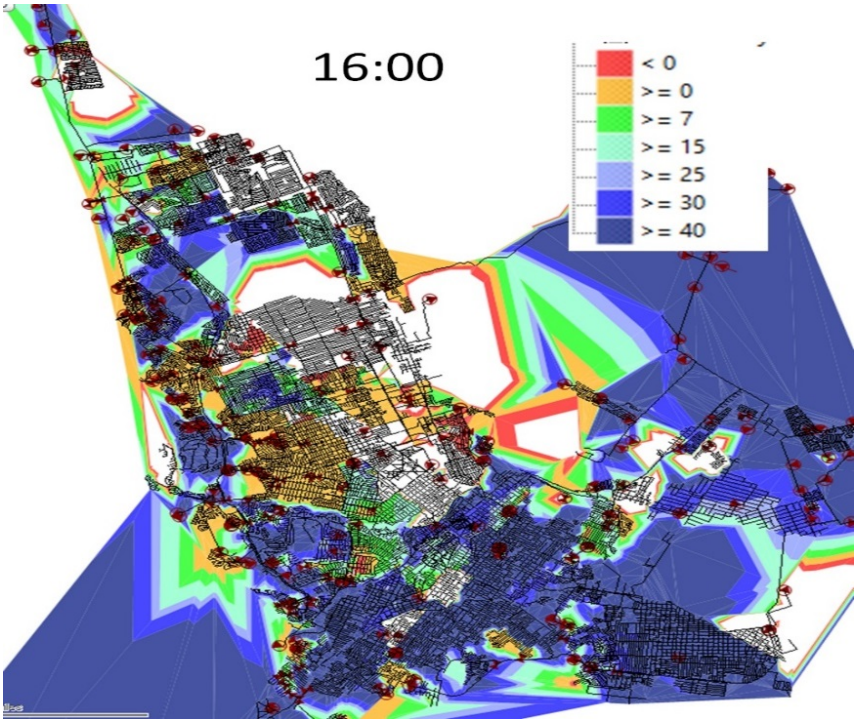


Figura 4. 66 Distribución de presiones a las 16:00 horas (Elaboración propia).

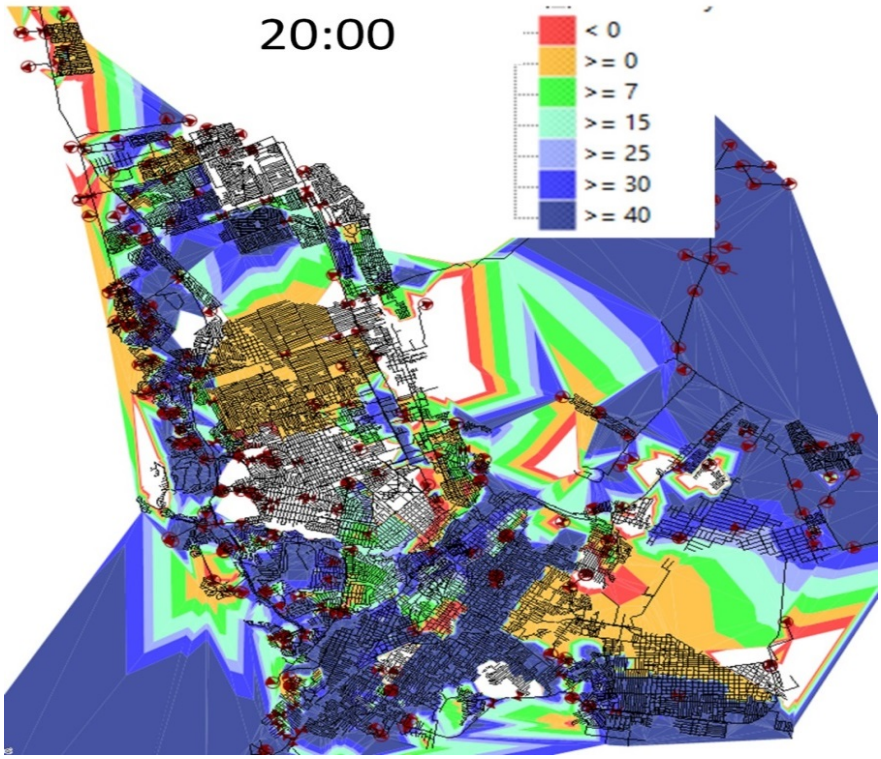


Figura 4. 67 Distribución de presiones a las 20:00 horas (Elaboración propia).

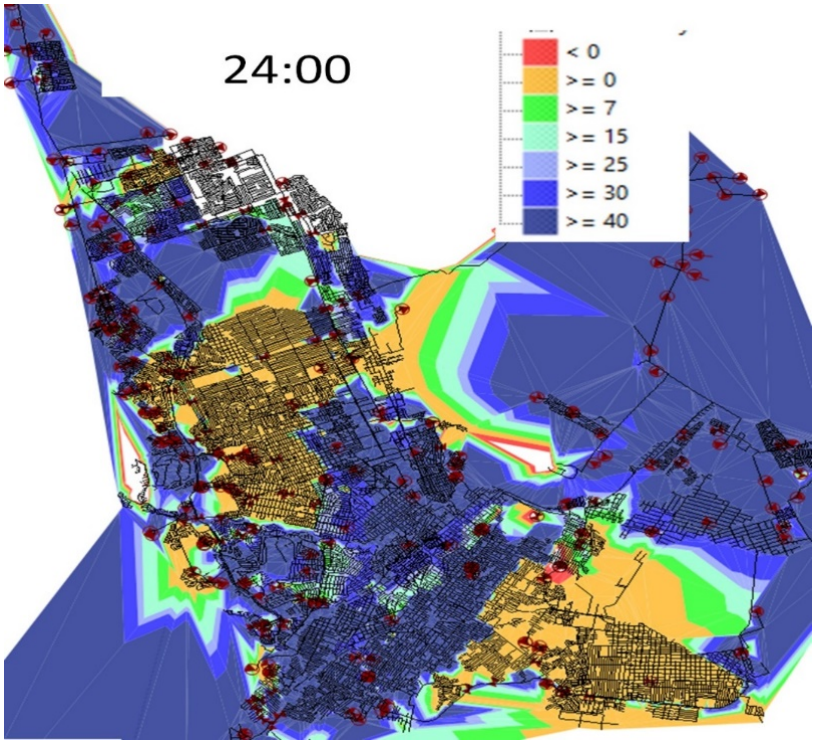


Figura 4. 68 Distribución de presiones a las 24:00 horas (Elaboración propia).

En la corrida del modelo, se observan zonas muy marcadas en el centro-norte (zona de distribución del tanque Colina-Saucito) y en el sur (Villa Juárez) con presiones menores de 0. También existen momentos en que el modelo "parece no converger", mostrando zonas en blanco.

Es por ello, que, para hacer un análisis más fino, de la envolvente de presión en la red, se seleccionó un sector, donde se tiene el conocimiento de que está sectorizado, identificando claramente sus fronteras, así como la actualización del catastro, pero que corresponda a estas dos zonas identificadas con problemática en la corrida del modelo integrado.

Se llevó a cabo el análisis en la Colonia Rigoberto Quiroz *(Figura 4.69)* recabando información mediante el uso de registradores de presión tipo *Multilog (Figura 4.70)* además de los datos generados del punto de suministro y entrada al sector de la válvula reguladora de presión con telemetría, estos fueron extraídos en tiempo real de forma remota, tanto de caudal como de presión al sector.



Figura 4. 69 Ubicación de la colonia Rigoberto Quiroz en la ciudad de Chihuahua, Chih.



Figura 4. 70 Registradores Multilog ubicados en la colonia Rigoberto Quiroz.

Dicho sector está perfectamente delimitado, con una sola entrada y salida de caudal, se definió realizar en una semana, el análisis en el sector de estudio del comportamiento de la envolvente de presión de los dos tipos de suministro, tanto continuo como intermitente lo cual permite la comparativa entre ambos. El primer paso fue realizar una campaña para verificar el aislamiento. Dicha actividad se realizó el 2 de mayo del 2018, ubicándose 10 puntos de medición, con manómetro de glicerina *(Figura 4.71)*



Figura 4. 71 Medición del punto 2, en la colonia Rigoberto Quiroz.

Se mostró que existía independencia de suministro entre el polígono correspondiente a la colonia Rigoberto Quiroz con respecto a sus colindancias por el valor de presión presentado, esto se realizó a las tres horas de parar el servicio a la colonia (9 *a.m.)* para que descendieran las presiones dentro de la sector, en la *Figura 4.65* del modelo de las 12 horas se puede ver que en la colonia ya no se registra una interpolación con presión, siendo en su mayoría ausente presión $o = 0$ *mca/ kg/* cm^2. Se presenta en el siguiente resumen *(Figura 4.72)*.

LEVANTAMIENTO DE PRESIONES PARA VERIFICAR EL AISLAMIENTO					
Nombre del distrito. Roberto Quiroz				fecha	Mayo 2-2018
Pto de obs.	lectura presión (kg/cm2)	hora	dentro o fuera del DH	tipo de usuario	observaciones
1	2.14	12:05	dentro	doméstico	medidor sucio
2	2.03	12:08	dentro	doméstico	medidor sucio
3	2.59	12:13	dentro	doméstico	medidor sucio
4	2.24	12:17	dentro	domestico	medidor sucio
5	2.03	12:20	dentro	doméstico	sin medidor
6	14.37	12:05	fuera	doméstico	fuga en medidor
7	14.39	12:13	fuera	doméstico	
8	15.04	12:08	fuera	doméstico	
9	14.35	12:20	fuera	doméstico	
10	14.37	12:20	fuera	doméstico	sin medidor



Figura 4. 72 Ubicación y resultados de la medicion de presiones para la comprobación de aislamiento en la colonia Rigoberto Quiroz (Elaboración propia).

El siguiente paso fue hacer la campaña de medición de la distribución de presiones, dentro del DH, la información se recopiló de una semana completa de las 11:00 *a.m.* del lunes 7 de mayo a las 11:00 *a.m.* al 14 de mayo del 2018.

Se obtuvo Información de la válvula reguladora, con obtención de datos cada minuto con 10 segundos, mediante la exportación de la plataforma *NEBULALINK (Figura 4.73)*.

Los datos generales de identificación remota de la *VRP* son:

Dispositivo remoto: Villa Juárez, Nodo 6

Ubicación: Chihuahua

Grupo: Sectorización JMAS Chihuahua

Latitud: 28º 36' 10.08" N

Longitud: 106º00' 39.7" W

Dispositivo Id: 2193 (891)

Hora: (UTC-07:00) Chihuahua, La Paz, Mazatlán

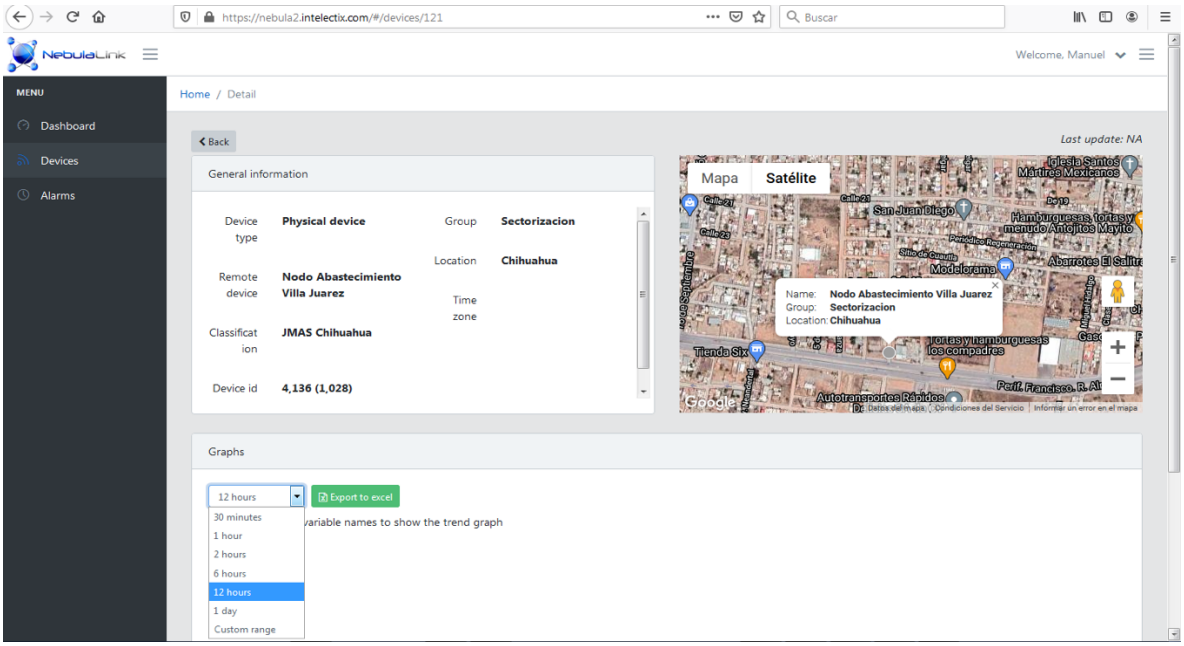


Figura 4. 73 Plataforma *NEBULALINK*, Sectorizacion JMAS Chihuahua.

Los registradores de presión obtuvieron datos de presión cada 15 minutos y con base a esta información se llevó a cabo la calibración del modelo. La ubicación y el número de

puntos de medición, se basó en los gradientes topográficos del distrito hidrométrico (DH). *(Figura 4.74)*.

Información de los registradores (*data loggers*):

Nodo	**Registrador**	**Dirección**
N_128	*R_13*	Ignacio Allende No. 1505
N_43	*R_19*	Emilio Carranza No. 1713
N_1	*R_22*	Privada 16 de septiembre No. 1502
N_113	*R_24*	Privada 5 de mayo No. 2301



Figura 4. 74 Puntos de la medicion de presiones en la colonia Rigoberto Quiroz (Elaboración propia).

El siguiente paso fue realizar la traza de la lotificación de la colonia e identificación de tipo de usuarios del sistema de agua potable, se tiene que el 99 % tipo doméstico, de los

cuales el 90 % son casas de un solo piso con almacenamiento elevado de 800 litros *(Figuras 4.75 y 4.76)*.



Figura 4. 75 Lotificacion de la colonia Rigoberto Quiroz (Elaboración propia).



Figura 4. 76 Usuarios domésticos de la colonia Rigoberto Quiroz.

Posteriormente se construyó el modelo de la red con toda la información requerida, en la siguiente pantalla se muestra, el modelo que tiene **139** nodos, **189** tramos de tuberías de diámetros **2 ½ ” a 8”** con una longitud de **17,282.80 metros** y un total de **1,543** cuentas *(Figura 4.77)*.

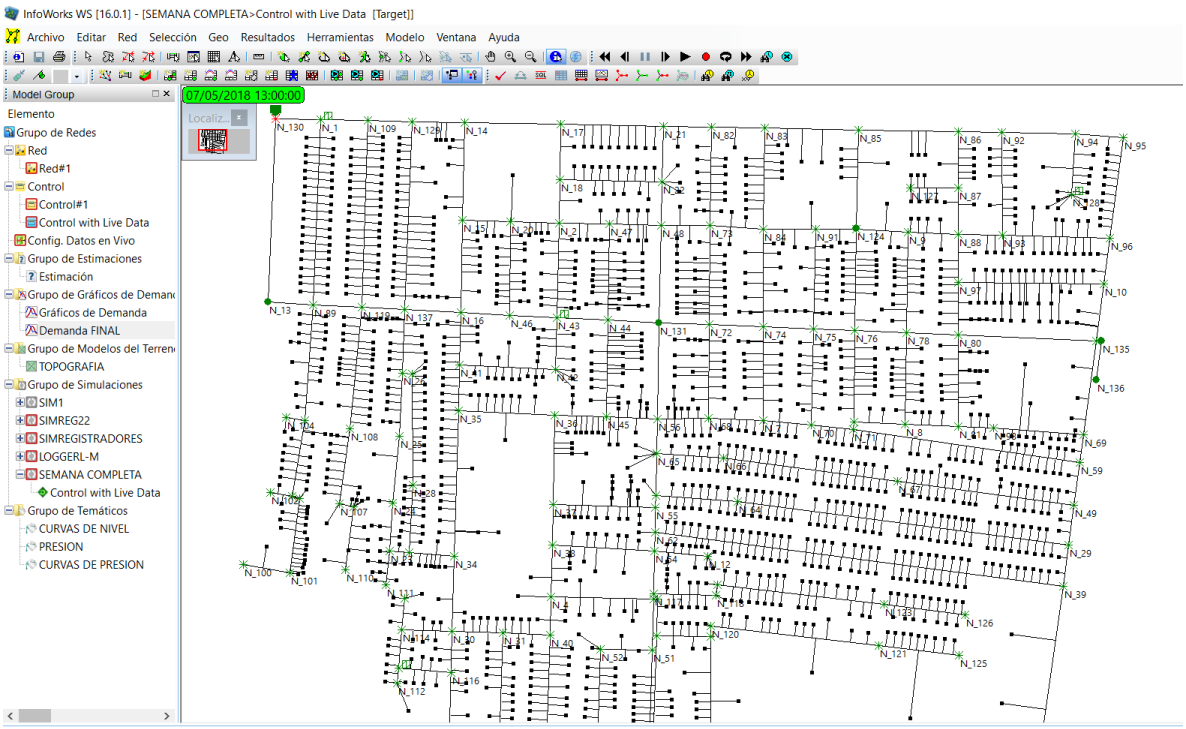


Figura 4. 77 Red en *Infoworks* de la colonia Rigoberto Quiroz (Elaboración propia).

Para iniciar el proceso se toma como base un Modelo de Elevación Digital (MED), obtenido del INEGI, para la asignación de la elevación en los nodos de forma directa con el módulo de integración que trae el *Infoworks* con el *ArcGIS*, el cual realiza la interpolación y la intersección con los nodos, ya que ambos se encuentran en el mismo plano geográfico con el sistema de coordenadas UTM y para el plano vertical se usó la siguiente proyección ZONA 13 NORTE WGS84, en cuanto al *datum* vertical NGVD29 *(Figura 4.78)*.

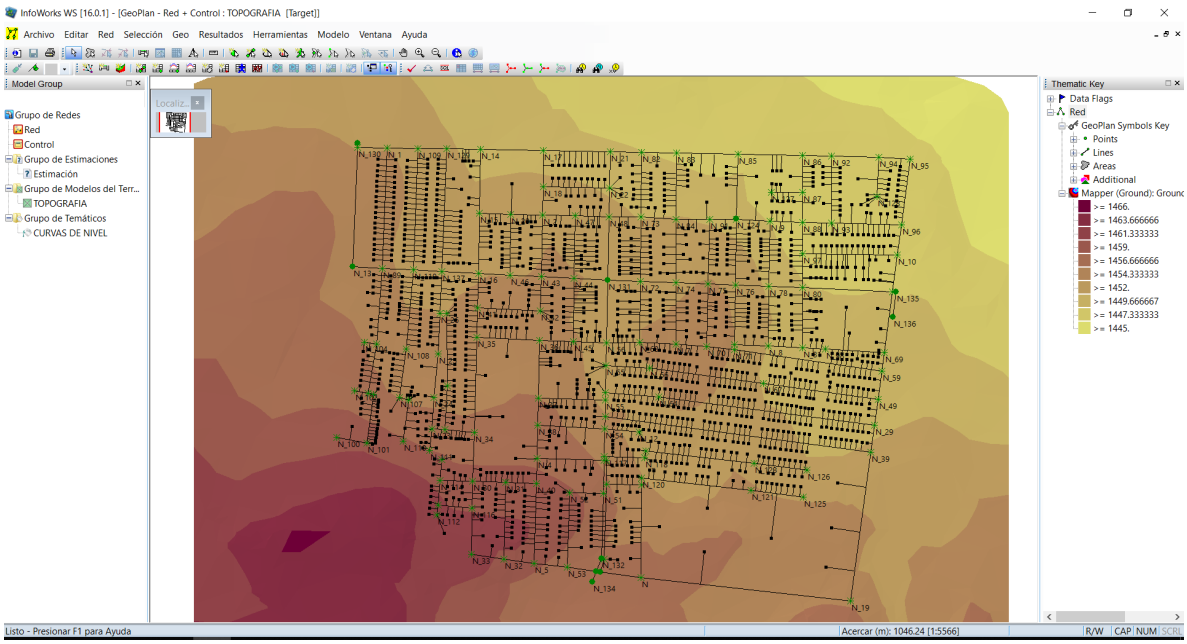


Figura 4. 78 Asignación de elevaciones topográficas de la colonia Rigoberto Quiroz (Elaboración propia).

Se alimentó el modelo con el patrón de demanda del sector *(Figura 4.79)*.

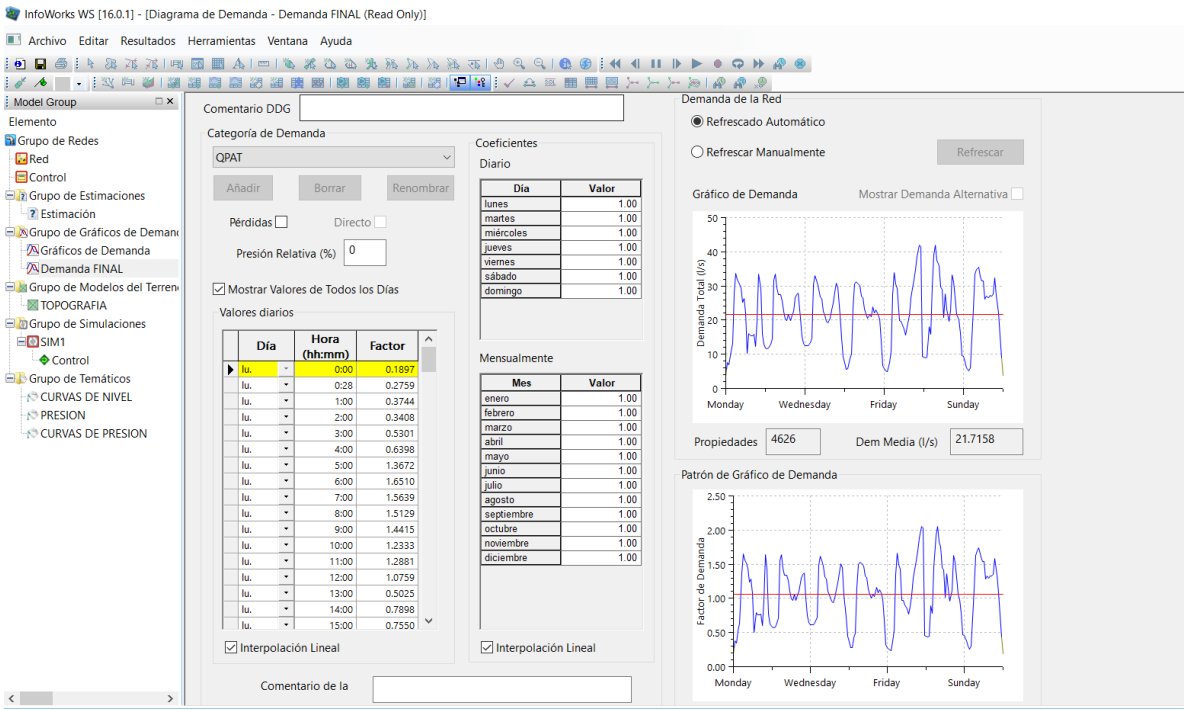


Figura 4. 79 Diagrama de demanda real obtenida a la entrada del sector (Elaboración propia).

Se incorporó el temático de datos en vivo, que es el que corresponde a la información obtenida por los registradores en campo y que son los puntos que apoyan para analizar la representatividad de la simulación con los datos medidos en el sitio *(Figura 4.80)*.

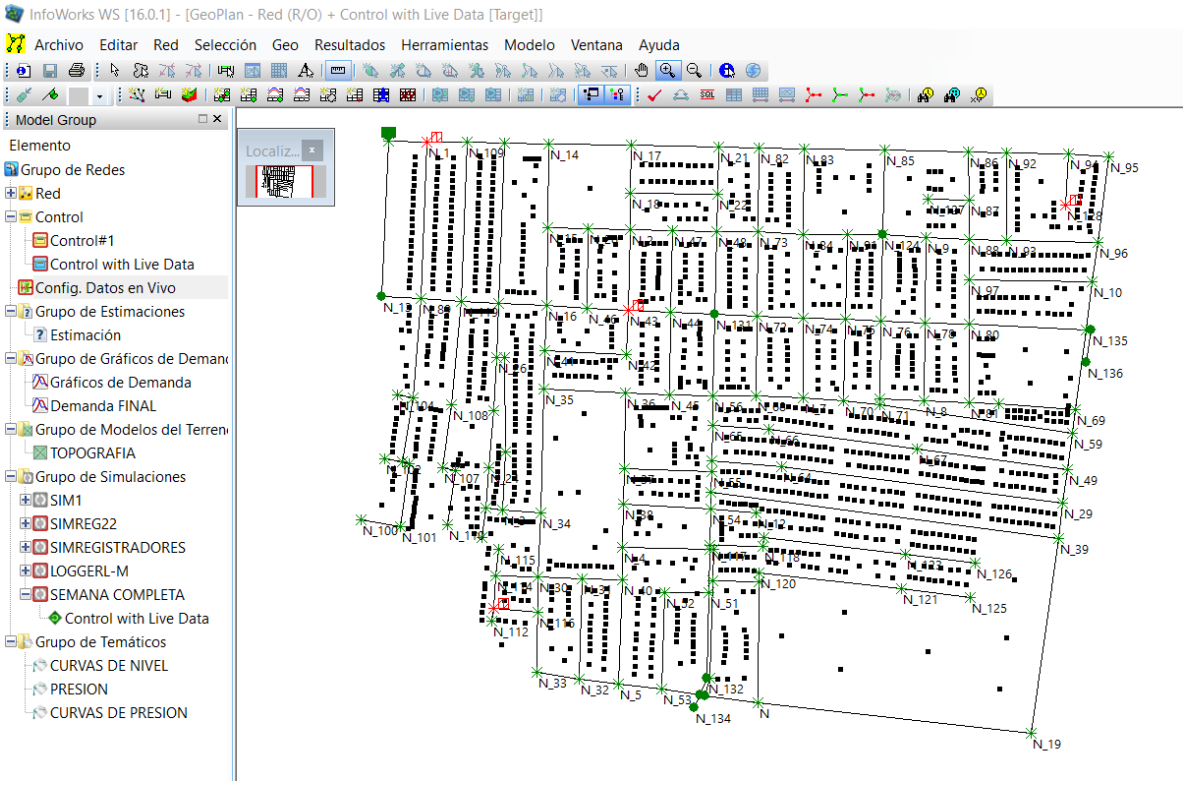


Figura 4. 80 Temático de los datos en vivo, ubicación de los registradores de presión para calibración del modelo (Elaboración propia).

En las siguiente *Figura 4.81* se muestra como se analizan los datos en vivo registrados en el *Infoworks*.

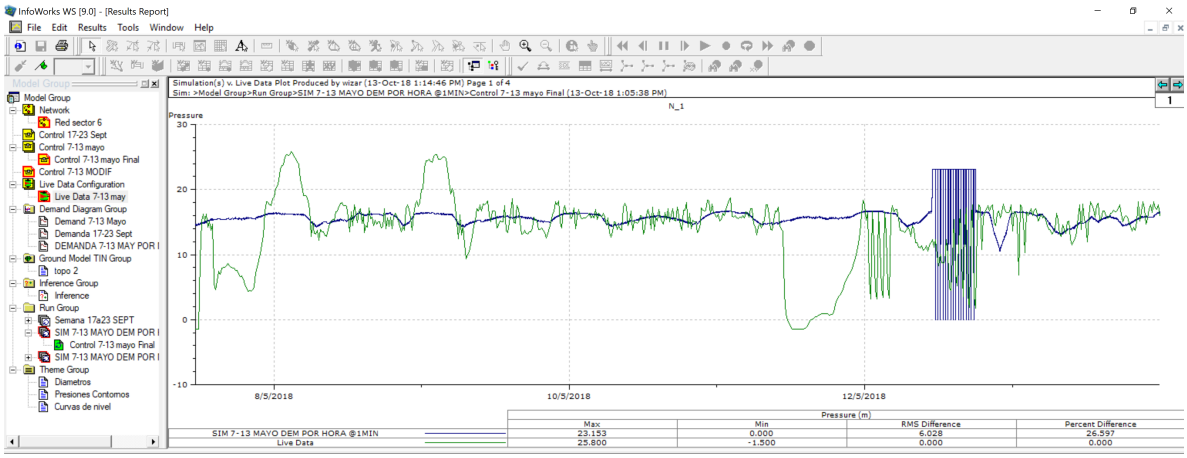


Figura 4. 81 Comportamiento de las presiones en el nodo N_1 (Elaboración propia).

En el tiempo de suministro en bloques en la colonia Rigoberto Quiroz se puede ver el comportamiento de la *VRP* de suministro de acuerdo a la *Figura 4.82*, sin embargo por el tipo de funcionamiento que tiene la *VRP* (muelleo con el solenoide) se ve claro la inestabilidad de la presión en el punto de entrada en el bloque de la mañana; esto es debido a las grandes demandas en los usuarios cercanos al punto de entrada y al rango de operación del resorte del piloto: también se tiene un pico muy fuerte de caudal al inicio del servicio de 58 *lps*, en la tarde se tiene un pico más fuerte del caudal demandado (68 *lps*), esto se le atribuye al llenado de los almacenamientos domésticos; en cuanto a la presión en el bloque de la tarde se ve más estable pues la *VRP* responde "casi" solo a los consumos por llenado de tinacos, la presión tiene un comportamiento inverso al caudal, descendiendo cuando hay mayor demanda, en el bloque de la mañana incluso en instantes a 0.5 kg/cm^2, en un promedio de *2* kg/cm^2; en el turno vespertino de *2* kg/cm^2.

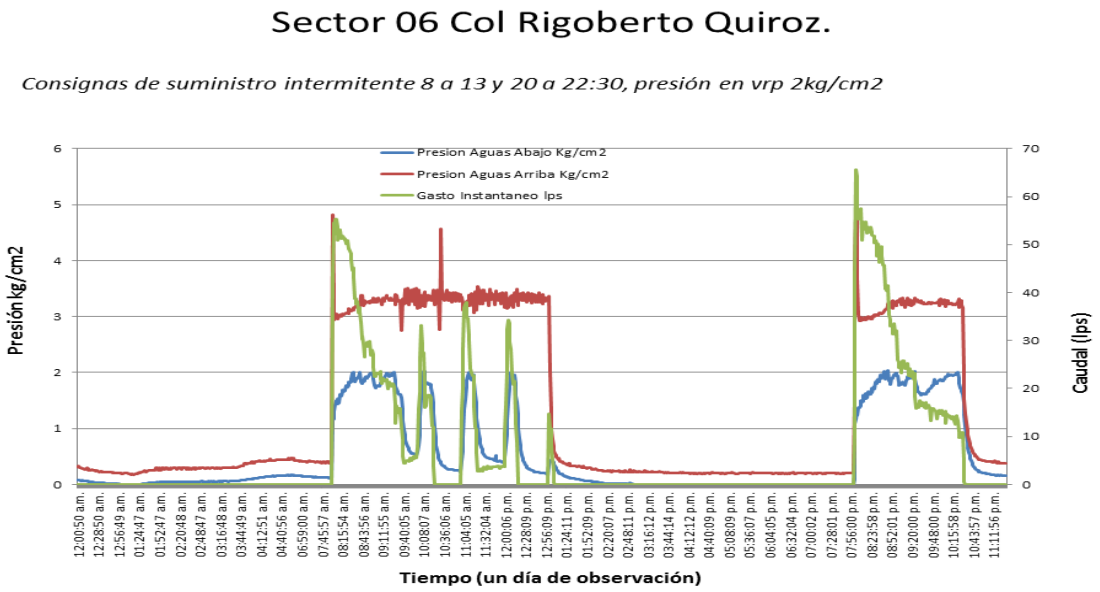


Figura 4. 82 Comportamiento de las presiones en la *VRP* de entrada de suministro al *DH* (Elaboración propia).

El comportamiento de los registradores en el suministro intermitente refleja las inconsistencias operativas de la oscilación de presión en la *VRP* de entrada, en el registrador (serie 3), se muestra un retraso en el tiempo para la permanencia del agua en el punto de hasta media hora, el desnivel topográfico se observa con la variación de los niveles de presión alcanzados en el sector, más o menos de 15 *m (Figura 4.83)*.

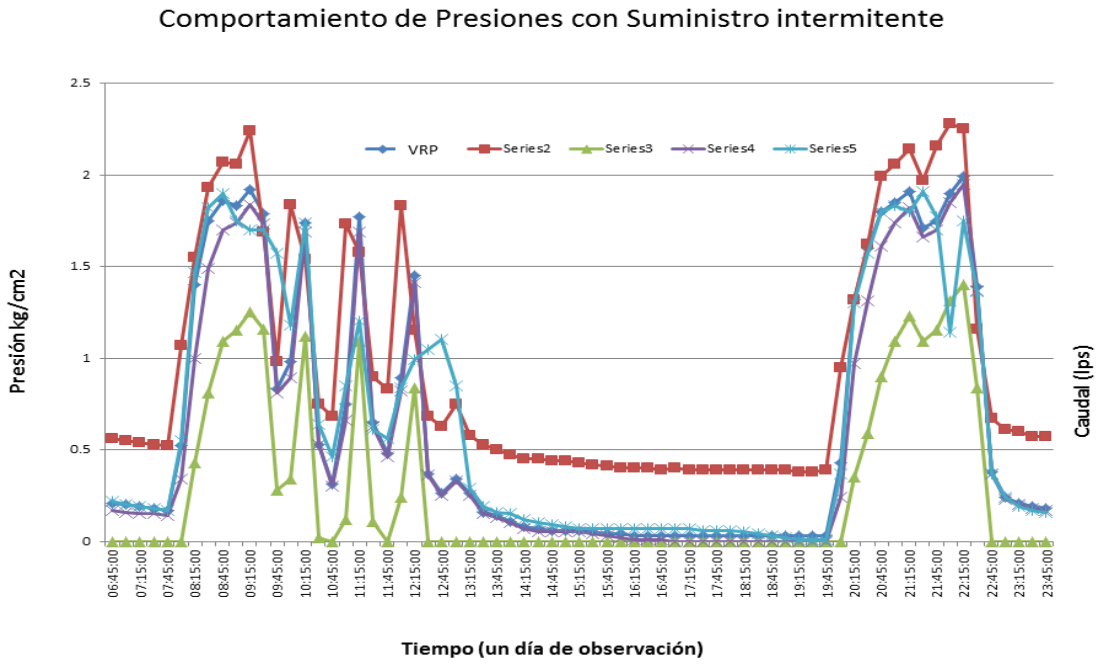


Figura 4. 83 Comportamiento de las presiones en cada uno de los registradores instalados en la colonia Rigoberto Quiroz (Elaboración propia).

Para hacer el análisis de la satisfacción de la demanda en la colonia se definió una presión a pie de domicilio de 1 kg/cm^2, para considerar que se tiene servicio, se puede observar que durante el bloque matutino el 60% de la colonia si tiene presión igual o mayor a 1 kg/cm^2, el resto tiene presiones por debajo de 1 kg/cm^2, incluso durante el horario de servicio pueden no tener presión, en cambio en el bloque de servicio vespertino se tiene en toda la colonia presión igual o mayor a 1 kg/cm^2, a pesar de ser menos tiempo el que se da en la tarde, esto debido en que tres de los puntos de monitoreo no decae la presión a 0 entre la terminación del periodo matutino y el inicio del vespertino; es decir queda con algo de carga la red *(Figura 4.84)*.

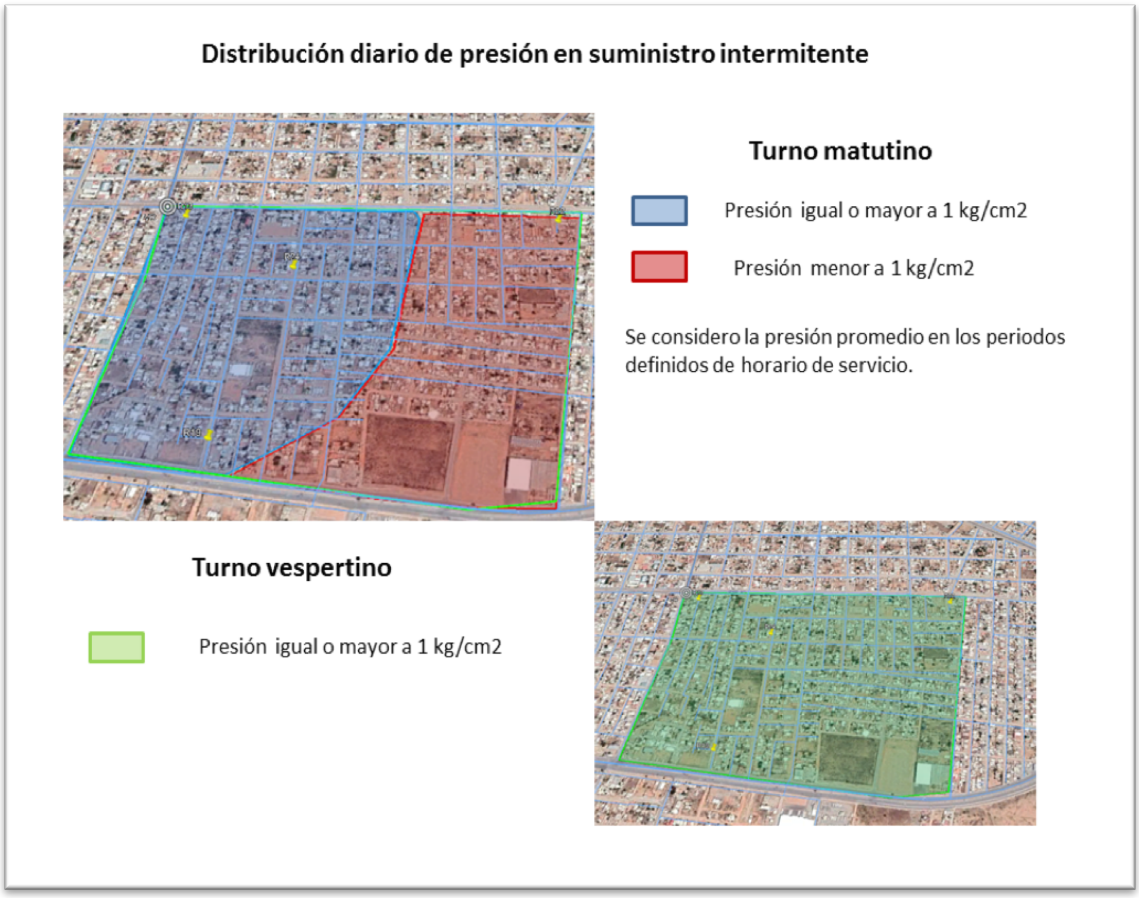


Figura 4. 84 Comportamiento de las presiones en los horarios de servicio establecidos (Elaboración propia).

El modelo en suministro intermitente presentaba algunas cuadras de forma instantánea que no convergía y que se iban en presiones negativas, como se muestra en las imágenes correspondientes desde las 24 horas hasta las 12 *p.m.*; al cambiar la operación de suministro intermitente a continuo, tenemos que la distribución de las presiones se "suavizan" en toda la colonia *(Figura 4.85)*.

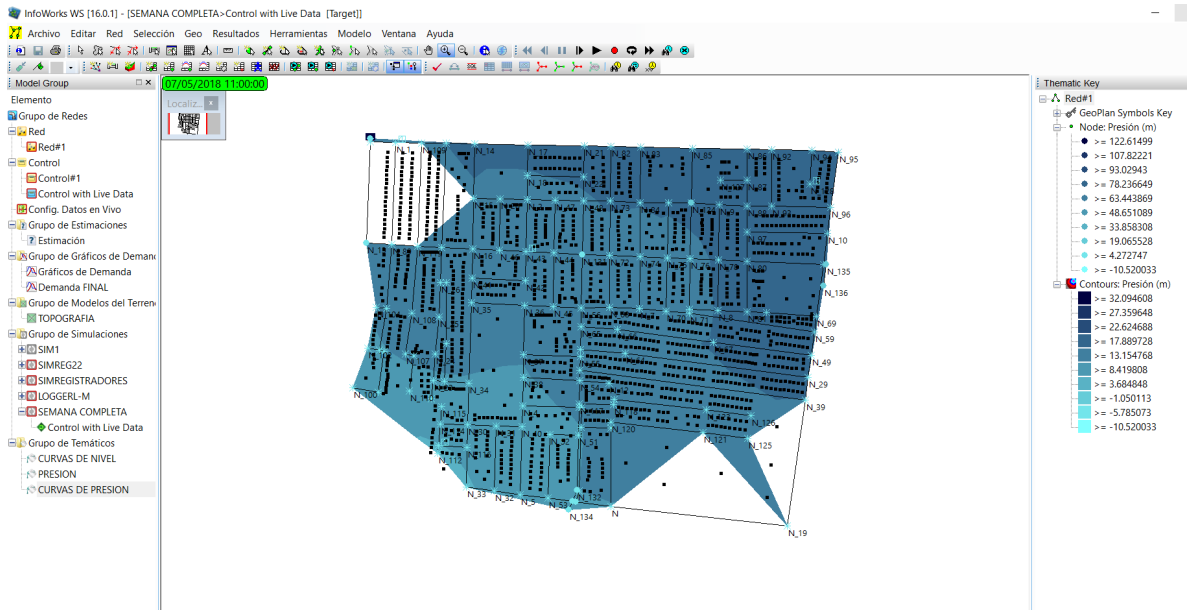


Figura 4. 85 Simulación de presiones en el sector a las 11:00 *a.m.* (Elaboración propia).

El dejar "libre" el suministro para verificar la respuesta a la demanda, mostró que la *VRP* de entrada oscila en la presión de entrega de 2.6 kg/cm^2 a 0.6 kg/cm^2, manteniendo en una presión promedio de 1.7 kg/cm^2 *(Figura 4.86)*.

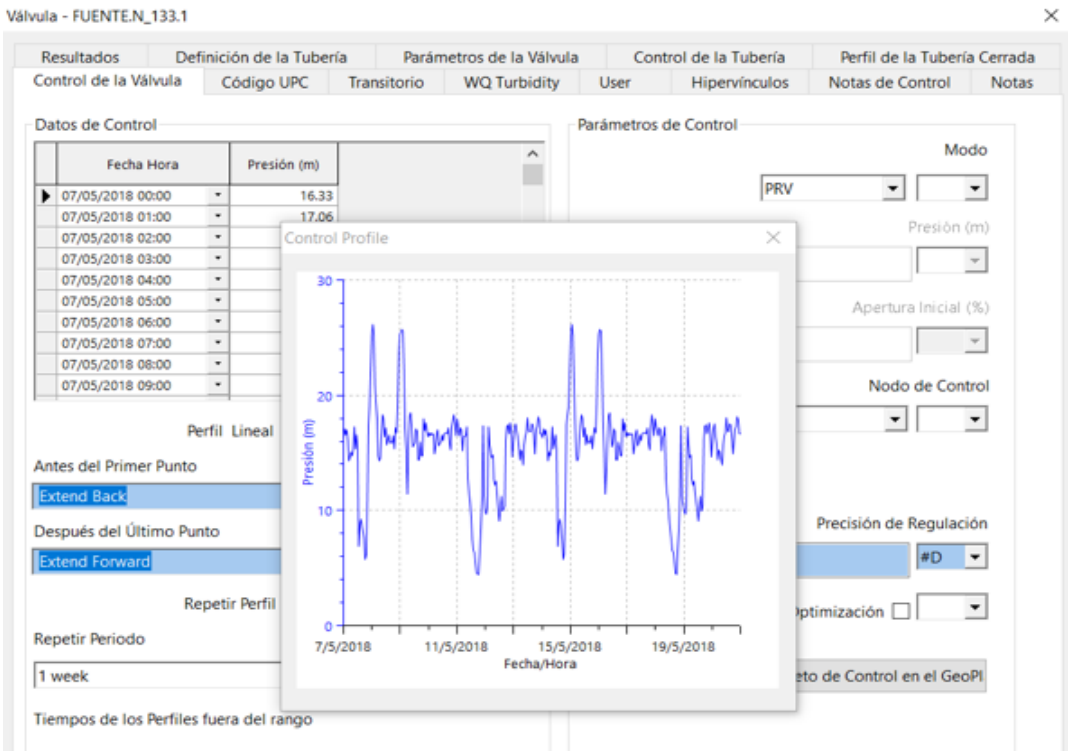
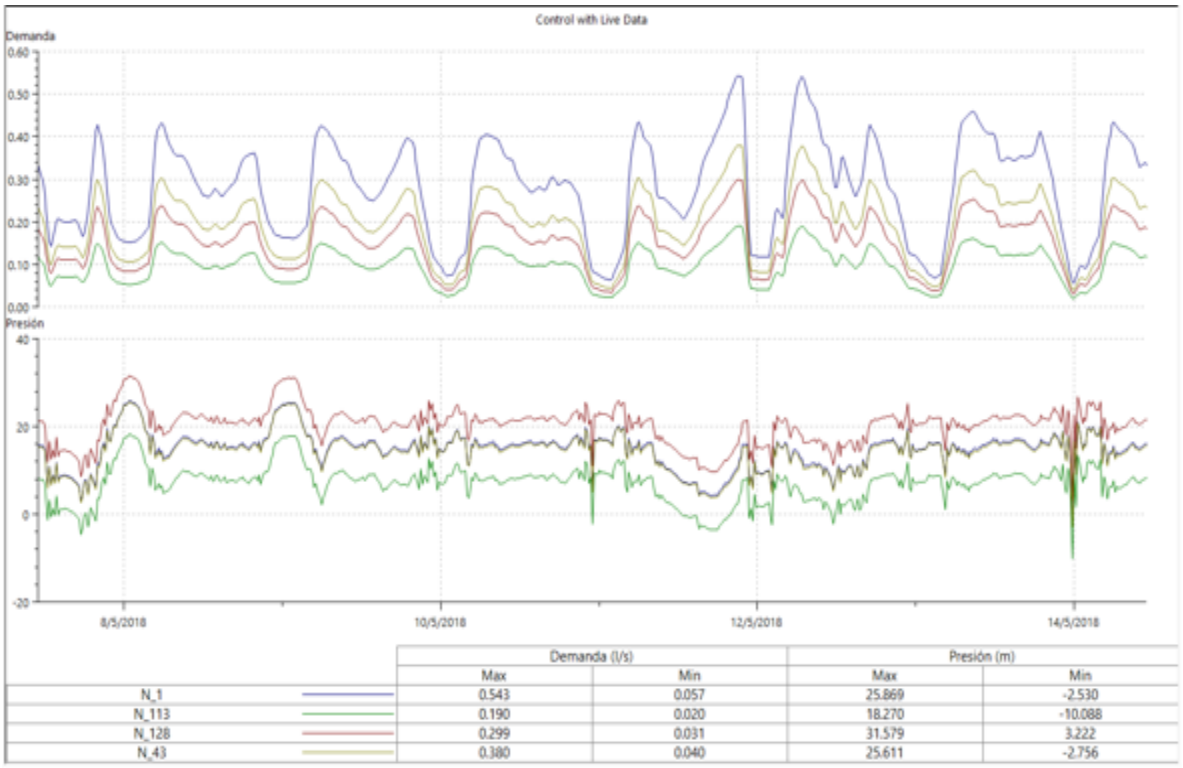


Figura 4. 86 Simulación de presiones de operación registradas en la *VRP* (Elaboración propia).

El comportamiento registrado en los puntos de observación dentro de la colonia se dio de una manera menos abrupta en su variación, sin embargo, también se presentan en algunos instantes, en tres de los puntos de monitoreo presiones negativas; la variación de operación de servicio suficiente fue de 10 a 30 *mca*, en cuanto a la demanda ilustrada por el caudal muestra en la variación entre el día y la noche, que el caudal mínimo nocturno oscila en un 10% del caudal diurno. *(Figura 4.87)*.



	Demanda (l/s)		Presión (m)	
	Max	Min	Max	Min
N_1	0.543	0.057	25.869	-2.530
N_113	0.190	0.020	18.270	-10.088
N_128	0.299	0.031	31.579	3.222
N_43	0.380	0.040	25.611	-2.756

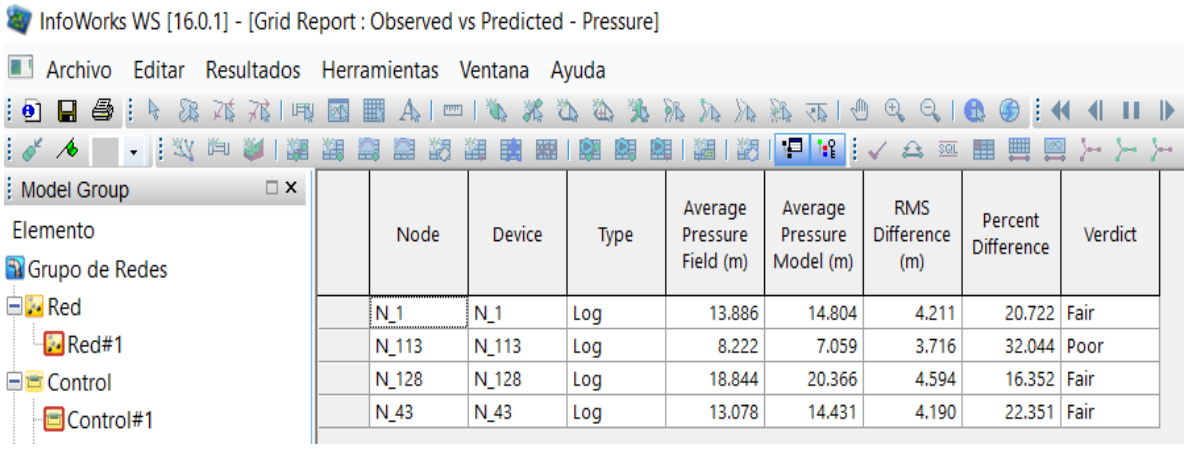
Figura 4. 87 Comparativa de los valores de caudal y presión en los puntos de registro con suministro continuo (Elaboración propia).

En conclusión, se observa que los valores obtenidos en campo y las simulaciones del modelo integrado de toda la ciudad, como el específico de la colonia son convergentes en la variación de la presión en la zona, que van desde presiones negativas, pasando por 0 y llegando en algunos puntos a 25 *mca*.

También se pudo advertir que el *Infoworks* no genera niveles satisfactorios de confiabilidad cuando se tienen más de 3 periodos horarios con presiones menores o iguales a 0, y se manifiesta con color blanco (o sin color), esta simulación es lo que sucede en un suministro intermitente, en el modelo integrado de la red se puede percibir las zonas tanto con suministro continuo como suministro intermitente, con la problemática descrita anteriormente. En cuanto a la simulación de suministro continuo en la colonia, se advierte una menor variación de la oscilación de presiones y caudales en el sector, sin embargo, hay instantes en el punto más lejano o denominado punto crítico (*N_113*) que la presión "no sube", a pesar de registrar caudal en el punto.

Es por ello, que la *Tabla 4.14* muestra que la calibración entre la simulación en *Infoworks*, aun en suministro continuo, no tiene una convergencia favorable en la calibración.

Tabla 4. 14. Comparativa del modelo con las mediciones de campo, suministro continuo (Elaboración propia).



	Node	Device	Type	Average Pressure Field (m)	Average Pressure Model (m)	RMS Difference (m)	Percent Difference	Verdict
	N_1	N_1	Log	13.886	14.804	4.211	20.722	Fair
	N_113	N_113	Log	8.222	7.059	3.716	32.044	Poor
	N_128	N_128	Log	18.844	20.366	4.594	16.352	Fair
	N_43	N_43	Log	13.078	14.431	4.190	22.351	Fair

Cabe señalar que la simulación en ambos escenarios muestra que, en la satisfacción de la demanda de los usuarios en la colonia, no solo es importante el tiempo o periodo en que suministra el gasto, sino que también se debe contemplar el tiempo de permanencia de la

presión suficiente en todo el sector; es por ello que a partir de estos resultados se propone realizar una gestión de presiones, con la finalidad de darle estabilidad y permanencia a la presión en el periodo de mayor demanda. Con este análisis se establecen los siguientes indicadores:

1) ***Ciclo de servicio al usuario (horas al día***) (*duty cycle*): Cantidad de tiempo en que el usuario dispone del servicio de agua potable; considerando el ciclo de servicio, en el periodo en que puede ser "utilizado" el líquido por el usuario para satisfacción de su demanda, determinado que es a partir de que se cuenta con 7 mca de presión en la toma domiciliaria.

2) ***Presión mínima de operación del DH (Entre 0 y 7 mca):*** esta puede darse al inicio del ciclo de servicio, originado la etapa de "saturación" de la red y desplazamiento del aire dentro de la tubería, o puede ser al término del ciclo de servicio, que la tubería quede con cierta carga en algunos tramos. No es presión suficiente para el aprovechamiento del agua potable. (Horario de No servicio al usuario en suministro intermitente u horario nocturno en suministro continuo).

3) ***Presión necesaria para servicio al usuario (Entre 7 y 30 mca):*** Esta etapa se da durante el ciclo de servicio dentro del sector, puede ser de forma no homogénea dentro del sector en valor, pero suficiente para ser utilizada de manera regular dentro de la vivienda, incluso en viviendas con dos pisos o más y con almacenamientos domésticos elevados.

4) ***Presión evitable para control de volúmenes fugados y fallas de la tubería/medidores (mayor de 30 mca):*** es una presión innecesaria en la red, genera daños en las instalaciones de las viviendas (típicamente en fallas en empaques de los accesorios), deterioro en la tubería por desgaste, provoca fugas y alimenta e incrementa el volumen perdido en fugas, así como la sobrepresión recurrente en el ciclo de servicio genera "el traslado" de las fugas o fallas de la red, que asocia el usuario con que no se rehabilita o repara adecuadamente.

5) ***Retraso en el reflejo de servicio (horas):*** Tiempo que transcurre entre la apertura de la válvula de control que suministra el agua al sector hidrométrico o DMA y momento en el que se tiene presión de 7 mca o mayor, en el punto de monitoreo.

6) ***Tiempo de llenado de la red (horas):*** Tiempo transcurrido a partir de la apertura de la válvula de control que suministra el agua al sector hidrométrico o DMA hasta que la presión en el domicilio obtiene un valor relativamente constante; es decir, se estabiliza la presión al haberse llenado de manera general la red.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En el análisis de los tres métodos identificados y explicados en el apartado *3.3.4. Determinación de herramientas de análisis*, para evaluar la envolvente presión, definiendo esto como el comportamiento y las magnitudes de las presiones; de forma distribuida espacial y temporal en la red de distribución de la ciudad de Chihuahua, cabe destacar que en los dos primeros métodos (geoestadísticos y estadísticos), fueron coincidentes en los valores obtenidos, derivados de los registros de datos de medición (presión y caudales); las estimaciones de dispersión y homogeneidad de los valores obtenidos en campo, presentaron un grado de confiabilidad aceptable, la cuales oscilaron por encima del 60%.

Estos análisis univariados de los valores de las variables consideradas (presión, caudal), permite evaluar que los resultados obtenidos tienen validez y representatividad.

El primer ***método geoestadístico***, permite acotar zonas de grandes problemas por sobrepresión y zonas con baja presión a succión, donde destaca que el 61% de la superficie de la ciudad tienen un servicio de a 4 a 9 horas.

En estas áreas con este ciclo de servicio se tienen problemas de sobrepresiones focalizadas en la porción norte específicamente en la zona de influencia del tanque Colina, tanque Chihuahua 2000 y las anexas del Saucito, con valores que van desde 38 a 79 *mca*, siendo constantes y recurrentes las fugas en medidor/toma, resultando solo en un año (2015) índices altos de fugas en red. En estas últimas áreas son de las primeras grandes entregas que se dan del acueducto el Sauz (una de las principales conducciones de la ciudad). Eso indica que el horario de servicio que se suministra, es un intervalo corto para el desalojo del caudal a transitar en estas zonas, por lo que se suple con altas velocidades de llenado para inducir

en un efecto de mayor empuje del agua hacia las redes y que incluso el diámetro de tuberías no es del tamaño adecuado para hacer la transferencia entre sectores.

En contraste en la zona sur, sobresalen las fugas en red por subpresión y vacío total hasta llegar a la succión, con horarios irregulares de servicio de 0 a 4 horas, estas se focalizan en tres zonas de influencia: tanque A, tanque San Jorge, tanque Cerro Grande, representando aproximadamente un 11% de la superficie de la mancha urbana. Esto podría ser indicativo de que la red presenta fatigas por constantes cambios de direcciones de operación y en tal caso, de que sus vidas útiles ya se cumplieron.

Una cuestión aparte es la zona centro de la ciudad, pues tiene altos índices de fuga tanto de medidor como de red; sin embargo la variación de las presiones máximas y mínimas no es muy grande; es posible que por ser la parte baja donde concurren los escurrimientos de otras zonas, esas fugas no sean originarias ahí y que solo afloran por esta razón; o que sea en las conexiones de la tomas domesticas a la red secundaria, o que algunas tomas viejas no se desarticularon cuando se hizo el cambio de red. Lo anterior es un área de oportunidad para el desarrollo de investigaciones futuras.
Este método permitió visibilizar problemas operativos en áreas de influencia y con ello poder jerarquizar acciones para su solución.

El segundo ***método estadístico,*** apoyó en identificar los factores que más pesan para mejorar el servicio y la satisfacción de la demanda en la ciudad, es por ello que se plantearon los siguientes supuestos

- ***H_{01}.-*** Existe relación entre la presión "considerada suficiente para el servicio (de 7 a 30 *mca*)" con la fuente de suministro y el horario determinado.

- ***H*$_{02}$**.- Existe relación entre la presión máxima y el tipo de fuga presentada.

El efecto más grande es el tiempo o las horas de servicio que se suministra a la red, es decir dosificar el suministro no es cuestión de experiencia sino de medición para determinar el tiempo que se requiere de traslado entre el punto de suministro hasta el punto más crítico dentro del sector, esto lo hemos denominado retraso en tiempo, entre el momento en que la válvula abre para surtir al sector y el momento en que llega hasta el usuario con mayor problemática dentro del sector (punto crítico); esto es muy importante ya que el diámetro por donde viaja el agua en su mayoría es de 3", es por eso que este salió como un factor importante.

Así como el periodo de tiempo en que la presión suficiente permanezca en el sector para considerar servicio (entre 7 a 30 *mca*) depende principalmente del tránsito y permanencia del agua en las tuberías de 3" de diámetro (análisis factorial).

El análisis de los bloques o ciclos de servicio de horas de suministro como tratamientos en el *ANOVA*, arrojó que estos ciclos tienen un comportamiento como la distribución de Poisson, en cambio los factores (presiones), siguen el patrón Gaussiano; comportamiento natural de la demanda que se ha documentado anteriormente (curvas de variación horaria y diaria), esto a pesar de ser un suministro intermitente y del valor de presión presente en las tuberías.

Es importante recalcar que el signo negativo o el efecto adverso para la satisfacción de la demanda tanto en horario y permanencia de presión suficiente para el uso del recurso hídrico por el usuario, lo tienen el tratamiento con horarios de servicio igual o menores de 4 horas, (ecuación ajustada marginal), las presiones por debajo de 7 *mca* y mayores a 30 *mca*. (ec. ajustada condicional).

Esto se interpreta que a pesar que, el horario de servicio se entregue por bloques de 4 horas y que en esa forma se va incrementando o disminuyendo el suministro a los sectores de forma lineal, por parte del Organismo Operador, en realidad la calidad del servicio no se comporta de manera lineal como la política de operación supone, sino que el decremento en la calidad del servicio es de manera exponencial.

Mediante el análisis de regresión múltiple se determinó que factores son importantes para tener una presión suficiente y óptima de operación para la satisfacción de la demanda del usuario; considerando que es el diámetro de tubería de 3" y el ciclo o bloque de horario de servicio designado que deberá ser como mínimo 6 horas. En cuanto a la regresión para obtener la respuesta a las fugas tanto de medidor como de red, se obtuvo que entre menor ciclo u horario de servicio se presentan más fugas en medidor e igualmente importante son las tuberías de diámetro de 3" y la presión máxima de operación.

Con el tercer ***método numérico*** de análisis para la satisfacción de la demanda en la colonia se definió una presión a pie de domicilio de 0.7 a 1.5 kg/cm^2, para considerar que se tiene servicio, en sectores donde la mayoría de las casas son de un piso, en el caso de que sean sectores que predominen casas de 2 pisos y con edificios con más pisos; la presión al usuario debe ser de 1.5 a 3 kg/cm^2. Así como evitar que se tengan presiones negativas en la red. Se identificaron 6 indicadores necesarios de medir y que permiten el tránsito entre el suministro intermitente y el suministro continuo.

Los resultados de calibración del modelo y sus condiciones de frontera tienen una incertidumbre en el catastro y la operación que es necesario ir validando conforme se instalen más registradores y se actualice el catastro.

La calibración entre la simulación en Infoworks, en suministro no continuo, no tiene una convergencia favorable en la calibración. Debido a las características particulares de una RDAP que opera con suministro intermitente, no es posible su modelación utilizando modelos convencionales

Con respecto a los objetivos planteados se lograron identificar las variables clave que inciden en la operación del sistema de distribución de agua potable con suministro intermitente como lo son: la presión, los diámetros de las tuberías, el tipo de fuente de suministro, las fugas en red y en medidor, así como los horarios de servicio (cantidad de horas de suministro). Se clasificaron las dichas variables de acuerdo a los rangos de presión (presiones negativas debajo de cero metros de columna de agua, presiones bajas de 0 a 7.00 *mca*, adecuadas de 7.01 a 15 *mca*, altas de 15.01 a 30 *mca* y sobrepresiones >30.01 *mca*); las fugas se dividen en dos grandes grupos (medidor/toma y red); las tuberías se clasificaron de acuerdo a su diámetro en 4" o mayores y de 3" o menores; la fuente de alimentación tiene tres grupos (pozos, tanques y rebombeos) y finalmente los horarios de servicio se clasifican en 18 áreas de acuerdo a cada horario existente.

La envolvente de presiones tiene valores máximos de presión de 78.10 *mca* y mínimos de -3.90 *mca*, donde el 2.24% del tiempo se tienen presiones menores a cero y 18.62% valores de sobrepresión (>30 *mca*), se presentan transitorios rápidos de hasta 77 *mca* en cuestión de fracciones de segundo y la presurización de la red ocurre de manera rápida llegando a 19 *mca* en menos de 15 minutos como valor promedio.

Las fugas que se presentan en una red de distribución con suministro intermitente son principalmente de 2 grupos: en red y en medidor (toma domiciliaria) estas representan el 80% del total de las fugas registradas, a su vez dentro de esas dos clasificaciones las fugas en red

representan el 48.42% y en medidor 51.58% en promedio en los últimos años; siendo los meses de octubre, noviembre y diciembre cuando más se presentan fugas, ya que la demanda baja y la presión aumenta en la red.

5.2 Recomendaciones

En un contexto de creciente problemática del vital líquido en todo el mundo, las empresas de servicios de agua deben tomar decisiones para minimizar las pérdidas en sus redes de distribución y elaborar los planes de acción necesarios. En el caso particular de sistemas intermitentes de agua potable las tomas de decisiones son más complejas y costosas.

El caracterizar el comportamiento de la envolvente de presiones mediante el uso de las herramientas descritas en el presente estudio es un punto de partida fundamental para conocer las peculiaridades del sistema, identificar las zonas problemáticas y ayudar a mejorar el servicio para el usuario.

Un adecuado manejo de las presiones en una red de distribución es fundamental para disminuir la presencia de fugas y para un adecuado funcionamiento de la misma. Si bien la reducción de fugas es claramente una parte importante de la gestión sostenible del agua, sus impactos deben reconsiderarse en un objetivo más amplio de protección del medio ambiente que estrictamente las pérdidas evitadas en metros cúbicos de agua.

La reducción del volumen de agua extraída reduce también los impactos ambientales asociados a la producción de agua (la operación y la infraestructura necesarias para la extracción, el tratamiento y el suministro). Mientras tanto, las actividades para reducir las

pérdidas de agua generan sus propios impactos ambientales, especialmente como resultado del trabajo, el equipo y la infraestructura utilizada para este propósito.

Con base en la investigación realizada fue posible validar la hipótesis planteada al inicio del presente estudio, en donde la envolvente de presiones que se presenta en una red de agua potable con suministro intermitente, está asociada directamente con un aumento en la presencia de fugas, ya que existen múltiples relaciones entre las horas de suministro, los valores de las presiones y las propias características de un sistema intermitente que inciden en la aparición de un mayor número de fugas.

Dado los resultados de investigación las recomendaciones más importantes y que se definen como aportaciones son las siguientes:

Aportaciones

I. Establecer una metodología para caracterizar la envolvente de presiones en una red de distribución con suministro intermitente, mediante un programa de monitoreo y análisis de las presiones utilizando diversos métodos tanto estadísticos, geoestadísticos y numéricos, los cuales facilitan la toma de decisiones para disminuir las fugas y en consecuencia incrementan la satisfacción de la demanda y mejoran el servicio que recibe el usuario.
II. Analizar con varios métodos de forma conjunta podría emplearse como base para establecer una metodología de operación de los sectores con suministro intermitente a un suministro continuo de forma cuantificable en los beneficios obtenidos.
III. Se propusieron indicadores de operación para la satisfacción de la demanda acordes a la topología de la red y al patrón de consumo de los usuarios.

IV. Se determinó que el comportamiento o los ciclos de servicio tiene un patrón de Poisson; esto, afecta en que, no debe tomarse a la ligera, la definición de los ciclos de servicio que se dan, ya que no tienen una respuesta de forma lineal, y el incremento o la definición del número de horas a suministrar en un IWS, debe ser acorde al punto III.

V. Se determinó que el comportamiento de la presión es Gaussiano aun en un suministro intermitente, esto que significa que a pesar y sin considerar los almacenamientos domiciliarios, tienen una variación que puede ser valorado por los coeficientes de variación diaria y horaria establecidos, sin embargo, faltaría determinar dichas magnitudes.

Líneas de trabajo futuro

1. Estudiar el efecto del tipo de material de las tuberías con respecto a la presión y las fugas.
2. Cuantificar la cantidad de aire presente en las tuberías.
3. Analizar el efecto de la fatiga de las tuberías a causa del suministro intermitente.
4. Analizar el deterioro que sufren las piezas especiales, así como las válvulas de regulación y seccionamiento en la red, a causa del suministro intermitente.
5. Estudiar el comportamiento mediante modelos y simulaciones del llenado y vaciado de los almacenamientos intradomiciliarios y ver como afecta la operación del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

Cabrera-Béjar, J. A., & Tzatchkov, V. (Abril-Junio de 2012). Modelación de Redes de Distribución de Agua con Suministro Intermitente. *Tecnología y Ciencias del Agua, III*(2), 5-25.

Lambert, A. (2000). What do we know about Pressure: Leakage Relationships in Distribution Systems? *IWA Conference on System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management*.

Charalambous, B. (2012). The Effects of Intermittent Supply Water Distribution Networks. *In WaterLoss*.

Laspidou, C., & Spyropoulou, A. (2017). Global dimensions of IWS—Number of people affected worldwide, Dealing with the complex interrelation of intermittent supply and water losses. *Chap. 1*, 5-16.

Laspidou, C., & Spyropoulou, A. (2017). Global dimensions of IWS—number of people affected worldwide. In: Dealing with the complex interrelation of intermittent supply and water losses. *IWA Publishing*, 5-16.

Lee, E., & Schwab, K. (2005). Deficiencies in Drinking Water Distribution Systems in Developing Countries. *Journal of Water and Health, 3*(2), 109-127.

Lenth, R. (1989). Quick and Easy Analysis of Unreplicated Factorials. *Technometrics, 31*, 469-473.

CEPIS. (1983). *Manual sobre control de fugas y mediciones en redes de distribución de agua potable*. Lima, Perú: OPS.

Cervera Gómez, L. E. (enero de 2007). Indicadores de uso sustentable del agua en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Estudios Fronterizos, 8*(16).

CONAGUA (C). (2015). *Modelación Hidráulica y de Calidad del Agua en Redes de Distribución*. Comisión Nacional del Agua, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Humanos, México.

CONAGUA (B). (2015). *Fenomenos Transitorios en Líneas de Conducción*. Comisión Nacional del Agua, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México: Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.

CONAGUA (D). (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Chihuahua-Sacramento (0830), Estado de Chihuahua*. Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas.

CONAGUA (E). (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Tabalaopa- Aldama (0835), Estado de Chihuahua*. Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterraneas.

CONAGUA. (2015). *Manual de Agua Potable, Alcantarilaldo y Saneamiento. Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable*. Manual, Comisión Nacional del Agua, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.

Abu-Madi, M., & Trifunovic, N. (2013). Impacts of supply duration on the design and performance of intermittent water distribution systems in the West Bank. *Water International*(38), 263-282.

Arias, L., & Zabala, J. (Noviembre de 2013). ANÁLISIS EN ESTADO ESTACIONARIO Y TRANSITORIO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL POLIDUCTO QUITO - AMBATO. *Escuela Politécnica Nacional*.

ASHM. (2015). *Pérdida De Presión A Través De La Tubería*. México: Aceros y Sistemas Hidráulicos de México S.A. de C.V.

AWWA. (2006). *ANSI/AWWA C900-16, Polyvinyl Chloride (PVC) Pressure Pipe and Fabricated Fittings, 4 in. Through 60 in. (100 mm Through 1,500 mm)*. Denver: AWWA.

Babbit, & Dolan. (1962). *Water Supply Engineering*. Mc Graw Hill.

Bivins, A. W., Sumner, T., Kumpel, E. H., G., C., & O., R. I. (2017). Estimating infection risks and the global burden of diarrheal disease attributable to intermittent water supply using QMRA. *Environmental Science & Technology, 51*(13), 7542-7551.

BVSDE. (2016). *Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental*. Recuperado el 21 de octubre de 2017, de http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/011632/011632-05.pdf

DCA.ULPGC. (2018 de 2018). *Departamento de Construcción Arquitectónica*. Obtenido de Universidad de Las Palmas de Gran Canaria: http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4918/html/22_ecuacin_de_continuidad.html

Dahasahasra, S. (2007). A Model for Transforming an Intermittent into 24x7 Water Supply System. *Geospatialtoday*, 34-39.

De Marchis, M., Freni, G., & Milici, B. (2016). Experimental evidence of the discharge law in private tanks connected to water distribution networks. Procedia Engineering. *154*, 115-122.

Devore, J. L. (2008). *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences. Seventh Edition*. San Luis Obispo, California, USA: Brooks/Cole.

Erickson, J., Smith, C., Goodridge, A., & Nelson, K. (2017). Water quality effects of intermittent water supply in Arraiján, Panamá. *Water Research, 114*, 338-350.

Fantozzi, M., & Lambert, A. (2010). *Recent developments in pressure management*. Sao Pablo, Brazil. Jun 06-09: Proc., IWA INt Specialized Conf. Leakage 2010.

Faure, F., & Pandit, M. (2010). Recuperado el Septiembre de 2017, de Intermittent Water Distribution: h p://www.sswm.info/category/implementa on-tools/wa- ter-distribu on/hardware/water-distribu on-networks/intermit- tent-w.Accessed 20/06/2013.

Fuertes, V., Izquierdo, J., Iglesias, P., Cabrera, E., & García-Serra, J. (1997). Llenado de tuberías con aire atrapado. *Ingeniería del Agua, 4*(3), 53-63.

Galaitsi, S., Russell, R., Bishara, A., Durant, J., Bogle, J., & Huber-Lee, A. (2016). Intermittent domestic water supply: a critical review and analysis of causal-consequential pathways. *Water*(doi:10.3390/w8070274).

García C., V. J. (2003). *Modelación de la demanda urbana de agua*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Valencia, España.

Germanopoulos, G. (1985). A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage in water supply networks. (2), 171-179.

Giles, R., Evett, J., & Liu, C. (1994). *Mécanica de los Fluidos e Hidráulica* (3a edición ed.). Madrid, España: McGRAW-HILL.

Giustolisi, O., & Walski, T. (2012). Demand components in water distribution network analysis. *J. Water Resour, 138*(4), 356-367.

Goulet, J., Coutu, S., & Smith, I. (2013). Model falsification diagnosis and sensor placement for leak detention in pressurized pipe networks. *Adv. Eng. Inform, 27*, 261-269.

Goverdhanam, S. (2014). *Decentralized Water Systems for Sustainable and Reliable Supply*. Tesis de maestría, Clemson University, Graduate School, Clemson.

Hair, J., Anderson, R., Black, W., & Tatham, R. (1999). *Análisis Multivariante* (Vol. 5a Ed.).

Hidra-Software. (2020). *Hidra Software*. Recuperado el Abril de 2020, de https://www.hidrasoftware.com/golpe-de-ariete-en-impulsiones-lo-que-debes-saber/

Ilaya-Ayza, A. E., Campbell, E., Pérez-García, R., & Izquierdo, J. (2015). La problemática de los sistemas de suministro de agua intermitentes. Aspectos generales. *Revista Científico Tecnológica Departamento de Ingeniería de Obras Civiles, 05*, 31-39.

INEGI. (2005). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. INEGI, Marco Geoestadístico Municipal versión 3.1.

INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. INEGI.

Ingei. (s.f.). (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) Recuperado el 15 de 07 de 2020, de Inventario Nacional de Viviendas 2016: https://www.inegi.org.mx/app/mapa/inv/

IWWA. (2000). International Seminar on Intermittent Drinking Water Supply System Management: Technical Papers,. Proceeding for the International Seminar on Intermittent Drinking Water Supply System Management. *Indian Water Works Association*.

J. Taylor, D. D., H. Slocum, A., & J. Whittle, A. (2018). Analytical scaling relations to evaluate leakage and intrusion in intermittent water supply systems. *PLoS ONE, 13*(5), 1-22.

Jöreskog, K. (1977). Factor analysis by Least-squares and Maximum-Likelihood methods. *En K. Enslein, A. Ralston y H.S. Wilf (Eds.), Statistical methods for digital computers, 3*, 127-153.

James Taylor, D. D. (2018). *Tools for Managing Intermittent Water Supplies*. Tesis Doctoral, Massachusetts Institute of Technology.

JANA. (2012). *Fatigue of Plastic Water Pipe: a Technical Review with Recomendations for PE4710 pipe Design Fatigue*. Jana Laboratories Inc.

JMAS. (2020). *Implementación de Gestión de Presiones en la Sectorización Hidráulica*. Chihuahua: Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua.

JMAS/IMTA. (2008). *Diagnóstico, Modelación y Planeación de Sectores en la Red de Distribución de Agua Potable de Chihuahua, Chihuahua*. Informe, Junta Municipal

de Agua y Saneamiento de Chihuahua e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Chihuahua.

Jolliffe, I. (1986). *Principal Component Analysis*. (https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1904-8_8, Ed.) New York, NY, USA: Springer.

Kumpel, E., & Nelson, K. L. (2017). . Comparing microbial water quality in an intermittent and continuous piped water supply.

Kumpel, E., & Nelson, N. (2013). *Comparing Microbial Water Quality in an Intermittent and Continuos Pipe Water Supply, 47*, 5176-5188.

Macke, S., & Batterman, A. (2001). *A strategy to reduce technical water losses for intermittent water supply systems*. Ph.D. thesis.

Martínez, F., Conejos, P., & Vercher, J. (Julio de 1999). Developing an integrated model for water distribution systems considering both distributed leakage and pressure-dependent demands. *Proceedings of the 26th ASCE Water Resources Planning and Management Division Conference*.

Milanés García, Y. (2011). EL Abastecimiento Intermitente de Agua Potable en Cuba. *Ilustrados*.

MINITAB. (2017). Obtenido de https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/basics/statistical-and-practical-significance/

Mokssit, A., De Gouvello, B., Chazerain, A., Figuères, F., & Tassin, B. (2018). Building a Methodology for Assessing Service Quality unde Intermittent Domestic Water Supply. *Water , 10*(9), https://doi.org/10.3390/w10091164.

Monge R., M. A. (2017). *iagua*. Obtenido de https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/presiones-negativas-tuberias

Navarro Gómez, C. J. (2013). *Enfoque Integrado de las Transformaciones de los Compuestos Nitrogenados Inorgánicos del Agua Residual Tratada durante el Riego de las Áreas*

Verdes. Tesis Doctoral, Centro de Investigación en Materiales Avanzados , Estudios de Posgardo, Chihuahua.

Ochoa Alejo, L., & Bourguett Ortiz, V. (2001). *Reducción Integral de Pérdidas de Agua Potable*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Tecnología Hidráulica. IMTA.

Pan, G. (1999). The Impact of Unidentified Location Effects on Dispersion-Effects Identification fron Unreplicated Factoral Designs. *Technometrics*(41), 313-326.

PIGOO. (2020). *Indicadores*. Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores, IMTA.

Pozos-Estrada, O., Fuentes, O., Sánchez, A., Rodal, E., & de Luna, F. (2017). Análisis de los efectos del aire atrapado en transitorios hidráulicos en acueductos a bombeo. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingenieria, 33*(1), 79-89.

PTM. (2018). *Tubería PVC Hidráulica Serie Métrica*. PTM México.

Rago, R. J. (1974). *Distribution System Design Criteria and Leak Detection at East Bay Municipal Utility District*. Okland, California, U.S.A.

Romero Chapa, M. A. (2013). *Problemas en Redes de Abastecimiento de Agua Potable*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. México D.F.: UNAM.

Saavedra, J., Rodríguez, J., & Hansen, M. (2017). *Indicadores de Gestión Prioritarios en Organismos Operadores*. Coordinación de Hidráulica , Subcoordinación de Hidráulica Urbana. México: CONAGUA - IMTA.

Sañudo V., A. E. (2017). *Análisis Transitorio por Arranque de Equipos de Bombeo en una Red de Pozos*. Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería Civil - Hidráulica. México: UNAM.

SARH. (1990). *Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos*.

SIGE. (2000). *Sintesis de Información Geográfica Estatal del Estado de Chihuahua*.

Sotelo Ávila, G. (1996). *Hidráulica General* (Vol. 1). México: LIMUSA.

Speight, V., Collins, R., & Weston, S. (s.f.). (T. U. Sheffiel, Editor) Obtenido de Simple Booklet: https://simplebooklet.com/intermittentwatersupply#page=0

SUBTERRÁNEAS, G. D. (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Chihuahua-Sacramento (0830), Estado de Chihuahua*. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua.

Surendra, P. V. (2005). *Estadística básica para el manejo de datos experimentales*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Tanyimboh, T. T., & Templeman, A. (2010). Seamless pressure-deficient water distribution system model. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, doi:10.1680/wana.900013*(163), 389-396.

Tavera, M. (2013). *Metodología para la gestión y planificación de un sistema de agua potable con suministro intermitente: Aplicación a la Ciudad de Tegucigalpa (Honduras)*. Tesis Doctoral, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE, Valencia, España.

Taylor, D., Slocum, A., & Whittle, A. (2019). Demand Satisfaction as a Framework for Understanding Intermittent Water Supply Systems. *Water Resources Research, 55*, 5217-5237.

Taylor, D., Whitttle, A., & Slocum, A. H. (Mayo de 2019). Demand Satisfaction as a Framework for Understanding Intermittent Water. (R. Gate, Ed.) *Water Resources Research*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/332996712_Demand_Satisfaction_as_a_Framework_for_Understanding_Intermittent_Water_Supply_Systems

The Survey System. (2014). *The Survey System*. Recuperado el Marzo de 2014, de http://www.surveysystem.com/sscalce.htm

Totsuka, N., Trifunovic, N., & Vairava-Moorthy, K. (2004). Intermittent Urban Water Supply Under Water Starving Situations. *Proc. 30th WEDC International Conference, Vientiane, Lao PDR, People-Centred Approaches to Water and Environmental Sanitation* .

Tsegaye, S., Eckartj, & Vairavamoorthy, K. (2011). Urban Water Management in Cities of the Future: Emerging Areas in Developing Countries. *Onthewaterfront*, 42-48.

Tzatchkov, V., Alcocer, V., Bourguett, V., & Felipe, A. (2014). *Avances en la hidráulica de redes de distribución de agua potable*. Jiutepec, Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Vairavamoorthy, K., & Elango, K. (2002). Guidelines for the design and control of intermittent water distribution systems. *Waterlines, 21*, 19-21.

Van den Berg C, D. A. (2011). *The IBNET Water Supply and Sanitation Performance Blue Book*. The World Bank, Washington D.C.

Van der Bruggen, B., Borghgraef, K., & Vinckier, C. (2010). Causes of Water Supply Problems in Urbanised Regions in Developing Countries. *Water Resour Manage, 24*, 1885-1902.

Vicente González, D. J. (2017). *Diseño de maniobras de gestión de presiones en sectores de distribución de agua y análisis de su impacto*. Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería Civil. Hidráulica, Energía y Medio Ambiente.

Walpole, R., Myers, R., Myers, S., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias* (Vol. 9). Pearson Educación.

Watson, D., & Philip, G. M. (1985). *A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation*. Geoprocessing 2.

WHO & UNICEF. (2000). *Global Water Supply and Sanitation*. Washington D.C.

World Bank. (1996). *Indicators: Water and Wastewater Utilities*. World Bank, Washington D.C.

World Bank. (2006). Infrastructure in Europe and Central Asia Region. Approaches to Sustainable Services, World Bank, Europe and Central Asia Region, Infrastructure Department.

WWAP. (2012). *Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas: https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/scarcity.shtml

WWAP. (2012). *Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo*. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP).

Xu, Q., Liu, R., Chen, Q., & Li, R. (2014). Review on water leakage control in distribution networks and the associated environmental benefits. *J. Environ. Sci., 26*, 955-961.

Yepes, G., & Ringskogk, S. S. (2001). The High Cost of Intermittent Water Supplies. *Journal of Indian Water Works Association*, 33.

Curriculum Vitae

Jesús Rubén Sánchez Navarro

14 Dic. 1985 • Mexico • +52 614 494 7838 • ingsanchezn@gmail.com

FORMACIÓN ACADÉMICA

Ingeniero Civil, Mención Honorífica Diciembre 2007
Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), Chih., México
Promedio: 9.27/10.00 Cédula profesional: **5733052**

Maestría en Administración, Mención Honorífica de Excelencia Agosto 2014
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), Chih.
Promedio 9.62/10.0 Cédula profesional: **8978071**

Estudiante de Doctorado en Ingeniería 2015 - 2021*
Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), Chih., México

Preparatoria Bilingüe del ITESM, Chih., México 2000 – 2003
TOEFL: 583 puntos, 2012

CERTIFICACIONES/ESPECIALIDADES

Examen profesional, Chih., México Febrero 2008

Defensa de tesis Doctorado, Chih., Méx Estimado marzo, 2021
Tesis: Caracterización de la Envolvente de Presiones en una Red de Distribución de Agua Potable con Suministro Intermitente.

Defensa de tesis Maestría, Chih., México 29 de agosto, 2014
Tesis: Factores Claves que Inciden en el Desarrollo de la Micro, Pequeña y Mediana Empresa en Edad Temprana; Caso Chihuahua.

Estancia de especialización en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), sobre modelación hidráulica de redes a presión y a superficie libre, utilizando InfoWorks, SWMM, ArcGIS, Epanet, en abastecimiento de agua potable con servicio continuo e intermitente.

EXPERIENCIA:

- **+15 años de experiencia en:**
  - Generación de volúmenes de obra.
  - Elaboración de estimaciones.
  - Generación de precios unitarios y presupuestos.
  - Elaboración de planos.
- **+12 años de experiencia en campo:**
  - Construcción de estructuras de concreto armado.
  - Construcción de estructuras de acero y construcción en general.
  - Trabajos de topografía: levantamientos topográficos con estación total, nivel y GPS diferencial, delimitación de terrenos y ríos, trazo y nivelación de obras de ingeniería civil.
  - Instalación y supervisión de tuberías de PVC y PAD para agua potable, alcantarillado sanitario y agua tratada.
  - Residente de construcción de naves industriales, fraccionamientos residenciales y obras hidráulicas de agua potable, alcantarillado y saneamiento.
- **+11 años de experiencia en estudios y proyectos:**
  - Elaboración de diagnósticos técnicos y sociales de la infraestructura, administración, operación y mantenimiento de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento.
  - Proyectos ejecutivos de agua potable para diversas localidades del estado de Chihuahua.

- Estudios de reactivación de redes de monitoreo piezométrico de diversos acuíferos del estado de Chihuahua.
- Proyectos para plantas de tratamiento de aguas residuales en diversas localidades del estado de Chihuahua.
- Proyectos para dotar de agua potable a localidades de la Sierra Tarahumara en Chihuahua.

- **+5 años de experiencia como catedrático:**
  - En el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) Campus Chihuahua, en materias como:
    - Administración de la Construcción.
    - Construcción Sustentable.
    - Productividad y Seguridad en la Construcción.
    - Formación Emprendedora.

Manejo de Software, Certificado de la Cámara de la Industria de la Construcción (CMIC):

- **Precios Unitarios:** OPUS2010- 2015
- **Dibujo:** AutoCAD 2002-2018
- **Topografía:** CivilCAD, CivilADS
- **Estructuras:** Ram Advance
- Microsoft Excel, PowerPoint, Word, y Project
- **Sistemas de información Geográfica**: ArcGIS, Global Mapper, SAS Planet, INEGI
- **Hidráulicos:** EPANET, Flow Master, Modflow, InfoWorks 16, SWMM
- **Estadísticos:** SSPS 17-20.0, Minitab 18

Equipos:

- **Topografía:** GPS Diferencial, Estación Total y Nivel.

DESCRIPCIÓN LABORAL:

Consultor independiente, 2011-actual

Elaboración de diagnósticos técnicos y sociales de la infraestructura, administración, operación y mantenimiento de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento de **192 comunidades rurales** del Estado de Chihuahua, Méx.

Subdirector de Estudios y Proyectos en SANA Ingeniería S.A. de C.V. 2014- actual

Funciones: administración y control de estimaciones de las siguientes obras:

- Trabajos de urbanización y plataformas en el fraccionamiento Tracia II, ubicado en la ciudad de Chihuahua, Chih.
- Urbanización (terracerías, guarniciones, agua potable, alcantarillado sanitario, agua tratada) del fraccionamiento Bosque Real II en la ciudad de Chihuahua, Chih.
- Construcción de pretratamiento para la descarga de aguas residuales del rastro municipal, Saucillo, Chihuahua,
- Reposición de 212.80 m de colector con tubería de asbesto cemento de 24" de diámetro, calle Hacienda de la Flor, Chihuahua, Chihuahua.
- Construcción de colector para dar servicio a los fraccionamientos Bosques 4-5 y Albaterra 3-5, Chihuahua, Chihuahua.
- Rehabilitación de colector con tubería de PVC de 60" de diámetro y pozo caja unión, Ciudad Juárez, Chihuahua.
- Encamisado de vía de ferrocarril en colectores: Patrocinio I, Patrocinio II y Aldama, Camargo, Chihuahua.
- Desarrollo de los trabajos de campo en apoyo a la construcción de las descargas intra-domiciliarias del sistema de alcantarillado sanitario en Loma Blanca, Juárez, Chihuahua, $144 mil pesos.
- Construcción de infraestructura que consta en la construcción de estructura de pavimentación, redes de agua potable, tratada, drenaje y guarniciones del fraccionamiento Bosques del Valle V en Chihuahua, Chihuahua.
- Urbanización del fraccionamiento Bosques del Valle V en Chihuahua, Chihuahua que consta en la construcción de estructura de pavimentación, redes de agua potable, tratada, drenaje y guarniciones.

- Construcción de planta de tratamiento de aguas residuales a base de un sistema de lagunas de estabilización con capacidad de 7.6 lps en la localidad de Julimes, Municipio del mismo nombre, del Estado de Chihuahua.
- Construcción de sistema integral de agua potable primera etapa en la localidad de Bacajipare, Urique, Chihuahua.
- Reposición del colector Gómez Morín consistente en suministro e instalación de tubería de P.V.C. de 20 cms (8”), 25 cms (10”), 30 cms (12”), 45 cms (18”) de diámetros, suministro e instalación de tubería de PEAD de 107 cms (42”) de diámetro, construcción de pozos de visita y descargas domiciliarias, en cd. Juárez, Juárez, Chihuahua.
- Conclusión de la planta de tratamiento de aguas residuales con capacidad de 8 lps. en la Localidad Congregación Ortiz, Municipio de Rosales, del Estado de Chihuahua.
- Reposición del colector el mimbre, del tramo calle Anaya general a av. Heroico colegio militar, Chihuahua, Estado de Chihuahua, primera etapa.
- Reposición de colector J. Cloutier segunda etapa con tubería P.V.C., en ciudad Juárez, municipio del mismo nombre, en el Estado de Chihuahua.
- Reposición del Colector SUR-SUR suministro e instalación de tubería de PEAD de 60" de diámetro y pozos caja unión en cd. Juárez, municipio de Juárez, Estado de Chihuahua, primera etapa.
- Reposición del colector Minerales consistente en suministro e instalación de tubería de PVC de 24" y 30" de diámetro en serie 20, pozos de visita en la ciudad de Chihuahua, Estado de Chihuahua.

Trabajos de topografía, 2011-actual

- Levantamientos topográficos para construcción de naves industriales en parque industrial norte, en la cd. de Chihuahua, Chih., Méx.
- Levantamiento de 4 Km. del Río del Carmen en Buenaventura, para su rectificación de caudales.
- Delimitación de propiedades catastrales en la ciudad de Chihuahua.
- Levantamiento y deslinde en ranchos del municipio de Coyame y Ojinaga, en el Estado de Chihuahua.

- Proyecto y trazo de 213 lotes y calles en el fraccionamiento Villas Valle Verde, en Aldama, Chihuahua.

Consultor para la World Wildlife Fund for Nature (WWF), proyectos hidráulicos para abastecer de agua potable a comunidades indígenas de la sierra Tarahumara de Chihuahua 2014- 2015.

Coordinador de infraestructura, Parque de Innovación y Transferencia de Tecnología del Tecnológico de Monterrey Campus Chihuahua
2012 – 2014
Funciones: Mantener en óptimas condiciones de funcionamiento e imagen las instalaciones y equipos los Parques Tecnológicos, revisando y solicitando el servicio de mantenimiento preventivo y correctivo a las instalaciones, mobiliario, equipo y herramientas.

Investigador, publicación de tesis: Claves que inciden en el desarrollo de la Micro, Pequeña y Mediana Empresa en Edad Temprana; Caso Chihuahua en el 2014.
Participación en el Congreso Internacional de Investigación Científica Multidisciplinaria en noviembre del 2013 con el artículo **"**Factores de Éxito de la Micro, Pequeña y Mediana Empresa en Edad Temprana; Caso Chihuahua".

Residente de Construcción, Suministros y Proyectos Hidráulicos S.A. de C.V. (SPH), Chih, Mex., 2005-2011

Supervisor y encargado de la construcción y estimaciones de las siguientes obras:

- Planta de tratamiento de aguas residuales de 62 lps en Colonia Anapra, Cd. Juárez,
- Construcción de naves industriales de 1,400 m^2 para grupo Copamex, Cuauhtémoc, Chih.,Méx.
- Construcción de sistema lagunar para tratamiento de aguas residuales de 49 lps, en Praxedis, Chih., Méx.
- Construcción de cárcamo de acero, Cd. Juárez, Méx.

- Construcción de sistema lagunar para tratamiento de aguas residuales de 238 lps, en Ojinaga, Chih., Méx.
- Construcción de sistema lagunar para tratamiento de aguas residuales de 90 lps, en Lázaro Cárdenas, Chih., Méx.
- Construcción de línea de conducción de 6" de diámetro de 3 Km. de longitud y red de atarjeas en Creel, Chih., Méx.
- Construcción de colector de 30" de PVC y red de alcantarillado sanitario, Casas Grandes, Chih., Méx.

Prácticas profesionales, Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS), Chih., Mex. 2004-2005

RECONOCIMIENTOS

Mención honorífica de excelencia, Maestría en Administración, ITESM, Chih.	2014
Mejor promedio de la Maestría en Administración, ITESM, Chih. Méx.	2014
Mención honorífica, Ingeniería Civil, UACH, Chih., Mex.	2008
Posición 3 de 90, generación 2007 de Ingeniería Civil, UACH, Chih., Mex.	2007
Mención honorífica, preparatoria del ITESM	2001
Seleccionado nacional de México en la disciplina de Inline Hockey	2016-2019
Premio Teporaca de Bronce (premio a la excelencia deportiva en Chihuahua)	2016

Domicilio Permanente: Cumbres de Arareco No.2004, Residencial Cumbres II
Chihuahua, Chihuahua, C.P. 31217

Esta tesis/disertación fue mecanografiada por **el autor Jesús Rubén Sánchez Navarro**