

**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL**

TEMA:

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA OBTENER EL VALOR DEL
EXPONENTE DE FUGAS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA
POTABLE DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL**

AUTOR:

Alvarado Guzñay, Joselyne Adriana

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERA CIVIL**

TUTOR:

Ing. Molina Arce, Stephenson Xavier

Guayaquil, Ecuador

2 de marzo del 2020



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por Alvarado Guzñay, Joselyne Adriana, como requerimiento para la obtención del título de ingeniera civil.

TUTOR

f. _____
Ing. Molina Arce, Stephenson Xavier

DIRECTOR DE LA CARRERA

f. _____
Ing. Alcívar Bastidas, Stefany Esther

Guayaquil, a los 2 del mes de marzo del año 2020



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Alvarado Guzñay, Joselyne Adriana**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Propuesta metodológica para obtener el valor del exponente de fugas en la red de distribución de agua potable de la ciudad de Guayaquil**, previo a la obtención del título de Ingeniera Civil, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 2 del mes de marzo del año 2020

LA AUTORA

f. _____
Alvarado Guzñay, Joselyne Adriana



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Alvarado Guñay, Joselyne Adriana**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Propuesta metodológica para obtener el valor del exponente de fugas en la red de distribución de agua potable de la ciudad de Guayaquil**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 2 del mes de marzo del año 2020

LA AUTORA:

f. _____
Alvarado Guñay, Joselyne Adriana



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

Ing. Alcívar Bastidas, Stefany Esther M Sc.
DIRECTORA DE CARRERA

f. _____

Ing. Glas Cevallos, Clara Catalina M Sc.
DOCENTE DE LA CARRERA

f. _____

Ing. Cabrera Santos, Miguel Octavio
OPONENTE

REPORTE URKUND



Urkund Analysis Result

Analysed Document: alvarado_joselyne_FINAL.docx (D63949220)
Submitted: 2/15/2020 10:10:00 PM
Submitted By: claglas@hotmail.com
Significance: 1 %

Sources included in the report:

4201763b-6105-4aa1-937e-f0f969472090

Instances where selected sources appear:

1

AGRADECIMIENTO

En primera instancia agradezco a Dios por bendecirme de muchas maneras posibles, una de ellas los padres que eligió para mí.

Le agradezco a mis padres por darme una buena educación a lo largo de toda mi vida estudiantil y universitaria, por confiar y apoyarme en cada una de las decisiones que he tomado a largo de mi vida, por ser un gran soporte en todas las formas posibles.

Le agradezco al resto de mi familia por preocuparse y motivarme a lo largo de toda mi carrera universitaria.

A mis amigos y compañeros universitarios por todas las buenas experiencias vividas que me llevo en mi corazón.

A mis profesores por brindarme de sus conocimientos no solo profesionales sino morales para ser un buen ing. Civil y ser humano. En especial a mi tutor de tesis, Ing. Xavier Molina, por su tiempo y conocimiento impartido durante estos 4 meses.

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación va dedicado a mis padres. Mi mamá por siempre aconsejarme y guiarme, por tener las palabras de aliento que necesito escuchar. Mi papá por enseñarme el valor de las cosas y apoyarme de manera incondicional. Los amo y gracias por su esfuerzo y fe que tienen en mí.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	2
1. GENERALIDADES	2
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	3
CAPÍTULO 2	4
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. PÉRDIDAS DE AGUA	4
2.1.1. PÉRDIDAS REALES	5
2.1.2. PÉRDIDAS APARENTES	9
2.2. EXPONENTE DE FUGAS	10
2.2.1. HIDRÁULICA DE FUGAS	10
2.2.2. ESTADO DEL ARTE DEL EXPONENTE DE FUGAS	14
2.2.3. PRINCIPIOS DE FAVAD	23
2.2.4. PRUEBA DE PRESSURE STEP TEST	26
2.3. APLICACIONES DEL CONCEPTO DE EXPONENTE DE FUGAS	31
2.3.1. BENEFICIOS DE LA GESTIÓN DE PRESIÓN	32
2.3.2. FACTORES IMPORTANTES PARA LA GESTIÓN DE PRESIÓN	33
CAPÍTULO 3	36
3 PRESSURE STEP TEST	36
3.1 METODOLOGÍA DE LA PRUEBA PRESSURE STEP TEST REALIZADA POR INTERAGUA	36

3.2 ANÁLISIS DE PRUEBAS DE INTERAGUA C.LDTA	39
3.2.1 PRUEBA PRESSURE STEP TEST: CASO DE ESTUDIO DEL SECTOR SGU- 189 39	
3.2.2 PRUEBAS DE PRESSURE STEP EJECUTADO POR INTERAGUA	59
3.3 PROPUESTA DE MEJORA	66
3.3.1 ASPECTOS A CONSIDERAR DENTRO DE LA PROPUESTA DE MEJORA	66
3.3.2 APLICACIÓN DE LAS PROPUESTAS DE MEJORA	70
<u>CAPÍTULO 4</u>	<u>102</u>
<u>4 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES</u>	<u>102</u>
<u>REFERENCIAS</u>	<u>104</u>

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1. Componentes del balance hídrico propuesto por la IWA. _____	4
Tabla 2. Impactos económicos de las fugas. _____	9
Tabla 3. Exponente de fugas para diferentes tipos de agujeros y materiales de tuberías. _____	17
Tabla 4. Tasa de fugas de fondo inevitable. _____	25
Tabla 5. Relación de caudal de fugas y presiones de acuerdo al material y tamaño de fuga. _____	31
Tabla 6. Beneficios de la gestión de presión. _____	32
Tabla 7. Volumen contabilizado dividido por tipos de cliente _____	40
Tabla 8. Factor de uso nocturno dividido por tipos de abastecimiento ____	41
Tabla 9. Caudal de uso nocturno de acuerdo al tipo de cliente _____	41
Tabla 10. Procedimientos y resultados del pressure step test _____	42
Tabla 11. Procedimiento y resultado de la prueba variando el consumo nocturno _____	45
Tabla 12. Procedimientos y resultados del pressure step test aumentando el porcentaje de error de micromedición como se observa a continuación. __	46
Tabla 13. Procedimientos y resultados del pressure step test aumentando el porcentaje de error de micromedición y variando consumo. _____	47
Tabla 14. Procedimientos y resultados del pressure step test considerando constante el mayor factor de uso nocturno para todo tipo de cliente. ____	48
Tabla 15. Procedimientos y resultados del pressure step test considerando constante el menor factor de uso nocturno para todo tipo de cliente. ____	49
Tabla 16. Procedimientos y resultados del pressure step test considerando constante el mayor factor de uso nocturno para todo tipo de cliente y aumentando el % error de micromedición _____	50
Tabla 17. Datos de prueba pressure step test dividida por sectores hidráulicos. _____	59
Tabla 18. Resultados del valor de exponente de fugas de $0.80 \geq N1 \geq 0.4$ para tuberías flexibles _____	61
Tabla 19. Resultados del valor de exponente de fugas de $1 \geq N1 \geq 0.8$ para tuberías rígidas. _____	62

Tabla 20. Resultados del valor de exponente de fugas de $1 \geq N1 \geq 0.8$ para tuberías flexibles. _____	63
Tabla 21. Resultados del valor de exponente de fugas de $N1 > 1$ para tuberías flexibles. _____	64
Tabla 22 Resultados del valor de exponente de fugas de $N1 > 1$ para tuberías rígidas _____	65
Tabla 23. Presiones y caudales obtenidos en pressure step test y consumo mínimo modificado. Prueba SGU 189 _____	66
Tabla 24. Obtención de $N1$ método Interagua _____	67
Tabla 25. Obtención de $N1$ promedio método Interagua _____	67
Tabla 26. Variación de resultado del exponente de fugas del sector CTP 005 _____	71
Tabla 27. Variación de resultado del exponente de fugas del sector CTP 008 _____	71
Tabla 28. Variación de resultado del exponente de fugas del sector CTP 072 _____	72
Tabla 29. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72 -148 _____	73
Tabla 30. Variación de resultado del exponente de fugas del sector SGU - 190 _____	74
Tabla 31. Variación de resultado del exponente de fugas del sector CTP- 073-074-075-078-079-080 _____	75
Tabla 32. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-113 _____	76
Tabla 33. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-137 _____	77
Tabla 34. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-143 _____	78
Tabla 35. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-144 _____	79
Tabla 36. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-145 _____	80
Tabla 37. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-146 _____	81

Tabla 38. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-147.	82
Tabla 39. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-151	83
Tabla 40. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-152	84
Tabla 41. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-154	85
Tabla 42. Variación de resultado del exponente de fugas del sector N72-494	86
Tabla 43. Variación de resultado del exponente de fugas del sector CRO-010- 011	87
Tabla 44. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-108 - 134	88
Tabla 45. Variación de resultado del exponente de fugas del sector SRO-132	89
Tabla 46. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-133-138-139-140-141-142	90
Tabla 47. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-136	91
Tabla 48. Variación de resultado del exponente de fugas del sector SGU-164	92
Tabla 49. Variación de resultado del exponente de fugas del sector SGU-186	93
Tabla 50. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-198	94
Tabla 51. Variación de resultado del exponente de fugas del sector N72-387-388	95
Tabla 52. Variación de resultado del exponente de fugas del sector CTP-001	96
Tabla 53. Variación de resultado del exponente de fugas del sector SGU-173	97
Tabla 54. Variación de resultado del exponente de fugas del sector N72-390	98

Tabla 55. Variación de resultado del exponente de fugas del sector NRO-401

99

Tabla 56. Variación de resultado del exponente de fugas del sector SRO-

112-118

100

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Mediciones de Caudal y presión en el punto de entrada para Pressure Step Test _____	40
Gráfica 2. Análisis de sensibilidad de prueba inicial de pressure step test _	52
Gráfica 3. Variación de resultados variando el consumo nocturno _____	53
Gráfica 4. Variación de resultados aumentando el porcentaje de error de micromedición _____	54
Gráfica 5. Variación de resultados aumentando el porcentaje de error de micromedición y variando consumo nocturno _____	55
Gráfica 6. Variación de resultados considerando el mayor factor de uso nocturno _____	56
Gráfica 7. Variación de resultados considerando el menor factor de uso nocturno _____	57
Gráfica 8. Variación de resultados aumentando el porcentaje de error de micro medición y considerando el mayor factor de uso nocturno _____	58
Gráfica 9. Ejemplo de análisis de sensibilidad por Ecuación Potencial ____	68
Gráfica 10. Extrapolación matemática del sector CTP 005 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno. _____	70
Gráfica 11. . Extrapolación matemática del sector Sector CTP 008 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno. _____	71
Gráfica 12. Extrapolación matemática del Sector CTP 072 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno. _____	72
Gráfica 13. Extrapolación matemática del sector S72 -148 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno. _____	73
Gráfica 14. Análisis de sensibilidad del sector SGU -190 variando % de error de micromedición, factor de uso nocturno y % de error de micromedición y factor de uso nocturno. _____	74
Gráfica 15. Extrapolación matemática del sector CTP-073-074-075-078-079-080 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno. _____	75
Gráfica 16. Extrapolación matemática del sector S72-113 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno. _____	76

Gráfica 17. Extrapolación matemática del sector S72-137 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno.	77
Gráfica 18. Extrapolación matemática del sector S72-143 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno.	78
Gráfica 19. Extrapolación matemática del sector S72-144 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno	79
Gráfica 20. Extrapolación matemática del sector S72-145 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno	80
Gráfica 21. Extrapolación matemática del sector S72-146 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno	81
Gráfica 22. Extrapolación matemática del sector S72-147 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno	82
Gráfica 23. Extrapolación matemática del sector S72-151 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno	83
Gráfica 24. Extrapolación matemática del sector S72-152 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno	84
Gráfica 25. Extrapolación matemática del sector SRO-154 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno	85
Gráfica 26. Extrapolación matemática del sector N72-494 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno	86
Gráfica 27. Extrapolación matemática del sector CRO-010- 011 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno	87
Gráfica 28. Extrapolación matemática del sector S72-108 -134 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno	88
Gráfica 29. Extrapolación matemática del sector SRO-132 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno	89
Gráfica 30. Extrapolación matemática del sector S72-133-138-139-140-141-142 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno	90
Gráfica 31. Extrapolación matemática del sector S72-136 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno	91
Gráfica 32. Extrapolación matemática del sector SGU-164 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno	92

Gráfica 33. Extrapolación matemática del sector SGU-186 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno _____	93
Gráfica 34. Extrapolación matemática del sector S72-198 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno _____	94
Gráfica 35. Extrapolación matemática del sector N72-387-388 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno _____	95
Gráfica 36. Extrapolación del sector CTP-001 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno _____	96
Gráfica 37. Extrapolación matemática del sector SGU-173 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno _____	97
Gráfica 38. Extrapolación matemática del sector N72-390 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno _____	98
Gráfica 39. Extrapolación matemática del sector NRO-401 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno _____	99
Gráfica 40. Extrapolación matemática del sector SRO-112-118 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno _____	100

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Clasificación de fugas de acuerdo a su tamaño y tiempo de fuga. _____	7
Ilustración 2. Relación fuga y presión. _____	12
Ilustración 3. Velocidades máximas de flujo laminar y transición para diferentes tipos de aberturas de fuga. _____	13
Ilustración 4. Valor promedio de N1 de acuerdo al material de tubería. ____	16
Ilustración 5. Configuración del estudio experimental en la universidad Johannesburgo. _____	19
Ilustración 6. Gráfico de presión vs tasa de flujo para tuberías de asbesto cemento. _____	20
Ilustración 7. Fallas en tuberías de asbesto cemento _____	21
Ilustración 8. Secciones de tuberías de acero corroídas. _____	22
Ilustración 9. Resultado de prueba pressure step test para fugas de área fija. _____	28
Ilustración 10. Resultado de prueba pressure step test para fugas de área variable. _____	29
Ilustración 11. Ejemplo de prueba de pressure step test. _____	30
Ilustración 12. Sistema de suministro grande en Gales. _____	34
Ilustración 13. Gráfico del número de Reynolds. _____	34
Ilustración 14. Modelo Chello de datalogger para registrar caudal y presión. _____	37

RESUMEN

Este trabajo de titulación consiste en determinar una propuesta metodológica para obtener el valor del exponente de fugas en la red de distribución de agua potable de la ciudad de Guayaquil debido a la gran cantidad de pérdidas de agua potable. Hoy en día, el agua dulce es un recurso limitado y en algunas ocasiones llega a ser escaso, por lo cual debemos concientizar. Esto se logrará analizando y comparando el valor exponente de fugas obtenido en pruebas de campo ya realizadas por la empresa de Interagua C. Ltda. con respecto a la teoría de FAVAD y si existe un método para mejorar el valor del exponente de fugas. La empresa Interagua presenta la ciudad de Guayaquil dividida en 97 sectores hidráulicos, de los cuales al momento se han realizado 63 pruebas de pressure step test. De estos sectores solo se evaluará 42 pruebas. Con dicha información proporcionada se realizarán análisis de sensibilidad para visualizar los posibles variantes para lograr obtener un valor N1 más exacto.

Palabras clave: Exponente de fugas, Pressure Step test, análisis de sensibilidad, micromedidores, consumo nocturno, presión.

ABSTRACT

This titling work consists in determining a methodological proposal to obtain the value of the leakage exponent in the drinking water distribution network of the city of Guayaquil due to the large amount of loss of drinking water. Nowadays, fresh water is a limited resource and sometimes it becomes scarce, so we must raise awareness. This will be achieved by analyzing and comparing the leakage exponent obtained in field tests already carried out by the company of Interagua C. Ltda. with the theory of FAVAD and if there is a method to improve the value of the leakage exponent. The Interagua company presents Guayaquil divided into 97 hydraulic sectors, of which at the moment 63 pressure step tests have been carried out. Of these sectors, only 42 tests will be evaluated. With this information provided, sensitivity analyzes will be carried out to visualize the possible variants to obtain a more accurate N1 value.

Keywords: Leakage exponent, Pressure Step test, sensitivity analysis, micro-measurer, costumer night, pressure.

CAPÍTULO 1

1. Generalidades

1.1 Introducción

Hoy en día, el agua dulce es un recurso limitado y en algunas ocasiones llega a ser escaso, por lo cual debemos concientizar. Este trabajo de titulación consiste en determinar una propuesta metodológica para obtener el valor del exponente de fugas en la red de distribución de agua potable de la ciudad de Guayaquil debido a la gran cantidad de pérdidas de agua potable.

Estamos viviendo en una era que tiene bastantes cambios globales, tales como: crecimiento de la población, el desarrollo económico, migración y urbanismo. Estos cambios provocan nuevas presiones en los recursos hídricos, además de presentar impactos negativos en la sociedad, como: económicos, sociales, técnicos y ambientales los mismos que afectan y afectarán el suministro de agua potable a largo plazo.

Por tal motivo, se necesita trabajar en la reducción de la pérdida de agua y de esa manera asegurar el suministro del mismo con alternativas eficientes. Dichas alternativas deben tener el fin de no hacer uso de otros recursos, sino trabajar en mejorar métodos y estrategias de reducción de estas pérdidas de agua en las redes de distribución de agua potable y consumos autorizados no facturados.

Esto se logrará analizando y comparando el valor exponente de fugas obtenido en pruebas de campo ya realizadas por la empresa de Interagua C. Ltda. con respecto a la teoría de FAVAD. Adicionalmente, se evaluará si puede llegar a existir mejoras en el método que se utiliza actualmente y de esa manera mejorar el valor del exponente de fugas.

1.2 Planteamiento del problema

El sistema de abastecimiento de agua potable tiene como objetivo brindar agua potable tanto en cantidad como en calidad a todos sus beneficiarios. Sin embargo, a largo plazo este llegará a ser un problema debido a la gran demanda.

Asegurar el suministro de agua potable de manera eficiente y suficiente podría ser un problema. Un factor agravante de dicho problema se presenta en los países en vías de desarrollo debido a la gran cantidad de pérdida de agua.

Las pérdidas de agua se clasifican en pérdidas aparentes y pérdidas reales. Las pérdidas aparentes ocurren cuando se conectan de manera arbitraria a la red de distribución de agua potable y no pagan por dicho consumo. Mientras que, las pérdidas reales ocurren por fugas en la red de distribución de agua potable.

Los cambios globales están provocando un aumento de presión en los recursos hídricos. Este aumento de presiones provoca un aumento en las fugas en las redes de distribución. Por tal motivo, se buscará un método adecuado para poder calcular el valor del exponente de fugas y así disminuir las pérdidas de agua.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Revisar el estado del arte referente a cálculos y estimaciones para obtener el exponente de fugas de la ecuación de FAVAD mediante método de gestión de presiones.

1.3.2 Objetivo específico

- Revisar metodología ya existente en la ciudad de Guayaquil y proponer mejoras.
- Verificar resultados obtenidos en pruebas de campo que al día de hoy se realizan en Guayaquil.

CAPÍTULO 2

2. Marco teórico

Para que este trabajo de investigación sea de mayor entendimiento, se realizará una descripción de todo lo que conforma los componentes hídricos.

2.1. Pérdidas de agua

Durante algunos años se han manejado diferentes formatos para establecer un balance hídrico que permita la eliminación de pérdidas de agua. Por ello, The International Water Association (IWA), ha establecido un modelo con terminologías que sean factibles en diferentes empresas alrededor del mundo.

Tabla 1. Componentes del balance hídrico propuesto por la IWA.

Volumen de entrada al sistema Q_i	Consumo autorizado Q_A	Consumo autorizado facturado Q_{AF}	Agua facturada exportada	Agua facturada
			Consumo facturado medido	
			Consumo facturado no medido	
		Consumo autorizado no facturado Q_{ANF}	Consumo no facturado medido	Agua no facturada
			Consumo no facturado no medido	
			Pérdidas aparentes Q_{pA}	
	Inexactitudes de los medidores y errores de manejo de datos			
	Pérdidas reales Q_{pR}	Fugas en las tuberías de adducción y distribución		
		Fugas y reboses en tanques de almacenamiento		
		Fugas en conexiones de servicio hasta el punto del medidor del cliente		

Fuente: (VAG, GIZ, 2009)

En la Tabla 1 se observan los diferentes elementos del balance hídrico los cuales se entiende por:

Volumen de entrada al sistema, se refiere al volumen total que entra al sistema el cual se divide en: consumo autorizado y pérdidas de agua.

Consumo autorizado, es el volumen de agua de los clientes registrados por la empresa de agua. Este consumo autorizado se subdivide en consumo autorizado facturado, el cual se refiere al pago del volumen de agua que se utilice, y consumo autorizado no facturado, aquel que se permite su registro, pero no se exige el pago del mismo.

Pérdidas de agua, que es el volumen de agua pérdida que corresponde a la diferencia entre el volumen de ingreso al sistema y consumo autorizado. Estas pérdidas se subdividen en: pérdidas reales, las cuales provienen de las fugas en tuberías, conexiones y tanques de almacenamiento; y pérdidas aparentes, las cuales provienen de la inexactitud de medición, errores de manejo y consumos no autorizados.

Agua no facturada, es el volumen de agua que ingresa al sistema, pero no representa ningún ingreso a la empresa de agua, los cuales comprenden: consumo autorizado no facturado, pérdidas reales y pérdidas aparentes.

Agua facturada, es el volumen de agua que ingresa al sistema y genera ingreso a la empresa de agua, el cual corresponde al consumo autorizado facturado.

2.1.1. Pérdidas reales

Como se indicó anteriormente, las pérdidas reales son volúmenes de agua perdidos desde el sistema de distribución hasta el punto del medidor del cliente, sea este por estallidos, reboses y fugas.

2.1.1.1. Clasificación

Estas pérdidas reales se clasifican según: ubicación y tamaño y tiempo de fugas.

De acuerdo a su ubicación:

Fugas desde puntos de distribución, estas fugas normalmente ocurren en tuberías, uniones y válvulas. En tuberías, se debe a los estallidos a causa de la corrosión del material; en válvulas, ocurre por desconexiones o empaquetaduras rotas; y, por último, en las válvulas se dan debido a falta de

mantenimiento y fallas operativas. Estas en puntos de distribución tienen tasas de flujo de medianas a altas y duración de fugas suelen ser cortos a medianos.

Fugas desde conexiones de servicio, estas fugas suelen ser difícil de detectar ya que sus caudales son generalmente bajos lo cual provoca que su duración sea larga. Estas fugas ocurren debido que las conexiones de servicio tienen uniones y accesorios las cuales presentan fallas altas.

Fugas y reboses en tanques de almacenamiento, ocurren debido que los controles de nivel no se encuentran en ocasiones en buenas condiciones y existe filtraciones en paredes por no ser herméticas. Sus fugas son fáciles de detectar, sin embargo, su reparación suele ser costosa.

De acuerdo a su tamaño y tiempo de fuga:

Fugas visibles, estas fugas aparecen por estallidos en tuberías de distribución. Se llaman visibles debido que el agua que fuga sube a la superficie de manera veloz, pero esto depende de ciertos factores como: presión y tamaño de fuga, y características del tipo de suelo.

Fugas ocultas, estas fugas no suben a la superficie. Sin embargo, existen instrumentos acústicos y no acústicos que permiten detectar si existe o no fuga.

Fugas de fondo, son fugas muy pequeñas las cuales son difíciles de detectar a diferencia de las fugas ocultas las cuales si permiten detectarse con instrumentos acústicos. Estas fugas ocurren por filtraciones o accesorios no herméticos y se consideran que existen en gran cantidad representando así un porcentaje bastante notorio en las pérdidas reales, ya que no se sabe el tiempo exacto durante el cual ocurren.

En la siguiente ilustración se puede apreciar los tipos de fugas respecto al caudal y tiempo de fugas según (VAG, GIZ, 2009):

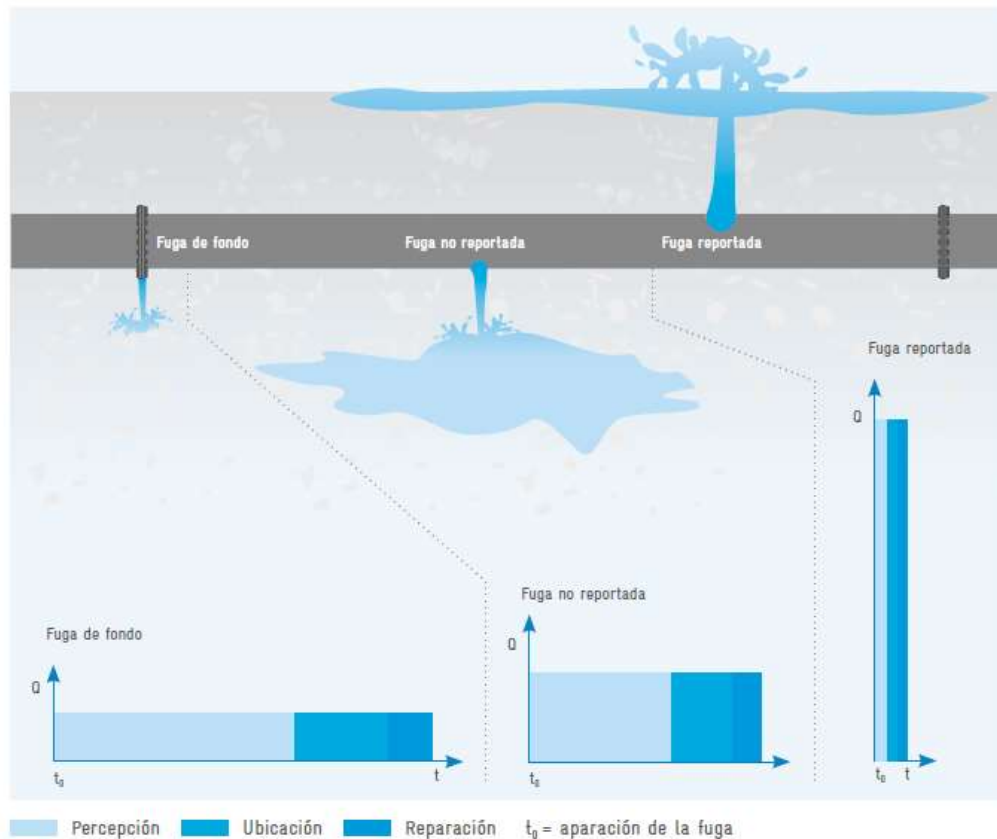


Ilustración 1. Clasificación de fugas de acuerdo a su tamaño y tiempo de fuga.

Fuente: (VAG, GIZ, 2009)

Entre las pérdidas reales y las pérdidas aparentes, es más fácil eliminar por completo las pérdidas aparentes. Sin embargo, las pérdidas reales se pueden disminuir, más no eliminarse por completo.

Por otro lado, existe un cierto nivel de importancia de las pérdidas reales de acuerdo al tipo de país en el cual nos encontremos. Esto se debe que en los países en desarrollo existe mayor cantidad de errores de medición, por lo que las pérdidas aparentes son un factor de mayor importancia que en países desarrollados.

2.1.1.2. Causas de pérdidas reales

Una vez se ejecuta el sistema de distribución, toda instalación queda bajo tierra expuesta a factores que no se pueden controlar. Estos factores son los

causantes de las pérdidas reales, los cuales comprenden: tuberías y uniones, válvulas y accesorios, y, tanques de almacenamiento y bombas.

Las tuberías y uniones se pueden dañar y clasificar de acuerdo: material, condición y edad. Las fallas en materiales suelen presentar de fábrica aparte del uso inapropiado de algunos materiales. La condición se centra en la corrosión de las tuberías, la cual reduce el espesor de la pared de tubería y a su vez la capacidad de soportar la fricción del agua-tubería y esfuerzo externos. La edad de las tuberías y uniones no es un factor muy representativo en las fugas siempre y cuando se realicen los respectivos mantenimientos.

Por otro lado, las fugas por medio de válvulas y accesorios ocurren por rupturas, fallas de material o deformaciones. Esto ocurre debido a un mantenimiento inapropiado. A pesar de presentar caudales bajos pueden considerarse pérdidas de agua significativas al no ser detectadas con tanta rapidez.

Mientras que las fallas en bombas y/o tanques de almacenamiento ocurren por fallas operativas y estructurales. Las fallas estructurales ocurren por baja calidad de sellado provocando rajaduras en paredes y pisos. Las fallas operativas ocurren por inapropiados controles del sistema. Estas fugas no son muy significativas sin embargo hay que tener cuidado al realizar un buen mantenimiento del mismo.

2.1.1.3. Impactos de las pérdidas reales

Las fugas de agua están provocando efectos negativos en la sociedad. Los mismos que no aseguran el suministro de agua potable de manera eficiente y suficiente a largo plazo. Estos impactos se clasifican en diferentes ámbitos, como: económico, técnico, social y ambiental.

Los impactos económicos se generan debido a la cantidad de agua no facturada, es decir aquella que no genera ningún ingreso a la empresa de agua. Esto es un problema puesto que de igual manera se debe satisfacer la demanda de cliente. Además del pago de reparaciones de tuberías debido a estallidos los cuales resultan muy costosos y reparaciones de zonas aledañas

si llegase a ser el caso. A continuación, en la Tabla 2 se muestra los daños identificados por niveles vs costos en la ciudad de Zurich, Suiza.

Tabla 2. Impactos económicos de las fugas.

Extensión de los daños	Descripción	Costos potenciales
Catastrófica	Fatalidades o problemas de salud permanentes	> USD 10 millones
Crítica	Lesiones a personas, daños a infraestructura e interrupciones de la producción, publicidad negativa	> USD 5 millones
Significativa	Interrupción del suministro a la población y los clientes, fallas en el abastecimiento local	> USD 1 millón
Menor	Interrupción corta del suministro, posible cobertura mediática	> USD 0,3 millones
Insignificante	Interrupciones temporales del suministro	> USD 0,1 millón
Imperceptible	No hay interrupción directa, los impactos locales son limitados	< USD 0,1 millón

Fuente: (VAG, GIZ, 2009)

Los impactos técnicos ocurren ya que, al existir estallidos en tuberías de agua potable por aumento de presión, también existirá un aumento de carga en tuberías de aguas servidas. Esto es un impacto negativo puesto que se tendría que adicionar tratamientos de aguas servidas lo cual generará un costo.

Los impactos sociales aparecen por fallas en el suministro de agua potable a los clientes. Esto provoca malestar debido a las interrupciones del servicio generando así atrasos de pago del servicio. De igual manera, dichas fallas de tuberías pueden desencadenar enfermedades puesto que el agua potable se encuentra en contacto con aguas residuales u otros contaminantes.

Los impactos ambientales ocurren por tratamientos químicos y bombeos de agua pérdida que generan desperdicio de energía y causan emisiones de dióxido de carbono innecesarias.

2.1.2. Pérdidas aparentes

Las pérdidas aparentes es el volumen de agua generado de la resta entre las pérdidas de agua y pérdidas reales. Según (VAG, GIZ, 2009) estas pérdidas se pueden agrupar en categorías de acuerdo a su origen:

- Inexactitud de medición debido a contadores incorrectos de agua de los clientes o medidores de flujo incorrectos.
- Manejo de datos y errores de contabilidad, así como mala rendición de cuentas de los clientes en los sistemas de facturación.
- Consumo no autorizado debido al robo de agua y a las conexiones ilegales.

Las pérdidas aparentes a diferencia de las pérdidas reales se pueden reducir de manera más eficaz y a un costo menor. Asimismo, pueden representar cantidades significativas de agua si no se controla las conexiones ilegales.

2.2. Exponente de fugas

Los sistemas de distribución de agua alrededor del mundo se están deteriorando y a su vez la demanda de agua potable aumenta. Las pérdidas de agua están compuestas de varios componentes, uno de los más importantes son las fugas. Las fugas constituyen una gran parte de pérdidas, alrededor de más del 70% del total de agua pérdida. (Van Zil & Clayton, 2005)

Este tema es muy complejo puesto que, a pesar de realizar varias investigaciones, no se ha logrado reducir las pérdidas de agua. Esto se debe a desde un principio no considerar los diferentes factores que afectan las fugas y el control de las pérdidas de agua. Estos factores que afectan las fugas son: hidráulica de fugas, comportamiento del material de tubería, hidráulica del suelo y demanda de agua.

2.2.1. Hidráulica de fugas

Una cantidad importante de fugas se encuentran en las pérdidas reales. Estas se pueden presentar en diferentes tipos de fallas en las tuberías de la red de distribución. Varios estudios de campo y laboratorio han comprobado la alta sensibilidad de la fuga a la presión (VAG, GIZ, 2009). Esto significa que mientras mayor sea la presión, mayor será el orificio de fuga y cuando la presión disminuya también se reducirá la fuga.

Esta teoría se la puede representar en la siguiente ecuación de orificio (1). Se puede hacer uso de la ecuación de orificio debido al comportamiento hidráulica que presenta las fugas en los tubos.

$$q = c * h^{\alpha} \quad (1)$$

Donde:

- q es el caudal de fugas
- c es el coeficiente de fugas
- h es la presión
- α es el exponente de fugas

Dentro de esta ecuación, el elemento que presenta mayor importancia es el exponente de fugas ya que afecta el valor del caudal. Normalmente el valor del exponente se encuentra entre 0.5 y 2.79 según varios estudios de campo realizados.

Sin embargo, existen factores que afectan el valor del exponente de fugas, los cuales son:

- Comportamiento del material de tubo
- Suelo circundante
- Condiciones de flujo en orificios de fuga
- Capacidad de fuga

Un factor muy importante es el material del tubo. Al existir esfuerzos en las paredes de tubos debido a la presión, se pueden producir fallas las cuales dependiendo del material del tubo actuarán de manera diferente al momento de variar la presión.

Al momento que la tubería presenta mayor presión interna, provoca que se produzcan fisuras o rajaduras en tuberías, las mismas que pueden incrementar dependiendo la capacidad que la tubería tenga de expandirse además de causar un aumento de fugas.

De acuerdo con Thornton y Lambert, el exponente de fuga tenderá hacia 1.5 por fugas de fondo en tubos flexibles y 0.5 por fugas en tubos rígidos. (VAG, GIZ, 2009)

De acuerdo con Morrison et al, (2007), la eficiencia en la gestión de la presión se puede expresar utilizando la siguiente ecuación (2):

$$L_1 = L_0 \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^\alpha \quad (2)$$

Donde:

- L_1 es el caudal de fuga a presión ajustado
- L_0 es el caudal de fuga a presión
- P_1 es la presión promedio ajustada
- P_0 es la presión promedio inicial en la zona
- α es el exponente de fugas

A continuación, se observa una gráfica de la interacción entre la presión y fuga de acuerdo a diferentes valores de exponente los cuales se encuentran en un rango de 0.5-2.5. Los mismos que se ven afectados por las características del material de tubo y condiciones del sistema a causa de impactos en fugas de fondo.

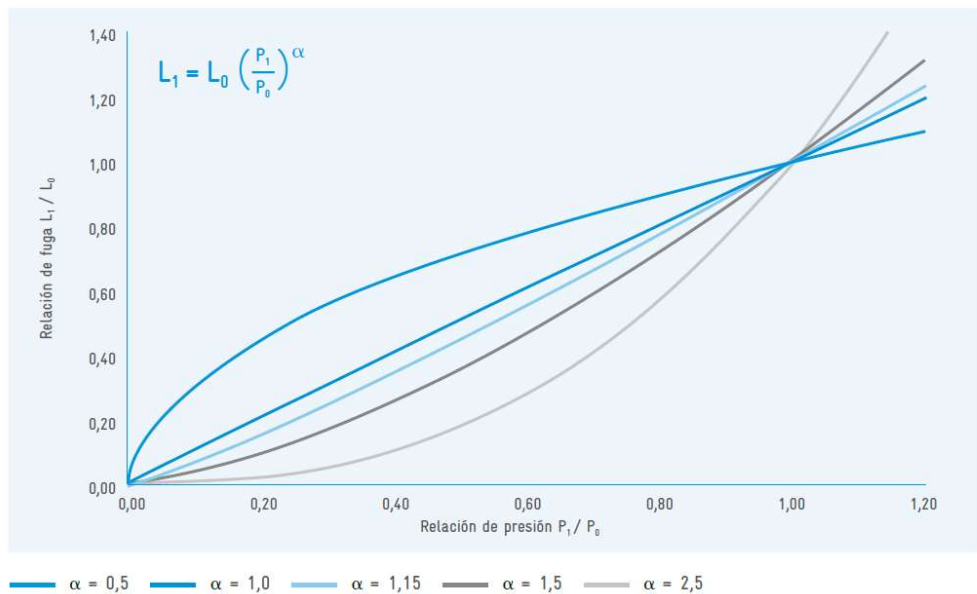


Ilustración 2. Relación fuga y presión.

Fuente: (VAG, GIZ, 2009)

Además de existir una variación del exponente de fugas debido al material del tubo, estas pueden variar por el tipo de abertura. En la Ilustración 2 se puede observar diferentes tipos de abertura de fugas para distintas velocidades de flujo máximo laminar y mínimo turbulento.

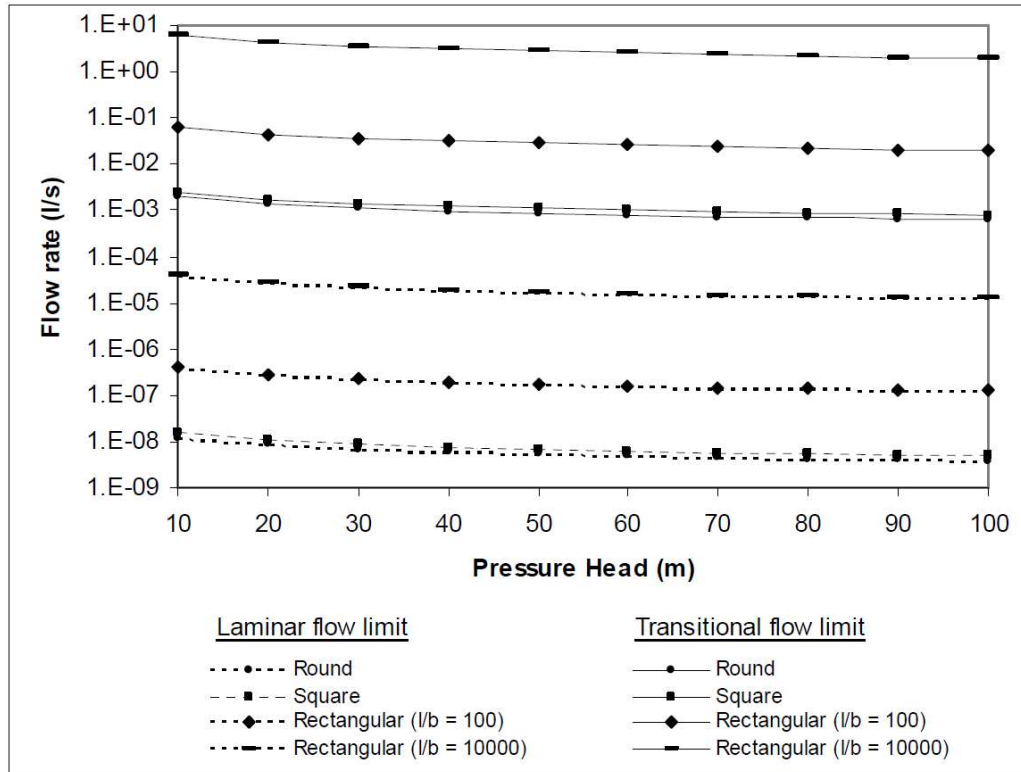


Ilustración 3. Velocidades máximas de flujo laminar y transición para diferentes tipos de aberturas de fuga.

Fuente: (Van Zil & Clayton, 2005)

Como se observa en la Ilustración 3 se realizó un análisis para agujeros redondos, cuadrados y rectangulares. Además de agujeros se analizó las rupturas rectangulares con una relación de l/b . Para el análisis se asumió coeficiente de descarga y flujo de orificio.

La Ilustración 3 muestra que las rupturas presentan mayor tasa de flujo que los agujeros; curre al presentar un perímetro mojado mayor. Los máximos caudales laminares que pueden ocurrir son muy pequeños por ende no

existirán pérdidas significativas en los sistemas de distribución en flujos totalmente laminar.

Por otro lado, varias investigaciones han demostrado que las fugas de fondo son difíciles de detectar. El flujo transitorio varía de 0.5 a 1 (Ilustración 13) debido a las fugas de fondo que no podemos detectar por tal motivo existe esa variación.

2.2.2. Estado del arte del exponente de fugas

Una estrategia fundamental para manejar las fugas es minimizar el exceso de presiones. A continuación, se muestran 3 tipos de pruebas realizadas anteriormente para minimizar el exponente de fugas(N1): pruebas de laboratorio en agujeros de tuberías, pruebas en sectores de sistema de distribución y pruebas nocturnas en sectores de sistema de distribución.

La primera prueba se realizó en el año 1980, donde (Hiki, 1981) realizó una prueba en Japón la cual consistía en realizar orificios de 1-5mm de diámetro en tubos de metal de alrededor 60 – 180mm de diámetro. Estas perforaciones se realizaron con el fin de tomar medidas de caudal a diferentes presiones una vez haya sido enterrada la tubería en material granular, arena, o sumergirla en agua. Los caudales fueron de 24 a 900 l/h a presiones de 2 a 60metros. Los resultados del exponente de fugas fueron entre 0.36 a 0.70, es decir, un promedio alrededor de 0.50. Otra prueba realizada en Japón en el año 1982 por Tokyo Waterworks presenta resultados similares, ya que obtiene un valor de N1 alrededor de 0.51 a 0.54 para caudales alrededor de 1500l/h.

Estas pequeñas variaciones de exponente de fugas se pueden presentar por cambios en el coeficiente de descarga, ya que este puede variar de acuerdo al rango de flujo en el cual se encuentre, sea este laminar o turbulento como se mencionó en el capítulo 2.3.2 la Ilustración 13.

En Reino Unido se realizó otra prueba de laboratorio con una variación de presiones de 10 a 75 metros en un rango de caudal de 0 a 4000 l/h. en tuberías de metal y plástico. Los resultados del valor de N1 para la tubería de metal

fue cercano a 0.50; mientras que, para tuberías de plástico, el valor de N1 fue cercano a 1.5.

Otras pruebas de agujeros en tuberías de plástico realizadas en laboratorio muestran un valor promedio de exponente de fugas de 1.50. Dichas pruebas realizaron agujeros de diferentes tamaños, es decir de 10 mm y 20 mm, en tuberías del mismo material, con una variación de presión igual para ambos casos los caudales variaron un poco. Sin embargo, el valor promedio de N1 para ambas muestras fueron alrededor de 1.50.

Por otro lado, también se han realizado pruebas de campo en diferentes sectores hidráulicos en una ciudad de Japón. Oruga presentó resultados de 20 pruebas cortas en pequeños sectores hidráulicos (Lambert, 2001), de las cuales 19 tuberías eran rígidas. Cada prueba duró 45min y se solicitó cerrar la válvula de abastecimiento de agua para poder calcular la variación de caudal a diferentes presiones. Los valores de N1 obtenidos fueron de 0.65 a 2.12, siendo así un valor promedio de N1 de 1.15.

Como podemos notar, según pruebas de laboratorio, para tuberías rígidas el valor de N1 es cercano a 0.50 pero en pruebas de campo este valor es superior a 0.50. Yeung re analizó los datos de Oruga mostrando que el valor del exponente N1 solo excede 1 debido a valores bajos de área efectiva de fugas. Esto se debe a que las tuberías en pruebas de campo experimentan grandes variaciones en el coeficiente de descarga por las presiones provocando que aumente significativamente el valor de N1 por encima de 0.50. (Lambert, 2001)

Las pruebas de uso nocturno para diferentes sectores hidráulicos se han realizado mayormente en Reino Unido y también se ha utilizado la misma técnica en otros países como Brasil, Malasia, entre otros (Lambert, 2001). Esta prueba se realiza reduciendo la presión de entrada al sistema de distribución durante un periodo de días, semanas u horas y se monitorea el efecto de flujo nocturno mínimo y presión promedio del sector.

En 1980, se realizaron numerosas pruebas de uso nocturno las cuales se hicieron una vez reparada todas las tuberías con fugas con excepción de las

fugas de fondo. Dichas pruebas arrojaron valores de N1 entre un rango de 0.50 a 1.5 con un promedio de N1 cercano a 1. Otras pruebas realizadas en Brasil para tuberías rígidas en sectores con fugas altas muestran valores de N1 en un rango de 0.52 a 0.67, mientras que para tuberías de PVC con fugas altas en juntas muestran un valor de N1 de 2.5.

Por tanto, los valores de N1 para las pruebas de uso nocturno se ven mayormente influenciadas por material de tubería y nivel de fuga que esté presente. Sin embargo, para las fugas de fondo, debido a que estas son casi indetectables, se considera un valor N1 de 1.5 sin necesidad de analizar el material de la tubería.

Normalmente, las tuberías presentan fallas de acuerdo a las propiedades del material; es decir, si la tubería es de asbesto cemento las fallas comunes que presentan son grietas longitudinales; y si las tuberías son de acero o hierro las fallas podrían ocurrir por corrosión.

A continuación, se muestra un cuadro con la variación del valor N1 de acuerdo al material de la tubería.

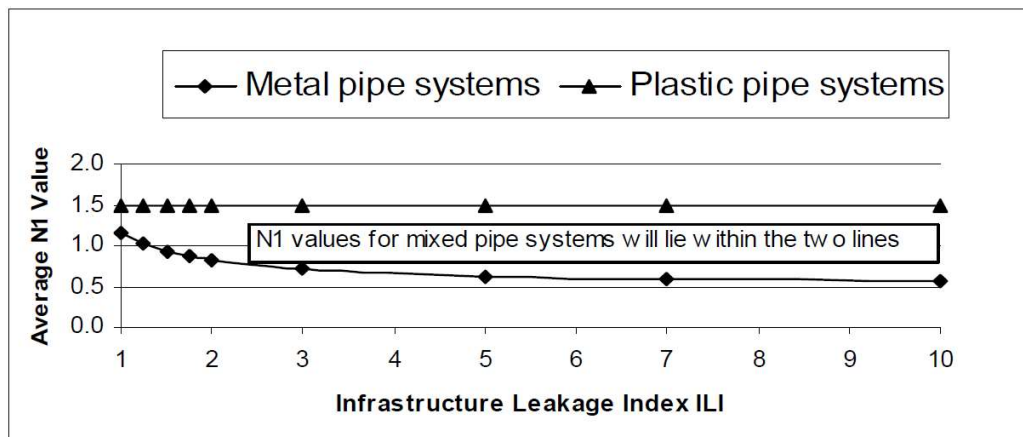


Ilustración 4. Valor promedio de N1 de acuerdo al material de tubería.

Fuente: (Lambert, 2001)

La presión del agua en las tuberías puede variar ya que es absorbida por las tensiones de las paredes de la tubería, generando fallas por materiales de poca resistencia. Por tanto, es importante que las tuberías estén diseñadas con respecto a la presión que las mismas vayan a soportar ya que puede

existir mucha fricción provocando nuevas fisuras e incrementar la extensión de fisuras ya existentes y el aumento de la frecuencia en estallidos.

Por otro lado, las altas presiones pueden ayudar a encontrar donde existen fugas y de esa manera reducirlas. A continuación, se muestra un estudio realizado por el grupo de investigación del agua de la Universidad de Johannesburgo en 2004 que determinan exponentes de fugas para diferentes tipos de fugas en diferentes tipos de materiales.

Tabla 3. Exponente de fugas para diferentes tipos de agujeros y materiales de tuberías.

Failure type	Leakage exponent for pipe material		
	uPVC	Asbestos cement	Mild steel
Round hole	0.52	-	0.52
Longitudinal crack	1.38 – 1.85	0.79 – 1.04	-
Circumferential crack	0.41 – 0.53	-	-
Corrosion cluster	-	-	0.67 – 2.30

Fuente: (Van Zil & Clayton, 2005)

En la Tabla 3, se puede observar que los mayores exponentes de fugas se encontraron en grietas longitudinales. Esto se debe al hecho que las tensiones circunferenciales en las tuberías son típicamente sustancialmente más altas que las tensiones longitudinales.

Los exponentes de fugas para tuberías con agujeros redondos, no se ven afectados tanto por el material de la tubería y se mantiene cerca del valor teórico de fugas para tuberías rígidas de 0.50. Asimismo, las grietas por corrosión de tuberías de acero presentaron un exponente de fuga alto.

La relación entre las fugas de tuberías y el suelo que la rodea es complejo (Van Zil & Clayton, 2005). Consideraciones teóricas proponen que las fugas continuas de las tuberías se drenen en un suelo granular adyacente sin dejar rastro; esto se refiere a que en un suelo granular, es decir arenoso, las fugas en tuberías no saldrán a la superficie y drenarán, por lo que nunca se sabrá si hubo o no fuga. Mientras que, si es un suelo cohesivo, es decir de arcilla o limo, este hará que las fugas de agua suban hasta la superficie del suelo haciendo estallar al mismo.

En el ensayo que se hizo de una tubería con falla, se ve que el flujo y presión aumenta y disminuye en repetidas ocasiones. Existen fluctuaciones a corto plazo en ambos procesos. Puede existir variaciones de resultado de N_1 de acuerdo a la longitud y recorrido de la grieta.

En tuberías las cuales tienen fallas por corrosión, los exponentes de fugas son mayores debido que es mayor la tensión de las paredes de la tubería provocando que aumente el área de fuga.

Puede existir el caso de que el valor de n_1 sea por debajo de 0.50 que es el exponente para valor teórico lo cual quiere decir que a medida que aumenta la presión el área de la fuga disminuye, esto ocurre solo en agujeros circulares debido que la tensión circunferencial teórica en una tubería es el doble del esfuerzo teórico longitudinal.

Como podemos notar, los resultados de los valores de N_1 en pruebas de campo son mayores que en pruebas de laboratorio. A continuación, se presentará los resultados de un estudio experimental realizado en la universidad de Johannesburgo para diferentes materiales de tubería.

El estudio experimental estaba compuesto de dos secciones finales removibles ajustadas a una sección de tubería fallida utilizando acoplamientos Viking Jhonston. Una sección final estaba conectada a la red municipal de suministro de agua a través de un medidor de flujo de turbina combinado. Para obtener las lecturas del medidor de flujo y el transductor de presión se utilizaba un registrador de datos. Las presiones se obtenían cada medio segundo y la tasa de flujo del pulso del medidor de flujo cada un litro de flujo. (Greyvensteins & Van Zyl, 2005)

El flujo y presión en el sistema se controlaban por una válvula de palanca bola en la tubería de suministro aguas arriba. La fuga se descargó en la atmosfera haciendo que no exista ningún tipo de flujo aparte del caudal de fuga. Para ello primero se introdujo un pequeño flujo para eliminar aires atrapados. La configuración se colocó horizontalmente en el transductor para filtrar en el mismo nivel. Una vez realizada la configuración, el flujo y presión aumentaron

y luego disminuyeron rápidamente en menos de 30 segundos. El procedimiento se repitió tres veces antes de analizar los datos.

A continuación, se muestra la configuración del estudio:

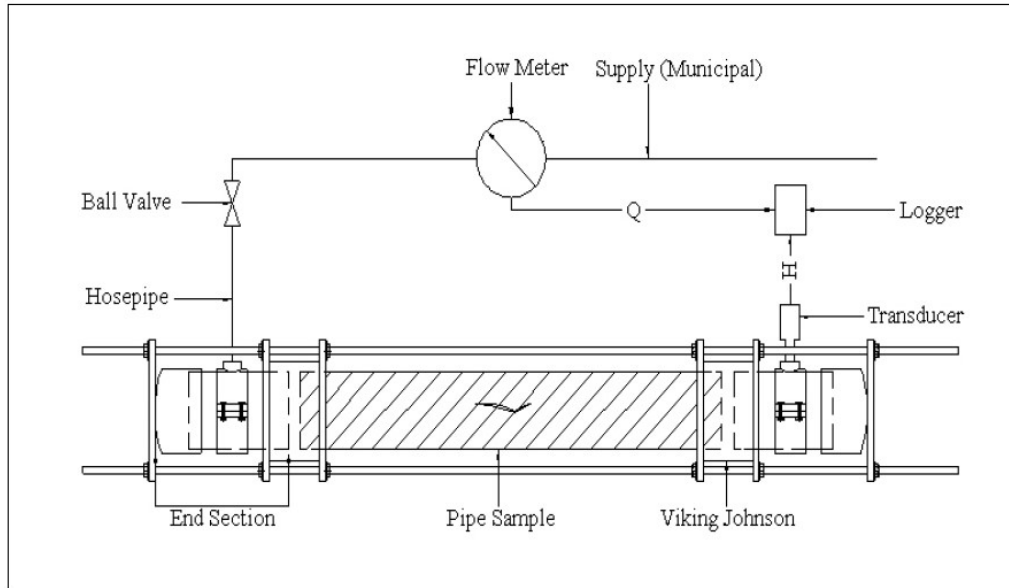


Ilustración 5. Configuración del estudio experimental en la universidad Johannesburgo.

Fuente: (Greyvensteins & Van Zyl, 2005)

En dicho estudio se descubrió que existen fluctuaciones de corto plazo en las mediciones de flujo y presión debido a flujos transitorios que existen en el sistema municipal de distribución de agua. La amplitud de fluctuaciones puede ser menor si se presenta flujo y presión bajos debido al efecto de la amortiguación de la válvula de estrangulamiento. Es normal que ocurran fluctuaciones de corto plazo en el sistema de distribución por lo que no se prosiguió a eliminarlas.

Los datos se obtuvieron identificando secciones estables del gráfico de flujo y presión para tomar valores promedios de cada rango. Los valores promedios se analizaron para obtener el valor del exponente de fugas para tuberías de asbesto cemento. A continuación, se observa los resultados para pruebas de campo en tuberías de asbesto cemento.

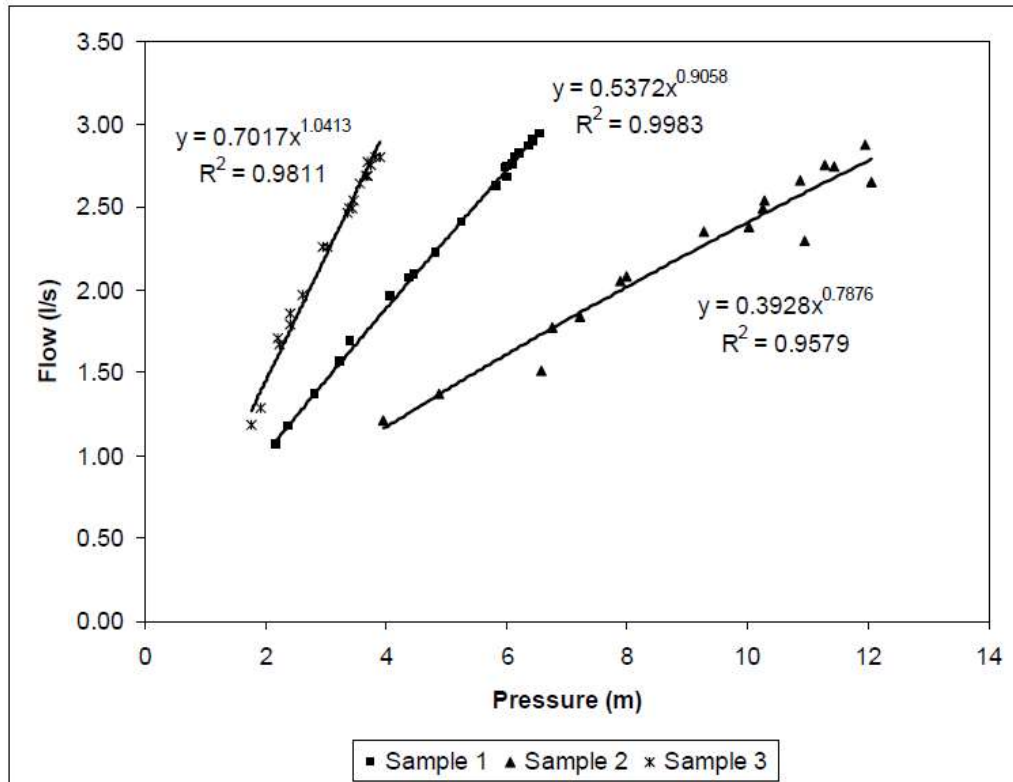


Ilustración 6. Gráfico de presión vs tasa de flujo para tuberías de asbesto cemento.

Fuente: (Greyvensteins & Van Zyl, 2005)

Se obtuvieron tres pruebas de tuberías de asbesto cemento en el campo. Dichas muestras presentan grietas longitudinales en uno de sus extremos como se observa a continuación:



Ilustración 7. Fallas en tuberías de asbesto cemento

Fuente: (Greyvensteins & Van Zyl, 2005)

Estas muestras presentan valores del exponente de fuga mucho más altos que el valor teórico expuesto en la anterioridad. Siendo estos, 0.91, 0.79 y 1.04, respectivamente. Como se puede observar las grietas de la muestra 1 y 3 son grietas paralelas a la línea de la tubería, mientras que, la muestra 2 presenta la grieta en línea ligeramente diagonal. Por tanto, se puede mencionar que el exponente de fugas pudo aumentar en las muestras 1 y 3 debido a que las grietas aumentan a medida que aumenta la presión en las tuberías, además de presentar un flujo turbulento.

Asimismo, se tomó tres muestras de tuberías de acero con grandes daños por corrosión en la pared de tubería. En estas pruebas obtenidas también se registró flujo turbulento dado que los valores obtenidos fueron: 0.67, 1.96 y 2.30, respectivamente.



Ilustración 8. Secciones de tuberías de acero corroídas.

Fuente: (Greyvensteins & Van Zyl, 2005)

Además de presentar agujeros en la pared de las tuberías, se puede notar como el material de la tubería ha sido significativamente reducido debido a la corrosión. Al tener una tubería con una reducción en cuanto al material del cual está fabricado, provoca menor resistencia de soporte y mayores tensiones provocando un aumento en el área de fuga. Por ende, a medida que las presiones aumentan en la tubería, el área de fuga aumentará aún más dando como resultado un aumento en el exponente de fugas.

Según (Farley & Trow, 2003), indican que los exponentes máximos en exceso de 2.5 no son realistas. Dichos exponentes juegan un papel muy importante en el comportamiento de fugas, además de tener implicaciones importantes para gestión de presión, selección de material y mantenimiento de sistemas existentes.

Para realizar las pruebas de campo en tuberías de PVC se realizaron fugas inducidas artificialmente en forma de agujeros, grietas longitudinales y grietas circunferenciales.

Se realizó una perforación en una tubería de PVC la cual tenía un flujo turbulento, esta muestra dio como resultado un exponente de fuga de 0.524. Este valor es cercano al valor teórico N1 para tuberías rígidas. Este resultado se puede deber por la combinación de un bajo módulo de elasticidad y grosor de pared de tubería de PVC provocando un aumento en la expansión del área de fuga con un aumento de presión.

Las pruebas con grietas circunferenciales en tuberías de PVC obtuvieron un número de Reynolds alto siendo así un flujo turbulento. Se obtuvieron tres muestras las cuales presentaron un exponente de fugas de 0.41, 0.50 y 0.53. En estas pruebas se puede encontrar que, al aumentar la longitud de la grieta, el exponente aumenta también. Esto ocurre debido que las fuerzas longitudinales en las paredes de las grietas son mayores para grietas más altas causando así que aumenten más en área que las grietas cortas.

Cuando se presenta un exponente menor de 0.50, se puede representar que el mismo presenta una disminución en área de fuga a medida que la presión va incrementando. Esto ocurre en tuberías con grietas circunferenciales puesto que la tensión circunferencial es el doble del esfuerzo longitudinal. Por tanto, se interpreta que las tensiones circunferenciales provocaron el aumento de la grieta y a su vez redujeron el área provocando un valor de N1 inferior a 0.50.

Por último, se realizó tres pruebas en tuberías de PVC con grietas longitudinales las cuales presentaron flujo turbulento y exponentes de fugas de 1.51, 1.46 y 1.85. Siendo así estos valores cercanos al valor teórico N1 de 1.5 para tuberías de PVC.

2.2.3. Principios de Favad

La relación entre la presión y fugas es importante de comprender para cualquier análisis de pérdida real. Los principios físicos de conservación de energía indican que la velocidad a través de un orificio individual podría variar con la raíz cuadrada de la presión; esto indica que un 10% de cambio en la presión podría provocar un 5% de cambio en la velocidad de una fuga a medida que fluye a través de un agujero en la tubería.

Asimismo, se han realizado pruebas controladas de sistema de distribución en Japón y Reino Unido las cuales demuestran que las tasas de fugas instantáneas en distritos de distribución individual son más sensibles a los cambios en presión que los indicados por la relación de raíz cuadrada.

En el año 1994 se expuso la teoría de May del área de descarga fija y variable. Esta teoría demuestra que el área de sección transversal de ciertos tipos de fugas, como: agujeros, roturas de tubería, juntas y accesorios también pueden variar con presión mientras que la velocidad del flujo continúe variando en proporción a la raíz cuadrada de la presión. (Lambert, Myers, Trow 1998).

A continuación, se muestra la ecuación hidráulica para caudal a través del área de un orificio sujeto a presión:

$$Q = Cd * A * (2gP)^{0.5} \quad (3)$$

Donde:

- Q, Caudal
- Cd, coeficiente de descarga
- A, área
- g, aceleración debido a la gravedad
- P, presión

Sin embargo, para algunos tipos de fugas individuales tanto el coeficiente de descarga como el área pueden depender solamente de la presión. Por tal motivo, la ecuación de FAVAD se ve mejorada por predicción práctica de la presión a la siguiente manera:

$$\frac{L_1}{L_0} = \frac{P_1^{N1}}{P_0} \quad (4)$$

Donde N1 representa la relación entre la presión y flujo, teniendo en cuenta que la presión depende del coeficiente de descarga y el área de sección transversal. El valor del exponente N1 podría variar entre 0.5 para áreas de fugas fijas a 1.5 para áreas de fugas variables donde el área efectiva, es decir, coeficiente de descarga por área varía con respecto a la presión.

Para las fugas en tuberías de metal, el valor de N1 suele estar cercano a 0.5, mientras que, para fugas de fondo en juntas y accesorios y en tuberías flexibles, el valor de N1 suele ser mayor o igual a 1.5. Existen casos donde el valor de N1 suele ser hasta 2.5, esto suele ocurrir mayormente en tuberías flexibles. Asimismo, para sistemas extensos de tuberías mixtas se puede aproximar el valor de $N1=1$ (Ilustración 4).

Las fugas de fondo son eventos individuales con caudales demasiados bajos para ser detectados por técnicas de detección de fugas acústicas. Estas fugas estas expuestas a aumentar a medida que incrementa la edad de la red y suelen ser mayores cuando estas sujetos a grandes presiones. Una manera eficiente y poco costosa de disminuir las fugas de fondo dentro de un buen sistema de mantenimiento es reduciendo la presión.

En la Tabla 4, se muestran los caudales estándar de fugas de fondo recomendados en presión(psi) para calcular fugas de fondo inevitable para un sistema o parte de uno.

Tabla 4. Tasa de fugas de fondo inevitable.

Infrastructure Component	Background Leakage at ICF=1.0	Units
Mains	2.87	gallons per mile of mains per day per psi of pressure
Service Connection – main to curb-stop	0.11	gallons per service connection per day per psi of pressure
Service Connection – curb-stop to customer meter	4.78	gallons per mile of service connection per day per psi of pressure
Infrastructure Component	Background Leakage at ICF=1.0	Units
Mains	9.6	liter per kilometer of mains per day per meter of pressure
Service Connection – main to curb-stop	0.6	liter per service connection per day per meter of pressure
Service Connection – curb-stop to customer meter	16	liter per kilometer of service connection per day per meter of pressure

Fuente: Lambert et al.1999

Estos valores se basan en datos internacionales de análisis de flujos nocturnos después de detectar y reparar roturas. Dichos valores pueden ser

usados para calcular el nivel mínimo esperado de fugas de fondo y asignar factor de condición de infraestructura de 1.

2.2.4. Prueba de Pressure Step Test

La prueba de pressure step test es una importante tecnología de evaluación de fugas utilizada alrededor del mundo. Sin embargo, dicha metodología no determina las fugas de fondo, especialmente en Reino Unido. (Fanner, Sturm, Thornton, & Liemberger, 2007)

En el año 2001 se analizó diversas investigaciones realizadas en Japón y Reino Unido. Dichos análisis indican que el valor de N1 se encuentra en un rango de 1 a 1.15 para grandes sistemas de distribución con diferentes materiales de tuberías.

Modelar la relación entre fugas y presiones usando el principio básico de la hidráulica en lugar de las fórmulas empíricas permite un análisis más fuerte de las fugas. La velocidad del agua que se escapa de agujeros está regida por la velocidad estándar de la ecuación hidráulica, como se observa a continuación:

$$v = (2gP)^{0.5} \quad (5)$$

Donde:

- v , velocidad del agua a través de fugas individuales.
- g , aceleración debido a la gravedad.
- P , presión a la que está sujeta la fuga.
- 0.5, exponente de la ley de potencia de raíz cuadrada para la relación.

Asimismo, el caudal del agua que escapa del agujero se rige por el área de la sección transversal del agujero y coeficiente de descarga:

$$Q_f = v * Cd * A \quad (6)$$

Donde:

- Q_f , caudal de fuga.

- V, velocidad del agua a través de la fuga.
- A, área de sección transversal de la fuga.
- Cd, coeficiente de descarga.

Uniendo la ecuación (5) y (6), obtenemos (7):

$$Q_f = Cd * A * (2gP)^{0.5} \quad (7)$$

Por otro lado, el coeficiente de descarga y área varía con respecto a la presión. Es decir, el coeficiente de descarga podría variar con fugas muy pequeñas, mientras que, el área de sección transversal puede variar con fugas en las uniones de tuberías donde el aumento de la presión provoca un aumento de área de fuga. Entonces se puede decir que la ecuación (7) indica que el caudal de fugas es proporcional a la presión a la potencia 0.5. Siendo de esa manera proporcional a la presión a la potencia 1.5. Dando como resultado la siguiente ecuación:

$$Q_f = Cd * A * (2gP)^{N1} \quad (8)$$

Durante la prueba, la presión de suministro en una zona se reduce a medida que se cierra la válvula de abastecimiento de agua o controlando una bomba en una estación de bombeo cerca del punto de entrada de la zona. En este proceso normalmente se puede obtener entre dos a tres reducciones de presiones durante un periodo de dos a tres horas de flujo nocturno mínimo constante.

Luego de que el consumo empiece a aumentar debido a la demanda del consumidor, no es posible continuar con la prueba debido que no se podrá predecir con precisión la influencia de la presión sobre la demanda del consumidor. La tasa de flujo de fuga se obtiene permitiendo el uso nocturno. La siguiente ecuación permite calcular el área efectiva de fuga:

$$\sum Cd * A = \sum Q_f / (2gP)^{0.5} \quad (9)$$

Donde:

- $\sum Cd * A$, área efectiva de fugas

- $\sum Q_f$, caudal de fugas total.

Si todas las fugas en la zona fueran de un tamaño constante, entonces el área de fuga efectiva sería constante de una configuración de presión a la siguiente. Esto se encuentra representado en la siguiente figura, donde el área de fuga efectiva vs los resultados de presión da como resultado una línea horizontal:

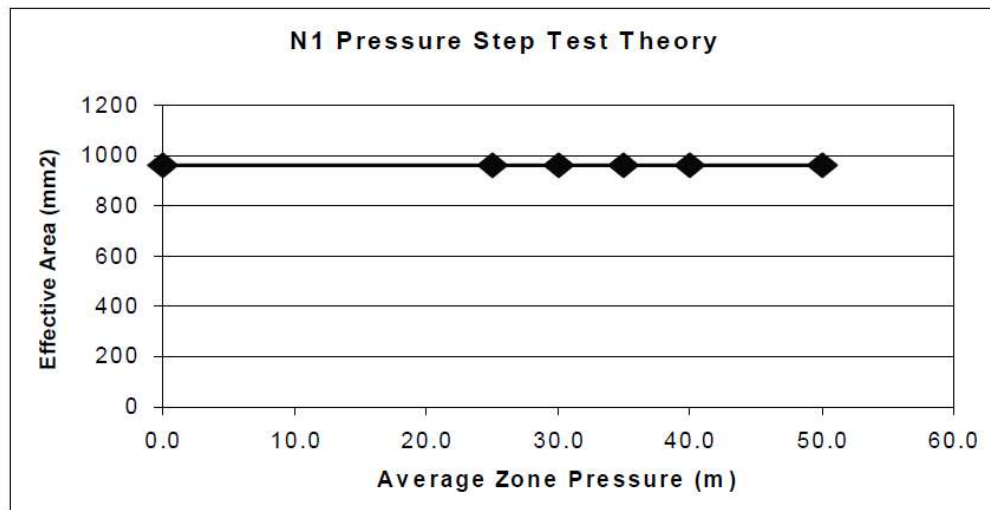


Ilustración 9. Resultado de prueba *pressure step test* para fugas de área fija.

Fuente: (Fanner, Sturm, Thornton, & Liemberger, 2007)

Por otra parte, si se reduce el área efectiva de fuga al reducir la presión, algunas de las fugas cambian de tamaño variable. Esto se puede observar en la siguiente figura, donde el área de fuga efectiva vs los resultados de presión da como resultado una línea inclinada que pasa a través del punto cero tanto en el eje X y Y:

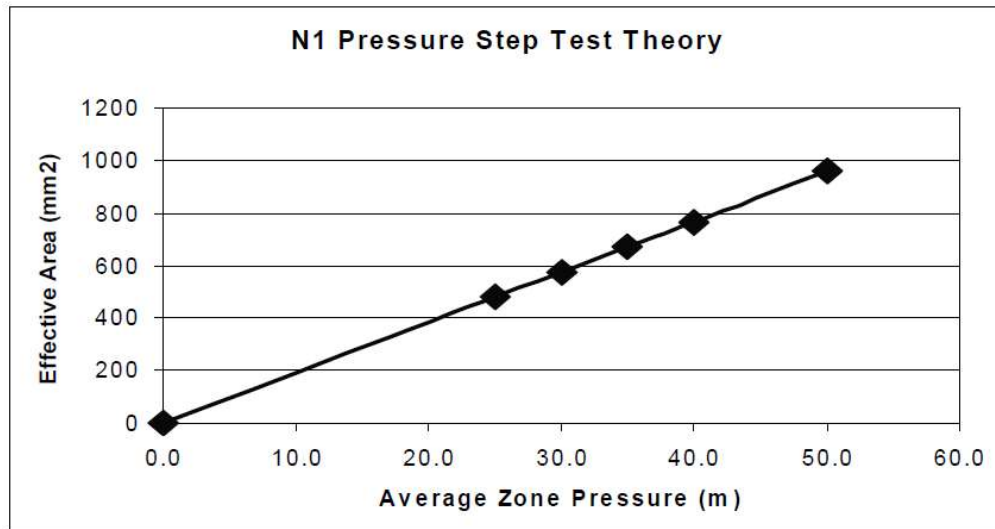


Ilustración 10. Resultado de prueba pressure step test para fugas de área variable.

Fuente: (Fanner, Sturm, Thornton, & Liemberger, 2007)

Los resultados de la prueba se analizan para determinar el área efectiva de una fuga en una zona y comparar los cambios en el área efectiva causada por el cambio en la presión. Una vez realizada dicha comparación, es posible determinar el valor de N1 y determinar la relación de agujeros de tamaño fijo y agujeros de tamaño variable a pesar de que se puedan producir roturas en tuberías de plástico.

La ecuación que se utiliza para calcular el valor de exponente de fugas N1 se basa en relación de los cambios de presiones y los caudales de fugas:

$$N1 = \log\left(\frac{L_1}{L_0}\right) / \log\left(\frac{P_1}{P_0}\right) \quad (10)$$

Sustituyendo los datos obtenidos en la prueba, como se observa en la siguiente ilustración, queda:

$$N1 = \frac{\log\left(\frac{14.53}{15.27}\right)}{\log\left(\frac{69.80}{73.64}\right)} = 0.92 \quad (11)$$

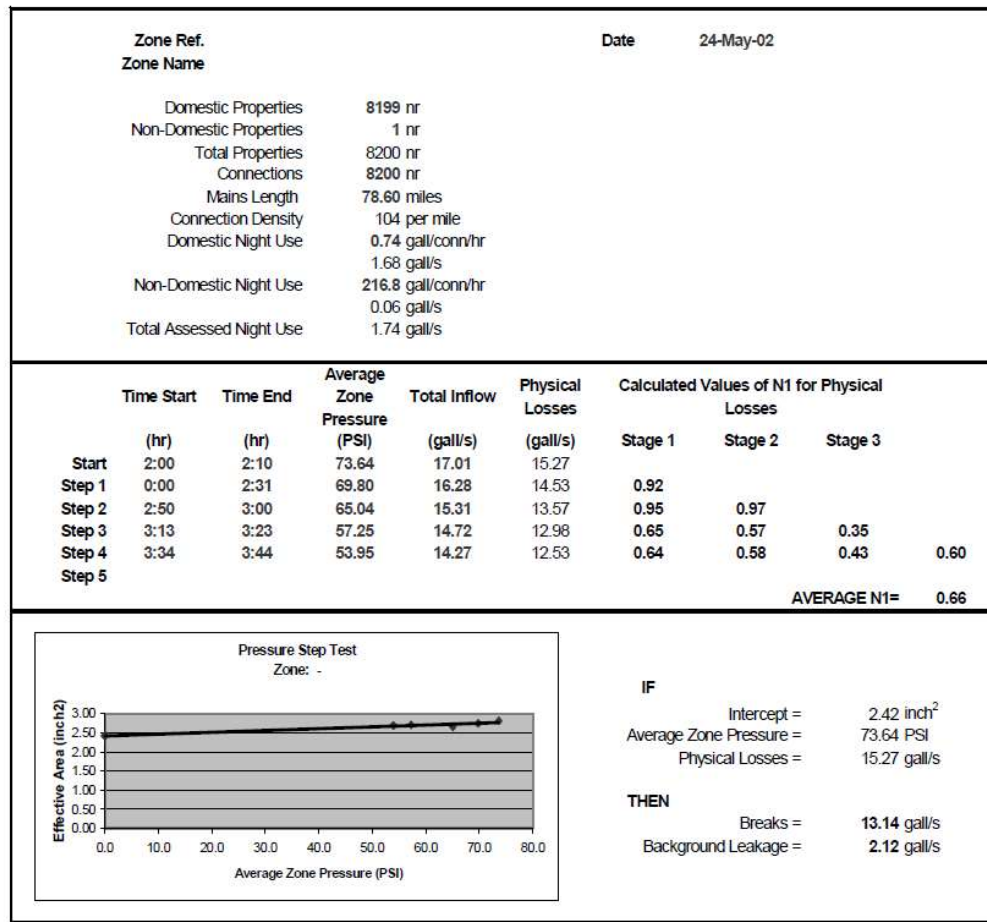


Ilustración 11. Ejemplo de prueba de pressure step test.

Fuente: (Fanner, Sturm, Thornton, & Liemberger, 2007)

Como se observa en la Ilustración 11, al tener el valor de fuga de fondo, se puede calcular el factor de condición de infraestructura dividiendo para la fuga de fondo inevitable. Se debe tener presente que esta técnica se ha desarrollado para sistemas donde predomina tuberías rígidas. Si se utiliza en sistemas donde no predomina tuberías rígidas, algunos volúmenes de rotura recuperables responden a una potencia de área variable en lugar de una potencia de área fija.

Por tal motivo, es importante tener en cuenta que, para obtener el factor de condición de infraestructura, el sistema de tuberías debe ser metálicas. Pero si fuese un sistema de tuberías mixtas, el resultado podría estar sobreestimando las fugas de fondo.

2.3. Aplicaciones del concepto de exponente de fugas

EL exponente de fugas se utiliza para reducir las pérdidas reales y para predecir los resultados de la gestión de presiones. Existen algunos métodos para reducir las pérdidas de agua, los cuales se han ido implementando a lo largo de los años. Cada método se utiliza dependiendo de la situación local tratando de reducir las pérdidas de agua de manera más eficiente y económica. La gestión de presiones es un método de intervención eficiente debido a su corto y mediano plazo. (VAG, GIZ, 2009).

La gestión de presión es la práctica de manejar presiones del sistema a niveles óptimos de servicio a la vez que se asegura un suministro suficiente y eficiente para usos legítimos (VAG, GIZ, 2009). Estos generan impactos positivos puesto que, al disminuir presiones innecesarias o excesivas, se ayuda a evitar estallidos o rupturas de tuberías en las redes de distribución de agua y a su vez disminuye las pérdidas de agua. Por otra parte, la gestión de presión presenta un impacto positivo en la clasificación de las fugas de acuerdo a su tamaño y tiempo de fuga (capítulo 2.1.1.1) debido a la relación directa del caudal de fugas y presión.

A continuación, en la Tabla 5 se observa un diámetro de agujero del mismo tamaño en diferentes materiales de tuberías. Se observa que, a mayor presión, existe mayor caudal de fuga. Mientras que, a menor presión, el caudal de fugas disminuye.

Tabla 5. Relación de caudal de fugas y presiones de acuerdo al material y tamaño de fuga.

Ø Agujero	Material del tubo	Exponente de fuga	Caudal de fuga a presión de		
			50 m	40 m	30 m
6 mm	Rígido (por ejemplo acero, fierro forjado,...)	0,5	1.800 m ³ /h	1.610 m ³ /h	1.394 m ³ /h
6 mm	Flexible (por ejemplo, PE, PVC...)	1,5	1.800 m ³ /h	1.288 m ³ /h	837 m ³ /h

Fuente: (VAG, GIZ, 2009)

La fórmula utilizada para realizar este cálculo se encuentra en capítulo 2.2.1 ecuación (1). Este método para reducir las pérdidas de agua resulta económico puesto que, solamente reduciendo la presión en una red de

distribución, se podrá bajar la presión. Un promedio de reducción del 10% de presión, permitirá un 5%-15% de reducción de caudal de fugas lo cual podría llegar a ser significativo.

Sin embargo, se debe considerar no presentar presiones por debajo del punto crítico, el cual muestra la presión más baja en una determinada área. Se debe asegurar una presión de servicio mínima en el punto crítico, la misma que servirá en el resto de zonas. De esa manera se evita una presión excesiva lo cual no ayuda a disminuir las pérdidas.

2.3.1. Beneficios de la gestión de presión

El manejo de la gestión de presión no ayuda simplemente a reducir las pérdidas de agua reales, sino se ven beneficiados otros factores, como se aprecia en la *Tabla 6*:

Tabla 6. Beneficios de la gestión de presión.

Gestión de presión: reducción de presiones promedio y máximas en exceso						
Beneficios para la conservación		Beneficios para la empresa de agua			Beneficios para el cliente	
Fugas reducidas		Frecuencia reducida de estallidos y fugas				
Consumo reducido	Caudales reducidos de fugas y estallidos	Costos de reparación reducidos en las troncales y servicios	Renovaciones diferidas y mayor vida de activos	Costo reducido del control activo de fugas	Menos quejas de clientes	Menos problemas en las tuberías y aparatos de los clientes

Fuente: (VAG, GIZ, 2009)

Los beneficios que ofrece este método es la conservación del agua permitiendo así reducir las fugas. De igual manera, la empresa de agua se beneficia ya que no existirán gran cantidad de tuberías dañadas por exceso de presiones lo cual a su vez aumenta la vida útil de las tuberías en la red de distribución. Y a su vez, los clientes se benefician al tener un consumo continuo.

Asimismo, existen otros beneficios tales como:

- Mayor número de clientes con suministro de agua.
- Mayor duración de suministro de agua.

- Consumo de energía reducido.

No obstante, se debe tener presente que esta reducción de presión no es la solución para la reducción de las pérdidas reales, solo es una manera de aliviar los impactos. La gestión de presión ayuda a las empresas de agua con altos niveles de fuga a recuperar inversión a corto plazo más no eliminar por completo el problema.

2.3.2. Factores importantes para la gestión de presión

Uno de los puntos clave para la gestión de presión es la importancia de presiones consistentes con variaciones mínimas. Al existir variaciones de presión en la red de distribución se provoca una reducción en cuanto a la vida útil de la tubería. Esto ocurre porque al existir suministros intermitentes, las explosiones provocan frecuencias mayores de lo que sería un suministro continuo, considerando la misma presión. Por tal razón, se debe evitar los cambios repentinos de presiones.

Otro factor importante es la relación entre las presiones máximas y frecuencias de nuevas fugas. Algunos datos obtenidos en Reino Unido indican que la frecuencia de ruptura de red varía con las presiones tanto en áreas medidas de distrito individual y para grandes sistemas de suministro.

Cuando se trata de suministros continuos, la frecuencia de ruptura de red aumenta de manera veloz al subir las presiones entre 35 a 40 metros de altura. A continuación, se muestra un gráfico de presión media y frecuencia de fugas el cual muestra que el exceso de presiones en sistemas de suministro continuo provoca frecuencias altas, las cual provoca reparaciones costosas.

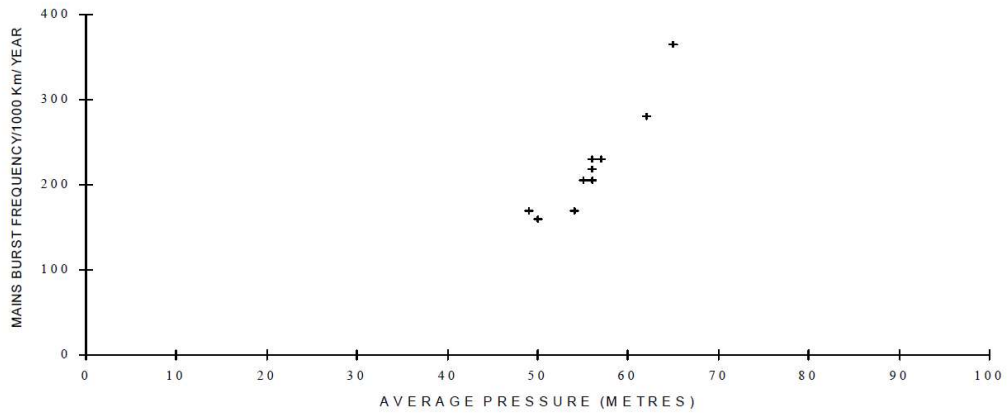


Ilustración 12. Sistema de suministro grande en Gales.

Fuente: (Lambert, 2001)

Por otro lado, el principio de conservación de energía indica que la velocidad con la que el caudal pasa por un orificio varía con la raíz cuadrada de la presión como vemos en la siguiente ecuación (12):

$$V = Cd * 2gP^{0.5} \quad (12)$$

Sin embargo, la presión no es lo único que se debe considerar como variable. El coeficiente de descarga no es un valor constante en fugas individuales puesto que puede cambiar dependiendo del flujo en que se encuentre. Este valor depende del número de Reynolds como se muestra en la Ilustración 13.

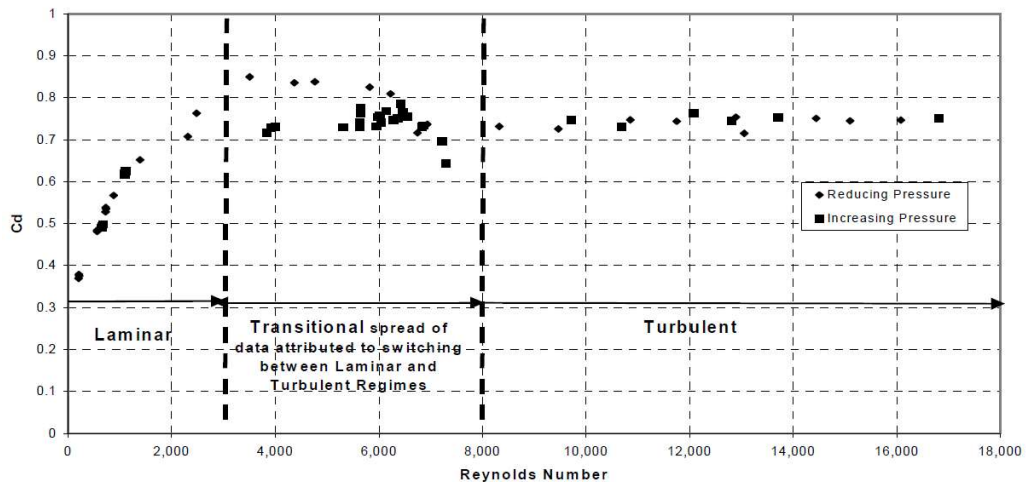


Ilustración 13. Gráfico del número de Reynolds.

Fuente: (*Lambert, 2001*)

Como se observa en la Ilustración 13 el flujo se encuentra dividido en laminar, transitorio y turbulento. En el flujo laminar el coeficiente de descarga aumenta a medida que aumenta el número de Reynolds, mientras que, en el flujo turbulento este se mantiene estable en 0.75, a diferencia del flujo transitorio el cual oscila entre 0.70 a 0.85.

CAPÍTULO 3

3 Pressure Step test

En nuestro país, Ecuador, para la obtención del valor de exponente de fugas, N1, la empresa Interagua C.ltda realiza la prueba del Pressure step test por las noches. Esta prueba es realizada por el departamento de control Agua No Contabilizada.

Esta prueba consiste en cerrar de manera gradual la válvula de abastecimiento de un sector hidráulico con el objetivo de generar una disminución escalonada de la presión de servicio y el caudal suministrado; pares de datos con los cuales se puede obtener el exponente de fugas n1.

3.1 Metodología de la prueba pressure step test realizada por Interagua

La ciudad de Guayaquil se encuentra dividida en 900 sectores hidráulicos, de los cuales se han analizado 97 y agrupado en 63 pruebas de PST. Para poder realizar la prueba se necesitan los siguientes equipos: caudalímetro, dataloggers y válvulas.

Los caudalímetros son equipos que me permiten medir la cantidad de agua que pasa por una determinada tubería. Sin embargo, este instrumento no mide el caudal, sino, mide la velocidad con la que el agua pasa por la tubería y a través de la formulación del equipo y diámetro de la tubería realiza el cálculo de determinar el caudal.

Existen 2 tipos de caudalímetro: el fijo y portátil. Caudalímetro fijo se encuentra instalado en campo el cual tiene una cámara y sensores los cuales miden instantáneamente el caudal que pasa por la tubería. Mientras que el caudalímetro portátil, es un equipo que se puede colocar y luego sacarlo.

La ciudad de Guayaquil se encuentra dividida en diferentes niveles: macrosector, distrito y sectores. El distrito de medición es el conjunto de diferentes sectores hidráulicos con un caudalímetro en el ingreso el cual permite saber el caudal que se entrega a una zona determinada. Existen distritos que no presentan un punto de caudal fijo, es decir, no hay un equipo

instalado en campo que permite verificar continuamente el caudal que pasa por la tubería. Cuando no hay eso hay una cámara de medición la cual me permite instalar un caudalímetro portátil.

Los dataloggers, son equipos que registran diferentes tipos de datos, para esta prueba se utilizan para registrar datos de presión y caudal.



Ilustración 14. Modelo Chello de datalogger para registrar caudal y presión.

Fuente: (Technolog, s.f.)

El datalogger siempre trabaja en conjunto con el caudalímetro. Este tiene conectado un datalogger que almacena y envía datos dependiendo de la configuración que propongamos, la cual puede ser a partir de 1 segundo.

Una vez obtenido los datos de presión y caudal, será posible obtener el N1. El N1 es el valor del exponente de fugas que representa la forma en la que se presenta la fuga en una tubería. Esto se debe a que las formas de las fugas en las tuberías son diferentes de acuerdo al material, tal como se explica en el capítulo 2.3.2

La presión en Guayaquil es alrededor de 20 m.c.a. y esta presión varía dependiendo a la demanda. Es decir, cuando se tenga mayor consumo, se tendrá mayor presión en las tuberías. Mientras que, a menor consumo, habrá menor presión. Por tal motivo, las pruebas de pressure step test se realizan por las noches, debido que se trata de evitar el consumo intencionado, es decir el consumo del usuario.

En un rango de 12 a 4 de la madrugada el consumo debería ser casi 0, sin embargo, esto no ocurre debido a la presencia de fugas. Por ello la prueba se realiza en este periodo de tiempo para realizar una estimación más precisa del caudal que fuga en la red.

Para poder variar la presión en la prueba se necesita tener una válvula de control que permite regular el sistema de distribución de agua potable. De esta manera controlar las presiones de acuerdo al sector.

Al cerrar la válvula se está variando el área de paso del agua. Al aumentar o disminuir el diámetro de la válvula, impide el paso del agua lo que genera una pérdida de carga, la misma que genera una disminución de energía del sistema la cual provoca que baje la presión. Como el caudal está ligado a la presión, el caudal de fuga disminuye.

Una vez la presión se mantenga constante se obtiene dicho valor con su respectivo caudal, luego de eso se cierra un poco la válvula y se vuelve a esperar hasta que la presión se mantenga constante, se obtiene el valor con su respectivo caudal y así sucesivamente.

Para obtener el caudal de pérdidas se resta el caudal de consumo y caudal mínimo de nocturno que se obtiene en la prueba.

Para obtener el caudal de consumo nocturno se debe dividir de acuerdo al tipo de cliente, dicho volumen de consumo lo tiene Interagua ya registrado en su base de datos. Sin embargo, no tiene el consumo nocturno que es el que deseamos obtener.

Para ello Interagua dispone de unos dispositivos llamados micromedidores electrónicos. Estos micromedidores se colocan al azar en algunas casas y se

obtiene el caudal promedio durante el día y caudal mínimo, la relación de ambos valores da como resultado el factor de consumo nocturno el cual me indica el porcentaje de consumo que se utiliza por las noches de acuerdo al tipo de cliente. Este se lo multiplica por un porcentaje de error y se obtiene el valor de consumo.

Ya teniendo estos dos datos, el consumo nocturno y el caudal mínimo nocturno ya se puede obtener el caudal de fugas y hacer uso de la ecuación de FAVAD (10) vista en el capítulo 2.2.4 para obtener el valor de N1.

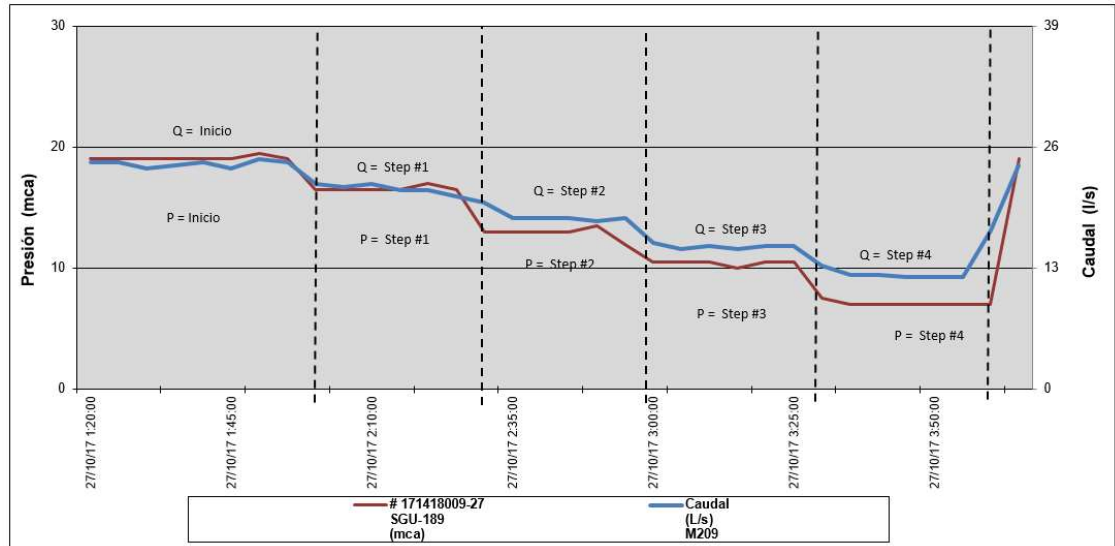
3.2 Análisis de pruebas de Interagua C.Idta

Se evaluarán 42 pruebas, dado que fueron aptas para realizar un análisis de sensibilidad puesto que el resto de pruebas tenían información que no podía ser corroborada.

3.2.1 Prueba pressure step test: Caso de estudio del sector SGU- 189

El presente capítulo evaluará las posibles variables existentes para la obtención del valor del exponente de fugas. Se ha tomado como referencia la prueba en el sector hidráulico SGU 189 realizada el 26 de octubre del 2017.

La siguiente gráfica muestra los diferentes intervalos de presión a diversos periodos durante la prueba. Se observa 5 momentos en los cuales se obtuvieron los datos de caudal con su respectiva presión.



Gráfica 1. Mediciones de Caudal y presión en el punto de entrada para Pressure Step Test

Fuente: Interagua

Para realizar la prueba, primero se debe tener dividido los tipos de clientes con su respectivo caudal promedio contabilizado. Como se observa a continuación:

Tabla 7. Volumen contabilizado dividido por tipos de cliente

Tipo de cliente	No. de conex.	Volumen contabiliz.(+) (m3/mes)	Caudal promedio contabiliz. (+) (l/s)	Consumo promedio unitario (l/conex/h)
Residencial	2.312	26.983	10,41	16,21
Comercial	23	311	0,12	18,78
Oficial	4	78	0,03	27,00
Público	0	0	0,00	0,00
Industrial	0	0	0,00	0,00

Fuente: Interagua

Este caudal promedio contabilizado se lo multiplica con el factor de uso nocturno que se obtiene mediante los micromedidores, en la Tabla 8 se observan los diferentes tipos de abastecimiento con sus respectivos tipos de cliente.

Tabla 8. Factor de uso nocturno dividido por tipos de abastecimiento

Tipo de cliente	Tipo de abastec.	% tipo de abastec. *	Factor de uso nocturno *	Q uso nocturno (l/s)
Residencial	Directo	50%	0,358	1,86
	Tanq. elev.	42%	0,361	1,58
	Cisterna	8%	0,191	0,16
Comercial	Directo	35%	0,520	0,02
	Tanq. elev.	59%	0,406	0,03
	Cisterna	6%	0,469	0,00
Oficial	Directo	0%	0,000	0,00
	Tanq. elev.	0%	0,000	0,00
	Cisterna	100%	0,436	0,01
Público	Directo	0%	0,000	0,00
	Tanq. elev.	0%	0,000	0,00
	Cisterna	0%	0,000	0,00
				3,67

Fuente: Interagua

Una vez obtenido los factores de uso nocturno por cada tipo de cliente en sus diferentes tipos de abastecimiento, se realiza un promedio por cliente el mismo que se multiplica por el caudal promedio contabilizado dando como resultado el caudal de uso nocturno. El mismo que debe multiplicarse un porcentaje de error de micromedición.

Tabla 9. Caudal de uso nocturno de acuerdo al tipo de cliente

Tipo de cliente	Tipo de abastec.	Factor de uso nocturno *	Q uso nocturno (l/s)	(l/s)
Residencial	<i>Todos</i>	0,30	3,16	3,23
Comercial	<i>Todos</i>	0,46	0,06	
Oficial	<i>Todos</i>	0,44	0,01	
Público	<i>Todos</i>	0,00	0,00	
Industrial	<i>Todos</i>	0,00	0,00	0,00

Fuente: Interagua

A continuación, en la Tabla 10 se muestra el análisis que se realiza una vez obtenido todos los datos.

Tabla 10. Procedimientos y resultados del pressure step test

	Hora de inicio	Hora de fin	Presión (mca)	Caudal (l/s)	Consumo (l/s)	Pérdidas (l/s)	Valores calculados de N1 para pérdidas físicas				
							Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5
Inicio		2:00	19,0	24,1	3,5	20,6					
Step 1	2:00	2:30	16,6	21,6	3,5	18,1	0,97				
Step 2	2:30	3:00	13,1	18,2	3,5	14,8	0,90	0,86			
Step 3	3:00	3:30	10,4	15,2	3,5	11,7	0,94	0,93	0,99		
Step 4	3:30	4:00	7,0	12,2	3,5	8,7	0,86	0,85	0,84	0,75	
							N1 Promedio =				0,89

Tipo de cliente	Tipo de abastec.	Factor de uso nocturno *	Q uso nocturno (l/s)	(l/s)
Residencial	Todos	0,30	3,16	3,23
Comercial	Todos	0,46	0,06	
Oficial	Todos	0,44	0,01	
Público	Todos	0,00	0,00	
Industrial	Todos	0,00	0,00	0,00

Uso nocturno no industrial = 3,23 l/s
 Uso nocturno industrial y grandes consumidores = 0,00 l/s
Total de uso nocturno = 3,23 l/s
 Error de micromedición = 7,0%
Uso nocturno estimado (corregido) = 3,5 l/s

Fuente: Interagua

En esta prueba se analizó las posibles variables que pueden existir en la obtención del valor de exponente de fugas. Estas variables fueron:

- Consumo nocturno
- Factor de uso nocturno
- Error de micromedición

En el capítulo 3.2.1.1 se muestra los diferentes datos obtenidos realizando una extrapolación matemática de cada una de las variables que se muestran a continuación:

Variando el consumo medido de la prueba

Para este cálculo se obtuvo un promedio de la diferencia entre consumos medidos a sus diferentes presiones. Luego se sacó un promedio total de cuanto variaba el consumo para cada presión. Este porcentaje se lo restó del 100% y se lo multiplico para cada uno de los consumos nocturnos. Dando como resultado un consumo variable a diferentes horas de la noche.

Tabla 11. Procedimiento y resultado de la prueba variando el consumo nocturno

	Hora de inicio	Hora de fin	Presión (mca)	Caudal (l/s)	Consumo (l/s)	Pérdidas (l/s)	Valores calculados de N1 para pérdidas físicas				
							Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5
Inicio		2:00	19,0	24,1	3,45	20,6					
Step 1	2:00	2:30	16,6	21,6	3,31	18,3	0,91				
Step 2	2:30	3:00	13,1	18,2	3,18	15,1	0,85	0,82			
Step 3	3:00	3:30	10,4	15,2	3,05	12,1	0,88	0,87	0,93		
Step 4	3:30	4:00	7,0	12,2	2,93	9,2	0,81	0,79	0,78	0,69	
Step 5											
N1 Promedio =											0,8319

Tipo de cliente	Tipo de abastec.	Factor de uso nocturno *	Q uso nocturno (l/s)	(l/s)
Residencial	Todos	0,30	3,16	3,23
Comercial	Todos	0,46	0,06	
Oficial	Todos	0,44	0,01	
Público	Todos	0,00	0,00	
Industrial	Todos	0,00	0,00	0,00

Uso nocturno no industrial = 3,23 l/s
 Uso nocturno industrial y grandes consumidores = 0,00 l/s
Total de uso nocturno = 3,23 l/s
 Error de micromedición = 7,0%
Uso nocturno estimado (corregido) = 3,5 l/s

Fuente: Interagua

Variación del porcentaje de error de micromedición

En este análisis se consideró la media de los distritos, siendo así un aumento del porcentaje de error de micromedición del 8.8% para analizar que tanto influye en la obtención del N1.

Tabla 12. Procedimientos y resultados del pressure step test aumentando el porcentaje de error de micromedición como se observa a continuación.

	Hora de inicio	Hora de fin	Presión (mca)	Caudal (l/s)	Consumo (l/s)	Pérdidas (l/s)	Valores calculados de N1 para pérdidas físicas				
							Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5
Inicio		2:00	19,0	24,1	3,51	20,57					
Step 1	2:00	2:30	16,6	21,6	3,51	18,07	0,97				
Step 2	2:30	3:00	13,1	18,2	3,51	14,74	0,90	0,86			
Step 3	3:00	3:30	10,4	15,2	3,51	11,65	0,94	0,93	1,00		
Step 4	3:30	4:00	7,0	12,2	3,51	8,65	0,87	0,85	0,85	0,76	
Step 5											
N1 Promedio =											0,8924

Tipo de cliente	Tipo de abastec.	Factor de uso nocturno *	Q uso nocturno (l/s)	(l/s)
Residencial	Todos	0,30	3,16	3,23
Comercial	Todos	0,46	0,06	
Oficial	Todos	0,44	0,01	
Público	Todos	0,00	0,00	
Industrial	Todos	0,00	0,00	0,00

Uso nocturno no industrial =	3,23 l/s
Uso nocturno industrial y grandes consumidores =	0,00 l/s
Total de uso nocturno =	3,23 l/s
Error de micromedición =	8,8%
Uso nocturno estimado (corregido) =	3,51 l/s

Fuente: Interagua

Variando consumo nocturno y aumentado porcentaje de error de micromedición

Tabla 13. Procedimientos y resultados del pressure step test aumentando el porcentaje de error de micromedición y variando consumo.

	Hora de inicio	Hora de fin	Presión (mca)	Caudal (l/s)	Consumo (l/s)	Pérdidas (l/s)	Valores calculados de N1 para pérdidas físicas				
							Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5
Inicio		2:00	19,0	24,1	3,51	20,57					
Step 1	2:00	2:30	16,6	21,6	3,37	18,21	0,91				
Step 2	2:30	3:00	13,1	18,2	3,24	15,01	0,85	0,82			
Step 3	3:00	3:30	10,4	15,2	3,11	12,06	0,88	0,87	0,93		
Step 4	3:30	4:00	7,0	12,2	2,98	9,18	0,81	0,79	0,78	0,69	
Step 5											
							N1 Promedio =				0,8344

Tipo de cliente	Tipo de abastec.	Factor de uso nocturno *	Q uso nocturno (l/s)	(l/s)
Residencial	Todos	0,30	3,16	3,23
Comercial	Todos	0,46	0,06	
Oficial	Todos	0,44	0,01	
Público	Todos	0,00	0,00	
Industrial	Todos	0,00	0,00	0,00

Uso nocturno no industrial = 3,23 l/s
 Uso nocturno industrial y grandes consumidores = 0,00 l/s
Total de uso nocturno = 3,23 l/s
 Error de micromedición = **8,8%**
Uso nocturno estimado (corregido) = 3,51 l/s

Fuente: Interagua

Variando el factor de uso nocturno

En este análisis se consideró constante el factor de uso nocturno considerando el mayor y menor factor, de ese analizar que tanto influye ambos casos en la obtención del N1.

Tabla 14. Procedimientos y resultados del pressure step test considerando constante el mayor factor de uso nocturno para todo tipo de cliente.

	Hora de inicio	Hora de fin	Presión (mca)	Caudal (l/s)	Consumo (l/s)	Pérdidas (l/s)	Valores calculados de N1 para pérdidas físicas				
							Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5
Inicio		2:00	19,0	24,1	5,20	18,88					
Step 1	2:00	2:30	16,6	21,6	5,20	16,38	1,06				
Step 2	2:30	3:00	13,1	18,2	5,20	13,05	1,00	0,96			
Step 3	3:00	3:30	10,4	15,2	5,20	9,97	1,06	1,05	1,15		
Step 4	3:30	4:00	7,0	12,2	5,20	6,97	1,00	0,99	1,00	0,91	
Step 5											
N1 Promedio =											1,0177

Tipo de cliente	Tipo de abastec.	Factor de uso nocturno *	Q uso nocturno (l/s)	(l/s)
Residencial	Todos	0,46	4,79	4,86
Comercial	Todos	0,46	0,06	
Oficial	Todos	0,46	0,01	
Público	Todos	0,00	0,00	
Industrial	Todos	0,00	0,00	

Uso nocturno no industrial = 4,86 l/s
 Uso nocturno industrial y grandes consumidores = 0,00 l/s
Total de uso nocturno = 4,86 l/s
 Error de micromedición = 7,0%
Uso nocturno estimado (corregido) = 5,20 l/s

Fuente: Interagua

Tabla 15. Procedimientos y resultados del pressure step test considerando constante el menor factor de uso nocturno para todo tipo de cliente.

	Hora de inicio	Hora de fin	Presión (mca)	Caudal (l/s)	Consumo (l/s)	Pérdidas (l/s)	Valores calculados de N1 para pérdidas físicas				
							Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5
Inicio		2:00	19,0	24,1	3,39	20,69					
Step 1	2:00	2:30	16,6	21,6	3,39	18,19	0,96				
Step 2	2:30	3:00	13,1	18,2	3,39	14,86	0,90	0,86			
Step 3	3:00	3:30	10,4	15,2	3,39	11,78	0,93	0,92	0,99		
Step 4	3:30	4:00	7,0	12,2	3,39	8,78	0,86	0,84	0,84	0,75	
Step 5											
N1 Promedio =											0,8847

Tipo de cliente	Tipo de abastec.	Factor de uso nocturno *	Q uso nocturno (l/s)	(l/s)
Residencial	Todos	0,30	3,12	3,17
Comercial	Todos	0,30	0,04	
Oficial	Todos	0,30	0,01	
Público	Todos	0,00	0,00	
Industrial	Todos	0,00	0,00	0,00

Uso nocturno no industrial = 3,17 l/s
 Uso nocturno industrial y grandes consumidores = 0,00 l/s
Total de uso nocturno = 3,17 l/s
 Error de micromedición = 7,0%
Uso nocturno estimado (corregido) = 3,39 l/s

Fuente: Interagua

Variando el factor de uso nocturno al mayor de los 3 tipos de cliente y aumentando el porcentaje de error de micromedición

Tabla 16. Procedimientos y resultados del pressure step test considerando constante el mayor factor de uso nocturno para todo tipo de cliente y aumentando el % error de micromedición

	Hora de inicio	Hora de fin	Presión (mca)	Caudal (l/s)	Consumo (l/s)	Pérdidas (l/s)	Valores calculados de N1 para pérdidas físicas				
							Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5
Inicio		2:00	19,0	24,1	5,54	18,54					
Step 1	2:00	2:30	16,6	21,6	5,54	16,04	1,08				
Step 2	2:30	3:00	13,1	18,2	5,54	12,71	1,02	0,99			
Step 3	3:00	3:30	10,4	15,2	5,54	9,63	1,08	1,08	1,18		
Step 4	3:30	4:00	7,0	12,2	5,54	6,63	1,03	1,02	1,04	0,95	
Step 5											
N1 Promedio =											1,0477

Tipo de cliente	Tipo de abastec.	Factor de uso nocturno *	Q uso nocturno (l/s)	(l/s)
Residencial	Todos	0,46	4,79	4,86
Comercial	Todos	0,46	0,06	
Oficial	Todos	0,46	0,01	
Público	Todos	0,00	0,00	
Industrial	Todos	0,00	0,00	0,00

Uso nocturno no industrial = 4,86 l/s
 Uso nocturno industrial y grandes consumidores = 0,00 l/s
Total de uso nocturno = 4,86 l/s
 Error de micromedición = 8,8%
Uso nocturno estimado (corregido) = 5,29 l/s

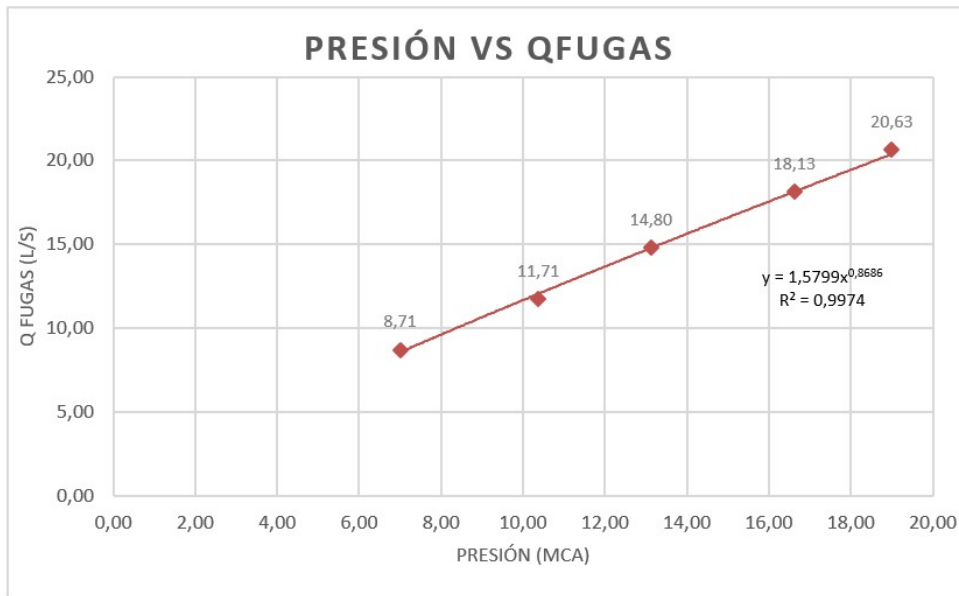
Fuente: Interagua

3.2.1.1 Extrapolación matemática de la prueba SGU189

Se realizó una serie de combinaciones de las variables de fugas, de ese modo buscar una correlación más exacta y valores de N1 sean lo más semejantes posibles.

Extrapolación matemática de la prueba inicial

En la Gráfica 2 podemos observar como el valor de n1 obtenido por la prueba y por el análisis de sensibilidad tiene una diferencia del 2.3%. Se realizará el mismo análisis variando los otros parámetros para buscar si la correlación aumenta o disminuye.



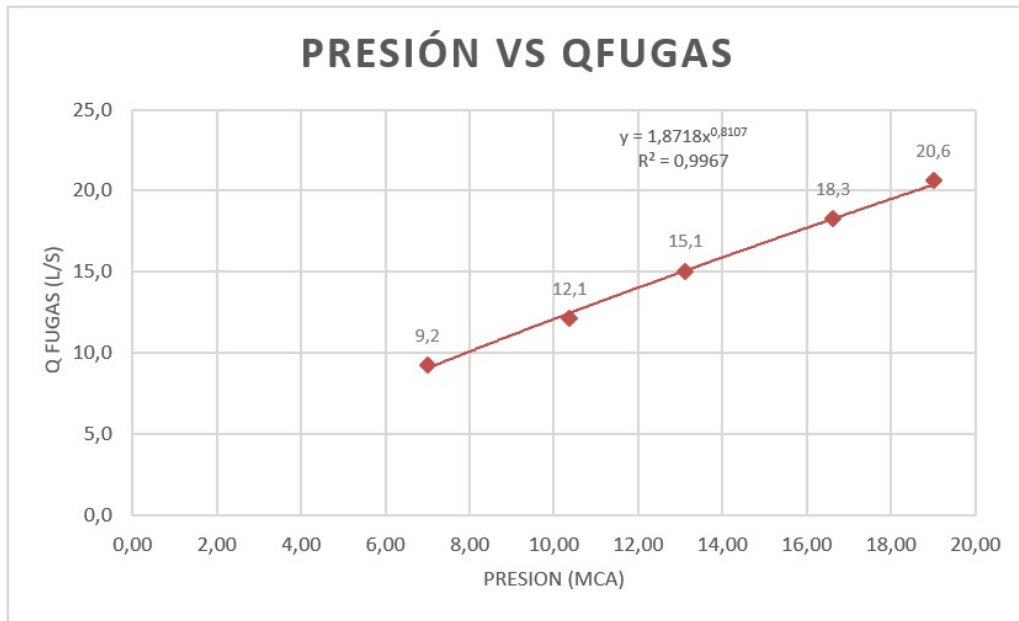
Exponente N1		
Prueba	0,8887	2,3%
A. sensibilidad	0,8686	

Gráfica 2. Análisis de sensibilidad de prueba inicial de pressure step test

Fuente: Joselyne Alvarado

Extrapolación matemática variando el consumo nocturno

En la Gráfica 3 podemos observar que la correlación da más lejos de 1 que si se utilizara la propuesta inicial de la prueba. Al igual que el porcentaje de diferencia entre los valores de N1.



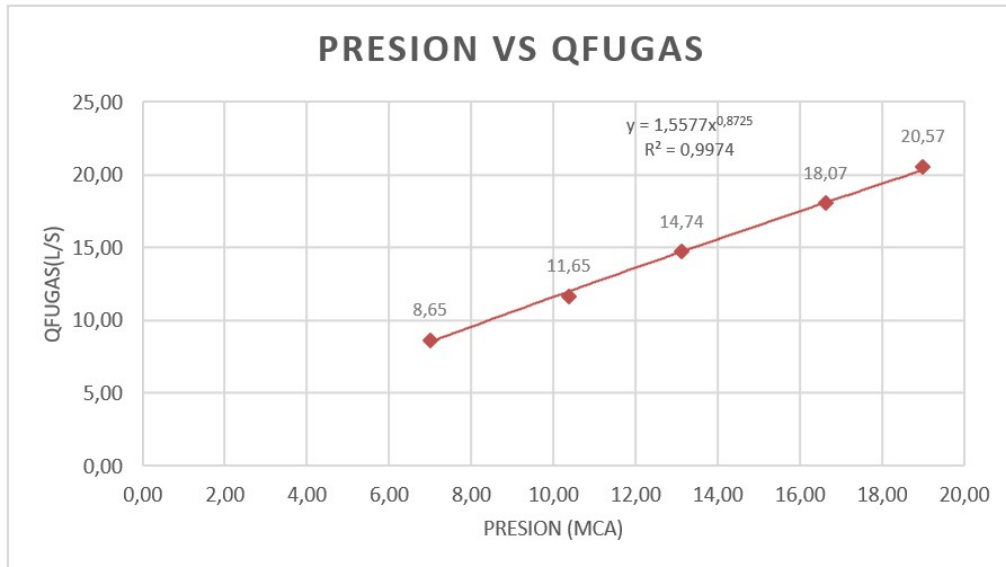
Exponente N1		
Prueba	0,8319	2,6%
A. sensibilidad	0,8107	

Gráfica 3. Variación de resultados variando el consumo nocturno

Fuente: Joselyne Alvarado

Extrapolación matemática aumentando el porcentaje de error de micromedición

Al subir el porcentaje de error micromedidor, la correlación se acerca de 1 y es menor el porcentaje de diferencia de N1 entre la prueba inicial y análisis de sensibilidad.



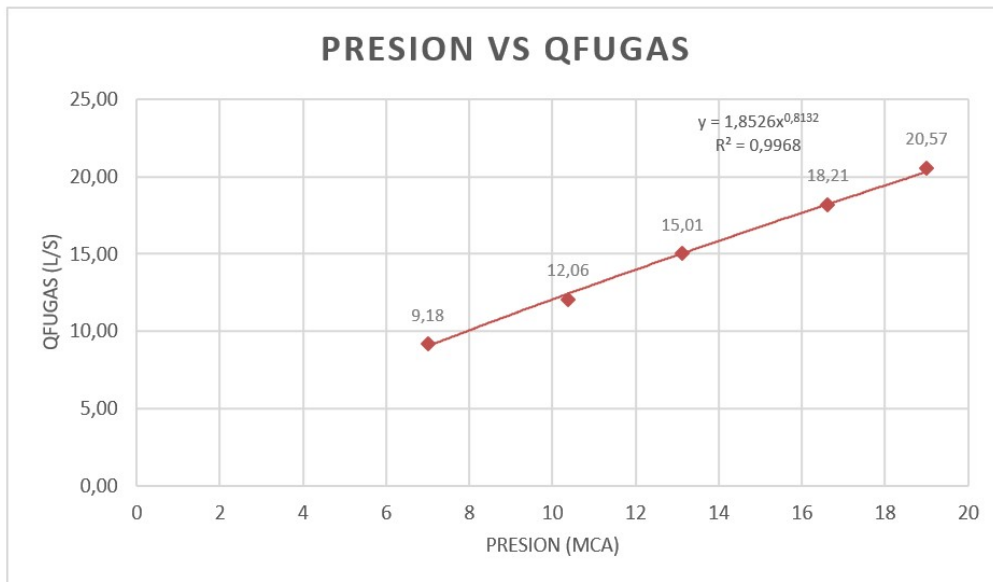
Exponente N1		
Prueba	0,8924	2,3%
A. Sensibilidad	0,8725	

Gráfica 4. Variación de resultados aumentando el porcentaje de error de micromedición

Fuente: Joselyne Alvarado

Extrapolación matemática aumentando el porcentaje de error de micromedición y variando consumo nocturno

Como observamos en la Gráfica 5 , si subimos el porcentaje de error de micromedidor y colocamos el promedio de caudal medido, no se acerca más a 1 la correlación como paso en método de solo aumentar el % de error de micromedidor. Asimismo, el valor de N1 se diferencia bastante entre valores de la prueba inicial y análisis de sensibilidad.



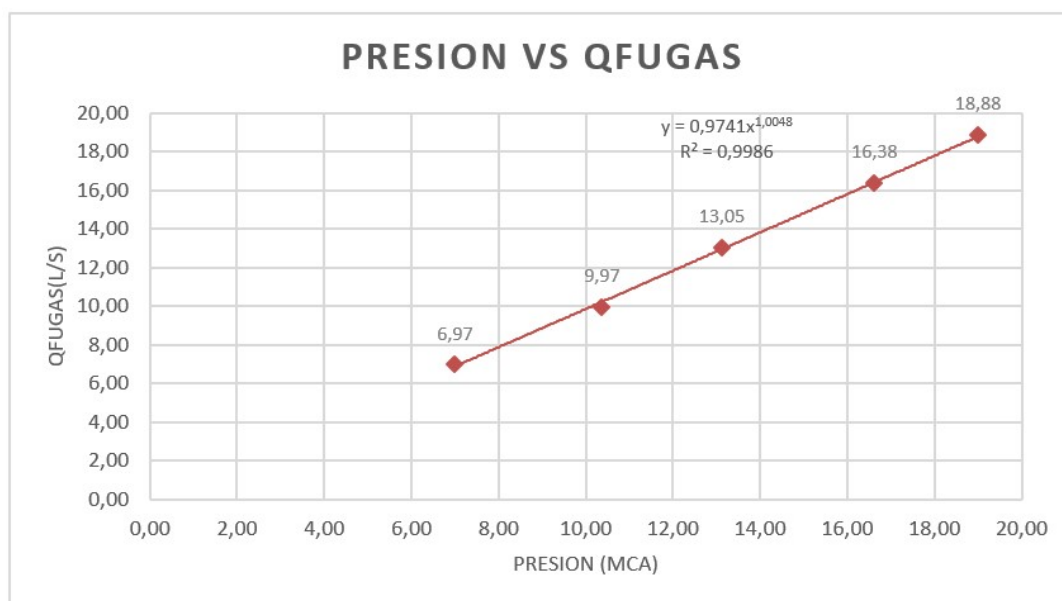
Exponente N1		
Prueba	0,8344	
A. Sensibilidad	0,8132	2,6%

Gráfica 5. Variación de resultados aumentando el porcentaje de error de micromedición y variando consumo nocturno

Fuente: Joselyne Alvarado

Extrapolación matemática considerando el mayor factor de uso nocturno

Como se observa en la Gráfica 6, al considerar el mayor factor de uso nocturno de los 3 tipos de clientes, la correlación se acerca más a 1 y el valor de N1 tiene poco % de diferencia entre la prueba y análisis de sensibilidad. Además de tener un porcentaje menor que la prueba inicial.



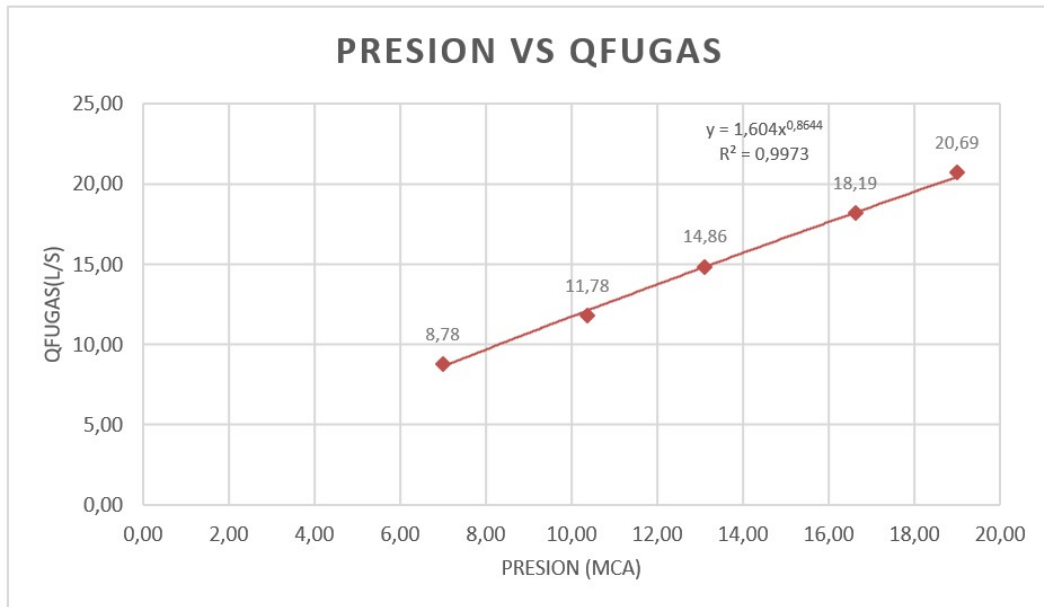
Exponente N1		
Prueba	1,0177	1,3%
A. Sensibilidad	1,0048	

Gráfica 6. Variación de resultados considerando el mayor factor de uso nocturno

Fuente: Joselyne Alvarado

Extrapolación matemática considerando el menor factor de uso nocturno

Como se observa en la Gráfica 7, al considerar el menor factor de uso nocturno de los 3 tipos de clientes, la correlación no se acerca a 1 tanto como cuando se utilizó el mayor factor de uso nocturno. También se observa que el valor de N1 se mantiene igual que la prueba inicial.



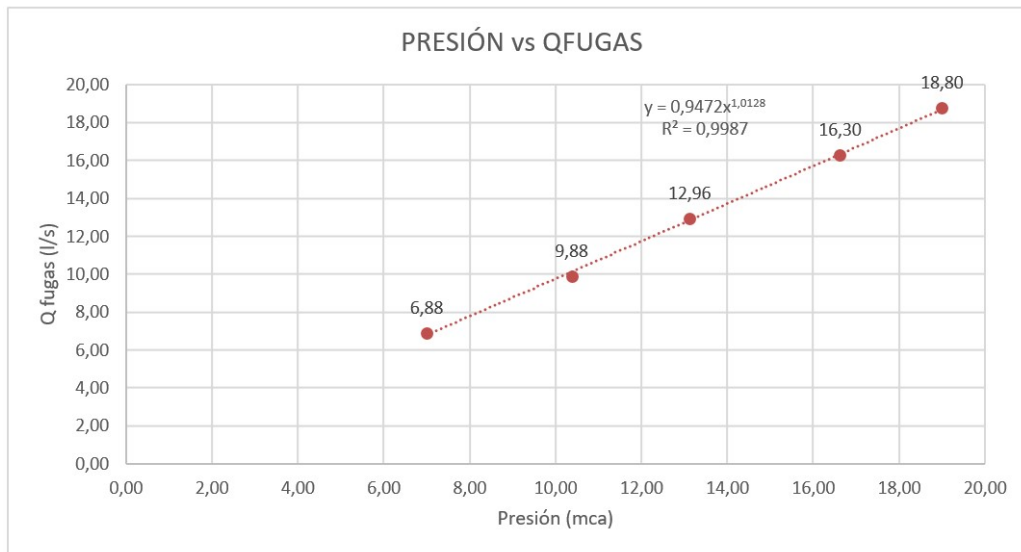
Exponente N1		
Prueba	0,8847	
A. Sensibilidad	0,8644	2,3%

Gráfica 7. Variación de resultados considerando el menor factor de uso nocturno

Fuente: Joselyne Alvarado

Extrapolación matemática aumentando el porcentaje de error de micromedición y considerando el mayor factor de uso nocturno

En este análisis si consideramos el mayor factor de uso nocturno de los 3 tipos de clientes, la correlación se acerca más a cero y el valor de N1 tiene poco % de diferencia. Sin embargo, si se asume a la vez, un valor de micromedición mayor al 7% es decir un 8.8% da aún más cerca el valor a 1 y menor el porcentaje de diferencia del N1 como podemos ver en la gráfica superior.



Exponente N1		
Prueba	1,0253	1,2%
A. Sensibilidad	1,0128	

Gráfica 8. Variación de resultados aumentando el porcentaje de error de micro medición y considerando el mayor factor de uso nocturno

Fuente: Joselyne Alvarado

3.2.2 Pruebas de Pressure step ejecutado por Interagua

En el presente capítulo se identificará cuantos exponentes de N1 se relacionan a la teoría de Favad.

Tabla 17. Datos de prueba pressure step test dividida por sectores hidráulicos.

Cod_Sec	Distrito	Sector Hidráulico	L. Red (Km)	Na (u)	AC	ACERO	HIERRO	PEAD	PVC	OTRO	Material priorizante	N1
1,00	CTP-1	CTP-001	35,24	3480	0,00%	0,00%	1,35%	2,87%	95,78%	0,00%	PVC	3,06
5,00	CTP-1	CTP-005	16,94	1520	0,94%	0,44%	35,29%	49,13%	14,20%	0,00%	PEAD	0,58
8,00	CTP-1	CTP-008	17,06	1430	0,00%	0,00%	0,39%	77,05%	4,76%	17,80%	PEAD	0,40
10,00	CRO-1	CRO-010	18,02	2092	16,75%	0,02%	53,64%	17,19%	12,41%	0,00%	HIERRO	0,98
11,00	CRO-1	CRO-011	8,42	852	2,29%	0,00%	79,91%	3,37%	14,43%	0,00%	HIERRO	0,98
72,00	CTP-2	CTP-072	12,69	1271	5,29%	0,10%	0,04%	89,91%	4,65%	0,00%	PEAD	0,74
75.78.79.80	CTP-2	CTP-075-078-079-080	27,88	4600	0,00%	0,00%	13,01%	7,27%	79,72%	0,00%	PVC	0,70
108,00	S72-4	S72-108	3,37	301	90,18%	2,08%	0,06%	2,13%	5,56%	0,00%	AC	0,93
112,00	SRO-1	SRO-112	5,88	1028	76,41%	0,00%	3,71%	6,42%	13,45%	0,00%	AC	2,61
113,00	S72-3	S72-113	7,43	519	6,31%	0,00%	2,74%	3,11%	87,84%	0,00%	PVC	0,66
118,00	SRO-1	SRO-118	1,82	229	90,47%	0,00%	0,00%	0,92%	8,61%	0,00%	AC	2,61
132,00	SRO-1	SRO-132	10,63	1370	0,80%	0,00%	26,64%	0,51%	72,05%	0,00%	PVC	0,86
133,00	S72-4	S72-133	4,53	726	0,00%	0,00%	16,52%	10,33%	73,15%	0,00%	PVC	0,98
134,00	S72-4	S72-134	2,68	187	67,05%	0,00%	12,96%	7,69%	12,31%	0,00%	AC	0,93
136,00	S72-4	S72-136	4,39	710	0,00%	0,00%	38,18%	0,43%	61,39%	0,00%	PVC	0,86
137,00	S72-4	S72-137	6,28	922	0,00%	0,00%	31,17%	3,07%	65,77%	0,00%	PVC	0,58
138,00	S72-4	S72-138	7,18	786	0,04%	0,00%	7,60%	24,32%	68,04%	0,00%	PVC	0,98
139,00	S72-4	S72-139	3,30	361	0,00%	0,00%	12,62%	0,79%	86,59%	0,00%	PVC	0,98
140,00	S72-4	S72-140	4,52	573	0,00%	0,00%	11,45%	33,46%	55,08%	0,00%	PVC	0,98
141,00	S72-4	S72-141	6,21	1106	0,00%	0,00%	4,68%	18,02%	77,30%	0,00%	PVC	0,98
142,00	S72-4	S72-142	7,20	1203	0,00%	0,00%	0,00%	27,52%	72,48%	0,00%	PVC	0,98

143,00	S72-4	S72-143	5,44	842	0,00%	0,00%	8,50%	12,01%	79,49%	0,00%	PVC	0,72
144,00	S72-4	S72-144	4,61	480	0,00%	0,00%	26,28%	5,10%	68,62%	0,00%	PVC	0,75
145,00	S72-4	S72-145	5,48	424	0,00%	0,00%	1,67%	7,61%	90,71%	0,00%	PVC	0,62
146,00	S72-4	S72-146	7,08	1214	0,00%	0,00%	6,56%	9,08%	84,36%	0,00%	PVC	0,75
147,00	S72-4	S72-147	0,89	148	0,00%	0,00%	25,11%	4,22%	70,67%	0,00%	PVC	0,70
148,00	S72-4	S72-148	9,11	693	2,47%	0,00%	0,75%	69,49%	27,29%	0,00%	PEAD	0,54
151,00	S72-4	S72-151	3,98	530	2,07%	0,00%	0,16%	11,48%	86,28%	0,00%	PVC	0,55
152,00	S72-3	S72-152	5,63	921	0,00%	0,00%	8,19%	6,24%	85,57%	0,00%	PVC	0,80
154,00	SRO-2	SRO-154	5,02	695	0,00%	0,00%	26,56%	2,47%	70,97%	0,00%	PVC	0,54
164,00	SGU-1	SGU-164	16,23	1176	0,00%	0,00%	3,12%	85,54%	11,33%	0,00%	PEAD	0,90
173,00	SGU-1	SGU-173	27,92	2344	0,00%	0,01%	8,92%	85,62%	5,45%	0,00%	PEAD	1,52
186,00	SGU-7	SGU-186	6,70	677	0,00%	0,00%	14,38%	65,92%	19,70%	0,00%	PEAD	1,00
189,00	SGU-5	SGU-189	26,01	2322	0,00%	0,00%	5,31%	92,66%	2,03%	0,00%	PEAD	0,89
190,00	SGU-1	SGU-190	10,05	1068	0,00%	0,00%	1,44%	89,64%	8,93%	0,00%	PEAD	0,80
198,00	S72-4	S72-198	8,39	930	0,00%	0,00%	5,28%	84,73%	9,99%	0,00%	PEAD	0,83
387,00	N72-12	N72-387	15,52	1889	0,00%	0,00%	0,01%	2,74%	97,25%	0,00%	PVC	0,88
388,00	N72-12	N72-388	17,66	1485	0,00%	0,00%	0,00%	2,86%	97,14%	0,00%	PVC	0,88
390,00	N72-21	N72-390	7,58	1143	0,00%	0,09%	0,00%	2,14%	97,77%	0,00%	PVC	2,50
401,00	NRO-5	NRO-401	10,06	1241	2,90%	0,00%	0,01%	87,95%	9,14%	0,00%	PEAD	1,97
494,00	N72-4	N72-494	9,44	1008	0,00%	0,10%	3,72%	5,03%	91,14%	0,00%	PVC	0,61

Fuente: Interagua

En la Tabla 17 se puede observar los diferentes sectores con sus respectivas características de material. De igual manera, se encuentra el valor del exponente N1 para cada sector. A continuación, se dividirá la tabla para revisar si guarda relación el material de tubería predominante con el exponente n1 calculado y cuales no guardan relación.

Como podemos observar en la Tabla 18, existe una gran cantidad de valores de N1 que no se encuentran afectados por material de tubería. Esto puede ocurrir teóricamente cuando las fugas están formadas por agujeros y/o grietas redondas, como se revisó en el capítulo 2.2.2. Si la fuga fuera dada por grietas longitudinales, probablemente el valor de N1 sería mayor.

Tabla 18. Resultados del valor de exponente de fugas de $0.80 \geq N1 \geq 0.4$ para tuberías flexibles

Cod_Sec	Distrito	Sector Hidráulico	L. Red (Km)	Na (u)	AC	ACERO	HIERRO	PEAD	PVC	OTRO	Material priorizante	N1
5,00	CTP-1	CTP-005	16,94	1520	0,94%	0,44%	35,29%	49,13%	14,20%	0,00%	PEAD	0,58
8,00	CTP-1	CTP-008	17,06	1430	0,00%	0,00%	0,39%	77,05%	4,76%	17,80%	PEAD	0,40
72,00	CTP-2	CTP-072	12,69	1271	5,29%	0,10%	0,04%	89,91%	4,65%	0,00%	PEAD	0,74
73,74	CTP-2	CTP-073-074	28,15	4605	0,36%	0,01%	9,01%	9,52%	81,09%	0,00%	PVC	0,70
75.78.79.80	CTP-2	CTP-075-078-079-080	27,88	4600	0,00%	0,00%	13,01%	7,27%	79,72%	0,00%	PVC	0,70
113,00	S72-3	S72-113	7,43	519	6,31%	0,00%	2,74%	3,11%	87,84%	0,00%	PVC	0,66
137,00	S72-4	S72-137	6,28	922	0,00%	0,00%	31,17%	3,07%	65,77%	0,00%	PVC	0,58
143,00	S72-4	S72-143	5,44	842	0,00%	0,00%	8,50%	12,01%	79,49%	0,00%	PVC	0,72
144,00	S72-4	S72-144	4,61	480	0,00%	0,00%	26,28%	5,10%	68,62%	0,00%	PVC	0,75
145,00	S72-4	S72-145	5,48	424	0,00%	0,00%	1,67%	7,61%	90,71%	0,00%	PVC	0,62
146,00	S72-4	S72-146	7,08	1214	0,00%	0,00%	6,56%	9,08%	84,36%	0,00%	PVC	0,75
147,00	S72-4	S72-147	0,89	148	0,00%	0,00%	25,11%	4,22%	70,67%	0,00%	PVC	0,70
148,00	S72-4	S72-148	9,11	693	2,47%	0,00%	0,75%	69,49%	27,29%	0,00%	PEAD	0,54
151,00	S72-4	S72-151	3,98	530	2,07%	0,00%	0,16%	11,48%	86,28%	0,00%	PVC	0,55
152,00	S72-3	S72-152	5,63	921	0,00%	0,00%	8,19%	6,24%	85,57%	0,00%	PVC	0,80
154,00	SRO-2	SRO-154	5,02	695	0,00%	0,00%	26,56%	2,47%	70,97%	0,00%	PVC	0,54
190,00	SGU-1	SGU-190	10,05	1068	0,00%	0,00%	1,44%	89,64%	8,93%	0,00%	PEAD	0,80
494,00	N72-4	N72-494	9,44	1008	0,00%	0,10%	3,72%	5,03%	91,14%	0,00%	PVC	0,61

Fuente: Interagua

Como podemos observar en la Tabla 19, el material de tubería que predomina son las rígidas. Normalmente el valor de N1 teórico para tuberías rígidas se encuentra entre 0.5 a 1. Además de depender el valor de N1 del material, depende de la forma del agujero. Por ello, los valores de N1 se encuentran más cercanos a 1, una de las razones podría deberse al tipo de grieta que presente. Igualmente, se encuentra dentro del rango especificado para tuberías rígidas según la teoría de FAVAD.

Tabla 19. Resultados del valor de exponente de fugas de $1 \geq N1 \geq 0.8$ para tuberías rígidas.

Cod_Sec	Distrito	Sector Hidráulico	L. Red (Km)	Na (u)	AC	ACERO	HIERRO	PEAD	PVC	OTRO	Material priorizante	N1
10,00	CRO-1	CRO-010	18,02	2092	16,75%	0,02%	53,64%	17,19%	12,41%	0,00%	HIERRO	0,98
11,00	CRO-1	CRO-011	8,42	852	2,29%	0,00%	79,91%	3,37%	14,43%	0,00%	HIERRO	0,98
108,00	S72-4	S72-108	3,37	301	90,18%	2,08%	0,06%	2,13%	5,56%	0,00%	AC	0,93
134,00	S72-4	S72-134	2,68	187	67,05%	0,00%	12,96%	7,69%	12,31%	0,00%	AC	0,93

Fuente: Interagua

En la Tabla 20 se muestran los resultados de las pruebas para obtener el valor N1 para tuberías donde predomina el material flexible. Estos valores se encuentran dentro de lo normal dado que presentan tuberías tanto flexibles como rígidas, pero en mayor cantidad tuberías flexibles. Por tal motivo, el valor de N1 no se encuentra dentro del rango especificado para tuberías flexibles, pero si es mayor que el valor mínimo esperado para tuberías rígidas.

Tabla 20. Resultados del valor de exponente de fugas de $1 \geq N1 \geq 0.8$ para tuberías flexibles.

Cod_Sec	Distrito	Sector Hidráulico	L. Red (Km)	Na (u)	AC	ACERO	HIERRO	PEAD	PVC	OTRO	Material priorizante	N1
132,00	SRO-1	SRO-132	10,63	1370	0,80%	0,00%	26,64%	0,51%	72,05%	0,00%	PVC	0,86
133,00	S72-4	S72-133	4,53	726	0,00%	0,00%	16,52%	10,33%	73,15%	0,00%	PVC	0,98
136,00	S72-4	S72-136	4,39	710	0,00%	0,00%	38,18%	0,43%	61,39%	0,00%	PVC	0,86
138,00	S72-4	S72-138	7,18	786	0,04%	0,00%	7,60%	24,32%	68,04%	0,00%	PVC	0,98
139,00	S72-4	S72-139	3,30	361	0,00%	0,00%	12,62%	0,79%	86,59%	0,00%	PVC	0,98
140,00	S72-4	S72-140	4,52	573	0,00%	0,00%	11,45%	33,46%	55,08%	0,00%	PVC	0,98
141,00	S72-4	S72-141	6,21	1106	0,00%	0,00%	4,68%	18,02%	77,30%	0,00%	PVC	0,98
142,00	S72-4	S72-142	7,20	1203	0,00%	0,00%	0,00%	27,52%	72,48%	0,00%	PVC	0,98
164,00	SGU-1	SGU-164	16,23	1176	0,00%	0,00%	3,12%	85,54%	11,33%	0,00%	PEAD	0,90
186,00	SGU-7	SGU-186	6,70	677	0,00%	0,00%	14,38%	65,92%	19,70%	0,00%	PEAD	1,00
189,00	SGU-5	SGU-189	26,01	2322	0,00%	0,00%	5,31%	92,66%	2,03%	0,00%	PEAD	0,89
198,00	S72-4	S72-198	8,39	930	0,00%	0,00%	5,28%	84,73%	9,99%	0,00%	PEAD	0,83
387,00	N72-12	N72-387	15,52	1889	0,00%	0,00%	0,01%	2,74%	97,25%	0,00%	PVC	0,88
388,00	N72-12	N72-388	17,66	1485	0,00%	0,00%	0,00%	2,86%	97,14%	0,00%	PVC	0,88

Fuente: Interagua

En la Tabla 21 se puede observar valores de N1 mayores a 1.5 como indica la teoría de FAVAD. Sin embargo, considerar un valor de exponente de fugas superior a 2.5 ya resulta un cálculo poco realista. Cabe recalcar que, a pesar de ser sectores hidráulicos con tuberías mixtas, estas no presentan ni el 10% de tuberías rígidas. Estas pequeñas variaciones se pueden presentar por presencia de tuberías de fondo o por el tipo de flujo que presente cada sector.

Tabla 21. Resultados del valor de exponente de fugas de $N1 > 1$ para tuberías flexibles.

Cod_Sec	Distrito	Sector Hidráulico	L. Red (Km)	Na (u)	AC	ACERO	HIERRO	PEAD	PVC	OTRO	Material priorizante	N1
1,00	CTP-1	CTP-001	35,24	3480	0,00%	0,00%	1,35%	2,87%	95,78%	0,00%	PVC	3,06
173,00	SGU-1	SGU-173	27,92	2344	0,00%	0,01%	8,92%	85,62%	5,45%	0,00%	PEAD	1,52
390,00	N72-21	N72-390	7,58	1143	0,00%	0,09%	0,00%	2,14%	97,77%	0,00%	PVC	2,50
401,00	NRO-5	NRO-401	10,06	1241	2,90%	0,00%	0,01%	87,95%	9,14%	0,00%	PEAD	1,97

Fuente: Interagua

En la Tabla 22 mostrada se puede observar como el valor obtenido en campo no guarda relación con el valor teórico para tuberías rígidas. Esto puede ocurrir debido al tipo de grieta que presente la tubería. Cuando existe problemas de corrosión, los valores de N1 suelen ser más altos del rango teórico para tuberías rígidas, tal como se muestra en la tabla.

Tabla 22 Resultados del valor de exponente de fugas de N1 > 1 para tuberías rígidas

Cod_Sec	Distrito	Sector Hidráulico	L. Red (Km)	Na (u)	AC	ACERO	HIERRO	PEAD	PVC	OTRO	Material priorizante	N1
112,00	SRO-1	SRO-112	5,88	1028	76,41%	0,00%	3,71%	6,42%	13,45%	0,00%	AC	2,61
118,00	SRO-1	SRO-118	1,82	229	90,47%	0,00%	0,00%	0,92%	8,61%	0,00%	AC	2,61

Fuente: Interagua

3.3 Propuesta de mejora

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de diversos análisis realizados para obtener el valor del exponente de fugas. Con el objetivo de identificar si las pruebas realizadas al momento están bien ejecutadas o si hay una posibilidad de mejora.

3.3.1 Aspectos a considerar dentro de la propuesta de mejora

Luego de analizar las posibles variables que pueden existir en la obtención del valor de exponente de fugas en la prueba SGU 189 mediante método de extrapolación matemática, se encontró dos métodos adicionales. A continuación, se explica cómo funciona cada uno:

1. Umbral de uso nocturno.

Como se observó en la prueba analizada anteriormente, esta arroja caudales a diferentes presiones. Dentro del análisis del exponente de fugas, se obtiene un consumo mínimo nocturno, el cual es multiplicado con un porcentaje estimado a ser mayor al cincuenta por ciento del valor.

Este resultado de consumo mínimo modificado varía de dos maneras: Si el caudal obtenido es menor que el consumo mínimo modificado, no se debe considerar ese dato de caudal en el análisis de N1, ni para caudales menores; y si el caudal es mayor al consumo mínimo modificado, no se realiza ningún cambio en el análisis.

Tabla 23. Presiones y caudales obtenidos en pressure step test y consumo mínimo modificado. Prueba SGU 189

Presión (mca)	Caudal (l/s)		
		Uso nocturno no industrial =	3,23 l/s
		Uso nocturno industrial y grandes consumidores =	0,00 l/s
19,00	24,08	Total de uso nocturno =	3,23 l/s
16,63	21,58	Error de micromedición =	7,0%
13,13	18,25	Uso nocturno estimado (corregido) =	3,45 l/s
10,38	15,17	Consumo mínimo modificado (+50%)	5,18 l/s
7,00	12,17		

Fuente: Interagua

Se observa que el consumo mínimo modificado es menor a los caudales, por ende, no influye en el análisis de N1.

2. Promedio método Interagua

Como se observó en el análisis del capítulo 3.2.1, los resultados del exponente de fugas se obtienen mediante un promedio de todos los valores obtenidos de N1. Sin embargo, se revisará la posibilidad de obtener un promedio no tan detallado sino más general, es decir, solo obtener un valor de N1 por cada etapa y sacar el promedio de los mismos para visualizar los cambios que estos impliquen en el análisis.

Tabla 24. Obtención de N1 método Interagua

Valores calculados de N1 para pérdidas físicas				
Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5
0,97				
0,90	0,86			
0,94	0,93	0,99		
0,86	0,85	0,84	0,75	
N1 Promedio Detallado=				0,889

Fuente: Interagua

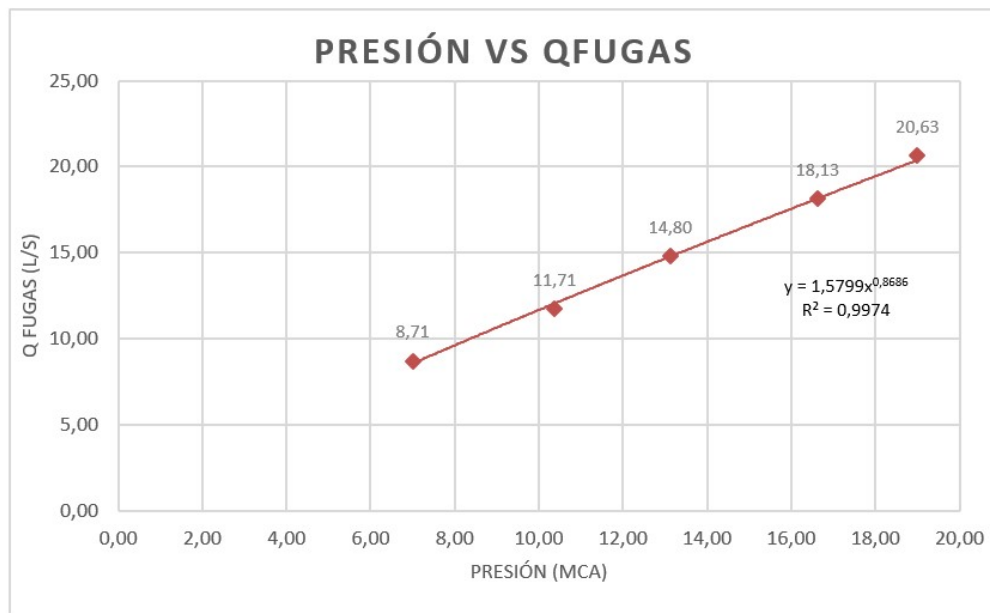
Tabla 25. Obtención de N1 promedio método Interagua

Valores calculados de N1 para pérdidas físicas				
Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5
0,97				
0,90	0,86			
0,94	0,93	0,99		
0,86	0,85	0,84	0,75	
N1 Promedio General=				0,893

Fuente: Interagua

3. Extrapolación matemática por ecuación potencial

Todas las pruebas de pressure step test han sido analizadas mediante la adaptación de la fórmula de FAVAD para obtener el valor del exponente de fugas N1. Sin embargo, otra forma de obtener el valor de N1 es mediante un análisis de sensibilidad. Esto realiza con el objetivo de revisar si existe similitud entre el valor de N1 obtenido por la adaptación de la fórmula de FAVAD y la formulación matemática potencial. De igual manera, revisar que exista una correlación positiva perfecta.



Gráfica 9. Ejemplo de análisis de sensibilidad por Ecuación Potencial

Fuente: Joselyne Alvarado

Por otro lado, las variables que más influenciaron en el valor de N1 fueron:

1. Error de micromedición

El error de micromedición en la prueba analizada era del 7%. Sin embargo, un porcentaje general de error de micromedición para los diferentes distritos es de 8.8%. Por tal motivo, en el siguiente capítulo se analizarán las pruebas de pressure step test considerando un porcentaje de error de micromedición del 8.8%.

2. Factor de uso nocturno.

En la prueba analizada se observó que esta variable muestra una correlación casi exacta al realizar el análisis de sensibilidad. Por ende, se considera que no se debe utilizar un factor diferente de acuerdo al tipo de cliente, sino se debe considerar el mayor factor para cada uno de los clientes. En el siguiente capítulo se observará como influye el cambio del factor de uso nocturno al máximo.

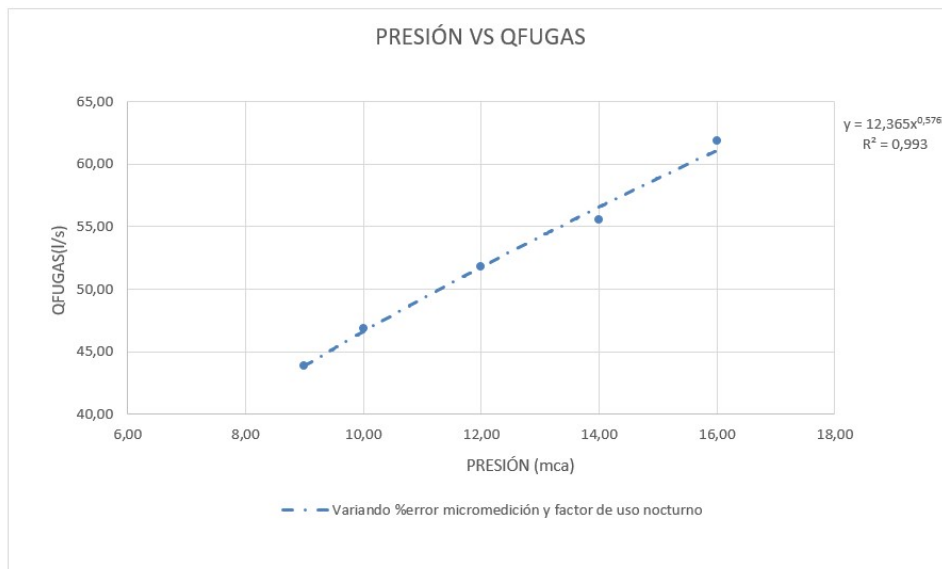
3.3.2 Aplicación de las propuestas de mejora

En este capítulo se llevará a cabo los cálculos para la obtención del valor de exponente de fugas de las 42 pruebas de pressure step test con las posibles variables que pueden existir. Se clasificarán en 5 partes de acuerdo al material de tubería y rangos de valor N1.

3.3.2.1 Análisis para obtener valor de exponente de fugas de $0.8 \geq N1 \geq 0.4$ en tuberías flexibles

Existen 17 pruebas de este tipo, las cuales se mencionan a continuación de acuerdo a su sector hidráulico:

Sector CTP 005



Gráfica 10. Extrapolación matemática del sector CTP 005 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno.

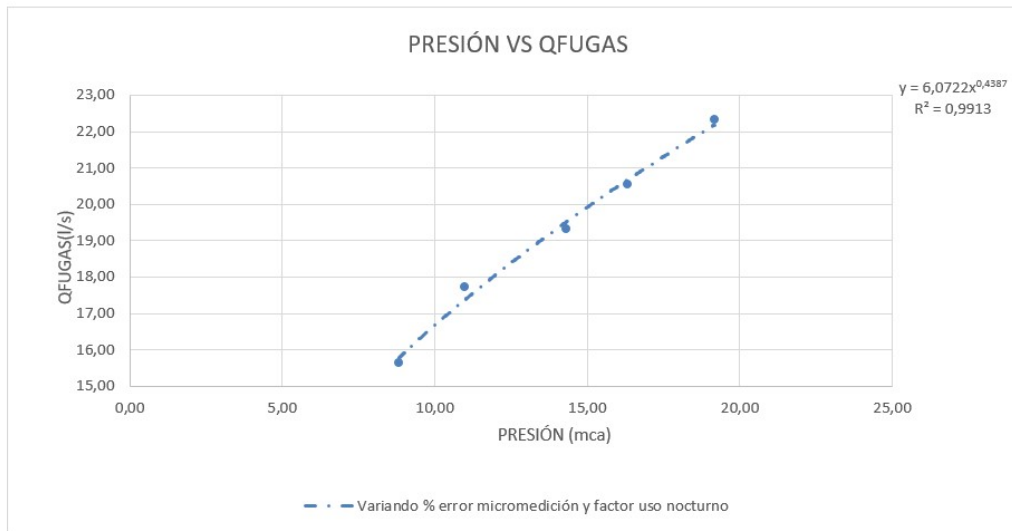
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 26. Variación de resultado del exponente de fugas del sector CTP 005

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,587
	Uso de promedios método IA	0,610
	Extrapolación matemática	0,576

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector CTP 008



Gráfica 11. . Extrapolación matemática del sector Sector CTP 008 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno.

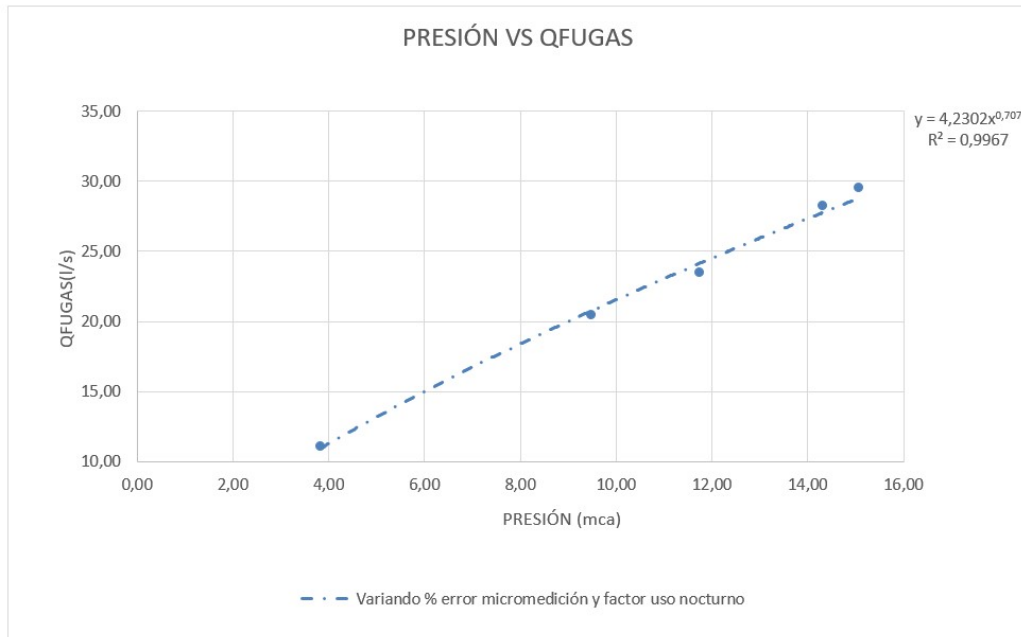
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 27. Variación de resultado del exponente de fugas del sector CTP 008

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,449
	Uso de promedios método IA	0,470
	Extrapolación matemática	0,439

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector CTP 072



Gráfica 12. Extrapolación matemática del Sector CTP 072 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno.

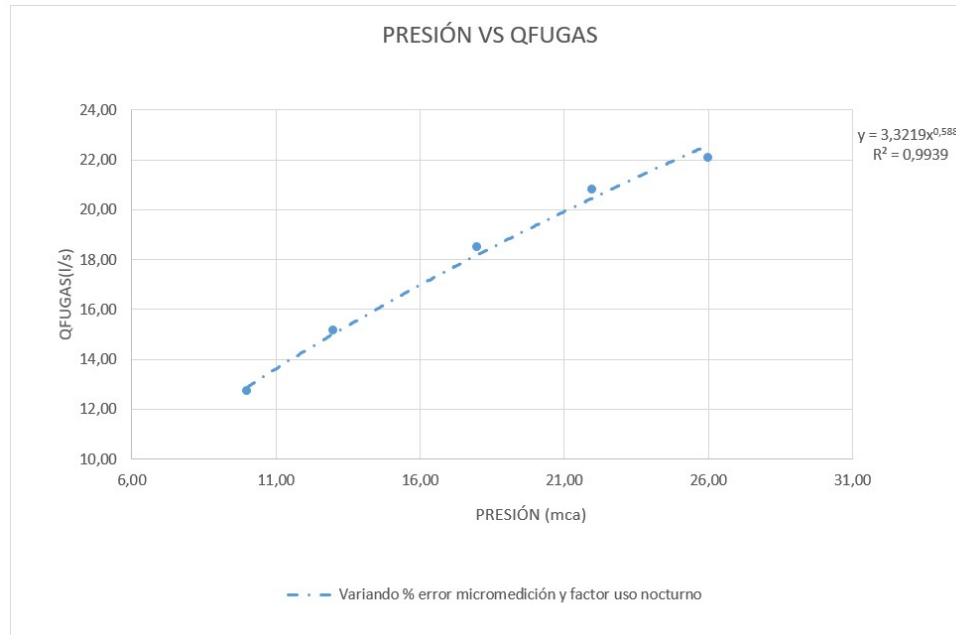
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 28. Variación de resultado del exponente de fugas del sector CTP 072

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,774
	Uso de promedios método IA	0,787
	Extrapolación matemática	0,707

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector S72 -148



Gráfica 13. Extrapolación matemática del sector S72 -148 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno.

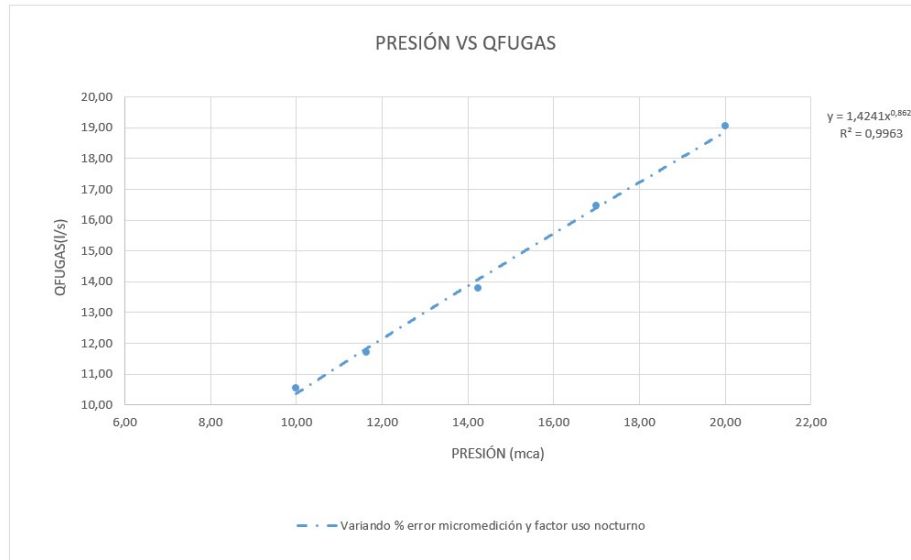
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 29. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72 -148

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,570
	Uso de promedios método IA	0,556
	Extrapolación matemática	0,588

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector SGU -190



Gráfica 14. Análisis de sensibilidad del sector SGU -190 variando % de error de micromedición, factor de uso nocturno y % de error de micromedición y factor de uso nocturno.

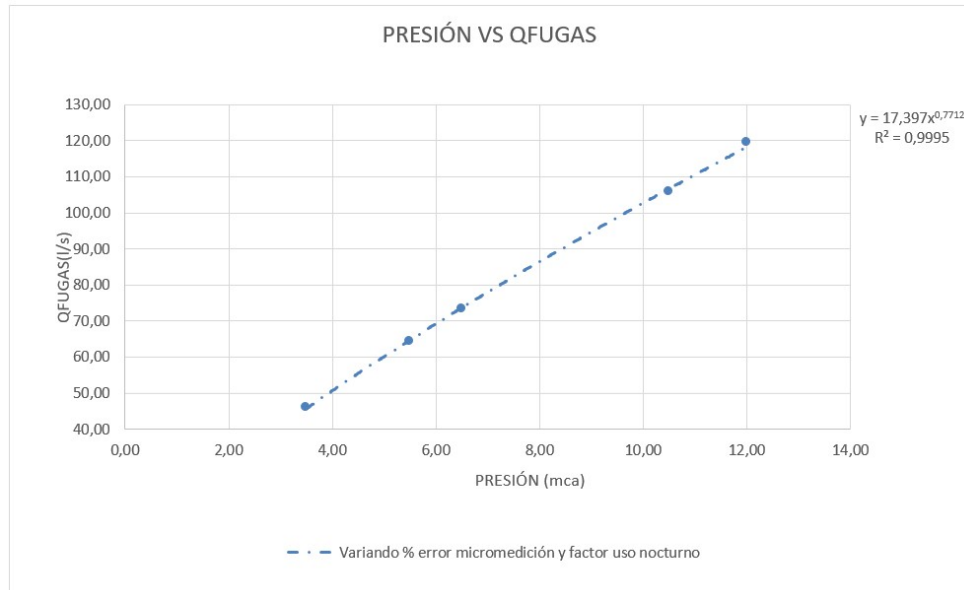
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 30. Variación de resultado del exponente de fugas del sector SGU - 190

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,859
	Uso de promedios método IA	0,850
	Extrapolación matemática	0,863

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector CTP-073-074-075-078-079-080



Gráfica 15. Extrapolación matemática del sector CTP-073-074-075-078-079-080 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno.

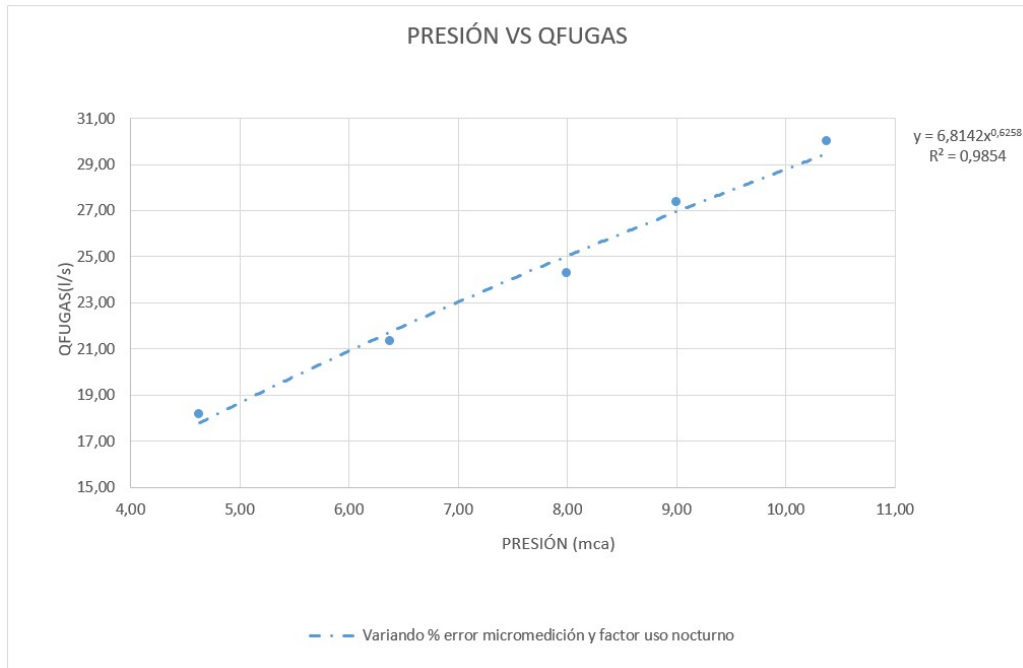
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 31. Variación de resultado del exponente de fugas del sector CTP-073-074-075-078-079-080

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,784
	Uso de promedios método IA	0,797
	Extrapolación matemática	0,771

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector S72-113



Gráfica 16. Extrapolación matemática del sector S72-113 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno.

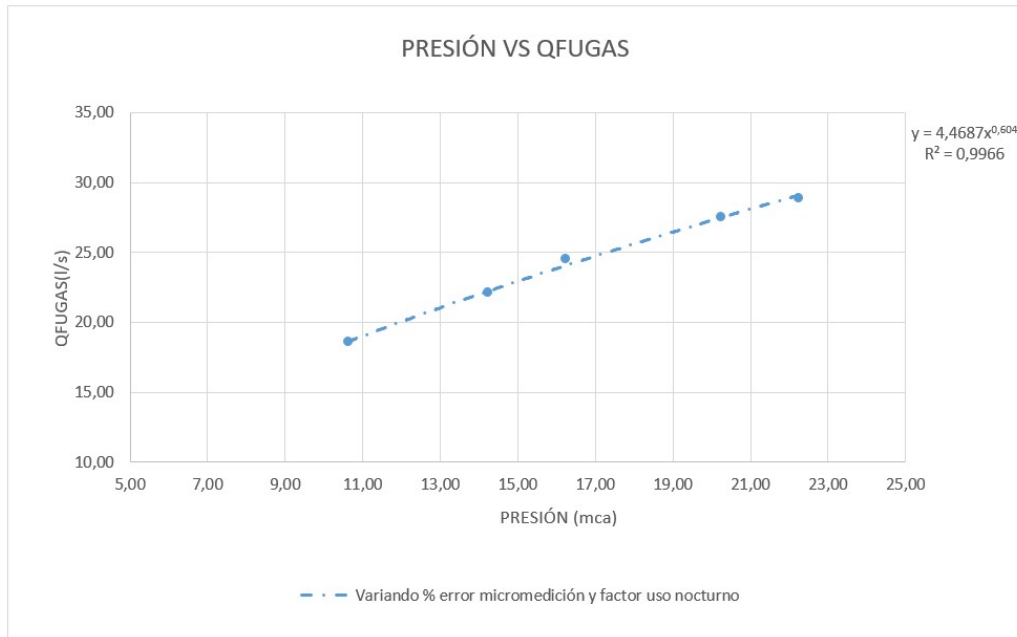
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 32. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-113

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,676
	Uso de promedios método IA	0,685
	Extrapolación matemática	0,626

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector S72-137



Gráfica 17. Extrapolación matemática del sector S72-137 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno.

Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 33. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-137

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,603
	Uso de promedios método IA	0,606
	Extrapolación matemática	0,604

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector S72-143



Gráfica 18. Extrapolación matemática del sector S72-143 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno.

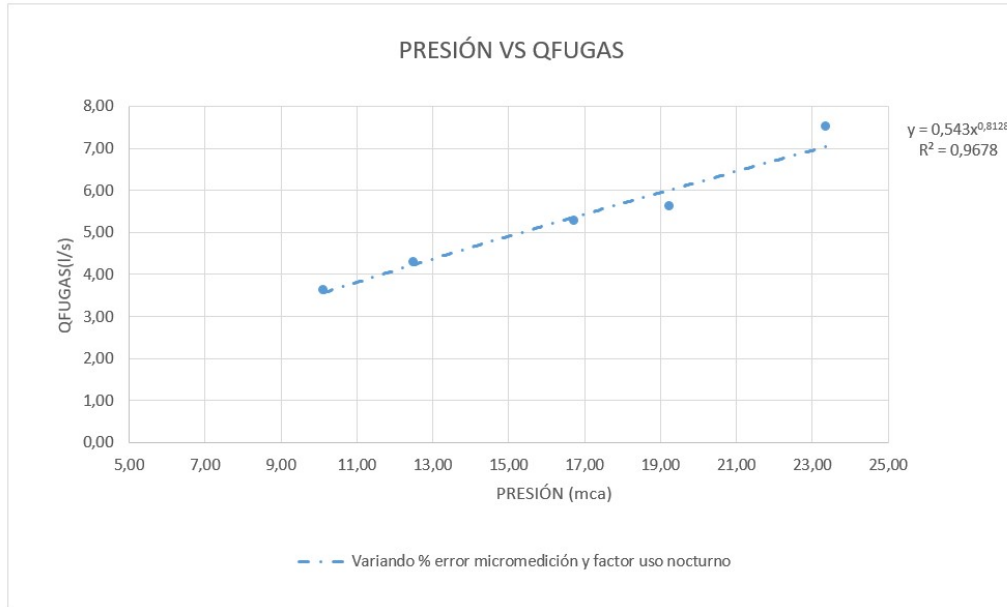
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 34. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-143

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,780
	Uso de promedios método IA	0,813
	Extrapolación matemática	0,751

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector S72-144



Gráfica 19. Extrapolación matemática del sector S72-144 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 35. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-144

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,833
	Uso de promedios método IA	0,865
	Extrapolación matemática	0,813

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector S72-145



Gráfica 20. Extrapolación matemática del sector S72-145 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

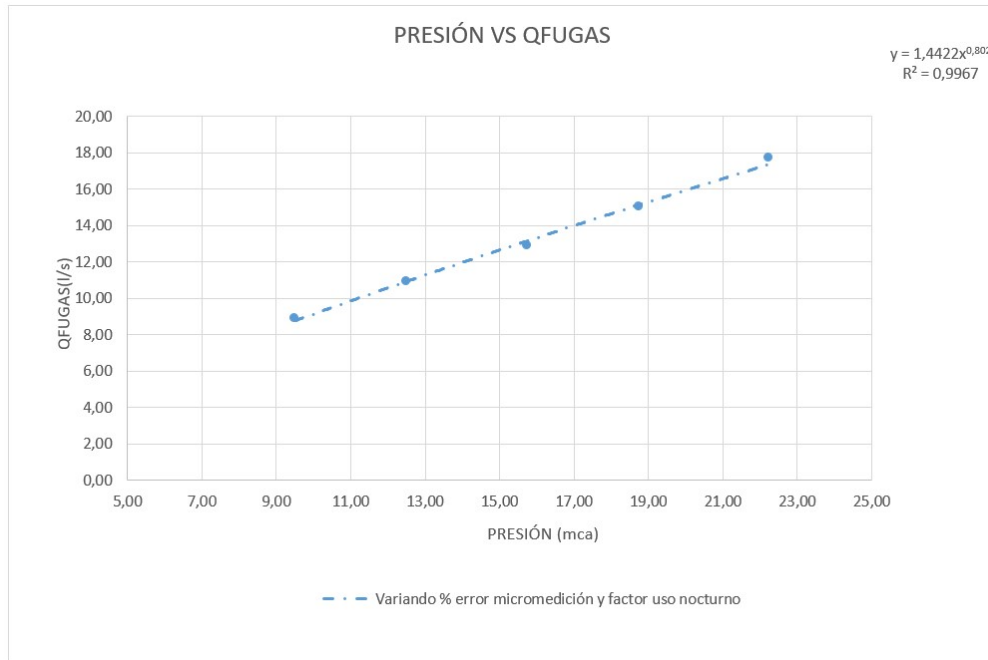
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 36. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-145

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,652
	Uso de promedios método IA	0,650
	Extrapolación matemática	0,663

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector S72-146



Gráfica 21. Extrapolación matemática del sector S72-146 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

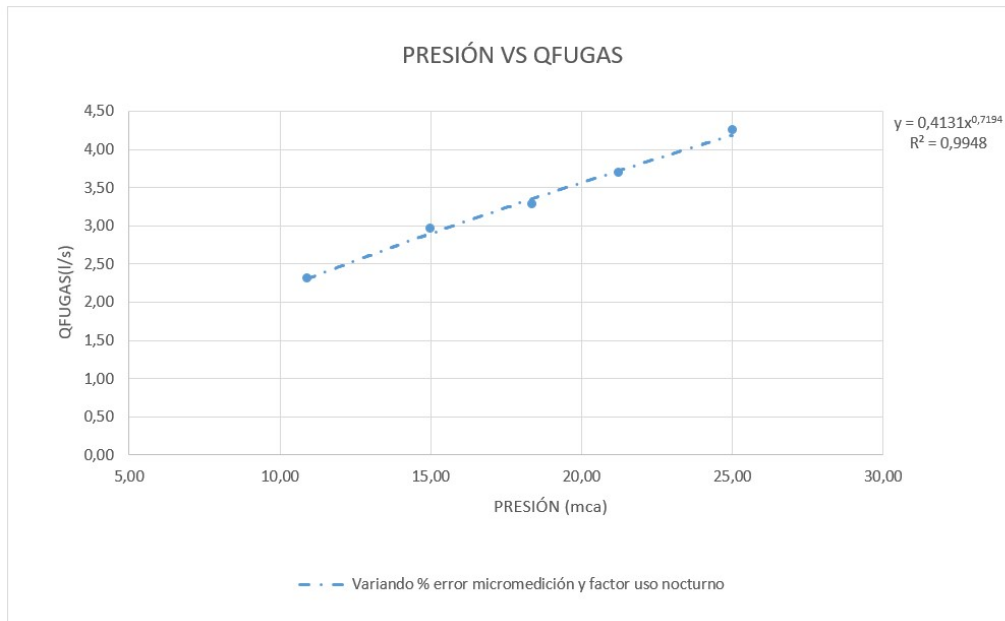
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 37. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-146

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,818
	Uso de promedios método IA	0,826
	Extrapolación matemática	0,802

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector S72-147



Gráfica 22. Extrapolación matemática del sector S72-147 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

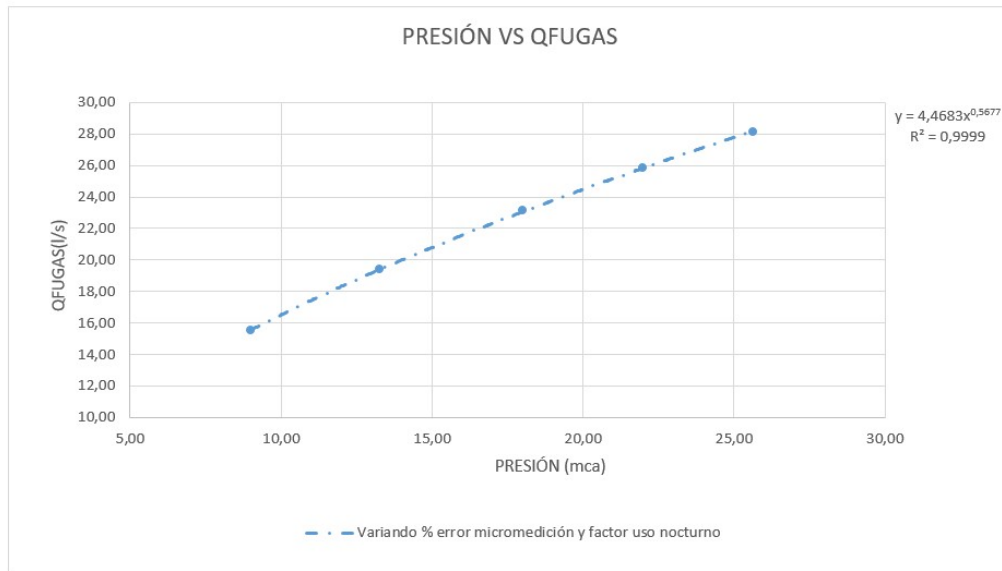
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 38. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-147.

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,730
	Uso de promedios método IA	0,745
	Extrapolación matemática	0,719

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector S72-151



Gráfica 23. Extrapolación matemática del sector S72-151 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

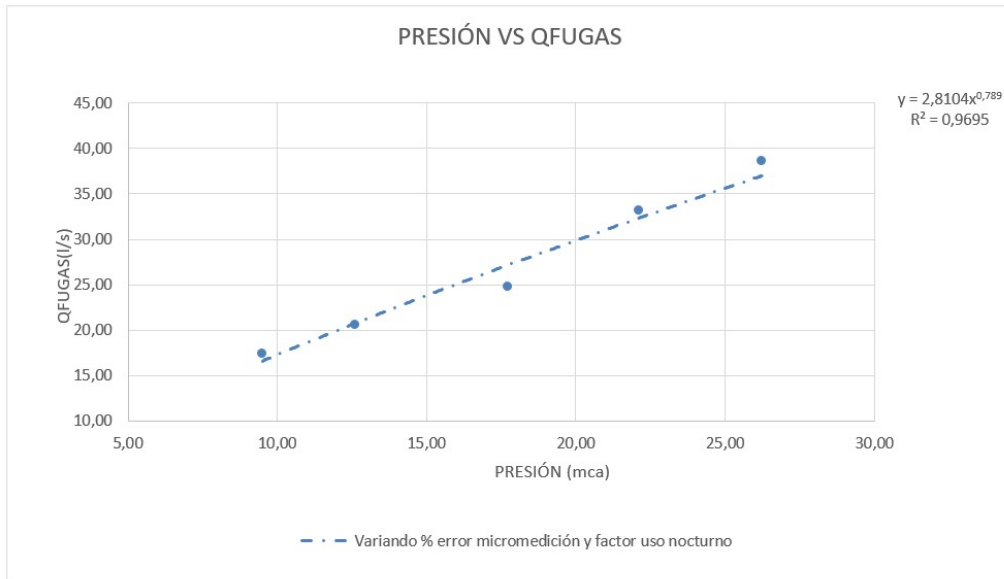
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 39. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-151

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,565
	Uso de promedios método IA	0,566
	Extrapolación matemática	0,568

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector S72-152



Gráfica 24. Extrapolación matemática del sector S72-152 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

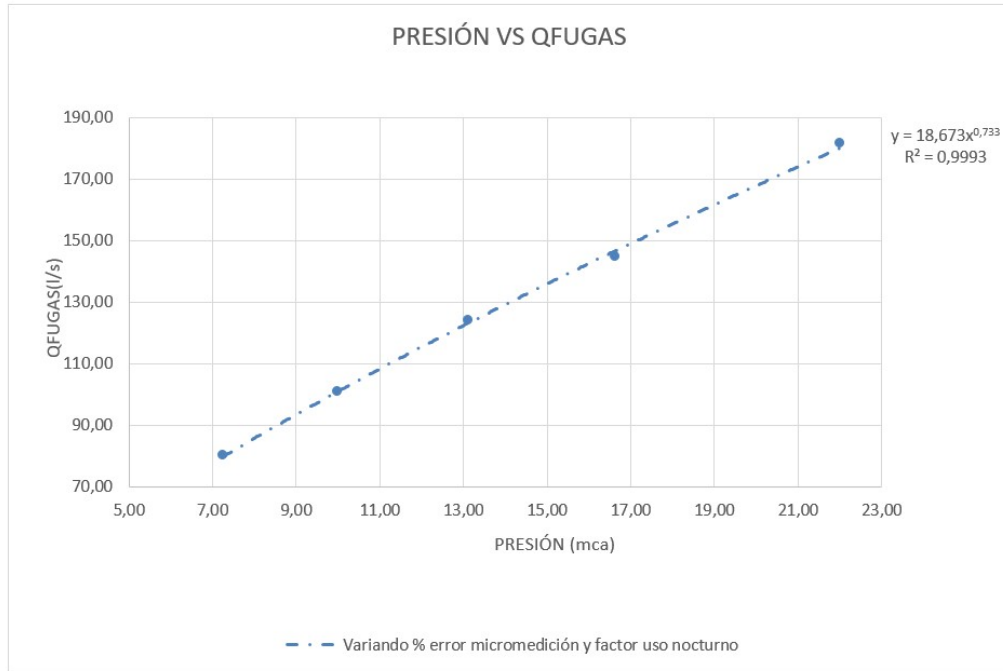
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 40. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-152

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,835
	Uso de promedios método IA	0,841
	Extrapolación matemática	0,789

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector SRO-154



Gráfica 25. Extrapolación matemática del sector SRO-154 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

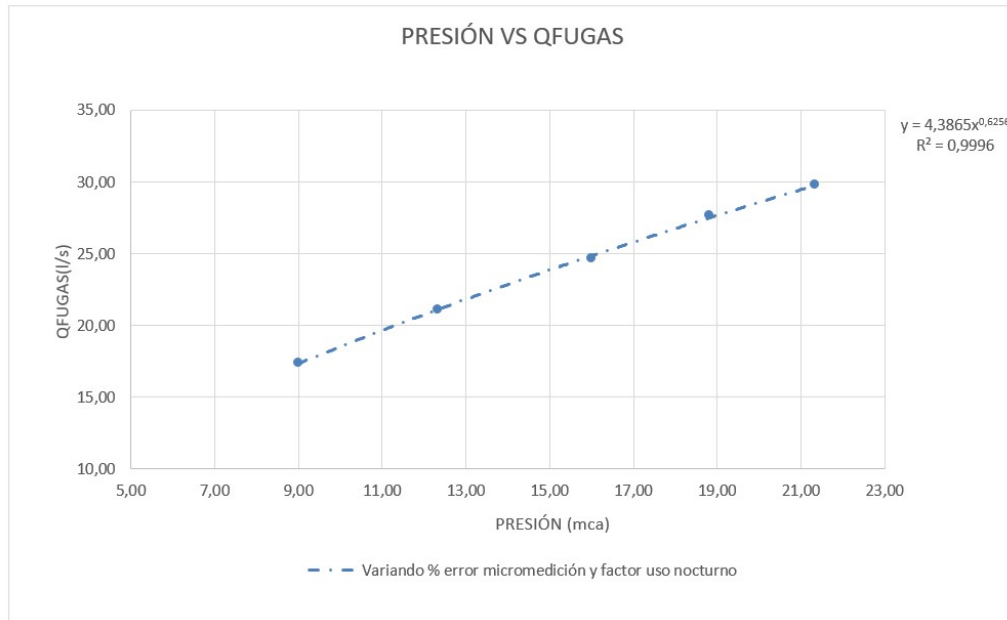
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 41. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-154

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,733
	Uso de promedios método IA	0,735
	Extrapolación matemática	0,733

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector N72-494



Gráfica 26. Extrapolación matemática del sector N72-494 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 42. Variación de resultado del exponente de fugas del sector N72-494

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,631
	Uso de promedios método IA	0,631
	Extrapolación matemática	0,626

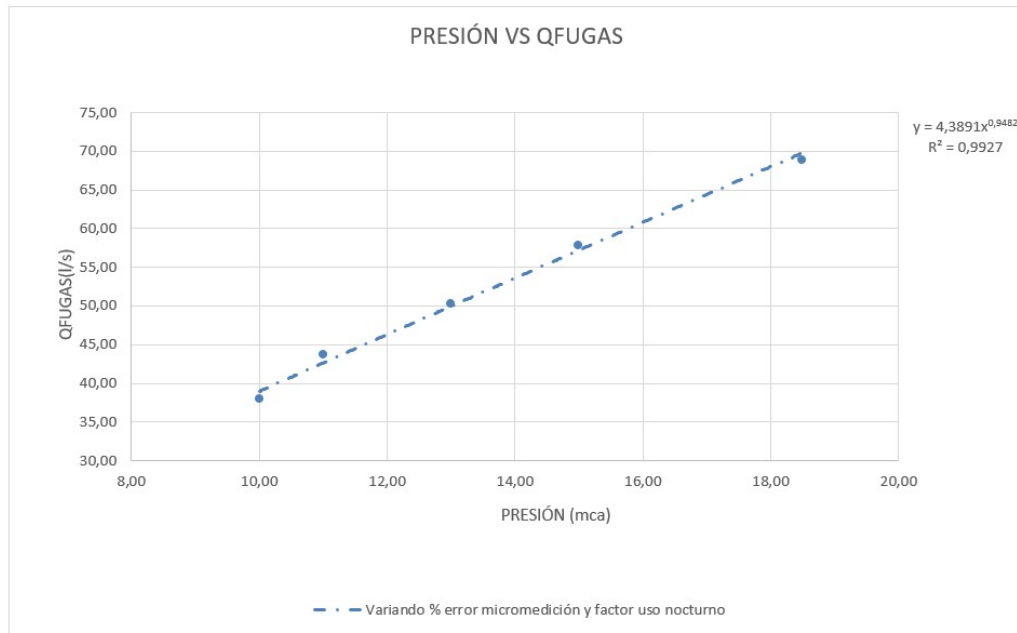
Fuente: Joselyne Alvarado

En todos estos casos del capítulo 3.3.2.1 se puede observar que el método utilizado presenta una correlación casi perfecta. Por otro lado, los valores de N1 se encuentran por debajo del valor teórico expuesto anteriormente, lo mismo que se puede deber al tipo de abertura que presente las tuberías, ya que al ser circulares el exponente de fugas suele disminuir.

3.3.2.2 Análisis para obtener valor de exponente de fugas de $1 \geq N1 \geq 0.8$ en tuberías rígidas.

Existen 2 pruebas de pressure step test de este tipo, las cuales se mencionan a continuación de acuerdo a su sector hidráulico:

Sector CRO-010- 011



Gráfica 27. Extrapolación matemática del sector CRO-010- 011 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

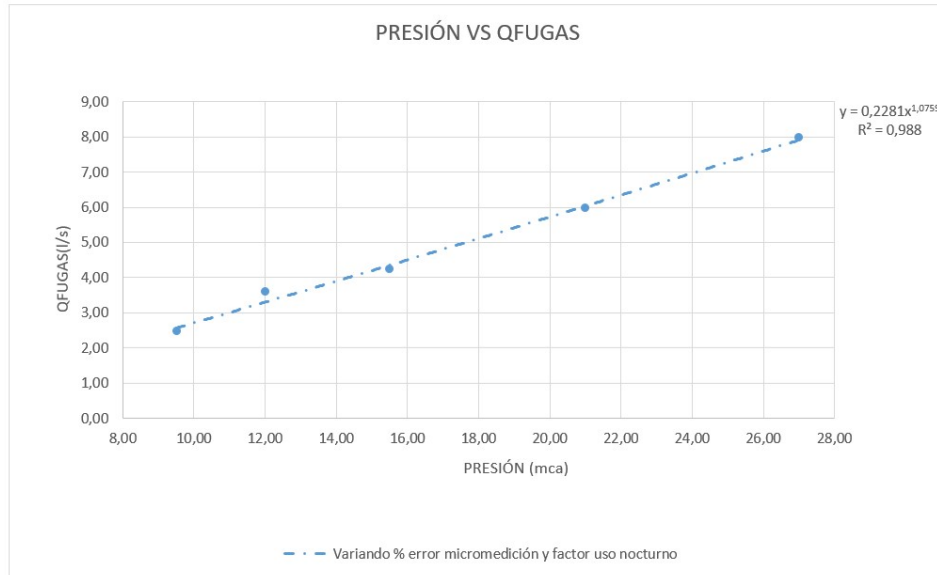
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 43. Variación de resultado del exponente de fugas del sector CRO-010- 011

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,990
	Uso de promedios método IA	1,034
	Extrapolación matemática	0,948

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector S72-108 -134



Gráfica 28. Extrapolación matemática del sector S72-108 -134 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 44. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-108 -134

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	1,092
	Uso de promedios método IA	1,136
	Extrapolación matemática	1,076

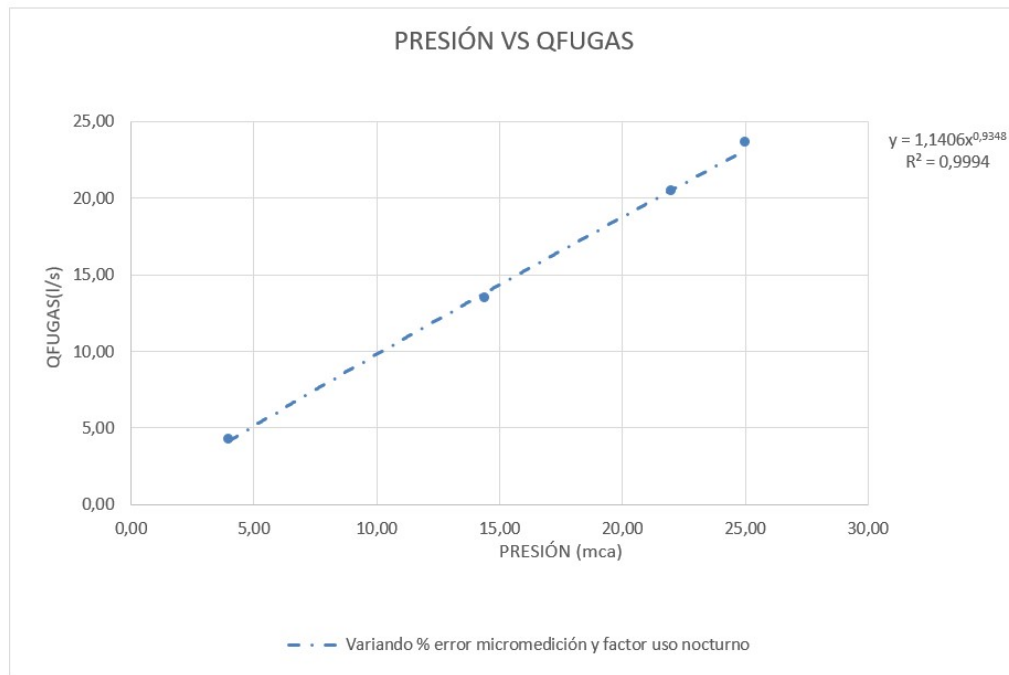
Fuente: Joselyne Alvarado

En todos los capítulos de 3.3.2.2 se puede observar el método que presenta un valor de N1 más cercano al valor teórico es mediante el método de extrapolación matemática. Por otro lado, observamos que si se realizamos el promedio de método de Interagua el valor de N1 saldrá mayor al promedio generado por etapas.

3.3.2.3 Análisis para obtener valor de exponente de fugas de $1 \geq N1 \geq 0.8$ en tuberías flexibles.

Existen 7 pruebas de este tipo, las cuales se mencionan a continuación de acuerdo a su sector hidráulico:

Sector SRO-132



Gráfica 29. Extrapolación matemática del sector SRO-132 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

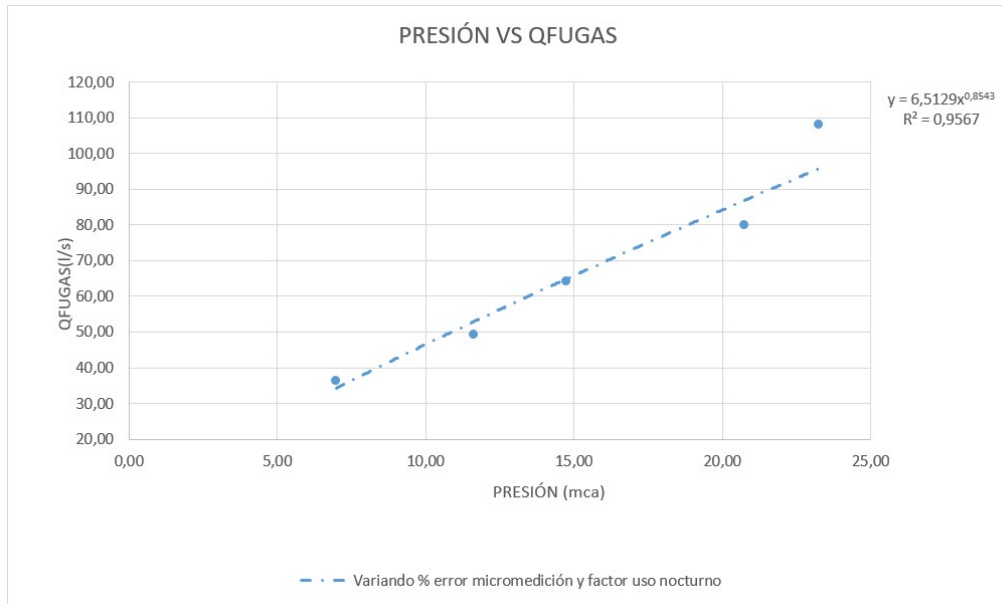
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 45. Variación de resultado del exponente de fugas del sector SRO-132

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,985
	Uso de promedios método IA	1,007
	Extrapolación matemática	0,935

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector S72-133-138-139-140-141-142



Gráfica 30. Extrapolación matemática del sector S72-133-138-139-140-141-142 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

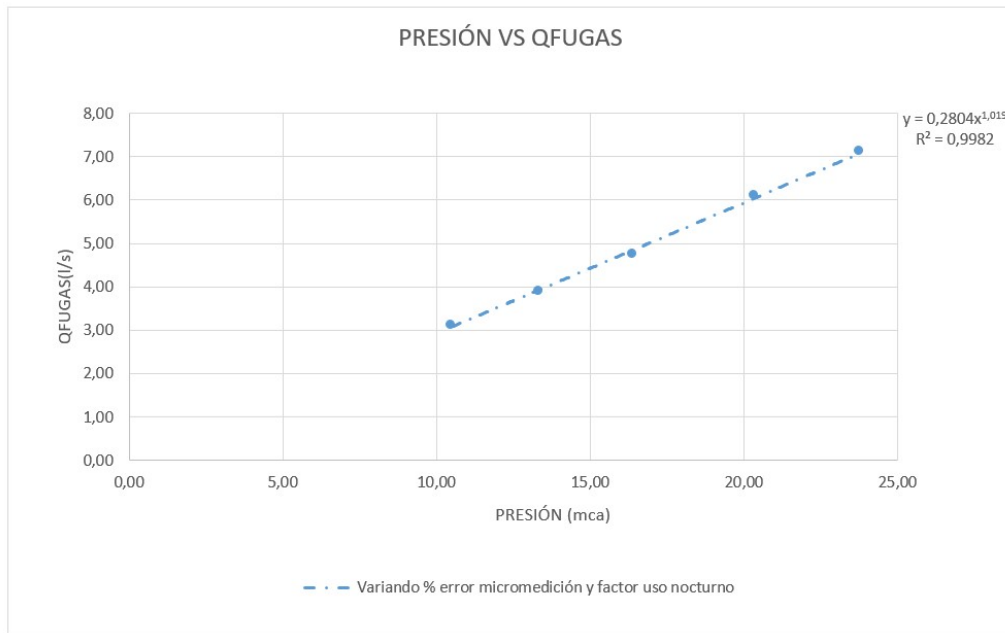
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 46. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-133-138-139-140-141-142

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	1,051
	Uso de promedios método IA	1,251
	Extrapolación matemática	0,854

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector S72-136



Gráfica 31. Extrapolación matemática del sector S72-136 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

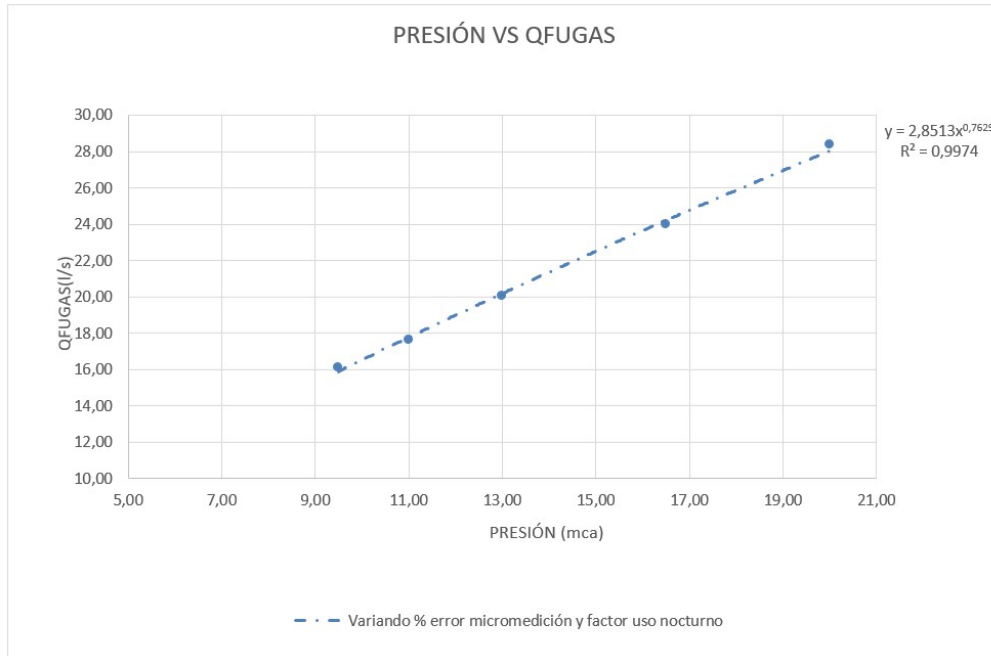
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 47. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-136

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	1,020
	Uso de promedios método IA	1,009
	Extrapolación matemática	1,019

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector SGU- 164



Gráfica 32. Extrapolación matemática del sector SGU-164 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 48. Variación de resultado del exponente de fugas del sector SGU-164

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,755
	Uso de promedios método IA	0,751
	Extrapolación matemática	0,763

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector SGU-186



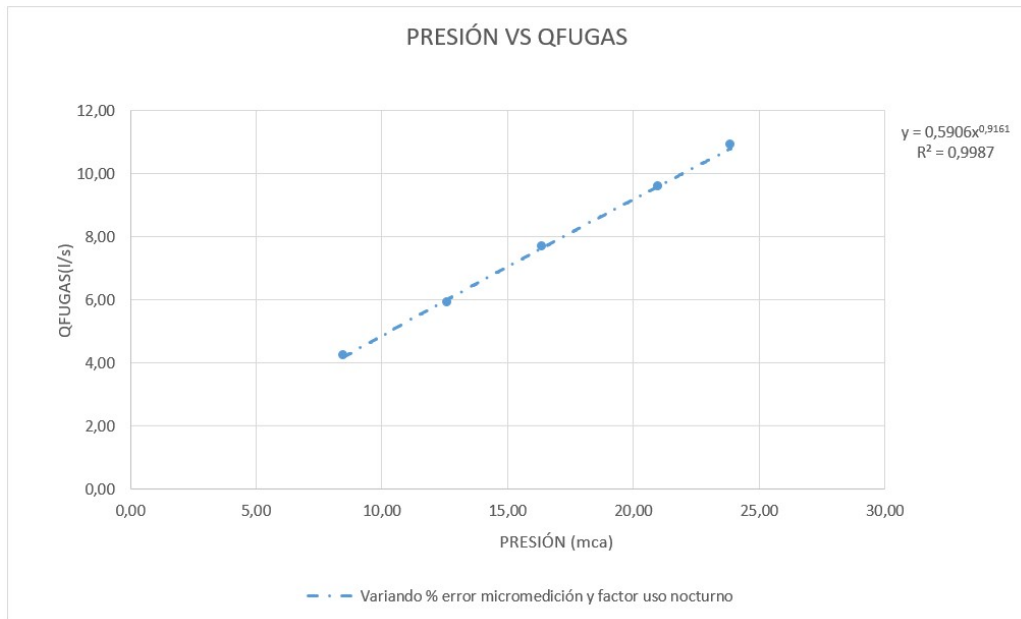
Gráfica 33. Extrapolación matemática del sector SGU-186 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

Tabla 49. Variación de resultado del exponente de fugas del sector SGU-186

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	1,236
	Uso de promedios método IA	1,205
	Extrapolación matemática	1,217

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector S72-198



Gráfica 34. Extrapolación matemática del sector S72-198 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

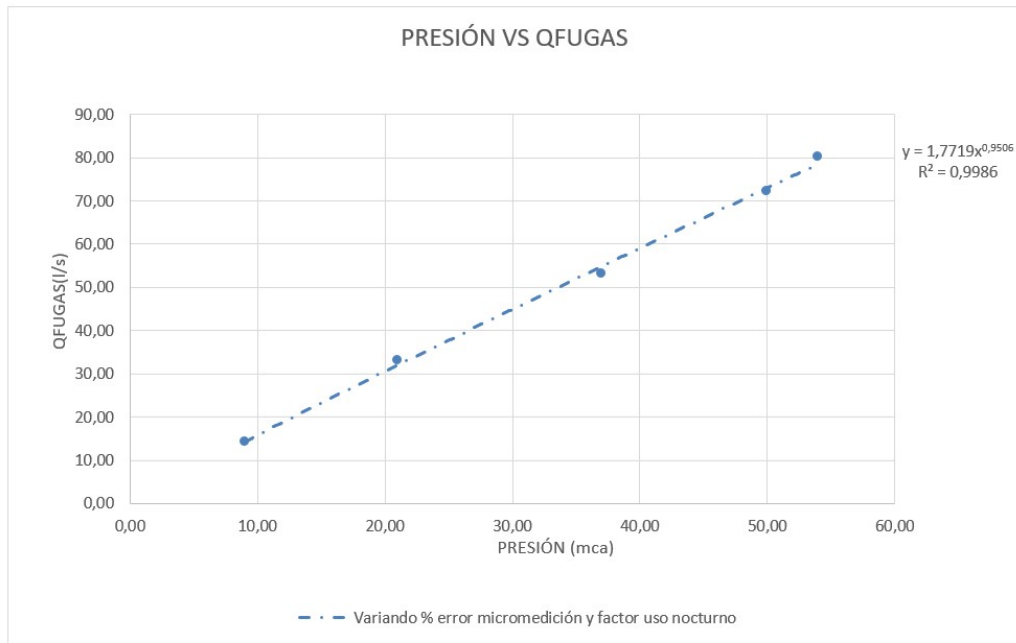
Fuente: Joselyne Alvarado

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,930
	Uso de promedios método IA	0,934
	Extrapolación matemática	0,916

Tabla 50. Variación de resultado del exponente de fugas del sector S72-198

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector N72-387 -388



Gráfica 35. Extrapolación matemática del sector N72-387-388 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

Fuente: Joselyne Alvarado

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	0,999
	Uso de promedios método IA	1,055
	Extrapolación matemática	0,951

Tabla 51. Variación de resultado del exponente de fugas del sector N72-387-388

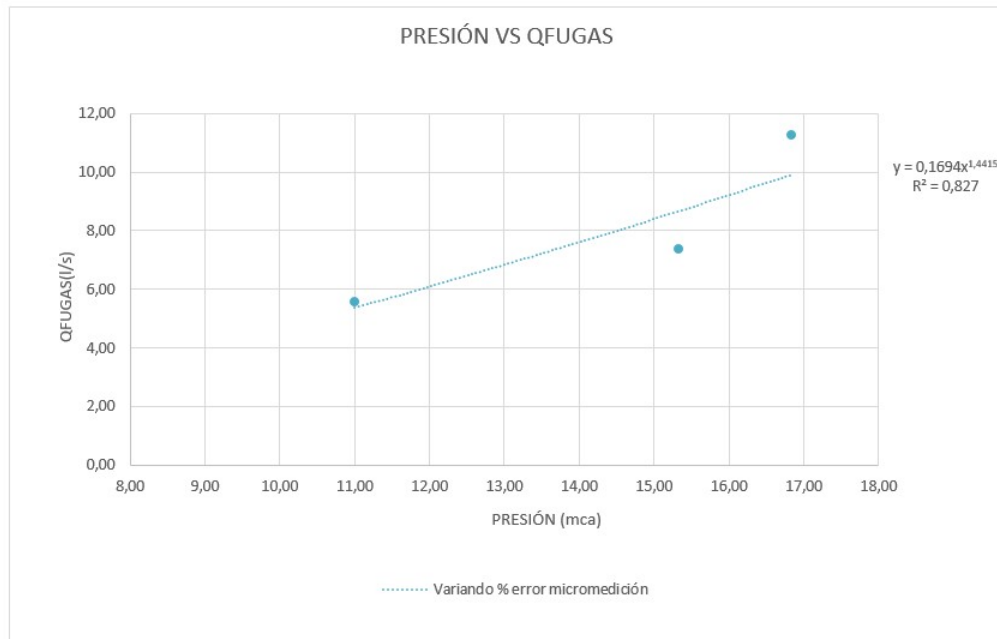
Fuente: Joselyne Alvarado

En este caso se puede observar que el método de Interagua y extrapolación matemática los valores de N1 son casi similares y presentan mayor correlación. Sin embargo, se observa que estos valores están por debajo que el valor teórico propuesto, cabe recalcar que se debe tener presente que la red no es totalmente de tuberías flexibles sino mixta con rígidas pero en mayor cantidad flexibles.

3.3.2.4 Análisis para obtener valor de exponente de fugas de $N1 > 1$ para tuberías flexibles

Existe 4 prueba de este tipo, la cual se mencionan a continuación de acuerdo a su sector hidráulico:

Sector CTP-001



Gráfica 36. Extrapolación del sector CTP-001 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

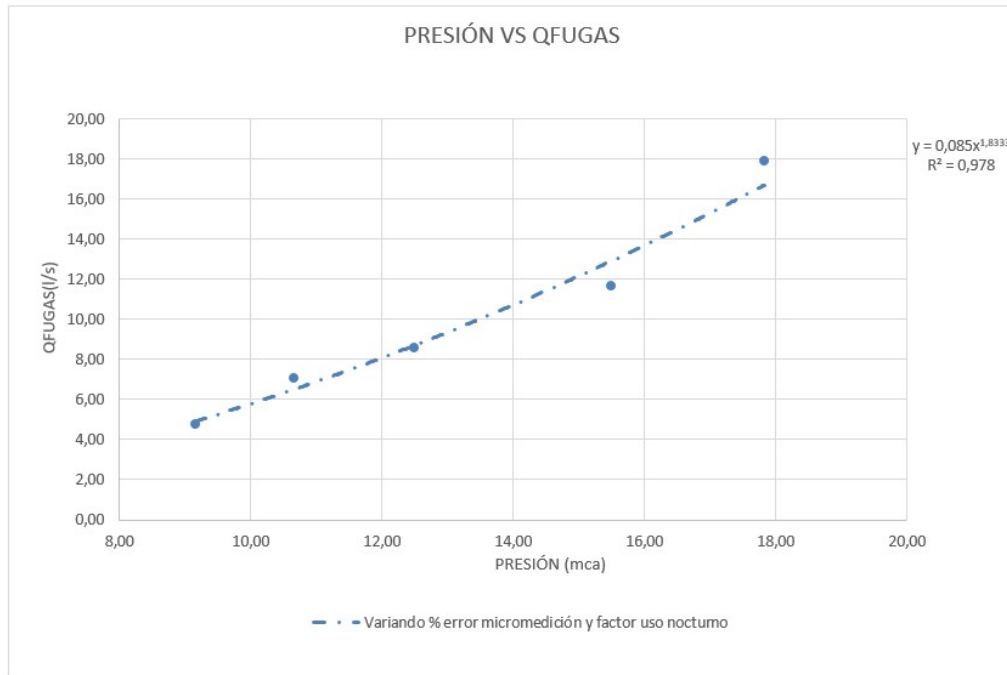
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 52. Variación de resultado del exponente de fugas del sector CTP-001

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	2,344
	Uso de promedios método IA	2,689
	Extrapolación matemática	1,442

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector SGU-173



Gráfica 37. Extrapolación matemática del sector SGU-173 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

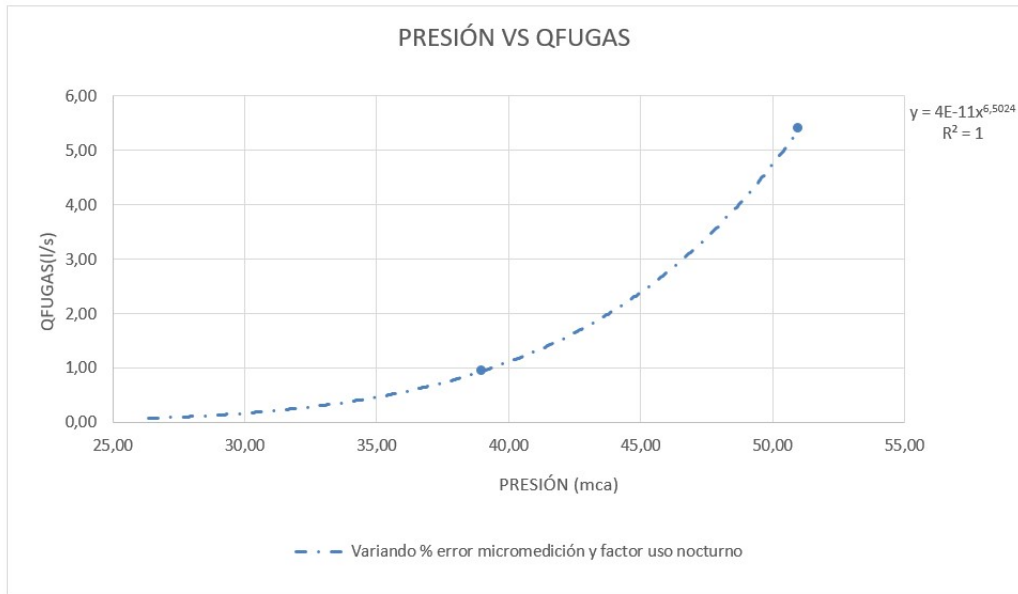
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 53. Variación de resultado del exponente de fugas del sector SGU-173

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	1,908
	Uso de promedios método IA	2,068
	Extrapolación matemática	1,833

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector N72-390



Gráfica 38. Extrapolación matemática del sector N72-390 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

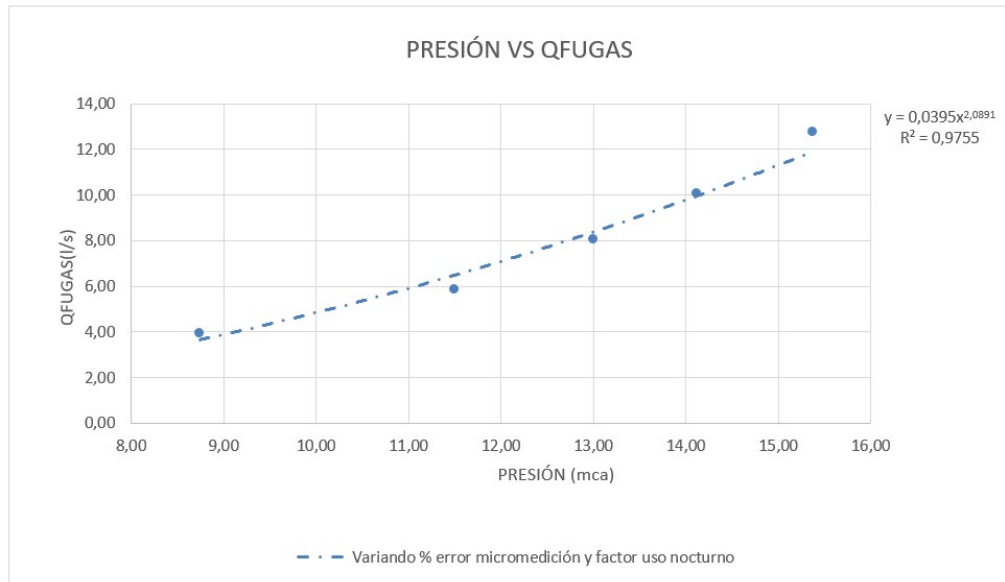
Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 54. Variación de resultado del exponente de fugas del sector N72-390

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	6,502
	Uso de promedios método IA	6,502
	Extrapolación matemática	6,502

Fuente: Joselyne Alvarado

Sector NRO-401



Gráfica 39. Extrapolación matemática del sector NRO-401 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 55. Variación de resultado del exponente de fugas del sector NRO-401

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	2,353
	Uso de promedios método IA	2,392
	Extrapolación matemática	2,089

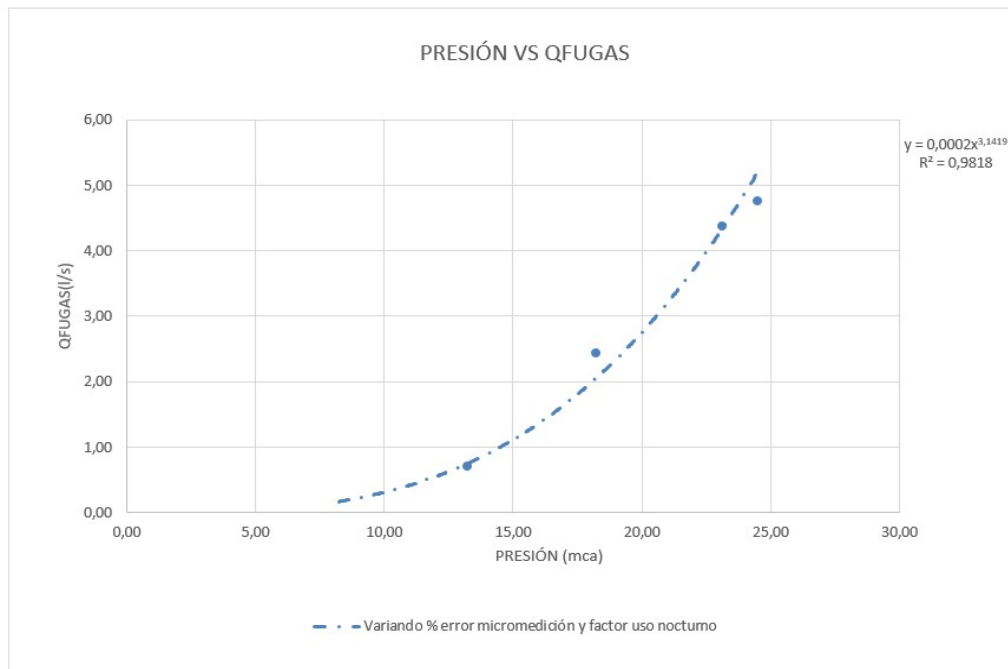
Fuente: Joselyne Alvarado

En este caso se puede observar que mediante el método de extrapolación matemática y la variación del porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno los valores de N1 se encuentran más cercanos al valor teórico para tuberías flexibles.

3.3.2.5 Análisis para obtener valor de exponente de fugas de $N1 > 1$ para tuberías rígidas

Existe 1 prueba de este tipo, la cual se mencionan a continuación de acuerdo a su sector hidráulico:

SRO-112-118



Gráfica 40. Extrapolación matemática del sector SRO-112-118 variando porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno

Fuente: Joselyne Alvarado

Tabla 56. Variación de resultado del exponente de fugas del sector SRO-112-118

		% Error de micromedición y factor de uso nocturno	Umbral de uso nocturno
Exponente N1	Método IA	2,751	2,058
	Uso de promedios método IA	2,609	1,956
	Extrapolación matemática	3,142	2,320

Fuente: Joselyne Alvarado

En este caso se observa que el valor de N1 que presenta mayor correlación es variando el porcentaje de error de micromedición y factor de uso nocturno mediante el método Interagua. Así mismo, el método de extrapolación matemática para el umbral de uso nocturno resulta un valor más real que utilizando las variables de error de micromedición y factor de uso nocturno.

Se observa que las fugas no dependen solamente del material de tubería sino de la abertura que presente la tubería; para tuberías rígidas con N1 mayor a 1 se puede deber a posibles grietas longitudinales como un incremento en el coeficiente d descarga. Asimismo, para tuberías rígidas un valor mayor a 1 se puede deber corrosión que puede experimentar la tubería.

CAPÍTULO 4

4 Análisis de resultados y conclusiones

De acuerdo a los resultados de los análisis de sensibilidad realizados en el capítulo Aplicación de las propuestas de mejora, las variables que mayormente influyen en la obtención del exponente de fugas N1 fueron:

- Error de micromedición
- Factor de uso nocturno

De ambos parámetros aquel cuya variación afectó más los resultados fue el factor de uso nocturno, seguido del porcentaje de error de micromedición mediante el método de extrapolación matemática.

El parámetro factor de uso nocturno en las pruebas normalmente presenta un valor distinto para cada tipo de cliente. Sin embargo, al momento de realizar el análisis de sensibilidad se observó que no existía mayor correlación. Por tal motivo, se optó por considerar solamente un factor de uso nocturno; es decir, el mayor de todos. Al ejecutar dicho cambio, el análisis de sensibilidad dio una correlación más favorable que si no se realizara el cambio.

Por otra parte, el parámetro del porcentaje del error de micromedición juega un papel importante en la obtención del N1. Este porcentaje al momento de realizar el análisis tampoco muestra mayor correlación. Sin embargo, al aumentar dicho valor al 8.8%, porcentaje de error de micromedición promedio para todos los sectores, el análisis de sensibilidad resulta más favorable.

Asimismo, se debe tener presente que al utilizar la media del error de micromedición en las pruebas, la gráfica del análisis de sensibilidad se diferencia notoriamente del resto. Por tal motivo, se recomienda realizar un análisis variando ambos parámetros, factor de uso nocturno y error de micromedición. El resultado de este análisis resulta mayormente favorable

que realizarlo por separado. Sin embargo, cabe recalcar que el parámetro que presenta mayor peso en el análisis es el factor de uso nocturno.

Otro de los parámetros que se analizó dentro de la prueba de pressure step test es no considerar los intervalos de caudales de la prueba por debajo del valor de consumo nocturno mínimo o muy cercanos al valor de consumo nocturno.

Esto ocurre por utilizar equipos de baja resolución durante las pruebas, lo que produce una pérdida de datos dejando que estos queden muy segmentados. Por tal motivo, el valor de caudal debería ser la media del consumo mínimo y se debería utilizar equipos que no estén basados en el cálculo de caudal a partir de la relación entre volumen y tiempo, sino calcular caudal a partir de la medición de velocidad del flujo.

Por ello se recomienda que en los casos en los que se utilice equipos electromagnéticos de batería, se debe revisar en la configuración del equipo la resolución de cada pulso. Una vez analizado dicho parámetro dentro de la prueba se observó que el cambio generado en el valor de N1 fue bastante distante, y a su vez se acercó al valor teórico según la teoría de FAVAD.

Para futuros análisis, se debería considerar los factores mencionados anteriormente. Estos análisis han ayudado a obtener un valor N1 más estimado al valor teórico según la teoría de FAVAD. De igual manera, hemos analizado que no todas las pruebas dependen simplemente del material de tubería, sino que influye en gran cantidad el tipo de abertura que tenga la tubería. Asimismo, el valor de N1 para fugas de fondo es 1.5, sin necesidad de identificar el material de tubería y nivel de fuga que presente; esto se debe a que son fugas casi indetectables.

En conclusión, lo mencionado anteriormente es muy importante puesto que determina si en un sector hidráulico es necesario cambiar toda la red de tuberías y a su vez estas decisiones generan altos costos por lo que un error generaría pérdidas grandes.

REFERENCIAS

- Fanner, P., Sturm, R., Thornton, J., & Liemberger, R. (2007). *Leakage management technologies*. American Water Work Associations.
- Farley, M., & Trow, S. (2003). *Losses in water distribution networks*. London: IWA Publishing.
- Greyvensteins, B., & Van Zyl, J. (2005). *An Experimental Investigation into the Pressure Leakage Relationship of some failed water pipes* . International Water Association.
- Hiki, S. (1981, May). Relationship between leakage and pressure. *Journal of Japan Waterworks Association*, pp. 50-54.
- Lambert, A. (2001). *What Do We Know About Pressure: Leakage Relationships In Distribution Systems*. UK: International Water Association (IWA).
- Martínez, F., Conejos, P., & Vercher, J. (1999). Developing and 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* , 1-14.
- Mora, J. (2017). Guayaquil: Interagua.
- SAAD BENNIS, R. F., NOURA, G., & DUBOIS, M. (2011). *Theoretical modeling and experimental validation of leakage in drinking water networks* . American Water Works Association.
- Technolog. (n.d.). Retrieved from Cello 4s- Remote monitoring solution: <https://www.technolog.com/products/cello-4s/>

VAG, GIZ. (2009). *Guía para la reducción de las pérdidas de agua, un enfoque en la gestión de la presión* . Eschborn : Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo.

Van Zil, J., & Clayton, C. (2005). *The effect of pressure on leakage in water distribution systems*.

Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., Beckwith, S., & Koelle, E. (2003). *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Waterbury: Civil and Environmental Engineering and Engineering Mechanics Faculty Publications .

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, Alvarado Guzñay, Joselyne Adriana, con C.C: # 0926601535 autora del trabajo de titulación: Propuesta metodológica para obtener el valor del exponente de fugas en la red de distribución de agua potable de la ciudad de Guayaquil, previo a la obtención del título de Ingeniera Civil en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 2 de marzo de 2020

f. _____

Nombre: Alvarado Guzñay, Joselyne Adriana

C.C: 0926601535



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Propuesta metodológica para obtener el valor del exponente de fugas en la red de distribución de agua potable de la ciudad de Guayaquil		
AUTOR(ES)	Joselyne Adriana Alvarado Guzñay		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Stephenson Xavier Molina Arce		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería civil		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	2 de marzo de 2020	No. DE PÁGINAS:	124
ÁREAS TEMÁTICAS:			
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Exponente de fugas, Pressure Step test, análisis de sensibilidad, micromedidores, consumo nocturno, presión.		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):			
<p>Este trabajo de titulación consiste en determinar una propuesta metodológica para obtener el valor del exponente de fugas en la red de distribución de agua potable de la ciudad de Guayaquil debido a la gran cantidad de pérdidas de agua potable. Hoy en día, el agua dulce es un recurso limitado y en algunas ocasiones llega a ser escaso, por lo cual debemos concientizar. Esto se logrará analizando y comparando el valor exponente de fugas obtenido en pruebas de campo ya realizadas por la empresa de Interagua C. Ltda. con respecto a la teoría de FAVAD y si existe un método para mejorar el valor del exponente de fugas. La empresa Interagua presenta la ciudad de Guayaquil dividida en 97 sectores hidráulicos, de los cuales al momento se han realizado 63 pruebas de pressure step test. De estos sectores solo se evaluará 42 pruebas. Con dicha información proporcionada se realizarán análisis de sensibilidad para visualizar los posibles variantes para lograr obtener un valor N1 más exacto.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593+98-651-5605	E-mail: joselynealvarado@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	Nombre: Clara Catalina Glas Cevallos		
	Teléfono: +593 98-461-6792		
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			