

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



TESIS

**“MODELAMIENTO PROBABILÍSTICO DE REDES DE
DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE UTILIZANDO LA
SIMULACIÓN DIFUSA DE MONTE CARLO”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

NOE GOMER ZELAYA MOYA

ASESOR

Ing. SABINO POMPEYO BASUALDO MONTES

LIMA- PERÚ

2019

© 2019, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados.

“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte con fines estrictamente académicos.”

Noé G. Zelaya Moya

nzelayam@uni.pe

944 330 267

DEDICATORIA

“A mi papá, Zadi, por guiarme desde pequeño en la incesante labor de construir mi propio camino.

A mamá, Aurelia, por su amor infinito, su paciencia, y su dedicación.

A mi profesora Yolanda, quien me enseñara la lección más importante de la vida: creer [de verdad] en uno mismo.

A Lisset y Gustavo, que me acompañan en cada paso, inspirándome y alentándome a seguir.”

ÍNDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
PRÓLOGO	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	9
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	10
1.1. PLANTEAMIENTO DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA	10
1.2. OBJETIVOS	11
1.3. HIPÓTESIS	11
1.4. METODOLOGÍA DEL TRABAJO	12
CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO	13
2.1. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE	13
2.2. ESTADÍSTICA Y PROBABILIDAD	26
2.3. CONJUNTOS DIFUSOS	37
2.4. LA SIMULACIÓN DE MONTE CARLO	41
2.5. LA SIMULACIÓN DIFUSA DE MONTE CARLO (FMCS)	55
CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN DETERMINISTA DE LA DEMANDA	57
3.1. GENERALIDADES	57
3.2. COMPOSICIÓN DE LA DEMANDA	57
3.3. FACTORES QUE DETERMINAN EN LA DEMANDA	60
3.4. ESTIMACIÓN DE DEMANDA A ESCALA RESIDENCIAL	61
3.5. ESTIMACIÓN DE DEMANDA A ESCALA POBLACIONAL	63
3.6. VARIACIÓN DE LA DEMANDA – ENFOQUE TRADICIONAL	65
CAPÍTULO IV. MODELAMIENTO ESTOCÁSTICO/ PROBABILÍSTICO	68
4.1. MODELAMIENTO ESTOCÁSTICO DE LA DEMANDA	68
4.2. MODELOS ORIENTADOS A POCOS USUARIOS	72
4.3. MODELOS ORIENTADOS A MÚLTIPLES USUARIOS	80
4.4. CORRELACIÓN ENTRE DEMANDAS NODALES	85
4.5. LA TEORÍA DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS EN EL ANÁLISIS DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA	87
CAPÍTULO V. MODELO PROPUESTO Y APLICACIÓN	88

5.1. MODELO DE ANÁLISIS PROPUESTO	88
5.2. APLICACIÓN	101
5.3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	112
5.4. LIMITACIONES	120
CONCLUSIONES	122
RECOMENDACIONES	124
BIBLIOGRAFÍA	125
ANEXOS	134
Anexo I: Código fuente del programa	
Anexo II: Análisis de variación de demanda nodal	
Anexo III: Resultados del análisis determinista - Tuberías	
Anexo IV: Resultados del análisis determinista – Nodos	
Anexo V: Resultados del análisis probabilístico – Tuberías	
Anexo VI: Resultados del análisis probabilístico – Nodos	
Anexo VII: Composición y crecimiento poblacional de la red RAP-02	
Anexo VIII: Plano de nodos y tuberías de la red RAP-02	

RESUMEN

El diseño tradicional de sistemas de distribución de agua potable considera la demanda de agua desde una perspectiva determinista, dejando de lado el carácter estocástico que es inherente a este fenómeno. Esto tiene como consecuencia un modelamiento poco realista. En el presente trabajo se propone una metodología de análisis que permite calcular los caudales máximos de diseño considerando el carácter aleatorio de la demanda. Se considera también la influencia de la correlación entre demandas nodales como un factor importante. Para ello, se propone utilizar un método basado en la simulación de Monte Carlo, pero que permite utilizar variables difusas (cuya incertidumbre no se puede considerar de naturaleza probabilística).

En primer capítulo se hace una breve descripción de la metodología a usar. En el segundo capítulo se sientan las bases teóricas para el desarrollo de la tesis. En el capítulo siguiente se hace una revisión del estado del arte referente a las consideraciones que se hacen respecto a la demanda en el diseño convencional. En el cuarto capítulo se estudian los modelos que se están desarrollando actualmente para el modelamiento de la demanda en sistemas de distribución agua, cuyo enfoque es estocástico y/o probabilístico. En el quinto capítulo se describe el modelo propuesto, se desarrolla un programa para su aplicación, y finalmente se aplica a un proyecto real del ámbito nacional.

El programa mencionado se desarrolló en Python, utilizando sus ventajas como plataforma de simulación numérica. Como motor de análisis hidráulico, se utilizó la librería EPANETTOOLS, que utiliza los comandos de análisis del programa EPANET desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés).

Se mostró la aplicabilidad del modelo para una red de tamaño mediano, haciéndose evidentes sus ventajas para un diseño racional basado en el análisis numérico de la incertidumbre.

ABSTRACT

Traditional design of drinking water distribution systems considers the demand using a deterministic approach, not taking in account the stochastic nature that is inherent in this phenomenon. This leads to unrealistic modeling. In this paper, an analysis methodology is proposed aimed to calculate the maximum design flows considering the random nature of the demand. The influence of the correlation between nodal demands is also considered as an important factor. To do this, a method based on Monte Carlo simulation is proposed, allowing to use of both random and diffuse variables (whose uncertainty nature cannot be considered as probabilistic).

In the first chapter a brief description of the methodology to be used is presented. In the second chapter, the theoretical basis for the development of the thesis is exposed. In the following chapter a review of the state of the art is made regarding the approaches that are used for demand modeling in conventional design. In the fourth chapter we study the models that are currently being developed for demand modeling in water distribution systems, whose approach is stochastic and / or probabilistic. The fifth chapter describes the proposed model, the development of a program for its application, and finally its application to a real project in the national scope.

The mentioned program was developed in Python, taking its advantages as a numerical simulation platform. As a hydraulic analysis engine, the EPANETTOOLS library is used, allowing to utilize analysis commands of the EPANET program developed by the United States Environmental Protection Agency (EPA).

The applicability of the model for a medium-sized network was presented, showing its advantages for a rational design based on the numerical analysis of uncertainty.

PRÓLOGO

El desarrollo y la mejora continua de las capacidades computacionales de los ordenadores personales presenta un sinnúmero de oportunidades para mejorar los procesos de análisis y diseño de los proyectos de ingeniería civil, constituyendo una herramienta imprescindible en la práctica actual. Así, es un reto para los profesionales de hoy el desarrollo de herramientas de software para su aplicación en la ingeniería.

El presente trabajo consiste en el planteamiento y la aplicación de una metodología para el análisis de redes de distribución de agua potable, utilizando un algoritmo que se diferencia de los programas tradicionales de diseño en que permite modelar la demanda considerando su carácter aleatorio, abriendo la posibilidad de utilizarse para un diseño orientado a la confiabilidad y el análisis de riesgos.

Dicha metodología fue aplicada a un proyecto real localizado en el Departamento de Lima, cuyos resultados obtenidos se compararon con los resultados de los cálculos realizados en el Expediente Técnico del proyecto. Se obtuvo como resultado una reducción de los caudales de diseño del orden del 15%.

Se espera que este trabajo sea sólo un peldaño en una línea de investigación que tiene mucho potencial.

Ing. Sabino P. Basualdo Montes

Asesor

LISTA DE FIGURAS

<u>NÚM.</u>	<u>TÍTULO</u>	<u>PÁG.</u>
Fig. 1	Distribución normal	29
Fig. 2	Distribución lognormal	30
Fig. 3	Función beta. Fuente	31
Fig. 4	Distribución triangular	32
Fig. 5	Distribución t de Student	33
Fig. 6	Distribución Chi-cuadrado	34
Fig. 7	Función de membresía $f(x)$ de un conjunto difuso sobre X	37
Fig. 8	El α -corte para $\alpha=0.5$ comprende al subconjunto [2.5, 4.5]	38
Fig. 9	Gráficos de dispersión para análisis de sensibilidad	49
Fig. 10	Muestreo Sistemático	53
Fig. 11	Muestreo Hipercubo Latino	54
Fig. 12	Ejemplo de salida del método FMCS	56
Fig. 13	Variación anual de la demanda	65
Fig. 14	Curva de variación diaria para la Ciudad de México	66
Fig. 15	Modelamiento de la demanda por el método PRP	73
Fig. 16	Tasa de llegada promedio para una vivienda a lo largo del día	74
Fig. 17	Esquema de Neyman Scott	76
Fig. 18	Comparación entre medición y métodos OP y PRP	78
Fig. 19	Ejemplo de un patrón probabilístico de uso para una persona	79
Fig. 20	Curva de probabilidad de C_p para diferentes niveles de confianza	83
Fig. 21	Valor del factor pico para poblaciones de más de 1000 habitantes	85
Fig. 22	Número difuso considerado para incluir el efecto de la correlación	89
Fig. 23	Esquema de modelo FMCS para redes de distribución de agua	90
Fig. 24	Comparativa de curvas de factor pico para poblaciones entre 10 y 1000 habitantes	91
Fig. 25	Curvas de factor reajustadas para poblaciones pequeñas	94
Fig. 26	Valores de la media y el coeficiente de variación de C_p	94
Fig. 27	Coeficientes de reajuste por agregación temporal para 60 min.	95
Fig. 28	Algoritmo de solución del modelo FMCS	98
Fig. 29	Curvas de probabilidad/posibilidad en salida de modelo	100
Fig. 30	Planta general del proyecto	102
Fig. 31	Esquema hidráulico del proyecto	103
Fig. 32	Curvas de crecimiento poblacional	106
Fig. 33	Vista en planta de la red RAP-02 dentro de la Zona B	108

Fig. 34	Demanda probabilística vs demanda determinista - nodo J-33	111
Fig. 35	Gráfico de distribución de caudales	113
Fig. 36	Gráfico de distribución de presiones según análisis determinista	114
Fig. 37	Vista de consola de ejecución del programa	114
Fig. 38	Curvas de caudales para tubo P-4	115
Fig. 39	Curvas de velocidades para tubo P-4	115
Fig. 40	Curvas de presiones para nodo J-236	116
Fig. 41	Desviación estándar para los caudales de la tubería P-4 vs Coeficiente de correlación cruzada de demanda nodal	119
Fig. 42	Media de los caudales de la tubería P-4	120

LISTA DE TABLAS

<u>NÚM.</u>	<u>TÍTULO</u>	<u>PÁG.</u>
Tabla 1	Coefficientes de variación de demanda	67
Tabla 3	Resultados de ensayos de calidad del agua	105
Tabla 4	Información censal de población del distrito de Pucusana	105
Tabla 5	Consumo promedio de agua	107
Tabla 6	Coefficientes de fricción para el sistema de abastecimiento	108
Tabla 7	Resumen de componentes de la red de distribución RAP-02	109
Tabla 8	Estimación determinista de demanda	111
Tabla 9	Estimación probabilística de demanda nodal	111
Tabla 10	Cuadro comparativo probabilístico vs determinista – Caudales	117
Tabla 11	Cuadro comparativo probabilístico vs determinista – Velocidades	118
Tabla 12	Cuadro comparativo probabilístico vs determinista – Presiones máximas	118
Tabla 13	Cuadro comparativo probabilístico vs determinista – Presiones mínimas	119

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

<u>SÍMB.</u>	<u>USO</u>
C	Coeficiente de Hazen-Williams para el cálculo de la pérdida de carga
C_p	Coeficiente de demanda máxima, razón entre el caudal máximo instantáneo y el caudal promedio diario.
CV_p	Coeficiente de variación de C_p .
D	Diámetro de las tuberías
g	Aceleración de la gravedad (m/s^2)
h_f	Pérdida de carga por fricción en una tubería o conducto
k	Coeficiente adimensional de pérdida de carga local en tuberías
$K1$	Coeficiente de variación diaria de la demanda, razón entre el caudal diario máximo anual y el caudal promedio anual.
$K2$	Coeficiente de variación horaria de la demanda, razón entre el caudal horario máximo anual y el caudal promedio anual.
k_Δ	Factor de reajuste por agregación temporal
L	Longitud de la tubería (m)
mod	función residuo o módulo (el residuo de dividir dos números enteros)
N_{us}	Número de usuarios de un sistema de distribución de agua potable
v	velocidad del agua en la tubería (m/s)
α	Grado de membresía a un conjunto difuso
β	Factor de reajuste por agregación temporal
μ_{C_p}	valor promedio diario de C_p

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

El Reglamento Nacional de Edificaciones establece en las normas IS.010 (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2012) y OS.010 (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2006) las consideraciones básicas para el diseño de instalaciones sanitarias de edificaciones (a escala de una vivienda) y habilitaciones urbanas (a escala de un grupo de viviendas) respectivamente. Para el primer caso, recomienda el uso del Método de Roy Hunter, aunque permite utilizar algún otro método racional siempre y cuando sea sustentado de manera adecuada.

Para el caso de estimación de la demanda de un grupo de viviendas, la Norma OS.100 del Reglamento Nacional de Edificaciones recomienda, en primera instancia, realizar un estudio de consumos. En caso de no contar con un estudio, se permite estimar los valores de los coeficientes de variación de consumo máximo diario y máximo horario como valores recomendados en la misma norma. A nivel local no se ha encontrado un estudio sobre cuál metodología se usa con mayor frecuencia para determinar los coeficientes de variación de la demanda. Investigadores de otros países mencionan que en la práctica del diseño de sistemas de distribución de agua se utiliza comúnmente coeficientes deterministas de variación de la demanda (Tzatchkov & Alcocer, 2016).

Debido a que la demanda de agua es una variable aleatoria, modelar una red considerando demandas deterministas puede conducir a resultados poco realistas. Por ello es que diversos investigadores recomiendan que el modelamiento del sistema debe tener en consideración el carácter estocástico o aleatorio de la demanda utilizando un enfoque probabilístico (Tricarico, De Marinis, Gargano, & Leopardi, 2007).

El problema principal que motiva el trabajo de investigación es el hecho de que el diseño tradicional con valores deterministas de demanda desestima el comportamiento estocástico inherente a las redes de distribución de agua. Un modelamiento realista de las redes de distribución de agua potable conllevaría a mejorar su confiabilidad y resiliencia, siendo el carácter aleatorio de la demanda uno de los factores de riesgo que más influyen en la confiabilidad hidráulica de un sistema de abastecimiento de agua potable (Gheisi, Forsyth, & Naser, 2016). Con un adecuado modelamiento probabilístico se pueden prever escenarios futuros desfavorables desde etapas tempranas del proyecto.

Un enfoque probabilístico permite establecer niveles de confianza de diseño de acuerdo según las necesidades del sistema. No se diseñarían los sistemas con los valores extremos fijos, sino con percentiles de nivel de confianza aceptables. Esto podría conllevar a reducir las dimensiones de las tuberías, estructuras de almacenamiento, estaciones de bombeo, etc., y tendría como consecuencia menores costos de construcción en la fase de inversión, y menores costos de operación en la fase de post inversión. Entre otras potenciales ventajas, destaca también la reducción de riesgos sobre la salud ligados al estancamiento de agua en las redes de distribución (Omaghomi & Buchberger, 2014).

Se ha mostrado en diversos estudios recientes que los coeficientes de variación máximos de demanda se relacionan de manera inversa con el tamaño de la población de diseño. En este sentido, modelar un sistema con valores fijos de estos coeficientes puede conllevar a deficiencias de diseño, por lo que el modelamiento con variables aleatorias dependientes de dicho parámetro estocásticos representaría una mejora substancial (Tzatchkov & Alcocer, 2016).

Por las razones expuestas, el diseño de las redes de distribución de agua potable considerando la demanda como una variable aleatoria debería conducir a un modelamiento más realista del sistema y por tanto a un diseño óptimo.

1.2. OBJETIVOS

Objetivo General:

- Proponer un modelo para el análisis redes de agua potable utilizando demandas con un enfoque probabilístico/difuso cuya finalidad será estimar la demanda máxima.

Objetivos Específicos:

- Diagnosticar el estado del arte del modelamiento de la demanda en las redes de distribución de agua potable.
- Plantear un modelo basado en la Simulación Difusa de Monte Carlo para el análisis de redes.
- Realizar un análisis comparativo entre los caudales máximos obtenidos con un enfoque determinista y con el enfoque probabilístico propuesto para una red en el ámbito nacional.

1.3. HIPÓTESIS

El modelamiento de redes de agua potable utilizando un enfoque probabilístico para la demanda conduce a la optimización de los caudales de diseño.

1.4. METODOLOGÍA DEL TRABAJO

1. Revisión de bibliografía.
2. Proponer un modelo basado en la Simulación Difusa de Monte Carlo para el análisis de redes de distribución de agua potable.
3. Diseño de la Investigación. Se aplicará el modelo a un proyecto del ámbito nacional, de la siguiente manera:
 - a. Se revisarán las características de la población considerada en el proyecto, y la demanda considerada en el diseño.
 - b. Se caracterizará la demanda de agua potable de la población en base a sus características, utilizando un enfoque probabilístico.
 - c. Se definirá la correlación entre demandas nodales como una variable difusa.
 - d. Se realizará la simulación de la red utilizando el método de análisis propuesto.
 - e. Se determinarán las variaciones de los principales parámetros hidráulicos de la red (velocidades, presiones y caudales).
 - f. Se realizará un análisis comparativo entre los resultados del análisis determinista y el análisis probabilístico para evaluar la variación entre los caudales de diseño.
4. Unidad de Estudio: Proyectos de mejoramiento y ampliación del sistema de abastecimiento de agua potable de la localidad de Pucusana.
5. Población y Muestra: Se estima que la población de diseño oscila entre 10,000 y 15,000 habitantes.
6. Recolección de los datos
 - a. Obtención de datos: La información se obtendrá del Expediente Técnico, el cual se encuentra publicado en la web de SEDAPAL.
 - b. Procesamiento, presentación, análisis e interpretación de los datos: Según lo descrito en el ítem 3), la información se utilizará para un análisis comparativo de parámetros hidráulicos entre el enfoque tradicional y el propuesto.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

2.1.1. Componentes del sistema de abastecimiento de agua potable

Se entiende por sistema de abastecimiento de agua potable al conjunto de componentes que abarcan desde el proceso de captación hasta su entrega al usuario final. Los requisitos más importantes que debe cumplir un sistema de abastecimiento de agua son: que sea inocuo para el consumidor, que sea eficiente y que sea sostenible (Ministerio de Salud, 2011).

En general, los sistema de abastecimiento de agua pueden dividirse en 4 componentes principales (Swamee & Sharma, 2008):

- Fuentes de agua y obras de captación: Se obtiene de fuentes de agua superficial (río, lagos, etc.) y/o subterránea (pozos, galerías filtrantes, etc.).
- Plantas de tratamiento / Estructuras de almacenamiento: Sirven para asegurar la calidad y cantidad requeridas de agua. El grado de tratamiento depende de la calidad del agua sin tratar, y de los requerimientos del agua potable.
- Redes de transmisión: Transportan el agua para su entrega a las redes de distribución. Pueden funcionar con presión de bombeo o por gravedad
- Redes de distribución: Entrega el agua a los usuarios mediante conexiones domiciliarias. Normalmente conformar redes en circuito cerrado.

El Reglamento Nacional de Edificaciones divide a las redes de distribución en dos componentes: ramales de distribución, que son las redes de distribución de último nivel cuya función es alimentar a las viviendas; y las tuberías principales, que es la red de tuberías que conducen agua desde las estructuras de almacenamiento para alimentar a los ramales (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2009).

El presente trabajo se enfoca en la optimización de las redes de distribución considerando la demanda como una variable aleatoria desde el análisis hidráulico. Las redes de distribución a utilizar tendrán en cuenta las tuberías principales de los sistemas de distribución, considerando demandas nodales en los puntos en los cuales se alimentan a los ramales de distribución, que corresponderán a la cantidad de usuarios servidos por dicho ramal.

2.1.2. Tipos de sistemas de abastecimiento

El tipo de fuente de agua es un factor que influye en el diseño de los distintos componentes de un sistema de abastecimiento de agua, pudiendo cambiar su configuración. Desde este punto de vista, se tienen tres tipos de sistemas (Mays, 2010), y las posibles combinaciones entre ellos:

- Sistemas con fuentes de agua superficial: Generalmente, se requiere de tratamiento en una planta para asegurar su calidad, debido a que las fuentes de agua superficial presentan turbidez, además de tener componentes que pueden afectar a la salud de los usuarios, y a los componentes de almacenamiento y conducción (corrosión, acumulación de calcio, etc.).
- Sistemas con fuentes de agua subterráneas: En las regiones áridas del Perú, este tipo de sistemas es especialmente importante. Según lo informado por el INEI, el año 2015 existían 55,646 pozos inventariados (Autoridad Nacional del Agua, 2015). Debido a su calidad antes del tratamiento, el agua subterránea puede ser en algunos casos usada sin necesidad de tratamiento. No obstante, tienen que evaluarse sus propiedades físicas y químicas para evitar efectos adversos sobre los usuarios y/o el sistema de distribución; estos factores definirán si requiere tratamiento.
- Sistemas con fuentes de agua externas (agua adquirida): Cuando una localidad no cuenta con fuentes de agua adecuadas en calidad y/o cantidad para su abastecimiento, se tiene que recurrir al abastecimiento de un proveedor externo. Esto suple muchos problemas relacionados a la calidad, y facilita la gestión del sistema. Dependiendo de las condiciones del suministro, pueden requerirse estructuras de almacenamiento de mayor capacidad que en un sistema con suministro superficial. En estos sistemas, con mayor frecuencia se tiene un mayor control sobre las pérdidas de agua (fugas), debido a que el costo de las mismas se paga al proveedor externo.

2.1.3. Hidráulica de las redes de distribución

2.1.3.1. Pérdidas de carga

El diseño hidráulico de tuberías de distribución esta principalmente condicionado por dos factores: la resistencia al movimiento de los fluidos en función de las presiones, y las velocidades requeridas y permitidas para la operación del sistema

(Shammas & Wang, 2016). Esta resistencia genera pérdida de cota piezométrica en el flujo, pudiendo ocurrir como pérdida por fricción, y pérdidas locales.

Las pérdidas de carga por fricción se deben a la fricción de contacto entre el fluido y la tubería que lo conduce. Para su cálculo pueden utilizarse las fórmulas de Darcy-Weisbach o la de Hazen-Williams. La fórmula de Darcy-Weisbach requiere de un proceso iterativo para el cálculo del factor de fricción, además de requerir información adicional para este cálculo al analizar una tubería con sección no circular, es por ello que muchos ingenieros prefieren utilizar la fórmula de Hazen-Williams (Shammas & Wang, 2016).

$$\text{Darcy-Weisbach: } h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (2.1)$$

$$\text{Hazen-Williams: } h_f = 6.81 \left(\frac{v}{C}\right)^{1.85} \frac{L}{D^{1.17}} \quad (2.2)$$

Donde h_f es la pérdida de cota piezométrica en metros (m), L es la longitud de la tubería en (m), D es el diámetro de la tubería en (m), f es el factor adimensional de fricción (el cual puede obtenerse con fórmulas empíricas o por el diagrama de Moody), v es la velocidad en m/s , g es la gravedad en m^2/s , C es el coeficiente adimensional de Hazen-Williams,

Además de las pérdidas por fricción, cuya magnitud es directamente proporcional a la longitud de la tubería analizada, existen las pérdidas locales, que ocurren en transiciones y cambios de dirección. Estas se calcula con una fórmula sencilla que depende de un factor de pérdida que depende de la geometría del elemento, de la siguiente manera (Shammas & Wang, 2016):

$$h_k = k \frac{v^2}{2g} \quad (2.3)$$

Las velocidades máximas y mínimas son establecidas en base al efecto que puede tener el agua en movimiento sobre las tuberías, ya sea la erosión en el caso de velocidades altas, y sedimentación en el caso de velocidades bajas. El Reglamento Nacional de Edificaciones en la norma OS.050 establece las siguientes velocidades límite (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2009) (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2012):

- Velocidad máxima: 3.0 m/s (en casos excepcionales se puede aceptar 5.0 m/s)
- Velocidad mínima: 0.6 m/s

El otro parámetro de control importante es la presión. Para una red de distribución de agua, los valores límite son 10 m de presión dinámica como mínimo y 50 m de presión estática de columna de agua como máximo (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2009). Las presiones bajas se controlan para asegurar un adecuado abastecimiento al usuario, y las velocidades altas para evitar el colapso de las tuberías por sobrepresión.

2.1.3.2. Desempeño del sistema

Para un funcionamiento correcto del sistema hidráulico, los componentes deben ser diseñados de modo que puedan tener un funcionamiento óptimo. Entre otros factores, se pueden mencionar (Mays, 2010):

- Capacidad de las bombas: Las bombas de capacidad idónea tienen ciclos de uso de acuerdo a la variación de la demanda. Las bombas de menor capacidad conducen a pérdidas de presión ante el incremento de la demanda, y las bombas de mayor capacidad permanecen por mucho tiempo utilizando muy poco de su capacidad.
- Capacidad de las tuberías: En el caso de las tuberías, tanto una tubería adecuada como una de mayor diámetro pueden satisfacer los requerimientos de caudal. Sin embargo, una tubería de mayor diámetro que el requerido representaría un costo innecesario para el sistema.
- Capacidad de los reservorios: Un reservorio de capacidad idónea para el sistema tiene ciclos de carga y descarga razonables. Reservorios de mayor capacidad también puede satisfacer la demanda del sistema, sin embargo, su costo es mayor. Reservorios de menor capacidad no pueden cubrir la demanda en horas de mayor uso de agua, por lo que se produce una caída de la presión.
- Elevación del reservorio de la red: La elevación del reservorio está relacionada directamente con la necesidad de uso del sistema de bombeo. Si la elevación no es la adecuada, habrá un uso excesivo de la bomba para mantener el equilibrio piezométrico del sistema.
- Presiones bajas en el sistema: Las zonas de menor presión puede ocurrir ya sea debido a su elevación altimétrica, o a la pérdida de presión por la distancia al reservorio. En el primero de los casos, hay una tendencia a mantener una presión estable, mientras que en el segundo caso la presión puede variar considerablemente en las horas pico.
- Desempeño del sistema durante la rotura de tuberías: Debe tener en cuenta que, ante fallas en tuberías, las presiones tienden a caer, y a pesar

de eso el sistema debe tener cierta resiliencia, y poder seguir abasteciendo a los usuarios por un tiempo razonable.

2.1.3.3. Análisis de redes

La geometría de las redes de distribución dependerá principalmente de la distribución de las calles de la localidad a abastecer, debido a que las tuberías se colocan debajo de las mismas. En este sentido, normalmente se adoptan sistemas ramificados en las afueras de las ciudades, y sistemas en circuito cerrado en las zonas con calles distribuidas en damero (Shammas & Wang, 2016). Es también habitual usar sistemas mixtos.

Los sistemas en circuito son mucho más confiables que los sistemas ramificados, ya que cada nodo de la red no se alimenta de una única tubería, sino de varias al mismo tiempo. En el caso del mantenimiento o reparación de una tubería en particular, el sistema tiene la capacidad de seguir funcionando, algo que no ocurre en los sistemas ramificados. Además, con este sistema se asegura la ausencia de puntos sin salida en la red (Swamee & Sharma, 2008). Es debido a esta ventaja que incluso el Reglamento Nacional de Edificaciones recomienda su uso en la norma OS.050 (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2009).

El análisis de redes ramificadas es sencillo, debido que puede calcularse de manera sencilla desde el punto de alimentación a cada ramal del sistema. Para ello se utilizan directamente las ecuaciones de Hazen-Williams o Darcy-Weisbach (Swamee & Sharma, 2008).

En el caso de redes en circuito cerrado, los métodos más comunes para su solución son:

- Método de Hardy Cross: Se hacen iteraciones para estimar los caudales utilizando las ecuaciones de continuidad y de pérdida de carga partiendo de valores iniciales establecidos al iniciar el proceso. Para este análisis, se divide la red en sus circuitos elementales.
- Método de Newton-Raphson: Se analiza el sistema como un conjunto de ecuaciones no lineales. A diferencia del método de Hardy Cross, este método analiza todo el sistema de manera simultánea.
- Método de linearización: Se analiza el sistema como un conjunto de manera similar al método de Newton-Raphson, con la diferencia que para resolver el sistema se realizan aproximaciones sucesivas en las que se simplifican las ecuaciones asumiendo linealidad en las ecuaciones de pérdida de carga.

EPANET, el software que se utiliza en este trabajo, utiliza un método heurístico denominado “Método del gradiente”, propuesto por Todini y Pilati en 1987 (Rossman, 2000). Este es un método matricial basado en el método de Newton-Raphson, que convierte el sistema de ecuaciones lineales y no lineales ligadas al sistema hidráulico a un conjunto iterativo de ecuaciones lineales (Todini & Pilati, 1988).

2.1.3.4. Análisis DDA y PDA

El análisis tradicional de redes de distribución de agua potable considera que la demanda en cada nodo es un valor que no depende de la presión nodal. Esta asunción simplifica los cálculos hidráulicos. Este enfoque se denomina como Análisis Dirigido por la Demanda o DDA por sus siglas en inglés (*Demand Driven Analysis*) (Giustolisi & Walski, 2012). Este tipo de análisis puede en algunos casos conducir a resultados poco realistas, principalmente en escenarios en que la red se encuentra colapsada (por fallas en el sistema hidráulico) (Gheisi, Forsyth, & Naser, 2016).

Un enfoque alternativo consiste en modelar los sistemas de distribución considerando la dependencia de la demanda y la presión. Cuando la presión es menor que un valor umbral mínimo, se considera que en ese nodo el caudal disponible es nulo. Cuando la presión disponible varía entre dicho valor y el valor requerido, existen un caudal disponible, pero es menor que el caudal demandado. Cuando la presión es mayor o igual que el valor requerido, el caudal disponible será igual que el caudal demandado. Este enfoque, muy utilizado en los análisis de confiabilidad (en que se analiza el nivel de satisfacción de las presiones deseadas) se denomina Análisis Dirigido por la Presión (HDA o PDA por sus siglas en inglés, *Pressure o Head Driven Analysis*) (Surendran, Tanyimboh, & Tabesh, 2005). Este tipo de análisis le añade complejidad al modelo, requiriendo cálculos iterativos para llegar a la solución final del sistema (Giustolisi & Walski, 2012).

2.1.3.5. Confiabilidad y robustez

Un concepto importante en el análisis de la incertidumbre en los sistemas de distribución de agua es la confiabilidad. Se define a la confiabilidad de un sistema como su capacidad de responder durante condiciones normales y anormales de operación (Giustolisi, Laucelli, & Colombo, 2009). Por la naturaleza de las posibles fallas hidráulicas, existen tres tipos de confiabilidad: confiabilidad ante fallas mecánicas (fallas en elementos físicos de la red, como válvulas, tuberías, etc.),

confiabilidad ante fallas hidráulicas (ante fenómenos como la variación de la demanda) y confiabilidad de la calidad del agua (Gheisi, Forsyth, & Naser, 2016).

Un concepto relacionado es la robustez, que es la capacidad de la red de satisfacer la demanda de los usuarios (en calidad y cantidad) ante la variación de uno o más parámetros del sistema. Para evaluar la robustez de una red se requiere, por tanto, estimar la variabilidad de los diferentes parámetros de la red (Babayan, Kapelan, Savic, & Walters, 2005).

2.1.3.6. *Importancia del análisis hidráulico*

Como se puede apreciar, el análisis de redes implica resolver un sistema complejo de ecuaciones no lineales, ya sea con un método algebraico o numérico. Además de analizar el estado estacionario del sistema, en el que se considera que los caudales, presiones y demandas son constantes, es común hacer un análisis de tiempo extendido, en el que se considera que la demanda cambia a lo largo del tiempo. Esto implica resolver muchas veces el sistema como en estado estacionario para las diferentes configuraciones de demanda (Mays, 2010). Este análisis es muy importante debido a que la permite conocer el rango de carga de trabajo esperado para el sistema de tuberías.

El análisis de redes de distribución de agua puede tener muchos usos, entre los que se pueden mencionar (Mays, 2010):

- Ampliar la capacidad de servicio de sistemas de distribución existentes.
- Distribuir y dimensionar componentes hidráulicos en sistemas nuevos o existentes.
- Optimización de desempeño de componentes del sistema: bombas, tanques, etc.
- Estudios de calidad del agua.
- Análisis de riesgo ante incendios para temas de seguros.
- Estudios de vulnerabilidad ante la ocurrencia de sequías, contaminación, fallas, etc.

2.1.4. Consideraciones de diseño

Como en todo problema de ingeniería, muchos aspectos del diseño están regidos por las normas de diseño aplicables al proyecto. En el caso del Perú, se cuenta con el Reglamento Nacional de Edificaciones elaborado por el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. Asimismo, el “Reglamento de la Calidad del Agua para el Consumo Humano” del Ministerio de Salud define los parámetros

límite para la aceptación del agua para consumo humano. Estas consideraciones son:

2.1.4.1. Periodo de diseño

La Norma OS.100 menciona que el periodo debe determinarse para cada estructura, y debe ser el óptimo, quedando a cargo del proyectista su definición y sustento (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2006). Se entiende por optimización lograr la menor relación costo/beneficio para la inversión a realizar.

En este sentido, es importante indicar que la elección del periodo de diseño depende de los siguientes factores (Shammas & Wang, 2016):

- La vida útil de la estructura y su equipamiento.
- La dificultad para la ampliación.
- El crecimiento poblacional y el consecuente incremento en el uso del agua
- La tasa de descuento
- La pérdida de desempeño esperada en el sistema

En base a un modelo matemático que considera también el factor de economía de escala, y se considera un incremento lineal en la demanda, planteado por Donald T. Lauria, se puede calcular el periodo óptimo X_0 en años de la siguiente manera (Arocha, 1997):

$$X_0 = \frac{2.6(1-a)^{1.12}}{r} + \frac{0.3(1-a)}{\sqrt{r}} X_D^{0.85} \quad (2.4)$$

Donde a es el factor de economía de escala de la estructura en análisis, r es la tasa de descuento, y X_D es el periodo de déficit de la estructura.

Para la estimación del periodo óptimo de diseño en proyectos en el Perú (Guibo, 2018), se pueden utilizar las siguientes fórmulas para el cálculo del periodo de óptimo de diseño en años con déficit y sin déficit (X^* y X_0 respectivamente):

$$X^* = \frac{2.6(1-a)^{1.12}}{r} \quad (2.5)$$

$$X_0 = X^* + \left(\frac{1-a}{r}\right)^{0.7} + \frac{(X_D)^{0.9}}{(X_D + X^*)^{0.6}} \quad (2.6)$$

Otro enfoque que considera el incremento de la demanda como una función exponencial, y no tiene en cuenta el factor de economía de escala, calcula el periodo óptimo en función de la vida útil de la estructura de la siguiente manera (Swamee & Sharma, 2008):

Para sistemas con flujo por gravedad:

$$X_O = X_U(1 + 2brX_U^2)^{0.375} \quad (2.7)$$

Para sistemas con flujo por bombeo:

$$X_O = X_U(1 + 0.417brX_U^2 + 0.01b^2X_U^2)^{0.375} \quad (2.8)$$

Donde b es el factor de crecimiento exponencial de la demanda, de modo que $Q = Q_0e^{bt}$, r es la tasa de descuento, y X_U es el tiempo de vida útil de la estructura.

Otros autores mencionan que es común utilizar el periodo de diseño de cuadros empíricos. Entre un autor y otro, pueden observarse diferencias importantes (Shammas & Wang, 2016) (Davis, 2010) (McGhee, 1999). En este sentido, siendo el periodo de diseño un tema tan influyente en el costo final del proyecto, es importante tomar un criterio para su determinación según las condiciones particulares del proyecto.

2.1.4.2. Población de diseño

La población de diseño de un proyecto es la población estimada que será servida por el sistema de abastecimiento en diseño. En la norma OS.100 se indica que la población debe calcularse considerando las tasas de crecimiento poblacional obtenidas del INEI (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2006).

Para este cálculo, existen diversas fórmulas, cuya aplicación dependerá de las características propias de la comunidad, y de los factores externos que puedan afectar a su crecimiento (McGhee, 1999).

- Método aritmético
- Método del porcentaje uniforme
- Método curvilíneo
- Método logístico
- Método del crecimiento declinante
- Método de la proporción

Existen además otras fórmulas para el ajuste, quedando a criterio del diseñador elegir la más adecuada para la población en análisis.

2.1.4.3. Demanda

El uso del agua puede ser de tipo doméstico, comercial e industrial, uso público y pérdidas. La demanda depende de muchos factores, entre ellos el clima, el nivel socioeconómico de la población, el tamaño de la ciudad, etc. (McGhee, 1999).

La norma peruana recomienda estimar la demanda en base a análisis de información estadística. En caso de no contarse con dicha información, y en caso no se justifique realizar un estudio de mercado, permite utilizar los siguientes valores (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2006):

- Para sistemas con conexiones domiciliarias:
 - o En clima frío: 180 l/hab/d
 - o En clima templado y cálido: 220 l/hab/d
- Para programas de vivienda con lotes de área menor o igual a 90 m²:
 - o En clima frío: 120 l/hab/d
 - o En clima templado y cálido: 150 l/hab/d
- Para sistemas de abastecimiento indirecto con cisternas o piletas:
 - o En clima frío: 30 l/hab/d
 - o En clima templado y cálido: 50 l/hab/d
- La demanda industrial debe determinarse de acuerdo al uso esperado
- La demanda comercial debe calcularse en base a las dotaciones que se mencionan en la Norma IS.010
- En caso de localidades con más de 10,000 pobladores, se debe considerar la demanda para el sistema contra incendio. El caudal adicional a considerar por tubería que contiene hidrantes es:
 - o Para zonas de uso residencial: 15 l/s
 - o Para zonas de uso comercial/industrial: 30 l/s

2.1.4.4. Variaciones de consumo y caudales de diseño

De manera similar a lo indicado en lo que respecta a la demanda, la norma recomienda calcular los factores de variación de la demanda en base al análisis de información estadística. De igual manera, permite calcular la demanda en caso no se tuviese dicha información disponible de la siguiente manera (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2006):

- Valor máximo anual de la demanda diaria: 1.3 veces la demanda diaria promedio
- Valor máximo anual de la demanda horaria: De 1.8 a 2.5 la demanda diaria promedio

Para fines de diseño, la norma OS.050 establece que el caudal de diseño de la red de distribución será el mayor entre el caudal máximo horario y el caudal máximo diario más el caudal contra incendios en caso sea requerido (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2009).

En el capítulo 3 del presente trabajo se describirá con mayor detalle el estado del arte y los requerimientos normativos del cálculo de la demanda y su variación.

2.1.4.5. Velocidades y presiones

En la sección 2.1.3 se han definido los límites permisibles para estos dos parámetros.

2.1.4.6. Diámetros y clases de tuberías

Los diámetros de las tuberías a utilizar estarán limitados por dos factores: disponibilidad de mercado, y diámetros mínimos reglamentarios.

Los diámetros comerciales para tuberías de PVC que trabajan a presión, están definidos en nuestro país por la norma NTP-ISO 1452-2: 2011. Estos diámetros son (milímetros): 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 75, 90, 110, 125, 140, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900 y 1000.

Las presiones nominales máximas que pueden resistir los tubos, según lo define la norma, son (en bares): 6, 8, 10, 12.5, 16, 20 y 25.

Asimismo, la norma OS.050 establece los diámetros mínimos a utilizar en los sistemas de distribución según su importancia:

- Diámetros mínimos en tuberías principales
 - o Para zonas residenciales: 75 mm
 - o Para zonas industriales: 150 mm
 - o Excepcionalmente pueden utilizarse tuberías de 50 mm
- Diámetros en ramales de distribución: determinados por cálculo hidráulico.

2.1.4.7. Almacenamiento:

La norma OS.030 cubre los requerimientos mínimos necesarios para el diseño de estructuras de almacenamiento de agua potable. En este sentido, se establece como función de las estructuras de almacenamiento el suministro de agua en cantidad necesaria compensando las variaciones diarias de la demanda, las demandas contra incendios, y los incrementos de caudal producidos por paralización del sistema de captación y tratamiento (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2006).

El agua a almacena se clasifica en 3 categorías:

- **Volumen de regulación:** Para la determinación del volumen, la norma mencionada establece que debe estudiarse la curva de variación horaria de la población en estudio. Esta curva se genera analizando data

estadística de consumo, y refleja la variación de consumo a lo largo del día. Con esta información, se debe elaborar el diagrama masa, y determinarse el volumen. En caso de no contar con esta información, la norma permite estimar el volumen como el 25% del promedio anual de la demanda como mínimo en caso de abastecimiento continuo de 24 horas.

- **Volumen contra incendio:** En el caso que corresponda un sistema contra incendio, el volumen de almacenamiento a considerar será como mínimo de 50 m³ en zonas de uso residencial, y en zonas de uso comercial/industrial será calculado con un gráfico del Anexo 1 de la norma mencionada.
- **Volumen de reserva:** Es el volumen adicional a los ya mencionado líneas arriba. Este volumen debe justificarse en caso de considerarse necesario.

2.1.4.8. Calidad

Los requisitos de calidad de agua aplicables a los sistemas de abastecimiento de agua potable los define el Ministerio de Salud en el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. En dicho documento se establecen los valores permisibles para los parámetros de calidad, que se clasifican en dos categorías (Ministerio de Salud, 2011):

- Parámetros de Control Obligatorio: Coliformes totales, coliformes termotolerantes, color, turbiedad, residual de desinfectantes y pH.
- Parámetros Adicionales de Control Obligatorio: Parámetros microbiológicos, parámetros organolépticos (sólidos, sales, etc.), parámetros inorgánicos y parámetros radiactivos.

2.1.4.9. Otros

Los componentes de los sistemas de abastecimiento de agua potable no mencionados, como son las plantas de tratamiento de agua potable, las estaciones de bombeo y las estructuras de captación, también están normadas por el Reglamento Nacional de Edificaciones, y tienen su norma propia. Estos componentes se encuentran fuera del alcance del presente trabajo, por lo cual no se entró en mayores detalles.

2.1.5. Análisis computacional de redes de distribución de agua potable

El problema del análisis de redes de distribución de agua consiste en resolver dos conjuntos de ecuaciones: un grupo de ecuaciones lineales resultantes de la ley de continuidad en los nodos de la red, y un conjunto de ecuaciones no lineales que se originan al analizar las pérdidas en las tuberías, que se hace con fórmula de

Hazen-Williams o la de Darcy-Weisbach. Este problema sólo puede resolverse con métodos iterativos. Incluso para redes de distribución pequeñas, se hace necesario el uso de una computadora para realizar el cálculo (Rossman, 2000).

El algoritmo básico para la solución de redes de distribución de agua fue propuesto en 1936 por el ingeniero estadounidense Hardy Cross. Este método fue utilizado para el cálculo manual de redes hasta la década de 1960, que fue cuando comenzaron a desarrollarse los primeros programas de cálculo por computador. En esa década, sin embargo, se popularizó el uso de algoritmos basados en el método de Newton-Raphson debido a su mejor performance, utilizando el lenguaje de programación FORTRAN. En la década de 1970 se mejoraron considerablemente los algoritmos de solución, y se introdujo el análisis de tiempo extendido. El análisis de calidad de agua en redes fue desarrollado en la década de 1980. En la década siguiente se desarrolló de manera notable la integración con interfaces gráficas, CAD, hojas de cálculo y bases de datos para las el análisis redes de distribución de agua (Rossman, 2000). A partir del 2000, los modelos por computador fueron mejorando en su integración a los Sistemas de Información Geográfica (GIS por sus siglas en inglés), a la vez que se desarrollaron de herramientas para la optimización de redes, la calibración y el análisis de resiliencia ante eventos catastróficos y/o fallas (Mays, 2010).

Se hace énfasis en el programa EPANET, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) en la década de 1990, cuya licencia es de dominio público. EPANET es un programa que permite el modelamiento hidráulico y de calidad de agua en redes de distribución, permitiendo además el análisis de periodo extendido. Las principales características del modelamiento hidráulico del programa son (Rossman, 2000):

- Permite analizar una cantidad ilimitada de nodos y tuberías
- Calcula de pérdidas por fricción con fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach y Chezy-Manning.
- Permite incluir pérdidas localizadas
- Modela bombas de velocidad constante y variable
- Calcula energía y costo de bombeo
- Modela de diversos tipos de válvula
- Permite modelamiento de reservorios de diversas formas
- Permite múltiples categorías de demanda nodales, permitiendo usar una curva de variación horaria para cada una.

- Permite modelar demandas dependientes de la presión
- Permite modelar el sistema con entradas de nivel de agua en los tanques y controles de flujo.

Una característica de EPANET es su Caja de Herramientas del Programador de EPANET (*EPANET Programmer's Toolkit* en inglés). Este es un conjunto de librerías y paquetes que se pueden utilizar en diversos lenguajes de programación, permitiendo utilizar el motor de análisis del programa en rutinas creadas por el usuario. Los lenguajes de programación soportados son: C/C++, Delphi, Pascal, Visual Basic, Python, Matlab, y cualquier otro lenguaje que permita utilizar las funciones incorporadas en archivos DLL (Vegas, Martínez, Alonso, & Tzatkov, 2017).

2.2. ESTADÍSTICA Y PROBABILIDAD

2.2.1. Teoría de la Probabilidad

La probabilidad ha sido desde tiempos remotos un concepto ligado a los juegos de azar. Su planteamiento formal, como Teoría de la Probabilidad, ha sido materia de estudio de los matemáticos más notables desde el siglo XVII. Entre ellos, se puede mencionar a Pierre de Fermat, Blaise Pascal, Christian Huygens, Jacobo Bernoulli, Abraham De Moivre, Thomas Bayes, Pierre Laplace, Friedrich Carl Gauss, Denis Poisson y Pafnuty Chevsyhev, en orden cronológico (Papoulis & Pillai, 2002).

La concepción axiomática moderna de la Teoría de la Probabilidad, es atribuida a Andrei Kolmógorov, quien en su trabajo "Fundamentos de la Teoría de Probabilidades" de 1933 sentó las bases de esta rama de las matemáticas basando su definición en la Teoría de Conjuntos y la Teoría de la Medida (Gorban, 2018). Esta definición permitiría generalizar la teoría, y su aplicación a los casos particulares a los que se venía aplicando antes de su planteamiento (Kolmógorov, 1987).

Esta definición establece que, siendo S el conjunto conformado todos los posibles resultados de un experimento (espacio muestral), y E un conjunto de resultados de este experimento (evento), se denominará a la función $P(E)$ función de probabilidad si se cumplen los siguientes axiomas (Canavos, 1988):

1. $P(E) > 0$
2. $P(S) = 1$
3. Si para los eventos $E_1, E_2, E_3 \dots$
 $E_1 \cap E_2 \cap E_3 \dots = \emptyset$, entonces:

$$P(E_1 \cap E_2 \cap E_3 \dots) = P(E_1) + P(E_2) + P(E_3) \dots$$

La importancia de estos axiomas es que permiten estructurar los conceptos comunes dentro del campo de la Probabilidad, permitiendo una visión holística de la teoría. Para ello se utilizan las propiedades y definiciones de la Teoría de Conjuntos. Los siguientes teoremas elementales, se derivan de los axiomas mencionados:

1. $P(\emptyset) = 0$
2. Para $\forall E \in S, 0 \leq P(E) \leq 1$
3. $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$

2.2.2. Variables aleatorias

Se define a la variable aleatoria como la función que transforma sobre la recta de los números reales a los resultados de un experimento sobre un espacio muestral S (Canavos, 1988). El dominio de la variable aleatoria es el conjunto formado por todos los posibles resultados del experimento.

Un ejemplo sencillo sería la asociación de un número al resultado del lanzamiento de un dado. Cuando el lado cae con el lado con los 2 puntos hacia arriba, la variable aleatoria toma el valor 2. Cuando el dado cae con el lado de 6 puntos hacia arriba, la variable aleatoria toma el valor de 6. Es decir, se mapean los resultados del experimento “lanzamiento de un dado” a una serie de valores numéricos reales (en este caso números enteros entre 1 y 6).

Teniendo en cuenta la definición de la función, el significado de variable aleatoria puede tener dos acepciones. Por un lado, puede representar el conjunto de todos los números reales (probabilidades) asociados a cada resultado del experimento, y por otro lado podría entenderse como la regla de correspondencia entre el conjunto de resultados y su correspondiente conjunto de probabilidades en el experimento (Papoulis & Pillai, 2002).

Existen dos tipos de variables aleatorias, según la naturaleza de su rango (Montgomery & Runger, 2014):

- Variables aleatorias discretas: Su rango es un conjunto finito (con cantidad de elementos contable).
- Variables aleatorias continuas: Tiene como rango a un intervalo de números reales (finito o infinito).

2.2.3. Distribuciones de probabilidad

Se denomina Función de Probabilidad (o Función de Densidad de Probabilidad para variables aleatorias continuas) a la función real de variable real que asigna a cada valor de la variable aleatoria un valor numérico que corresponde a su probabilidad. En el caso de las Variables Aleatorias Continuas, se entiende a esta función como la curva límite para un número grande de observaciones en un intervalo muy pequeño. Por ello, la Función de Densidad de Probabilidad debe cumplir las siguientes condiciones (Canavos, 1988):

1. $f(x) \geq 0$, para todo $x \in \mathbb{R}$
2. $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1$
3. $P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x)dx$

Donde X es una variable aleatoria, x es el valor de su dominio, a y b son dos valores cualesquiera de la variable X . Si estas condiciones se cumplen, $f(x)$ se denominará Función de Densidad de Probabilidad.

Asimismo, se define como Función de Probabilidad Acumulada (*Cumulative Distribution Function*, CDF en inglés) a la función cuyo valor es la probabilidad de que la variable X tome un valor menor que el valor específico de x , o $P(X \leq x)$. Si $F(x)$ es una función de probabilidad acumulada, entonces se cumple que:

1. $F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt$
2. $F(-\infty) = 0$
3. $F(+\infty) = 1$
4. $P(a \leq x \leq b) = F(b) - F(a)$
5. $\frac{dF(x)}{dx} = f(x)$

A continuación, se detallan las funciones de probabilidad más comunes:

Distribución normal

La distribución normal es de uso muy extendido en el estudio de diversos fenómenos, y es una de las más usadas en las estadísticas. Fue originalmente como una aproximación a la distribución binomial cuando la probabilidad no es 0 ni 1 (Forbes, Merran, Hastings, & Peacock, 2011).

Sus propiedades son:

- Parámetros: μ (media, parámetro de ubicación) y σ (desviación estándar, parámetro de escala)

- Rango: $-\infty < x < +\infty$
- Función de probabilidad: $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$
- Valor esperado: μ
- Varianza: σ

En la figura 1 se muestran tres ejemplos de la distribución, en la que se aprecia la influencia de los parámetros.

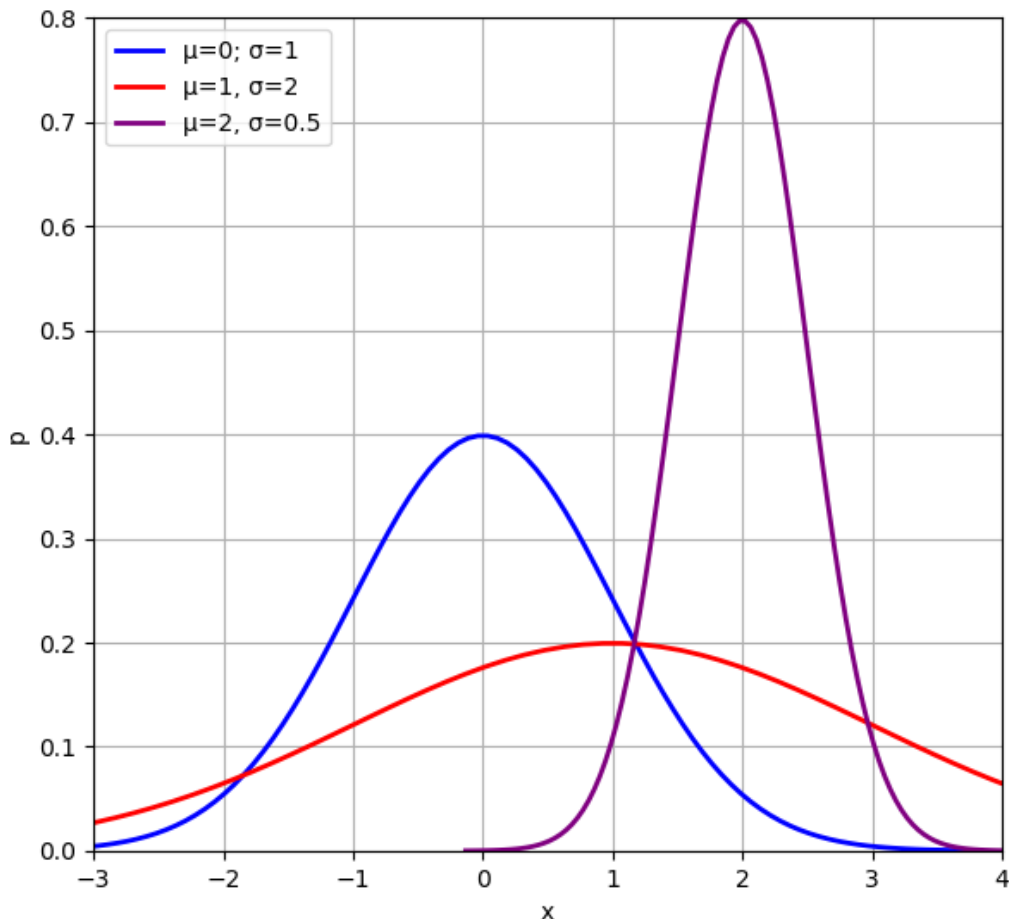


Fig. 1: Distribución normal. Fuente: Elaboración propia

Distribución log-normal

Es una distribución asimétrica limitada por el extremo inferior (Forbes, Merran, Hastings, & Peacock, 2011). La característica principal de esta distribución es que su logaritmo presenta una distribución normal.

Sus propiedades son:

- Parámetros: Se define comúnmente con dos parámetros: la media μ y la desviación estándar σ de la distribución normal $\ln(x)$. En la librería Scipy de Python, se define con 3 parámetros: $s = \sigma$, loc (*location*, ubicación del

inicio del dominio) y $scale = e^\mu$ (factor que regula la amplitud) (The Scipy community, 2018).

- Rango: $loc \leq x < +\infty$
- Función de probabilidad: $f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(x)-\mu}{\sigma}\right)^2}$
- Valor esperado: $e^{\mu+\frac{\sigma^2}{2}}$
- Varianza: $e^{2\mu+\sigma^2}(e^{\sigma^2} + 1)$

Se muestran a continuación 4 distribuciones lognormal graficadas en Python. Nótese la influencia de los parámetros en la forma de la curva.

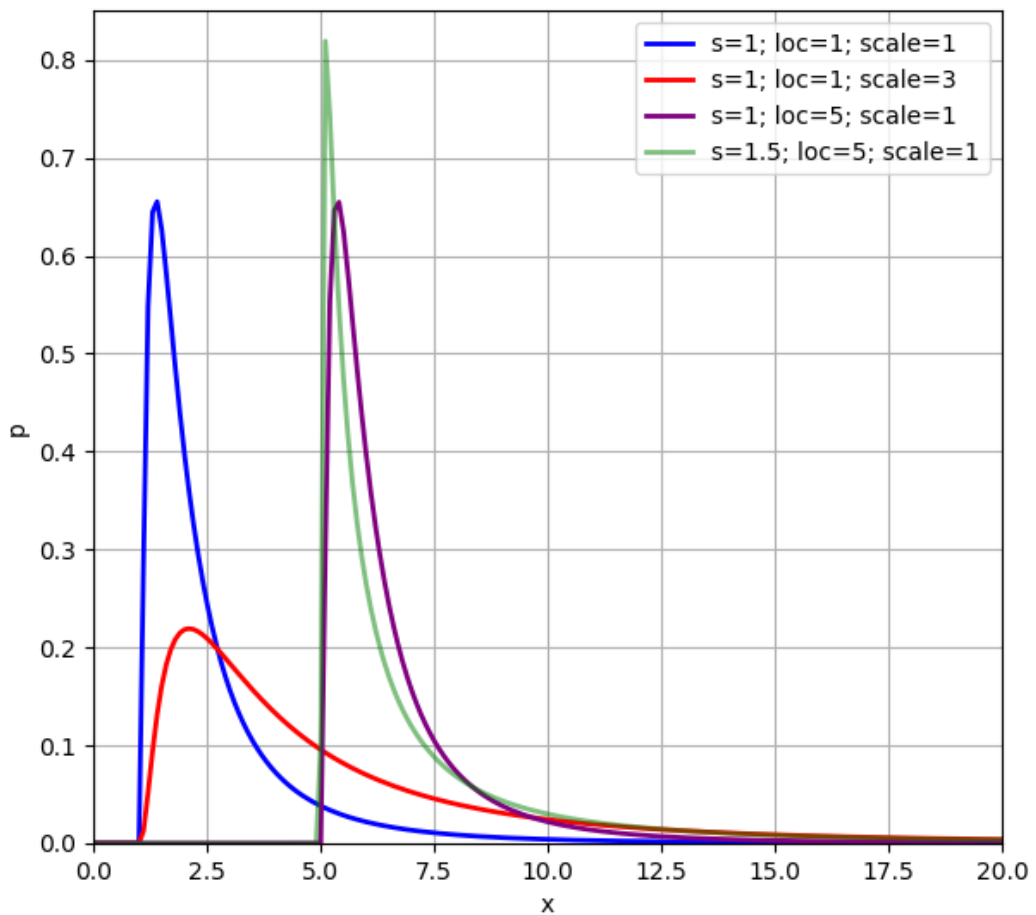


Fig. 2: Distribución lognormal. Fuente: Elaboración propia

Distribución beta

La distribución beta se usa para definir representar variables aleatorias acotadas por ambos extremos. Un ejemplo serían las duraciones de actividades en redes de proyectos (Forbes, Merran, Hastings, & Peacock, 2011). Una característica que tiene esta distribución es que el grado de asimetría puede modularse con la proporción entre sus parámetros principales.

- Parámetros: α y β , parámetros de forma. En la librería Scipy de Python, se definen 2 parámetros adicionales: *loc* (*location*, ubicación del inicio del dominio, ya que por defecto se sitúa en $x = 0$) y *scale* (factor que define la amplitud del dominio, ya que por defecto es 1) (The Scipy community, 2018).
- Rango: $0 \leq x \leq 1$
- Función de probabilidad: $f(x) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}$, donde $\Gamma(x)$ es la función gamma de x .
- Valor esperado: $\frac{\alpha}{\alpha+\beta}$
- Varianza: $\frac{\alpha\beta}{(\alpha+\beta)^2(\alpha+\beta+1)}$

En la figura 3 se muestran 3 curvas de distribución beta con parámetros utilizados para su representación en Python.

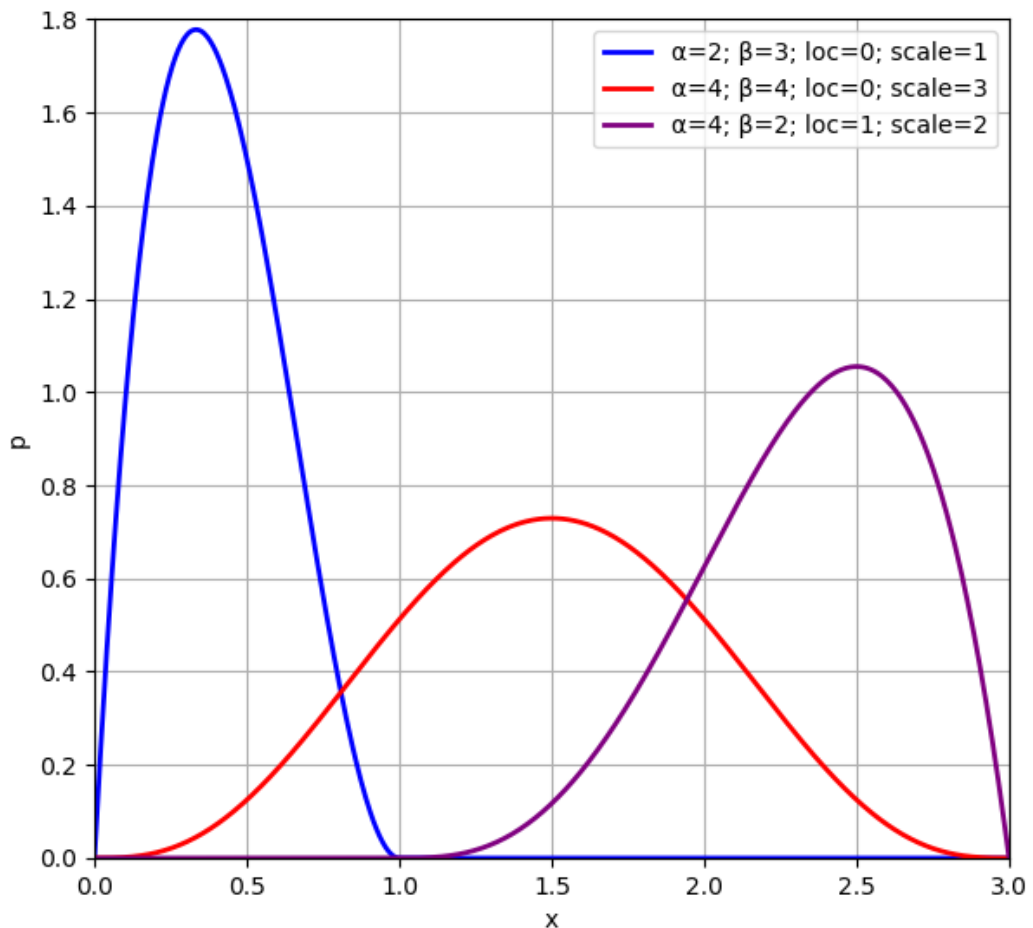


Fig. 3: Función beta. Fuente: Elaboración propia

Distribución triangular

Esta distribución tiene la forma de un triángulo, donde el vértice central representa al valor con mayor probabilidad.

- Parámetros: a y b , límites inferior y superior; c , valor con mayor probabilidad (moda). En la librería Scipy de Python, se definen con 3 parámetros adicionales: $loc = a$ (*location*, límite inferior) y $c' = b - a$ (amplitud del dominio) y $s = (moda - a)/c$ (factor de forma) (The Scipy community, 2018).
- Rango: $a \leq x \leq b$
- Función de probabilidad: $f(x) = \frac{(x-a)^2}{(b-a)(c-a)}$ para $a \leq x \leq c$, $f(x) = 1 - \frac{(b-x)^2}{(b-a)(b-c)}$ para $c \leq x \leq b$.
- Valor esperado: $\frac{a+b+c}{3}$
- Varianza: $\frac{a^2+b^2+c^2-ab-ac-bc}{18}$

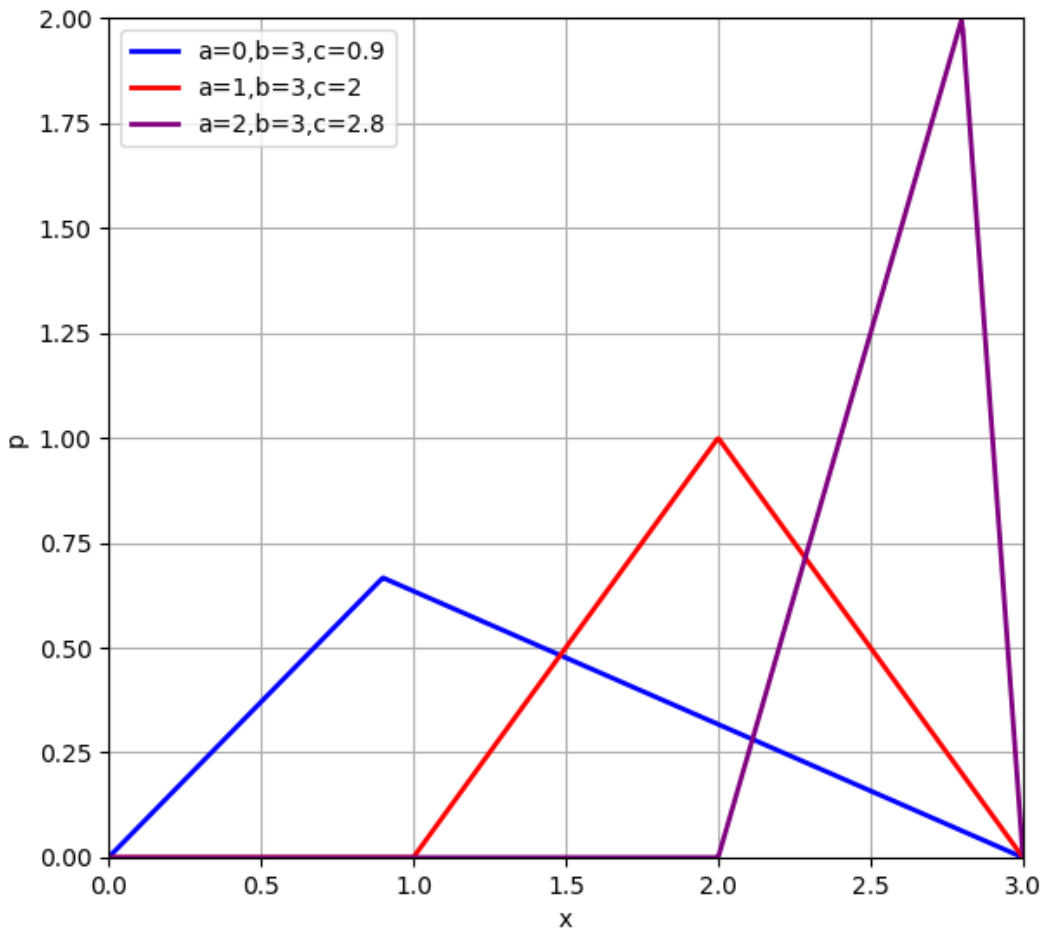


Fig. 4: Distribución triangular. Fuente: Elaboración propia

Distribución t de Student

La distribución t de Student se origina en el estudio de la media de una población pequeña con distribución normal, cuando se necesita calcular la varianza (Kroese, Taimre, & Botev, 2011). Es muy usual en las pruebas de hipótesis cuando se compara dos muestras con distribución normal, y se quiere saber si ambas pertenecen a la misma población.

- Parámetros: ν , un parámetro que define la forma de la curva. Cuando es entero, representa el número de grados de libertad de la variable.
- Rango: $-\infty < x < +\infty$
- Función de probabilidad: $f(x) = \frac{\Gamma[(\nu+1)/2]}{\sqrt{\pi\nu} \Gamma[\nu/2][1+x^2/\nu]^{(\nu+1)/2}}$
- Valor esperado: 0
- Varianza: $\frac{\nu}{\nu-2}$

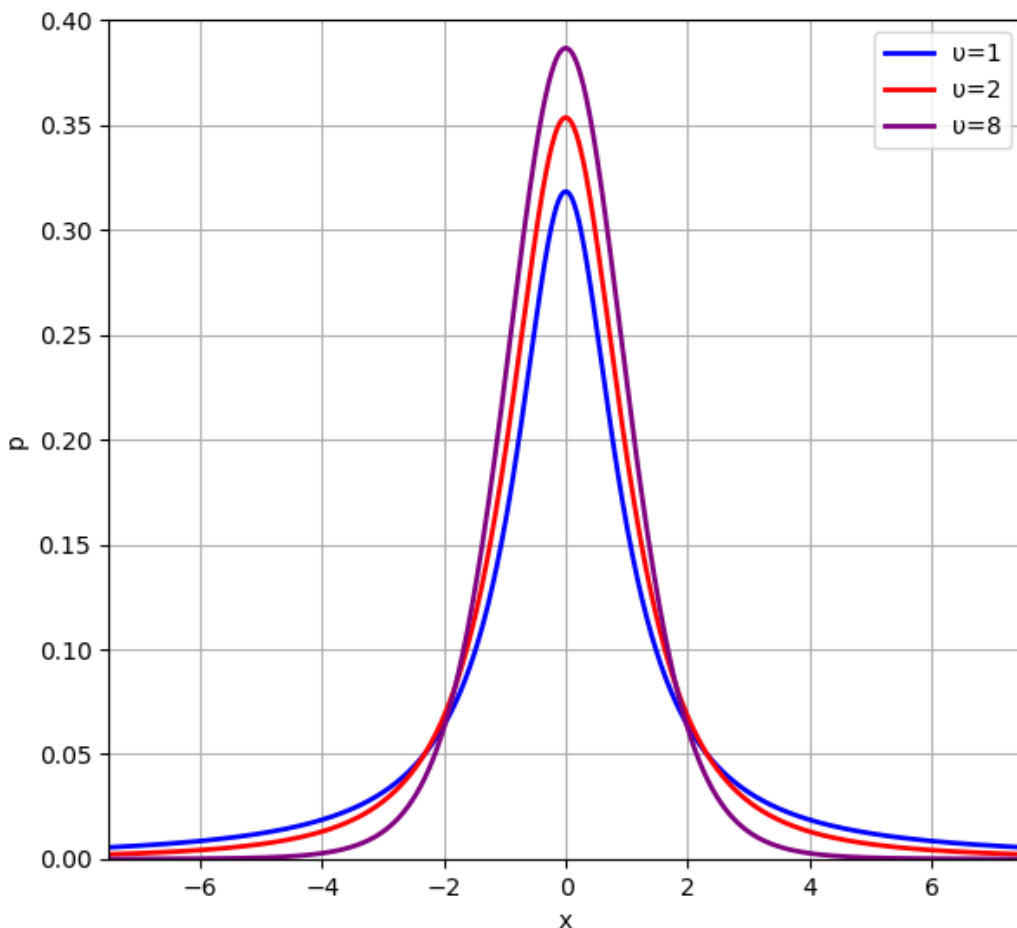


Fig. 5: Distribución t de Student. Fuente: Elaboración propia

Distribución Chi-Cuadrado

La distribución Chi-cuadrado se origina al sumar k variables aleatorias con distribución normal. Debido a esto, se utiliza para probar la bondad de ajuste de

una serie de datos a una función de distribución dada, considerando que las diferencias están normalmente distribuidas, y dado que se analiza la suma de sus cuadrados (Forbes, Merran, Hastings, & Peacock, 2011). La distribución Chi-cuadrado es un caso particular de la Distribución Gamma, y hereda por tanto las propiedades de esta.

- Parámetros: ν , un parámetro que define la forma de la curva. Cuando es entero, representa el número de grados de libertad de la variable.
- Rango: $-\infty < x < +\infty$
- Función de probabilidad: $f(x) = \frac{x^{(\nu-2)/2} e^{-x/2}}{2^{\nu/2} \Gamma[\nu/2]}$
- Valor esperado: ν
- Varianza: 2ν

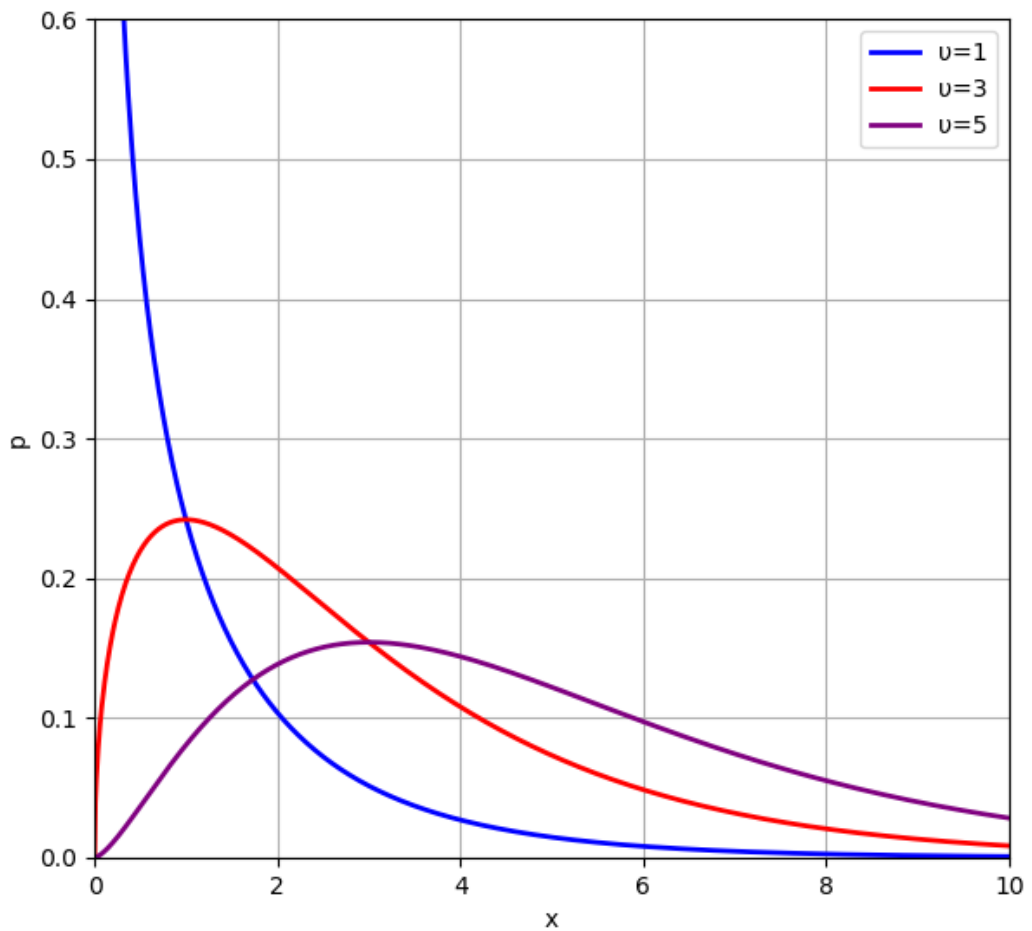


Fig. 6: Distribución Chi-cuadrado. Fuente: Elaboración propia

2.2.4. Probabilidad condicional

Se define como probabilidad condicional de un evento A respecto a la ocurrencia de un evento B , a la siguiente relación (Papoulis & Pillai, 2002):

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

Este axioma da origen al Teorema de Bayes, cuya forma generalizada es:

Si $U = [A_1, A_2 \dots A_N]$ es una partición del espacio muestral S , es decir $S = A_1 \cup A_2 \dots \cup A_N$, entonces se cumple que, para todo evento B :

$$P(B) = \sum_{i=1}^N P(A_i)P(B|A_i) \quad (2.9)$$

Otro aspecto importante referente a la probabilidad condicional, que es considerado fundamental para la Teoría de la Probabilidad moderna (Kallenberg, 1997), es la esperanza condicional. Este concepto es especialmente importante en el estudio de las martíngalas y los procesos de Márkov.

Si $E(X)$ es la esperanza matemática de la variable aleatoria A , y si B es otra variable aleatoria sobre el mismo espacio muestral S , se cumple la regla de la torre (Kolmógorov, 1987):

$$E[A] = E[E[A|B]] \quad (2.10)$$

Esta igualdad permite calcular el valor de la esperanza de una variable en función de la esperanza condicional de otra, permitiendo realizar un cambio de variable para facilitar la solución del problema en estudio.

2.2.5. Estimación de parámetros

Uno de los aspectos de la Estadística Inferencial es la estimación de parámetros para facilitar información para la toma de decisiones. Para ello, utilizando la información de una serie de muestras, y con ayuda de las técnicas de la estadística, se determinan los parámetros necesitados (Canavos, 1988).

La estimación de parámetros puede hacerse de dos maneras:

Estimación puntual:

Se determina como una función real de las variables aleatorias en estudio. Para ello, se requiere de una cantidad n de observaciones. Las propiedades deseables en un estimador son: que sea insesgado (el sesgo es la diferencia del valor del estimador con el verdadero valor del parámetro a estimar), que sea consistente (a medida que aumenta la cantidad de muestras, el valor del estimador tiene que acercarse al parámetro en estudio), que tenga la menor varianza posible. En este sentido, la media muestral es un estimador ideal para la media de una población (Papoulis & Pillai, 2002).

Estimación por intervalos:

Este tipo de estimación consiste en determinar un intervalo que contenga el parámetro en estudio con un grado de precisión establecido. A diferencia de la estimación puntual, en la estimación por intervalos se considera también el error producido durante la estimación (Canavos, 1988).

Sea θ el estimador en estudio, entonces se puede decir que $\langle \theta_1; \theta_2 \rangle$ es un intervalo de confianza para el estimador si:

$$P(\theta_1 < \theta < \theta_2) = \gamma \quad (2.11)$$

Donde el valor $\gamma = 1 - \alpha$ se denomina coeficiente de confianza. Asimismo, el valor α se conoce como nivel de confianza. Entonces, puede sostener que en el $100\gamma\%$ de los casos el valor de θ se encuentra dentro del intervalo de confianza.

Para estimadores insesgados, y si la variable se distribuye de manera simétrica respecto a la media, el intervalo tiene la forma $\bar{x} \pm d$ (Papoulis & Pillai, 2002).

2.2.6. Método de los momentos

Cuando se desea ajustar la distribución de algún parámetro medido en una población a una distribución de probabilidad de k parámetros, un método sencillo y de amplia utilización es el método de los momentos propuesto por Karl Pearson. El método consiste principalmente en generar un sistema de k ecuaciones al igualar los valores de los k primeros momentos de la distribución propuesta con los momentos calculados de las muestras (Hall, 2005). Obviamente se trataría de un sistema de k ecuaciones no lineales con k incógnitas.

El momento j de una población cuyas muestras son $[x_1, x_2 \dots x_n]$ se define de la siguiente manera :

$$m_j = E[x^j] \quad (2.12)$$

El primer momento de una población es su media, el segundo momento se relaciona con su varianza, el tercero con su asimetría, y el cuarto con su curtosis.

La generalización de este método consiste en estimar los k parámetros de la distribución propuesta utilizando los l momentos (con l no necesariamente igual a k), buscando minimizar el error en la estimación de los momentos respecto a los momentos medidos. Esto se resuelve utilizando algoritmos de optimización, donde las variables de entrada son los k parámetros (Hall 2005).

2.3. CONJUNTOS DIFUSOS

2.3.1. Generalidades

En el análisis de incertidumbre, es común recurrir a la información de expertos para caracterizar variables de las cuales no se tiene información estadística. Este tipo de información, cuya naturaleza es inherentemente subjetiva, muchas veces tiene que ser incluida en los análisis numéricos de riesgo. Para un análisis riguroso, desde el punto de vista axiomático, de este tipo de información, es común utilizar la Teoría de los Conjuntos Difusos, propuesta por el Dr. Lofti A. Zadeh en 1965 (Sadeghi, Fawek, & Pedrycz, 2010), (Zadeh, Fuzzy Sets, 1965).

Se define como conjunto difuso a una clase A , tal que, si X es un conjunto ordinario cuyo elemento genérico es x , su pertenencia a la clase estará caracterizada por una función de membresía f que asocia a cada elemento de X un número real en el intervalo $[0,1]$, siendo el valor de $f(x)$ el grado de membresía de x al conjunto difuso A . Mientras más alto sea el valor de $f(x)$, tendrá un mayor grado de membresía (Zadeh, Fuzzy Sets, 1965).

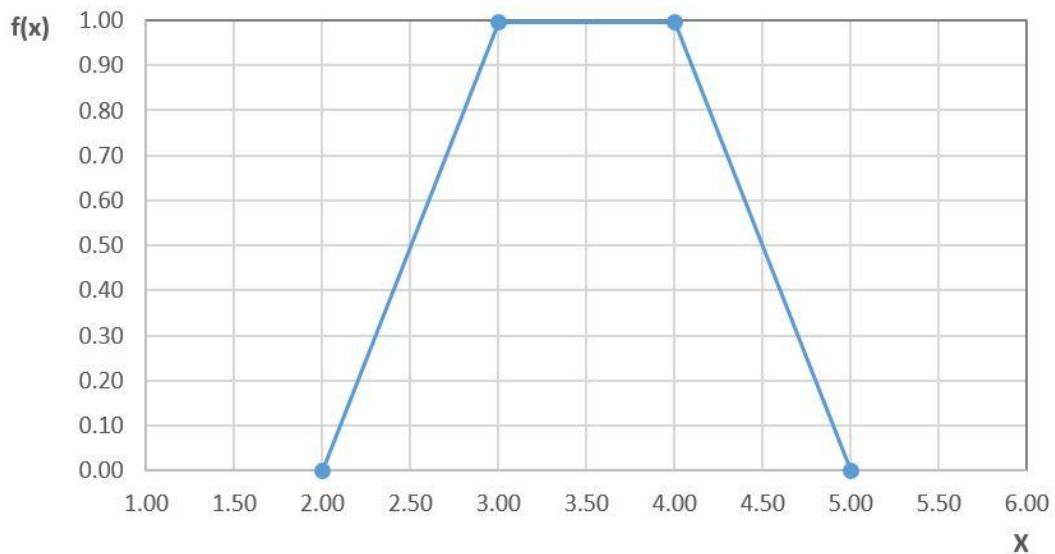


Fig. 7: Función de membresía $f(x)$ de un conjunto difuso sobre X . Fuente: Elaboración propia.

La definición de los conjuntos difusos tiene un paralelismo con la teoría de los conjuntos ordinarios. En el caso de los conjuntos ordinarios, un elemento puede pertenecer o no pertenecer al conjunto, por lo que sólo habría dos grados de membresía (0 o 1) (Zadeh, Fuzzy Sets, 1965). En este sentido, la teoría de los conjuntos difusos hace una generalización del significado de la pertenencia, permitiendo que pueda tomar un valor continuo entre ambos extremos.

La teoría de los conjuntos difusos permite definir con precisión matemática los criterios subjetivos. Establece además un marco referencial para poder realizar

operaciones con ese tipo de información. En el trabajo de Zadeh, se adaptan muchos de los conceptos y métodos de la teoría de conjuntos ordinarios a los conjuntos difusos. Por ejemplo, se definen la igualdad de conjuntos difusos, el complemento, la inclusión; además, se definen operaciones como la unión, la intersección, siendo además aplicables para estas operaciones las leyes distributivas y las leyes de De Morgan (Zadeh, Fuzzy Sets, 1965).

Esta teoría permite el modelamiento de la incertidumbre en casos de no contar con información estadística, y en su lugar sólo contar con información subjetiva, que puede provenir del juicio de expertos. Debido a esto, la teoría de los conjuntos difusos ha sido aplicada muchas veces en la ingeniería. Se ha aplicado, por mencionar algunos trabajos relacionados a la ingeniería civil, en la programación de obras, en el modelamiento del riesgo en proyectos, en la predicción de la productividad, en la optimización de la energía, en la optimización de costos, etc (Sadeghi, Fawek, & Pedrycz, 2010).

Una definición importante en el estudio de los números difusos es el nivel α (α -corte). La regla de membresía define una jerarquía de pertenencia al conjunto difuso, siendo por tanto importante definir niveles de jerarquía entre los elementos del conjunto. Si A es un conjunto difuso, se define por α -corte al subconjunto del conjunto X conformado por todos los elementos de X que tienen un nivel de membresía mayor que α . Se denota a este conjunto como $[A]^\alpha$ (Carvalho, Bassanezi, & Lodwick, 2017). En la figura 8 se grafica el concepto de α -corte. En este caso, el α -corte $[A]^{0.5}$ es el subconjunto $[2.5, 4.5]$, debido a que todos los elementos en este intervalo tienen una membresía mayor o igual que α .

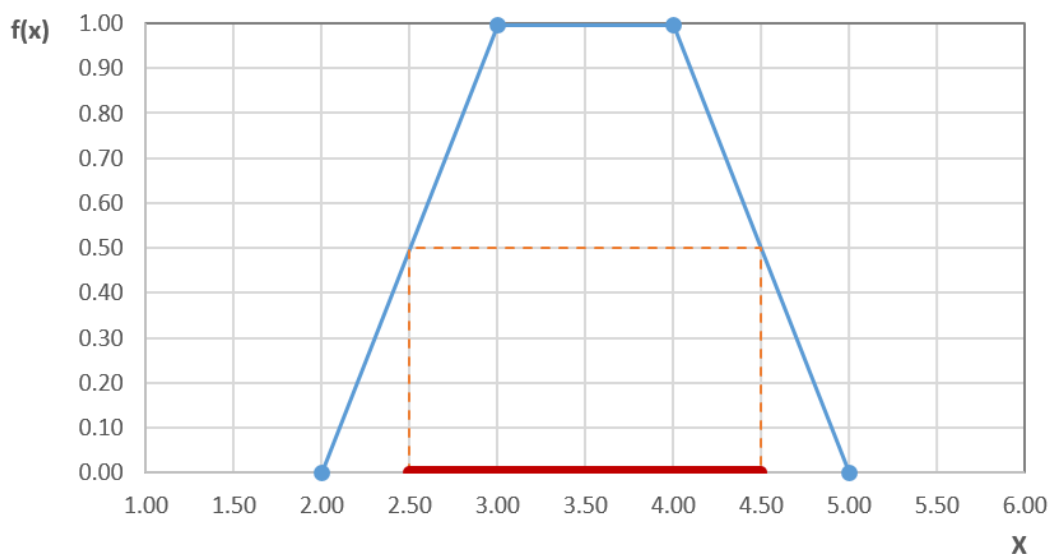


Fig. 8: El α -corte para $\alpha=0.5$ comprende al subconjunto $[2.5, 4.5]$. Fuente: Elaboración propia.

2.3.2. El principio de extensión de Zadeh

El principio de extensión de Zadeh es un concepto que sirve para adaptar ideas no difusas a conjuntos difusos. Entre otros aspectos, establece una manera de aplicar el concepto de funciones a los conjuntos difusos (Carvalho, Bassanezi, & Lodwick, 2017).

Sea f una función que mapea el conjunto X con el conjunto Z , de modo que $z = f(x)$. Sea A un conjunto difuso con función de membresía $u(x)$ definido sobre X . Entonces, se denomina como extensión de Zadeh de f a la función \hat{f} que se aplica sobre Z , y que genera un conjunto difuso $\hat{f}(Z)$ cuya función de membresía será (Carvalho, Bassanezi, & Lodwick, 2017):

$$u_{\hat{f}}(z) = \sup[u(f^{-1}(z))] \quad (2.13)$$

Donde \sup es el elemento supremo (valor límite superior) en el caso en que $u(f^{-1}(z))$ tome uno o más valores, y f^{-1} es la función inversa de f . Si $f^{-1}(z)$ es un conjunto vacío, $u(z)$ se considera 0.

Si f es una función biyectiva, entonces se cumple que:

$$u_{\hat{f}}(z) = u[f^{-1}(z)] \quad (2.14)$$

Como puede apreciarse, este concepto permite calcular nuevos conjuntos difusos como resultado de la aplicación de funciones sobre otros conjuntos difusos.

2.3.3. Números difusos y variables difusas

Los números difusos son un tipo especial de conjuntos difusos usados para operaciones numéricas con variables cuya incertidumbre no es estadística.

Se define como números difusos a una clase especial de conjuntos difusos que cumplen las siguientes tres condiciones (Carvalho, Bassanezi, & Lodwick, 2017):

1. Todos los α -cortes del conjunto difuso son no vacíos.
2. Todos los α -cortes son intervalos reales cerrados.
3. El soporte de A , $\text{supp}(A)$, es un conjunto limitado.

El soporte de un conjunto difuso es el conjunto formado por todos los elementos cuya función de membresía es mayor de cero.

Los números difusos permiten representar valores numéricos para variables caracterizadas por información subjetiva. Estas variables tienen un rol análogo al

de las variables aleatorias en la teoría de la probabilidad, y se denominan variables difusas (Nahmias, 1978).

Los números difusos, con base en el principio de extensión de Zadeh permiten realizar operaciones aritméticas análogas a las realizadas en números reales. Una operación aritmética de dos números difusos A y B generará un número difuso C , tal que sus α -cortes para cada operación indicada son (Carvalho, Bassanezi, & Lodwick, 2017):

$$[A + B]^\alpha = [A]^\alpha + [B]^\alpha = [a_1^\alpha + b_1^\alpha, a_2^\alpha + b_2^\alpha] \quad (2.15)$$

$$[A - B]^\alpha = [A]^\alpha - [B]^\alpha = [a_1^\alpha - b_2^\alpha, a_2^\alpha - b_1^\alpha] \quad (2.16)$$

$$[A \times B]^\alpha = [A]^\alpha \times [B]^\alpha = [\min(a_1^\alpha b_1^\alpha, a_1^\alpha b_2^\alpha, a_2^\alpha b_1^\alpha, a_2^\alpha b_2^\alpha), \max(a_1^\alpha b_1^\alpha, a_1^\alpha b_2^\alpha, a_2^\alpha b_1^\alpha, a_2^\alpha b_2^\alpha)] \quad (2.17)$$

$$[\lambda A]^\alpha = \lambda[A]^\alpha = [\lambda a_1^\alpha, \lambda a_2^\alpha] \quad (2.18)$$

Donde λ es un número real positivo, y $[a_1^\alpha, a_2^\alpha]$ y $[b_1^\alpha, b_2^\alpha]$ son los intervalos generador los α -cortes en A y B respectivamente.

Dos tipos muy comunes de números difusos son los triangulares y trapezoidales. Si consideramos a los triangulares como un caso particular de los trapezoidales en el que los dos vértices superiores coinciden, podremos representar ambos tipos de números con la notación $A = [a, b, c, d]$, donde a, b, c y d son los valores de los números que forman los vértices del trapecio. El número difuso de la Fig. 8 puede representarse como $A = [2, 3, 4, 5]$. Esta notación será particularmente válida para operaciones aritméticas con números difusos, ya que la suma o resta de dos números difusos puede calcularse utilizando aplicando la operación directamente a los 4 parámetros de los números difusos (Shaheen, Robinson, & AbouRizk, 2007).

2.3.4. Los números difusos como base para teoría de la posibilidad

Zadeh propuso usar la teoría de los conjuntos difusos como marco referencial para la teoría de la posibilidad (Zadeh, 1999). El concepto de posibilidad que usó fue el definido por Gaines y Kohout. Ellos definen como posible a todos aquellos eventos que no se puede decir que no ocurrirán (por ejemplo, no se puede decir que un determinado vehículo no tendrá un accidente, por tanto, es posible). Asimismo, definieron como imposible a aquellos eventos que no ocurrirán (por ejemplo, se puede decir con certeza que un auto no podrá volar, por lo tanto es imposible) (Gaines & Kohout, 1975).

Debido a que el concepto de posibilidad es subjetivo, es posible representar la posibilidad de eventos con conjuntos difusos. Con los conjuntos difusos se puede definir funciones de membresía para determinar si un evento es posible o imposible. Así, al analizar la posibilidad de un evento utilizando conjuntos difusos, se puede entender como posibilidad de la ocurrencia de un determinado evento a su nivel de membresía en el conjunto difuso definido (Zadeh, 1999).

En este sentido, los cálculos de la teoría de posibilidades pueden hacerse con las reglas de los conjuntos difusos.

La posibilidad y la probabilidad son conceptos de diferente naturaleza, y no tienen necesariamente el mismo comportamiento. El hecho de que un evento pueda ocurrir (posibilidad), no significa necesariamente que vaya a ocurrir con mucha frecuencia (probabilidad). Por ejemplo, es posible que un auto pueda moverse a más de 300 Km/h, pero es poco usual. Sin embargo, existen un principio denominado Principio de la consistencia posibilidad/probabilidad, que dice que, si algo es imposible de hacer, entonces también es improbable. Del mismo modo, cuando la posibilidad baja, la probabilidad tiende a bajar. Cuando la probabilidad baja, sin embargo, la posibilidad no necesariamente tiende a bajar (Zadeh, 1999).

Al hablar de posibilidad, también se hablará de un nivel de confianza en el sentido posibilístico. Si se quiere determinar un α -corte con un nivel de confianza requerido μ , entonces el valor de α tiene que ser igual a $1 - \mu$ (Sadeghi, Fawek, & Pedrycz, 2010).

2.4. LA SIMULACIÓN DE MONTE CARLO

2.4.1. Generalidades

Generalmente, cuando se habla del método de Monte Carlo, se hace referencia a la simulación de modelos en los que hay variables aleatorias involucradas. Utilizando un software, se generan un gran número de posibles resultados del modelo, para analizar estadísticamente los resultados, y poder conocer el rango de probabilidades (Brandimarte, 2014).

Un antecedente notable en la concepción del método de Monte Carlo fue planteado por el científico francés Georges Louis Leclerc, el Conde de Buffon, en el siglo XVIII. El problema, conocido como La Aguja de Buffon, consiste calcular el valor de π de manera indirecta mediante el uso del muestreo aleatorio en el que se tenía que repetir un gran número de veces un experimento, para contar cuántas veces se logra el éxito del mismo.

Dos siglos después, entre los años 1930 y 1950, Enrico Fermi, Stanislaw Ulam y John von Neumann desarrollaron el método para resolver problemas de física en el desarrollo de la bomba de hidrógeno. Fue en ese periodo en que se comenzó a llamarlo Monte Carlo, en referencia al principado de Mónaco (Brandimarte, 2014).

Actualmente, el método de Monte Carlo es considerado uno de los principales métodos capaces de resolver complejos problemas con múltiples variables. Si bien su uso fue por muchas décadas exclusivo en el ambiente de la investigación nuclear, con el desarrollo y difusión de las computadoras esta herramienta ha ampliado enormemente su campo de aplicación (Zio, 2013).

2.4.2. Procedimiento para realizar una simulación de Monte Carlo

El primer paso para llevar a cabo una simulación de Monte Carlo es definir el sistema en estudio mediante un modelo matemático. Para ello, se definen sus componentes como variables aleatorias y parámetros. Del mismo modo, se definen también las relaciones que hay entre dichos componentes.

Una vez definido el modelo, se procede a realizar la simulación. Este proceso iterativo que consiste en las siguientes etapas (Brandimarte, 2014):

1. Generación de números aleatorios. Se tiene que generar un conjunto de números aleatorios para cada variable aleatoria del sistema. Normalmente se generan números aleatorios distribuidos uniformemente entre 0 y 1. La cantidad de números aleatorios a generar dependerá del número de “experimentos” que desea realizarse, y debe ser un número grande. Es recomendable utilizar números pseudo aleatorios debido a su eficiencia (los programas de computador pueden generar rápidamente conjuntos grandes de números pseudo aleatorios, mientras que, para generar números aleatorios reales, los cuales normalmente se basan en parámetros físicos, son poco eficientes) y su repetibilidad (a diferencia de los números aleatorios reales, los números pseudo aleatorios pueden repetirse cuando se requiera).
2. Transformación de números aleatorios. Los números aleatorios generados en la primera etapa se transforman en variantes de las distribuciones de probabilidad de cada una de las variables aleatorias. Para ello, se usan algoritmos de transformación inversa, considerando que ya se conoce la distribución de probabilidad de cada variable. Por ejemplo, si una variable tiene una distribución normal, se transformarán

los números creados en la primera etapa (que siguen la distribución uniforme entre 0 y 1) a una secuencia de números aleatorios que siguen una distribución normal. Para ello, se utilizará la función de probabilidad acumulada para la distribución normal, cuyos parámetros son los definidos inicialmente para representar a la variable. Se procede de manera similar con las demás variables aleatorias del sistema.

3. Simulación del sistema. En esta etapa se realiza realmente la simulación del sistema. Para ello, cada variable aleatoria tomará un valor del conjunto de números aleatorios generado en la segunda etapa. Dado que cada variable del sistema tiene en esta etapa un valor numérico definido, se calculan los parámetros del sistema que desean estudiarse. Para ello se utilizan las relaciones que hay entre dichos componentes del sistema, cuyas ecuaciones se definen antes de realizar el proceso iterativo.
4. Almacenamiento de salidas. Todas las variables del sistema que desean analizarse, cuyos valores son obtenidos en la tercera etapa, se almacenan para un posterior análisis. Esta etapa es muy importante, debido a que, al finalizar el proceso iterativo, deberán analizarse estadísticamente los resultados obtenidos para cada variable en todos los experimentos realizados. Para un conjunto de n experimentos aleatorios, se tendrán también n salidas.

Como nota aclaratoria, al hablar de “números aleatorios” a lo largo de este trabajo, se hará referencia a los números “pseudo-aleatorios” generados por computador. Como se mencionó en el ítem anterior, se utilizarán números pseudo-aleatorios debido a sus ventajas para la simulación de modelos por computador.

2.4.3. Generación de números aleatorios

2.4.3.1. Descripción general

Para la primera etapa de la simulación, se requiere generar un conjunto de números aleatorios para cada variable del modelo. Para ello, la gran mayoría de los programas y lenguajes de programación cuentan con algoritmos integrados que permiten realizar este proceso. Cuando los números generados se encuentran uniformemente distribuidos en el intervalo $[0; 1)$, se denomina al algoritmo generador de números aleatorios uniformes (Kroese, Taimre, & Botev, 2011).

La generación de números aleatorios ha sido un problema importante para este tipo de análisis. Aún a principios del siglo anterior se utilizaban los resultados de fenómenos intrínsecamente aleatorios, como lanzar dados, girar una ruleta, o medir fuentes de radioactividad. Sin embargo, la frecuencia con la que se puede producir data con estos métodos y su carácter irreproducible hicieron que su aplicación no sea factible (Zio, 2013).

Para superar esto, la primera mitad del siglo anterior se publicaron en diversas ocasiones tablas con grandes cantidades de números aleatorios para ser utilizados en estadística y criptografía. Uno de los últimos trabajos de este tipo fue publicado en 1955 por la RAND Corporation. Este contenía una lista con 1,000,000 números aleatorios producidos por una ruleta electrónica conectada a un ordenador. Con todas sus limitaciones, estas series de números fueron utilizados para los experimentos científicos en su época. El desarrollo de las computadoras dejaría obsoletos estos trabajos tan sólo algunos años después (Zio, 2013).

En 1956, Jon Von Neumann propuso un algoritmo sencillo para generar una serie de números pseudo aleatorios: sea x_i el i ésimo número de la serie de números. Entonces, x_{i+1} podría calcularse como una función de x_i , esto es: $x_{i+1} = f(x_i)$. Eligiendo la función $f(x)$ correcta, se podría generar una serie de números pseudo aleatorios (Von Neumann, 1951). A pesar de las ventajas de la generación de números pseudo aleatorios bajo este enfoque, se presenta también uno de los aspectos desfavorables más importantes a tener en cuenta: toda serie generada necesariamente tendrá que repetirse después de generar una determinada cantidad de números (periodo).

Un tipo especialmente sencillo de algoritmo es el Generador Lineal Congruencial (LCG por sus siglas en inglés, Linear Congruential Generator). Es fácil de implementar para experimentos sencillos. En este caso, la función de dependencia entre los números que conforman es $x_{i+1} = (a \times x_i + c) \bmod m$. Con la adecuada elección de los parámetros a , c , m y x_0 (al primer valor de una serie se le conoce como semilla, ya que todos los valores siguientes dependerán de este valor), pueden lograrse series con un periodo considerablemente grande. Una elección incorrecta, por otro lado, puede conducir a generar series parcializadas, que conducirían a resultados erróneos en experimentos. El periodo máximo de este algoritmo será m . Una elección común para muchos generadores es: $a = 11$, $c = 16$ y $m = 2^{31} - 1$ (Brandimarte, 2014) (Wichmann & Hill, 1982).

2.4.3.2. Generadores más complejos

En la actualidad, los generadores LCG tiene únicamente uso didáctico. Los generadores modernos utilizan algoritmos que les permiten tener periodos mucho mayores. Entre estos, los principales son:

- Generadores combinados: Utilizan varios generadores LCG con parámetros diferentes y combinan sus salidas con una función determinada. Un generador popular en este grupo es el propuesto por B. A. Wichmann e I. D. Hill en 1982. Este algoritmo combina tres generadores LCG, cuyas salidas se suman, y se toma la parte decimal ($mod(1)$) como número pseudo aleatorio. El periodo de este generador es aproximadamente $6.95E12$ (Wichmann & Hill, 1982) (Matsumoto & Nishimura, 1998).
- Generadores de recursividad múltiple: En estos generadores, el elemento i de la serie depende de los k elementos anteriores, que se combinan linealmente. Un tipo especial es el generador de Tausworthe o LFSR (registro lineal de retroalimentación, o Linear Feedback Shift Register), que utilizan bits como elementos de la serie por sus ventajas en el cálculo por ordenador. En este caso, la semilla es un determinado número de bits, de tal manera que el siguiente número es la suma del producto de estos bits por un vector de bits definido. Esta secuencia de bits se transforma a una serie de números aleatorios uniforme convirtiendo a decimal cada serie de k dígitos, y dividiendo este resultado entre 2 elevado a la k (Brandimarte, 2014).
- Generador Mersenne-Twister: Es el generador de números pseudo aleatorios que ostenta en la actualidad el mayor periodo, alcanzando en su última versión el vertiginoso periodo de $2^{19937} - 1$ (este número coincide con un número primo de Mersenne, de ahí el origen de la denominación). Presentado por Makoto Matsumoto y Takuji Nishimura en 1997 en un artículo publicado por la ACM (Association for Computing Machinery), se basa en una generalización del generador de recursividad múltiple. La semilla está conformada por 623 vectores de 32 bits y un vector de 1 bit, elegidos de modo que conforman un sistema equidistribuido de 623 dimensiones, alcanzando el máximo periodo posible con los vectores semilla que utiliza. Mediante operaciones matriciales simplificadas para utilizar las operaciones binarias naturales del ordenador, este algoritmo se compone de dos etapas principales: recursión y templado. En la recursión,

se genera el siguiente vector de 32 bits de la serie en función de los vectores anteriores inmediatos (recursión). Luego de ello, el vector generado pasa por un proceso de templado, que mejora la distribución de la serie, de modo que satisface el criterio de k-distribución (distribución uniforme en un espacio de K dimensiones) para números pseudoaleatorios (Matsumoto & Nishimura, 1998).

Cabe mencionarse que el generador Mersenne Twister es el usado por defecto en una variedad de programas de análisis estadístico y lenguajes de programación, Python y R por mencionar dos ejemplos (The R Foundation, 2018) (The Python Software Foundation, 2018).

2.4.3.3. Propiedades deseables en un generador de números pseudo aleatorios

Las propiedades que debe poseer un buen algoritmo generador de números pseudo aleatorios son (Kroese, Taimre, & Botev, 2011):

- 1) Pasar pruebas estadísticas: Los parámetros estadísticos de la serie de números generados deben ser en primer lugar compatibles con los de una serie de números uniformemente distribuidos. Por ejemplo, tener una media cercana a 0.5, y una varianza igual a $1/12$ (Brandimarte, 2014). Además de esto, existe una batería de pruebas conocida como *diehard* (duro de morir en inglés), que evalúan la calidad de las propiedades pseudo aleatorias de una serie generada.
- 2) Fundamento teórico: Los principios matemáticos de un buen generador deben ser claros, permitiendo un análisis riguroso de las propiedades del generador.
- 3) Reproducibilidad: Debido a su uso frecuente en procesos de prueba, se requiere que un generador pueda reproducir a demanda la serie de números generados preferentemente sin necesidad de almacenarlos en la memoria del computador.
- 4) Rápido y eficiente: Debido a que normalmente se requieren de billones de números pseudo aleatorios para experimentos, el algoritmo debe ser capaz de generar en poco tiempo una serie de números de tal orden, utilizando la menor cantidad posible de memoria.
- 5) Periodo grande: Para un experimento que utilice N números pseudo aleatorios, se requiere de un generador que tenga un periodo mayor a $10N^2$ como mínimo (Kroese, Taimre, & Botev, 2011). Esto es para evitar problemas de duplicación y dependencia.

- 6) Múltiples series: El generador debe ser capaz de producir series paralelas de números pseudo aleatorios independientes para distintos usos.
- 7) Ligero y fácil: Un buen generador no debe requerir hardware sofisticado, y debe ser fácil de implementar y ejecutar.
- 8) No producir 0 y 1: Esto es para evitar problemas con los valores extremos en las simulaciones.

2.4.4. Análisis estadístico de resultados

2.4.4.1. Análisis estadístico de información

La data que se origina de un proceso de simulación, tiene que analizarse de manera similar a como se analiza la data estadística real (Kroese, Taimre, & Botev, 2011). Este análisis se hace principalmente para verificar la calidad de la información que genera el modelo, y también para verificar su precisión.

Los principales parámetros y estimadores estadísticos que se usan frecuentemente son (Kroese, Taimre, & Botev, 2011):

- Características de centralidad: Media y mediana
- Características de dispersión: Varianza, desviación estándar, momentos de grado k, etc.
- Características de dependencia: Covarianza, coeficiente de correlación, autocorrelación.

Asimismo, para poder visualizar mejor la información generada, pueden usarse gráficos como:

- Gráficos de dispersión n-dimensionales
- Histogramas
- Curvas FDC empíricas (función de densidad acumulada)
- Gráficos de densidad

2.4.4.2. Precisión del resultado

Como señala Brandimarte (2014), el método de Monte Carlo es sumamente flexible y general, pero es inherentemente ineficiente (en el sentido de que es necesario un muestreo de gran tamaño para lograr una precisión aceptable). Es por tanto necesario conocer cuán preciso es el resultado generado, y si la cantidad de experimentos realizados es adecuada para lograr la precisión esperada. Para ello, se tiene que realizar un análisis de la variabilidad de los resultados.

Sea $x = [x_1, x_2, \dots, x_N]$, el vector de resultados de n experimentos con variables aleatorias independientes cuyo valor se espera que sea el mismo. Sea \bar{x} la media

de este vector de resultados. Sea también l la media real del vector de resultados esperado de acuerdo a su función de distribución. De acuerdo al Teorema del Límite Central, para N suficientemente grande, \bar{x} tendría la siguiente distribución (Kroese, Taimre, & Botev, 2011):

$$\bar{x} \sim N\left(l, \frac{\sigma^2}{N}\right) \quad (2.19)$$

Donde σ^2 es la varianza de x . Con el nivel de confianza definido en $1 - \alpha$, puede establecerse que el intervalo de confianza para la media es:

$$\bar{x} - z_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \leq l \leq \bar{x} + z_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (2.20)$$

El error relativo de la estimación de l sería:

$$E(l) = \frac{\sigma}{\bar{x}\sqrt{N}} \quad (2.21)$$

Siendo así, tendría que buscarse una cantidad de muestras N para lograr un porcentaje de error aceptable para la simulación, de acuerdo al objetivo que tenga el estudio.

Cuando se simulan procesos en los cuales la estimación del error relativo puede verse afectada por la autocorrelación de las muestras, es común utilizar el método de lotes, el cual consiste en agrupar los resultados en lotes, y analizar la variación de los resultados entre los resultados de dichos lotes (Brandimarte, 2014).

2.4.4.3. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se define como el estudio de la relación entre la incertidumbre en la salida de un modelo y las diferentes fuentes de incertidumbre en los datos de entrada del modelo (Saltelli, y otros, 2008). Dicho de otro modo, es el análisis de la importancia que tiene cada variable en la variabilidad o incertidumbre del modelo. Este análisis debe hacerse de la mano con el análisis de incertidumbre, que sería en este caso la simulación con el método de Monte Carlo.

Las razones posibles por las que es necesario hacer un análisis de sensibilidad son (Saltelli, y otros, 2008):

- Corroboración del modelo.
- Priorización de investigaciones.
- Simplificación de modelo.
- Identificación de factores críticos.
- Priorización de la estimación de parámetros

El análisis de la sensibilidad puede verse desde dos enfoques (Saltelli, y otros, 2008). El primero es el enfoque derivativo o algebraico. La sensibilidad sería la razón entre la variación de la variable y su variación consecuente en el resultado. Sea $Y = H(Z)$ el modelo a simular, donde Z representa al conjunto de variables aleatorias en análisis, la sensibilidad de la variable z_i , desde este enfoque, estará dada por:

$$S(x_i) = \frac{dH}{dz_i} \quad (2.22)$$

Otra manera de analizar la sensibilidad es mediante los gráficos de dispersión y la correlación. Para ello, se observa gráficamente la dispersión de la salida del modelo para cada variable en estudio. Con la ayuda de estos gráficos, puede apreciarse la “fuerza” de cada variable en la variabilidad del resultado final. Por ejemplo, en la figura 9, se aprecian los gráficos de dispersión para un modelo con 4 variables, Z_1 , Z_2 , Z_3 y Z_4 . Se puede apreciar claramente que la variable Z_4 tiene un grado de influencia mayor en el resultado, por lo que la sensibilidad de esta variable será mayor.

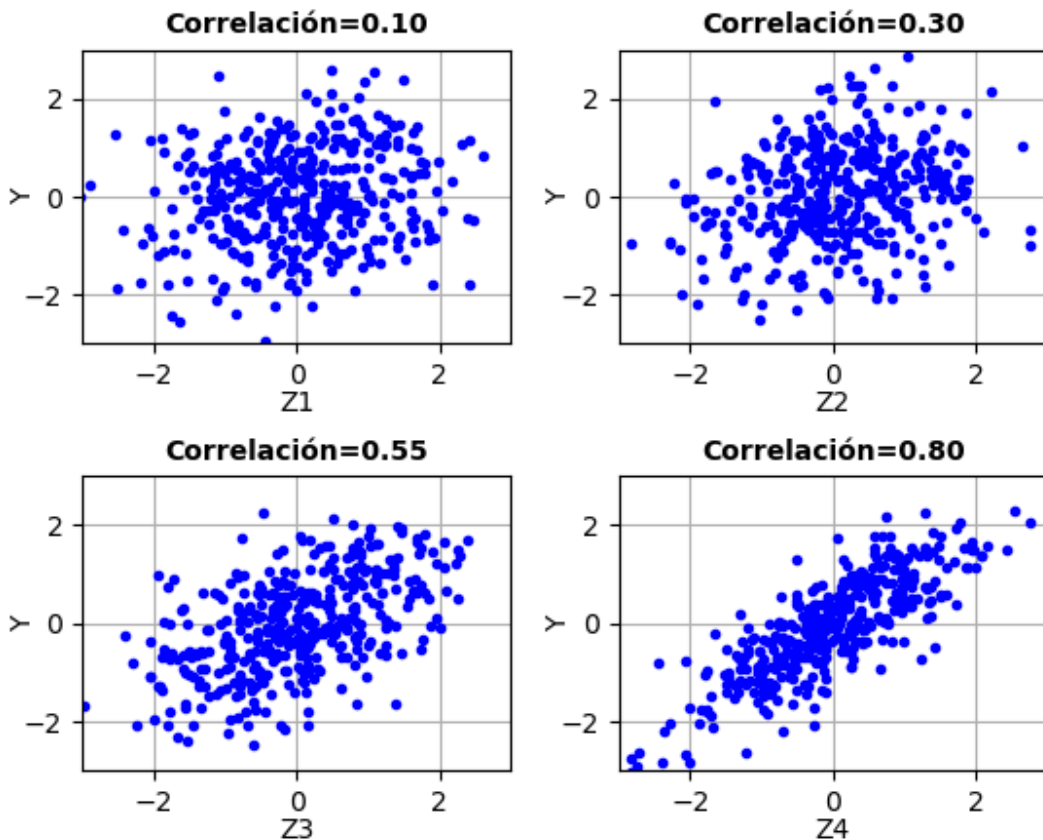


Fig. 9: Gráficos de dispersión para análisis de sensibilidad. Fuente: Elaboración propia

En este sentido, el uso de los coeficientes de regresión lineal y correlación (de Pearson) entre la variable y la salida de la simulación como indicador de la

sensibilidad sería apropiado, ya que muestran la fuerza de la relación. Cuando el coeficiente de correlación de Pearson es cercano al valor máximo, que es 1, como sería en el caso de la variable Z_4 de la figura, la relación sería directa, por lo que la variable influye de manera positiva en la salida. Un incremento en la variable haría que la salida tienda a incrementarse también. En el caso opuesto, cuando la variable es cercana a -1, la variable influiría negativamente en la salida. En el caso en el que la correlación sea cercana a 0, podría decirse que la influencia de la variable en la salida es poco consistente (Palisade Corporation, 2018).

Por otro lado, el coeficiente de regresión lineal relacionado con la pendiente muestra la proporción entre la variación de la variable de entrada y la del resultado. Este parámetro sería de cierta forma equivalente a la derivada parcial respecto a la variable en estudio (Palisade Corporation, 2018).

La manera de representar la sensibilidad es con los gráficos de tornado. Se grafican en orden descendente los indicadores de sensibilidad de las variables del sistema.

2.4.5. Técnicas de reducción de varianza

Para lograr la precisión esperada en el análisis, una manera natural sería aumentar el valor el número de experimentos de manera considerable, ya que como se vio en la sección anterior, el error esperado es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de dicho valor. Sin embargo, la función raíz cuadrada tiene una peculiaridad: su derivada decrece al aumentar N . Esto hace que reducir la varianza sea cada vez más difícil mientras N va en aumento. Es necesario, por tanto, buscar otras maneras de reducir el error esperado, que es lo mismo que decir, reducir la varianza del estadístico en estudio (Brandimarte, 2014).

Debido a que los métodos mencionados a continuación consideran diferentes maneras de muestrear las variables, el muestreo aleatorio ordinario se denomina Monte Carlo Puro o Crudo (Crude Monte Carlo, CMC) para diferenciarlo.

Entre los métodos más comunes para reducir la varianza, tenemos:

2.4.5.1. Muestreo antitético

Es un método en el cual se espera reducir la varianza de resultado mediante un artificio en el muestreo de números pseudo aleatorios utilizados en la simulación. Se divide en dos partes las series de números a utilizar: en la primera parte se incluyen números pseudo aleatorios, y en la segunda parte se incluyen sus opuestos (antitéticos) según la de distribución de probabilidad que utilizan. Esto

introduce una correlación negativa entre las dos partes, que conlleva a reducir su varianza, de la siguiente manera.

Sea x^1 una serie de $N/2$ números pseudo aleatorios, y sea la serie x^2 su antítesis. Por ejemplo, si x pertenece a la distribución uniforme $U[0:1]$, x^2 sería $1 - x$. Análogo sería el caso en el que x perteneciera a una distribución normal, sólo que en ese caso se aplicaría el complemento a la función acumulada de probabilidad. Si se define $x = [x^1|x^2]$ como la concatenación de los dos vectores. Entonces, la varianza esperada en el cálculo de \bar{x} será (Brandimarte, 2014):

$$Var(\bar{x}) = \frac{Var(x)}{N} \quad (2.23)$$

$$Var(\bar{x}) = \frac{Var(x^1)+Var(x^2)+Covar(x^1,x^2)}{2N} \quad (2.24)$$

$$Var(\bar{x}) = \frac{Var(x)*(1+\rho(x^1,x^2))}{N} \quad (2.25)$$

Esto muestra el rol que tiene el coeficiente de correlación entre las muestras en la varianza del sistema. Así, la inducción de una correlación negativa entre las muestras tiene el potencial de mejorar el resultado. Esto se logra con el muestreo antitético. Si bien es cierto, la reducción de la varianza se ha logrado a nivel de la muestra (entrada de la simulación), es de esperarse que la salida también vea su varianza reducida. En la literatura se indica claramente que esto sólo ocurre en funciones monótonas (Kroese, Taimre, & Botev, 2011). No obstante, en funciones no monótonas, la varianza puede incluso aumentar al aplicar esta técnica, he ahí la importancia de conocer bien la función o el modelo al cual se aplica (Brandimarte, 2014).

2.4.5.2. Monte Carlo Condicional

El método de Monte Carlo Condicional es una estrategia para reducir la varianza de un experimento utilizando la teoría de la probabilidad condicional. Para el cálculo de la esperanza matemática (media) del parámetro en estudio, puede utilizarse un cálculo indirecto utilizando una variable secundaria (Brandimarte, 2014). Para ello se usa la regla de la torre de la esperanza condicional:

$$E[X] = E[E[X|Y]] \quad (2.26)$$

Donde $E[X]$ es la esperanza matemática de la variable X y $E[X|Y]$ es la esperanza matemática condicional de la X dado que ocurre Y . Esta esperanza es también una variable aleatoria. De esta manera, la media de una variable aleatoria se puede calcular mediante la esperanza condicional sujeta a la probabilidad de condicional de otra variable.

En lo que respecta a las varianzas, la relación entre estas se establece en el Teorema de la Varianza Condicional (Kroese, Taimre, & Botev, 2011):

$$\text{Var}(X) = E[\text{Var}(X|Y)] + \text{Var}(E[X|Y]) \quad (2.27)$$

En esta relación, se establece claramente que $\text{Var}(E[X|Y]) \leq \text{Var}(X)$, lo que significa que la varianza de la esperanza condicional será menor que la varianza de la variable aleatoria inicial, dado que estos parámetros siempre son positivos. He aquí la razón de ser del método de Monte Carlo Condicional en la reducción de la varianza.

La relación entre las variables aleatorias X e Y debe ser definida analíticamente (Kroese, Taimre, & Botev, 2011), haciendo la aplicación de este método un proceso sumamente delicado. Es por ello que su aplicación depende mucho del problema en el que se piensa utilizar (Brandimarte, 2014).

2.4.5.3. Muestreo estratificado

Este método utiliza también las ventajas de la esperanza condicional para la reducción de la varianza, pero utiliza otro enfoque. Se crea una variable aleatoria estratificada en la que cada estrato tiene una probabilidad conocida, y sobre la cual se mapea la variable aleatoria en estudio.

Si se trata de calcular la varianza en la estimación de X , se aplicaría la ley de la esperanza condicional igual que en el caso de Monte Carlo Condicional. Siendo así, la varianza de esta variable tendría la siguiente forma (Kroese, Taimre, & Botev, 2011):

$$\text{Var}(X) = \sum_{i=1}^m \frac{p_i^2 \sigma_i^2}{N_i} \quad (2.28)$$

Donde m es el número de estratos considerados, p_i es la probabilidad del estrato i , σ_i es la varianza de las muestras asignadas al estrato y N_i es la cantidad de muestras del estrato.

Esta varianza puede optimizarse distribuyendo de manera conveniente las muestras en los estratos. Para ello, se utiliza el método de los Multiplicadores de Lagrange, y se demuestra que la cantidad de muestras de cada estrato debe ser proporcional a su probabilidad y su desviación estándar. Esta cantidad óptima sería (Kroese, Taimre, & Botev, 2011):

$$N_i = N \frac{p_i \sigma_i}{\sum_{j=1}^m p_j \sigma_j} \quad (2.29)$$

Con esta distribución, la varianza tomaría su menor valor posible, el cual sería:

$$Var_{min}(X) = \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^m p_i^2 \sigma_i^2) \quad (2.30)$$

La dificultad de este cálculo radica en que el valor de las desviaciones estándar de cada estrato son datos no conocidos al inicio del muestreo. Es por ello que en la práctica se realizan muestras de prueba para poder realizar una óptima distribución de las muestras.

Existen dos maneras particulares de aplicar el Muestreo Estratificado. El primero es el Muestreo Estratificado Proporcional. En este caso, no se toman en cuenta las varianzas de los estratos, y se asigna una cantidad de muestras a cada estrato en función de su probabilidad únicamente. Esto conlleva, de todas maneras, a una reducción de la varianza.

De manera similar, el Muestreo Sistemático es aquel que considera que cada estrato tiene la misma probabilidad, teniendo por tanto la misma cantidad de muestras (Kroese, Taimre, & Botev, 2011). Este muestreo puede extenderse a un espacio de n dimensiones. Por ejemplo, para un sistema con dos variables aleatorias uniformemente distribuidas unitarias (2 dimensiones), considerando 5 estratos para cada dimensión, las 50 muestras requeridas se distribuirían de la manera que se muestra en la figura 10. Nótese que el espacio muestral se dividió en 25 cuadrados, y a cada uno de ellos se le asigna 2 muestras, mientras que, en muestreo aleatorio estándar, hay cuadrados que no tienen muestra alguna.

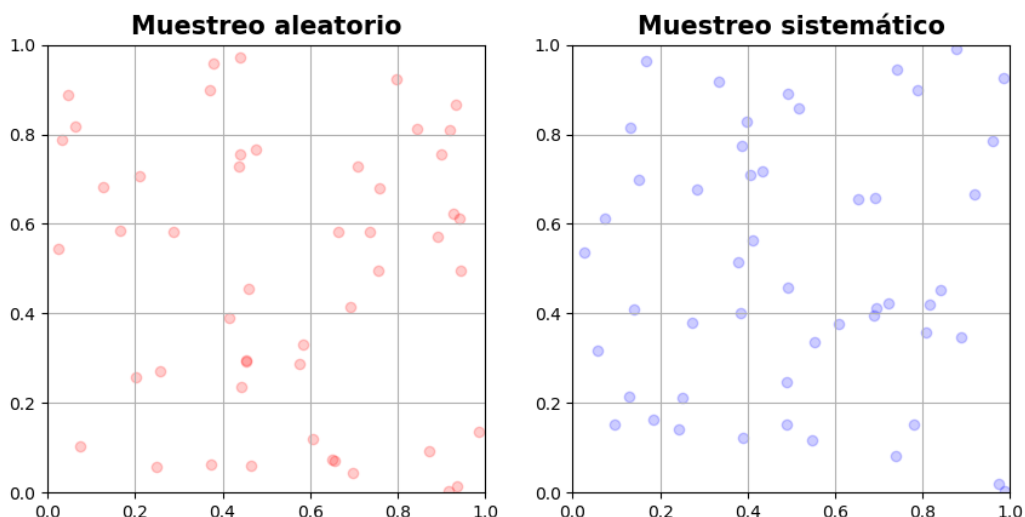


Fig. 10: Muestreo Sistemático. Fuente: Elaboración propia.

Muestreo hipercubo latino

El muestreo sistemático tiene una gran desventaja, especialmente en problemas multidimensionales: la cantidad de estratos crece exponencialmente con el

número de dimensiones. En un problema de n dimensiones (a cada variable aleatoria a analizar le corresponde una dimensión), para k clases o estratos por dimensión, se tendrían un total de k^d estratos. Una alternativa eficiente a la estratificación multidimensional es el Muestreo Hipercubo Latino, propuesto por McKay et. Al en 1979 (Kroese, Taimre, & Botev, 2011).

Un cuadrado latino es un arreglo bidimensional de elementos sobre un cuadrado, distribuidos de manera cada elemento ocurre una sola vez en cada fila y en cada columna. Si se generaliza este concepto a 3 dimensiones, se tendría un cubo latino, y si se generaliza a $n > 3$ dimensiones, se tendría un hipercubo latino. Este concepto es la base para este método de muestreo.

Se define una cantidad k de estratos para cada variable, y se realiza el muestreo considerando que cada variable debe tener precisamente k estratos equiprobables. De esta manera, se asegura que en el experimento cada variable utilice todos los valores posibles definidos en la estratificación. En la figura 11, se muestra la aplicación del Muestreo Hipercubo Latino para el mismo problema de dos dimensiones mencionado en la sección anterior. Como se puede apreciar, a pesar de no tener la misma cantidad de muestras en cada cuadrado, la suma de muestras en cada fila y columna es la misma. La cantidad de muestras es 50

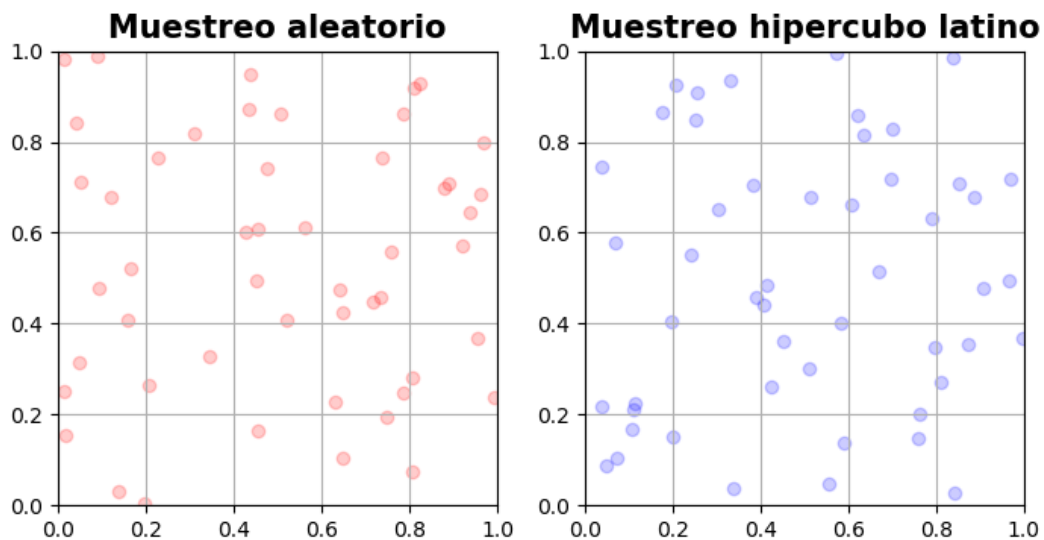


Fig. 11: Muestreo Hipercubo Latino. Fuente: Elaboración propia.

McKay et. al demostraron que, si la función en estudio es monótona, la varianza con el Muestreo Hipercubo Latino es menor que utilizando el muestreo aleatorio ordinario (McKay, Beckman, & Conover, 2000).

Además de los métodos mencionados, existen otros que tienen mayor o menos complejidad, y que pueden ser más o menos específicos a cada problema. Para

el trabajo en curso se utilizará el Muestreo Hipercubo Latino, por su practicidad y su eficiencia.

2.5. LA SIMULACIÓN DIFUSA DE MONTE CARLO (FMCS)

La Simulación Difusa de Monte Carlo (*Fuzzy Monte Carlo Simulation, FMCS*) fue propuesta debido a la necesidad de contar con un método para simular modelos en los cuales se tienen tanto variables aleatorias como difusas. El método heurístico fue propuesto por investigadores canadienses como alternativa a métodos anteriores que tenían ciertos cuestionamientos conceptuales, como el convertir los números difusos a distribuciones de probabilidad, siendo estos dos conceptos de diferente naturaleza. En su planteamiento se evaluó su validez como herramienta de evaluación de riesgo en la construcción, pero como método de análisis tiene una aplicabilidad muy amplia (Sadeghi, Fawek, & Pedrycz, 2010).

Para un modelo definido por n variables aleatorias y m variables difusas (entrada), que trata de calcular los resultados probables/posibles de uno o más parámetros (salida), la Simulación Difusa de Monte Carlo se puede aplicar en líneas generales de la siguiente manera (Sadeghi, Fawek, & Pedrycz, 2010):

1. Generar w muestras aleatorias del modelo, donde en cada muestra se generan valores aleatorios para cada una de las variables aleatorias.
2. Para cada muestra, se calcula el parámetro de salida del modelo utilizando operaciones de la aritmética de números difusos. Esto es posible porque las variables aleatorias han sido reemplazadas por los valores reales generados en el muestreo aleatorio. El resultado de este cálculo será un modelo por cada una de las w muestras.
3. Analizar los w números difusos resultantes. Para cada valor de α , se tienen w intervalos de α -cortes con valores inferiores y superiores definidos. Es posible calcular entonces para cada valor de α dos curvas de probabilidad, una para el límite superior y una para el límite inferior. El resultado de este proceso sería una familia de curvas de probabilidad, dos curvas para cada valor de α , que también puede graficarse como una superficie.

Teniendo en cuenta que la confiabilidad en el sentido posibilista es igual a $1 - \alpha$, el gráfico permitirá observar los valores de la variable de salida y su relación con la confiabilidad (en los dos sentidos, probabilístico y posibilístico).

En la figura 12 se muestra el resultado de un análisis FMCS realizado para calcular el riesgo de excedencia en un proyecto de construcción. Como puede apreciarse,

al disminuir la posibilidad de excedencia, es decir, al aumentar la confiabilidad, las curvas cubren un área mucho mayor, lo que indicaría que deben tomarse mayores márgenes de seguridad. Por ejemplo, si se desea saber en qué rango se encontrará el costo para una confiabilidad difusa y probabilística del 90% (posibilidad de excedencia del 10%), bastaría con trazar una línea horizontal con abscisa igual a 10%, y ver en qué puntos intersecta a la curva verde, cuya posibilidad de excedencia es del 10%.

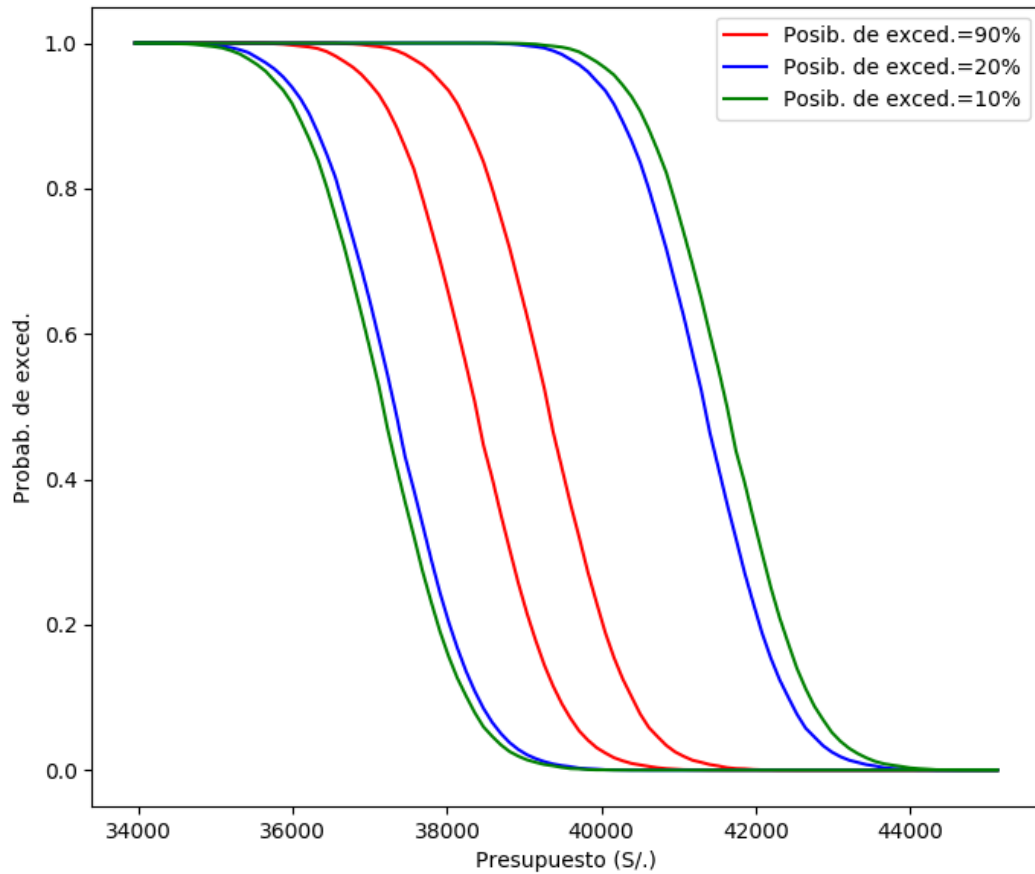


Fig. 12: Ejemplo de salida del método FMCS. Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN DETERMINISTA DE LA DEMANDA

3.1. GENERALIDADES

El objetivo principal de un sistema de distribución de agua es satisfacer la demanda de agua de la localidad servida durante un periodo de tiempo razonable (Shammas & Wang, 2016). Esto implica abastecer del líquido elemento de manera continua, y con una presión suficiente, aún en los periodos de mayor demanda. Así, se tienen que diseñar los diferentes componentes del sistema de modo que la velocidad y la presión en todas las tuberías y los nodos satisfagan los límites indicados por las normas en rigor. Una vez definida la distribución en planta de la red, se calculan de manera iterativa las velocidades y presiones en los distintos nodos y tuberías, cambiando los diámetros de las tuberías hasta lograr que se encuentren entre los rangos límite deseados (Arocha, 1997).

En este sentido, el factor que define la dimensión de los componentes del sistema es la demanda, es por ello que algunos autores consideran su estimación como la etapa más importante del proceso de diseño (Swamee & Sharma, 2008). La estimación precisa de la demanda es, sin embargo, una tarea difícil, debido a su gran complejidad, ya que depende de muchos factores propios de cada población en estudio (Swamee & Sharma, 2008). La falta de información histórica de consumos es un problema común que dificulta esta tarea (American Water Works Association, 2014).

3.2. COMPOSICIÓN DE LA DEMANDA

La composición de los diferentes usos del agua en una localidad define en gran medida la demanda esperada, ya que cada tipo de uso tiene un patrón de consumo particular (Arocha, 1997). Los tipos más importantes al hablar de sistemas de abastecimiento de agua para localidades son:

3.2.1. Doméstico o residencial

Este tipo de demanda representa el volumen más importante en los sistemas de distribución de agua para localidades, y representa un porcentaje más importante aún de usuarios. La demanda de agua varía con la cantidad y edad de los ocupantes, su nivel de ingreso, la ubicación geográfica de la localidad, clima, etc. En localidades con clima cálido, el uso es mayor debido a la mayor frecuencia del uso de duchas, uso para riego, etc. En climas fríos la demanda es menor, pero en climas extremadamente fríos aumenta debido a la práctica común de dejar los aparatos funcionando para evitar el congelamiento (Shammas & Wang, 2016).

El agua de uso doméstico se clasifica en agua para uso interior y agua para uso exterior, ambos con patrones distintos (Koch, 2010):

- El agua para uso interior se utiliza principalmente para el funcionamiento de los aparatos sanitarios. En este sentido, la eficiencia de los aparatos utilizados influye de manera importante en esta demanda. La antigüedad de las viviendas está normalmente ligada al uso de aparatos sanitarios antiguos, que son poco eficientes respecto al uso del agua, y a las pérdidas internas debido al deterioro de las tuberías. Estudios han mostrado que esta demanda no presenta variación estacional significativa (American Water Works Association, 2014).
- El agua para uso exterior tiene como finalidad el uso para el riego de jardines, abastecimiento de piscinas, piletas, limpieza de pisos y vehículos, etc. El uso de agua para estos fines muestra variación estacional importante (American Water Works Association, 2014). Un factor determinante en este tipo de uso es el nivel socioeconómico de los usuarios: los sectores de mayor nivel de ingresos muestran un mayor uso de este tipo, mientras que los sectores de menor nivel puede incluso tener un suministro deficitario (McGhee, 1999).

Las políticas de gestión eficiente del agua tienen una influencia superlativa en este tipo de uso. Estudios han mostrado que, desde la aprobación de la Ley de Política Energética en 1992 en los Estados Unidos, la cual estandarizó los caudales máximos de los aparatos sanitarios, el uso de agua per cápita ha venido disminuyendo gradualmente incluso hasta nuestros días (American Water Works Association, 2014). Deberá evaluarse el impacto de esta disminución en el diseño de nuevos sistemas de abastecimiento.

El Reglamento Nacional de Edificaciones en la Norma OS.100 diferencia la demanda para uso doméstico de la demanda industrial y comercial, presentando valores recomendados en caso de no contar con un estudio de demanda.

3.2.2. Comercial e industrial

El uso del agua con fines comerciales e industriales dependerá mucho de las características propias de su actividad económica. Debido a que su demanda no depende de la cantidad de población de la localidad servida, puede llegar a representar un valor importante (McGhee, 1999). Además de factores propios de cada actividad, las cantidades de agua utilizados dependerán en gran medida de

la tarifa del agua para el consumidor industrial y las prácticas de conservación y reutilización (Koch, 2010).

El cálculo de la demanda para uso comercial, de acuerdo a lo indicado en la Norma OS.100, puede realizarse utilizando las dotaciones específicas detallados en la Norma IS.010. En dicha norma se detallan consumos para diferentes tipos de comercios, como restaurantes, piscinas, escuelas, etc.

Para el uso industrial, la norma recomienda realizar el cálculo de la demanda considerando las condiciones de uso al que será destinada.

3.2.3. Agua contra incendios

A pesar de que el volumen de agua que se utiliza para apagar incendios es pequeño comparado con la demanda anual de la población, el caudal que se requiere en caso de un incendio es importante, y puede llegar a ser comparable al caudal total en comunidades pequeñas (Koch, 2010). La tipología y material de las construcciones, el uso de la zona y el tamaño de la población son factores que influyen en el caudal a destinar para el uso contra incendios (Shammas & Wang, 2016).

En nuestro país, la Norma OS.100 recomienda considerar un caudal para incendio de manera obligatoria para poblaciones de más de 10,000 habitantes. En dichas localidades, debe considerarse la colocación de modo que la distancia entre ellos sea menor o igual a 300 metros. Además, los caudales de diseño de los hidrantes serán (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2006):

- Para zonas de uso residencial: 15 l/s
- Para zonas de uso comercial/industrial: 30 l/s

3.2.4. Agua para uso municipal

El agua para uso municipal implica el abastecimiento del sistema de riego de áreas verdes, para edificios públicos y para trabajos de limpieza pública. De manera similar al caso de la demanda comercial/industrial, el caudal para este fin debe estimarse considerando el uso que tendrán.

3.2.5. Pérdidas

Las pérdidas en los sistemas de abastecimiento de agua se deben principalmente a las fugas, errores de lectura y conexiones clandestinas. El rango de pérdidas varía entre 2% y 50% entre las principales ciudades del mundo (Shammas & Wang, 2016). En los países desarrollados, el porcentaje de pérdidas puede llegar a ser menor al 15%. En México, el porcentaje de pérdidas según estudios en varias

ciudades, representa aproximadamente el 40% de la demanda (Comisión Nacional del Agua, 2016). En la ciudad de Lima, según el Plan Maestro Operacional, el porcentaje de pérdidas el 2012 fue de 25.95% (SEDAPAL, 2014).

Es necesario realizar un estudio de detección de pérdidas cuando el porcentaje de agua perdida alcanza cierto valor límite definido por la entidad que administra el agua. Los signos principales de que están ocurriendo pérdidas importantes son: altos caudales en las horas de la madrugada, flujo de agua en cunetas en época seca, pavimentos húmedos, filtraciones permanentes, pérdidas anormales de presión, y vegetación inusual (Shammas & Wang, 2016).

Las fugas actúan como orificios, por lo que su caudal dependerá directamente de la raíz cuadrada de la presión. Es por ello que los límites de presión establecidos juegan un papel importante en el control de pérdidas (Swamee & Sharma, 2008).

3.3. FACTORES QUE DETERMINAN EN LA DEMANDA

La demanda de agua de una población depende principalmente de los siguientes factores (McGhee, 1999):

- Factores meteorológicos: El clima es el factor más importante en la determinación de la demanda. Las localidades con clima árido tienen una demanda mucho mayor que las comunidades con clima húmedo, lo cual puede explicarse por un mayor uso doméstico de agua, tanto externo como interior (Davis, 2010). Investigaciones han mostrado una relación inversa entre el nivel de precipitación y el consumo de agua (Arocha, 1997).
- Factor socioeconómico: El estándar de vida influye mucho en el uso del agua. Generalmente, un estatus socioeconómico alto implica un mayor uso de agua (Davis, 2010). Distritos con mayor valor de vivienda generalmente cuentan con mayor área de jardines, piscinas, etc.
- Tamaño de la población: El tamaño de la localidad se relaciona directamente al consumo per cápita. Los usuarios de ciudades grandes consumen más agua que los usuarios de ciudades pequeñas. Esto puede deberse a que en las ciudades grandes existen muchos comercios e industrias, y que en localidades pequeñas muchas veces el abastecimiento de agua es deficiente (McGhee, 1999).
- Antigüedad: Las ciudades más antiguas presentan mayores consumos debido al uso de aparatos sanitarios que no cumplen con las regulaciones de eficiencia recientes (Davis, 2010).

- **Medición:** El control del uso del agua con medidores impone un sentido de responsabilidad en los usuarios que no se aprecia en sistemas sin medición. Cuando las conexiones tienen medidores, los usuarios suelen reparar sus fugas y hacer un uso más conservador del agua, como consecuencia de esto, tienen una menor demanda (Davis, 2010). Por otro lado, la medición puede usarse para controlar los picos de demanda al imponer tarifas más altas en horas pico (Shammas & Wang, 2016).
- **Gestión del suministro y conservación:** El mantenimiento continuo, el monitoreo de los sistemas de abastecimiento de agua y las políticas de reducción de pérdidas influyen de manera directa en la reducción del consumo de agua de una localidad. Asimismo, incentivar a la población al uso racional del agua tiene un efecto negativo en la demanda. Esto tiene además ventajas desde el punto de vista ambiental (Koch, 2010).

3.4. ESTIMACIÓN DE DEMANDA A ESCALA RESIDENCIAL

A pequeña escala, es decir, cuando se considera una cantidad limitada de aparatos sanitarios (normalmente para una sola edificación), el cálculo de la demanda dependerá principalmente de la simultaneidad con que se usen. Todos los métodos buscan calcular el caudal máximo probable o caudal de diseño. Los métodos de cálculo pueden agruparse de la siguiente manera (Castro, Garzón, & Ortiz, 2006):

3.4.1. Métodos empíricos

- **Método británico:** Calcula la demanda máxima probable como la multiplicación del gasto total de todos los aparatos sanitarios y un factor de probabilidad (Máxima Demanda Probable) que depende del gasto total.
- **Método de Dawson y Bowman:** Establecen demandas máximas de diseño en función del tipo de vivienda, de los aparatos sanitarios con los que posiblemente cuente, y del gasto de los aparatos sanitarios.

3.4.2. Métodos semiempíricos

- **Método alemán de la raíz cuadrada:** Establece como patrón o unidad de gasto a la descarga por una válvula de 3/8" (la cual se estima en 0.25 l/s). Para todos los aparatos sanitarios, se calcula un factor de carga, que es igual al cuadrado entre el gasto esperado en dicho aparato y la unidad de gasto. Se suma el producto de la cantidad de aparatos sanitarios con su factor de carga, y se calcula la raíz cuadrada de esta suma. La demanda de diseño se calcula como el producto de esta suma por la unidad de gasto.

- Método del factor de simultaneidad: Para cada tipo de aparato sanitario, se calcula un factor de simultaneidad que es igual a la inversa de la raíz cuadrada de la cantidad de aparatos menos uno. Se suman los caudales multiplicados por su respectivo factor para todos los aparatos para obtener así el caudal máximo probable.
- Método racional o español: Utiliza también un factor de simultaneidad para aparatos sanitarios en una vivienda, y además permite utilizar un factor de simultaneidad para un grupo de viviendas.

3.4.3. Métodos probabilísticos

- Método de Hunter: Este método ampliamente utilizado, y recomendado por la norma IS.010, utiliza la teoría de las probabilidades modelando de manera simplificada el uso de los aparatos sanitarios. Todos los aparatos se convierten en unidades equivalentes de un solo aparato patrón (unidades de gasto), para modelar el sistema con una distribución binomial de n aparatos iguales con la misma probabilidad de uso y caudal. Luego de ello se utiliza la curva de distribución binomial para determinar el caudal máximo probable (con una confiabilidad del 99%). Se utilizan las curvas de diseño de Hunter, que relacionan el caudal de diseño con la cantidad de unidades de gasto del sistema. La principal debilidad del método de Hunter es que, convertir un aparato sanitario en un número determinado de veces el aparato patrón, artificio necesario para aplicar la distribución binomial, no tiene significado físico alguno (Omaghomi & Buchberger, Estimating Water Demands in Buildings, 2014). Cada aparato tiene su propio caudal y probabilidad de uso, que no necesariamente guardan relación entre sí. Diversos estudios evidenciaron que aplicar el método de Hunter con las curvas originales resulta en una sobreestimación de la demanda de agua al hacer comparaciones con métodos más recientes (American Water Works Association, 2014).
- Método de Wistort: Para superar el punto débil mencionado en el método de Hunter, el Método de Wistort aproxima la distribución de la demanda a una curva de probabilidad normal, cuya media y desviación estándar se derivan de la distribución binomial original utilizada por el método de Hunter. En este caso, cada aparato se ingresa a la ecuación con su probabilidad de uso y su caudal. Para lograr una confiabilidad similar a la del método de Hunter, se calcula la demanda máxima probable suman a la media una cantidad determinada de veces (según la curva de

probabilidad de excedencia normal) la desviación estándar. Es importante señalar que aplicar la aproximación normal a la distribución binomial de Hunter es recomendable bajo ciertas condiciones que dependen de la cantidad de aparatos sanitarios y su probabilidad de uso. (Omaghomi, 2014).

- Método de Wistort Modificado: El método de Wistort tiene una aplicabilidad limitada cuando se trata de viviendas unifamiliares y/o con un número pequeño de aparatos sanitarios. Es por ello que investigadores propusieron recientemente una modificación en la que se usa una distribución binomial truncada en cero para el cálculo de la media y la desviación estándar que se usan en la fórmula de Wistort. (Buchberger, Omaghomi, Wolfe, Hewitt, & Cole, 2017).
- Enumeración exhaustiva: Utilizando el cálculo computacional, se enumeran todas las posibles combinaciones de aparatos sanitarios, considerando cada uno como una variable con distribución binomial. Para cada combinación se calcula su probabilidad de ocurrencia y su caudal esperado. Ordenando los resultados de este cálculo en función de los caudales esperados se estima el caudal máximo probable. Para un sistema con n aparatos sanitarios, se requiere evaluar 2^n (Buchberger, Omaghomi, Wolfe, Hewitt, & Cole, 2017).
- Simulación de Monte Carlo: Mediante el método de Monte Carlo, se simula la demanda considerando la distribución binomial para el uso en cada aparato sanitario. Esto permite, de manera similar al método anterior, obtener una curva de probabilidad de la demanda (Omaghomi & Buchberger, 2014).

3.5. ESTIMACIÓN DE DEMANDA A ESCALA POBLACIONAL

El problema en el cálculo de la demanda de un grupo de viviendas grande es más complejo, ya que la cantidad de aparatos sanitarios y usuarios es mucho mayor, y las tendencias varían de diferente manera. El consumo promedio de una población con fines de diseño puede estimarse de tres maneras diferentes según la metodología convencional (Arocha, 1997):

1. Dotaciones asignadas en función de la zonificación. Se utilizan dotaciones por área definidos por las normas de diseño en la zona de estudio, y utilizando con las áreas de cada sector, se calculan las demandas para los diferentes nodos del sistema.

2. Resultado de una estimación per cápita a futuro. Se utilizan datos de consumo per cápita definidos por las normas de diseño, y calculando la población proyectada dentro del periodo de diseño, se estiman los consumos para la localidad.
3. Proyección utilizando datos históricos de consumo. Se utilizan datos provenientes de medición de consumos en sistemas existentes. Esto sería aplicable principalmente para ampliaciones y/o mejoramientos de sistemas de distribución de agua.

En los casos 1 y 2 se utiliza información provista por las normas de diseño aplicables a la localidad. Estas asignan dotaciones en función de algunas características de la población, como su tamaño, su clima, etc. Utilizar estas dotaciones sin tener en cuenta las características particulares (uso industrial y comercial, pérdidas, clima, etc.) de la localidad puede conducir a sobredimensionar o subdimensionar el sistema (Arocha, 1997).

En el Perú, la norma que define estos parámetros es la norma OS.100, cuya metodología se alinea más al método 2. Las dotaciones que la norma recomienda son (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2006):

- Para sistemas con conexiones domiciliarias:
 - o En clima frío: 180 l/hab/d
 - o En clima templado y cálido: 220 l/hab/d
- Para programas de vivienda con lotes de área menor o igual a 90 m²:
 - o En clima frío: 120 l/hab/d
 - o En clima templado y cálido: 150 l/hab/d
- Para sistemas de abastecimiento indirecto con cisternas o piletas:
 - o En clima frío: 30 l/hab/d
 - o En clima templado y cálido: 50 l/hab/d

El caso 3 representa el caso ideal, ya que la mejor fuente de información para un buen diseño es la información histórica de consumos, que representa de manera más precisa las características del consumo particulares de la población en estudio. Si no existiese información para la población en estudio, la información estadística de poblaciones cercanas puede ser de mucha utilidad, siempre y cuando se tomen en cuenta las diferencias socioeconómicas, comerciales e industriales entre estas. El diseño debe tener en cuenta que al mejorar el sistema de distribución el consumo puede verse afectado (Davis, 2010).

3.6. VARIACIÓN DE LA DEMANDA – ENFOQUE TRADICIONAL

3.6.1. Tipos de variación de demanda

La demanda de agua varía en el tiempo, diferenciándose principalmente 3 tipos de variación: horaria, semanal y anual. La variación horaria y semanal se deben principalmente a las costumbres y actividades de la población. En este sentido, esta variación se deberá principalmente al uso doméstico interior de agua (Koch, 2010).

La variación anual o estacional se debe al factor meteorológico. En verano se aprecia un mayor consumo de agua. Esta variación se relaciona con el uso doméstico exterior del agua. En la figura 13 se muestra de manera ilustrativa la variación anual de consumo en una localidad de los Estados Unidos.

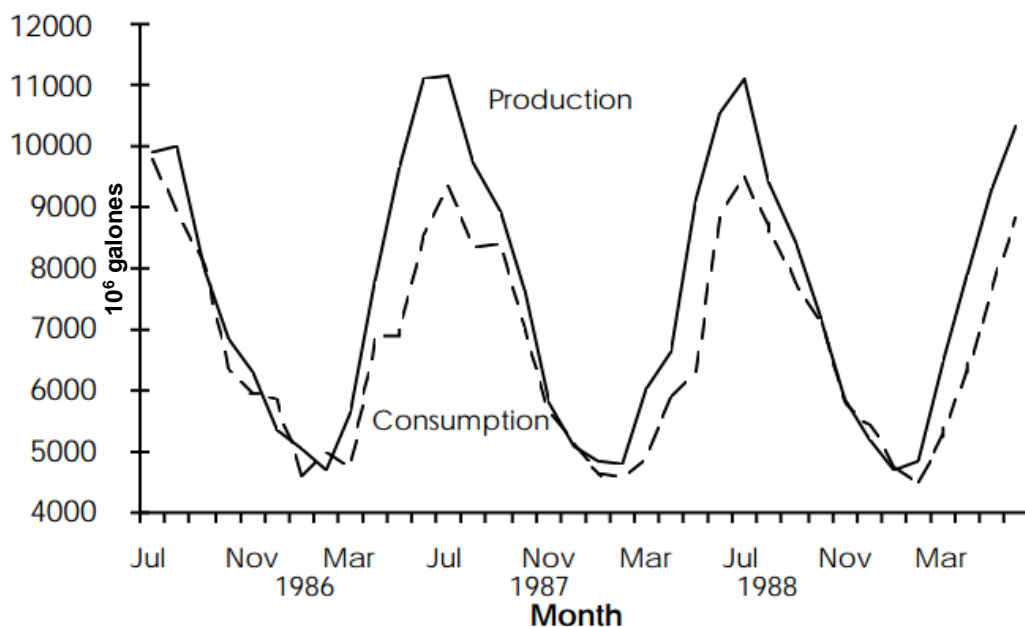


Fig. 13: Variación anual de la demanda en la localidad de Phoenix, Arizona, USA. Fuente: (Mizgalewicz, 1991)

Para representar la variación del consumo a lo largo del día se utilizan los patrones de consumo o curvas de variación diaria. Estas curvas reflejan la fluctuación de la demanda a lo largo del día como un factor de la demanda media diaria (Shammas & Wang, 2016). En la figura 14 se muestra una curva de variación diaria para la Ciudad de México.

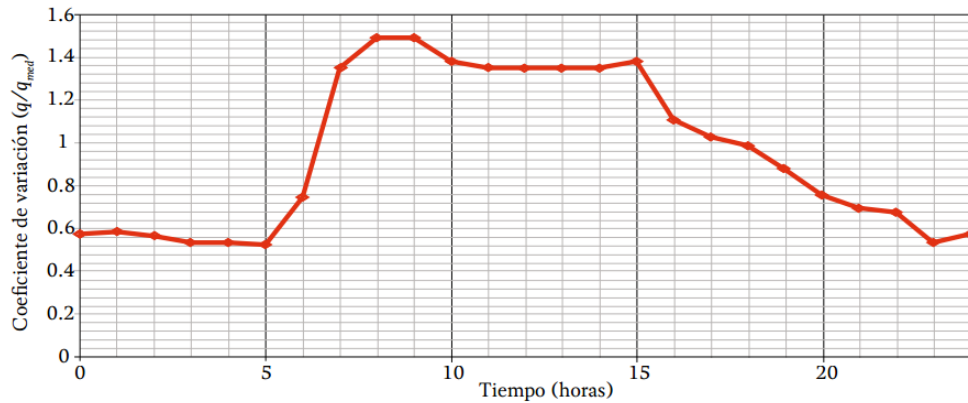


Fig. 14: Curva de variación diaria para la Ciudad de México. (Comisión Nacional del Agua, 2016)

3.6.2. Coeficientes de variación

Para representar la variación de la demanda en el proceso de diseño, convencionalmente se usan constantes de diseño denominados coeficientes de variación.

El coeficiente de variación diaria es la relación entre la demanda promedio del día de mayor consumo del año y la demanda promedio anual. Se representa como $K1$. El coeficiente de variación horaria es la relación entre la demanda promedio de la hora de mayor consumo en el día de mayor demanda del año y la demanda promedio anual. Se representa como $K2$ (Arocha, 1997).

Estos coeficientes deben estimarse en base a un estudio de la demanda. En caso de no contarse con dichos coeficientes, puede utilizarse coeficientes de variación estimados, los cuales son provistos en la bibliografía técnica (McGhee, 1999). La norma OS.100 establece los siguientes coeficientes:

- $K1 = 1.3$
- $K2 = 1.8 - 2.5$

En la bibliografía revisada se consideran los siguientes coeficientes:

Tabla 1: Coeficientes de variación de demanda (Elaboración propia)

Autor - Año	K1	K2	Ámbito de aplicación
(Shammas & Wang, 2016)	1.5 - 3.5	2.0 - 7.0	Estados Unidos
(Comisión Nacional del Agua, 2016)	1.2 - 1.4	1.55	México
(Davis, 2010)	2.2	5.3	Estados Unidos
(Regal, 2008)	1.2 - 1.3	1.56 - 2.08	Perú
(Swamee & Sharma, 2008)	1.5 - 2.0	2.0 - 5.0	De uso común
(Vierendel, 2009)	1.2 - 1.5	1.8 - 2.5	Perú
(Rodríguez, 2001)	1.2 - 1.5	1.8 - 2.25	México
(Mays, Water Distribution Systems Handbook, 2000)	1.8 - 2.8	2.5 - 4.0	De uso común
(McGhee, 1999)	1.8	2.25	De uso común
(Arocha, 1997)	1.2 - 1.7	2.0 - 3.0	Venezuela

3.6.3. Factores que afectan a la variación de la demanda

El coeficiente de variación de demanda tiene una relación inversa con el tamaño de la población (Shammas & Wang, 2016). Las ciudades de menor población tienen un consumo mucho más variable, mientras que las ciudades más pobladas tienen una demanda más uniforme. La relación entre los caudales máximos instantáneos y los caudales promedio se puede estimar con la siguiente relación para una población mayor a 220 personas (Shammas & Wang, 2016):

$$Q_{INST. MÁX} = \frac{7 \times Q_{PROM. DIARIO}}{P_K^{0.167}} \quad (3.1)$$

Donde P_K es la población en miles de personas.

El intervalo de análisis también influye en el coeficiente de variación de demanda (Davis, 2010). El coeficiente máximo por minuto es mayor que el coeficiente máximo horario, y este es mayor que el coeficiente máximo diario.

La composición de los usuarios del agua también influye en la variación de la demanda. La demanda doméstica presenta mucho mayor variación que la demanda industrial (McGhee, 1999), por lo que este factor debe tener en cuenta al elegir los factores de variación.

CAPÍTULO IV. MODELAMIENTO ESTOCÁSTICO/PROBABILÍSTICO

4.1. MODELAMIENTO ESTOCÁSTICO DE LA DEMANDA

4.1.1. Importancia de los modelos estocásticos y probabilísticos

La demanda juega un rol muy importante en el modelamiento hidráulico de los sistemas de distribución de agua (Gargano, Tricarico, & Del Giudice, 2016). La variación de la demanda incide directamente en los valores de los caudales y las presiones del sistema. Es así que, una estimación incorrecta de la demanda puede conducir a un diseño deficiente de la red, ya que su comportamiento depende de cómo se modela dicha variable (Gheisi, Forsyth, & Naser, 2016).

A pesar de ello, en la práctica actual, y como se ha venido haciendo desde hace muchos años, el modelamiento de la demanda se hace de manera determinista, utilizando las curvas de variación diaria, o asumiendo factores pico cuyos valores son fijos (Tzatchkov & Alcocer, 2016). Esto podría ser válido en cierta forma para las tuberías más importantes de la red, que involucran a una gran cantidad de usuarios, pero no para las tuberías secundarias, cuyo comportamiento es distinto (Alcocer, Tzatchkov, García, Buchberger, & León, 2008). Es usual en el modelamiento usar la misma curva para todos los nodos, lo que equivale a asumir una sincronía perfecta en el comportamiento de los usuarios respecto al uso del agua (Moughton, Buchberger, Boccelli, Filion, & Karney, 2006). Modelar una red de esta forma, sin considerar la incertidumbre propia de la demanda, puede llevar a deficiencias de diseño (Kapelán, Savic, & Walters, 2005).

Se entiende por confiabilidad a la capacidad del sistema de seguir abasteciendo a los usuarios tanto en condiciones normales como extraordinarias (fallas o mecánicas), con la calidad y cantidad requeridas por los usuarios. La gestión eficiente y segura de un sistema de distribución de agua necesita de los análisis de confiabilidad (Giustolisi, Laucelli, & Colombo, 2009). El modelamiento estocástico o probabilístico de la demanda permite precisamente analizar múltiples escenarios, incluyendo las condiciones extraordinarias de operación, con el fin de tener un modelo robusto que considere la incertidumbre natural en dicha variable. Este aspecto es muy importante también para la optimización, dado que se busca minimizar el costo de la inversión para un nivel requerido de confiabilidad (Babayan, Kapelán, Savic, & Walters, 2005).

Un modelo detallado de la demanda permite modelar a mayor detalle en la escala temporal y espacial, lo que a su vez permite poder hacer análisis predictivos de calidad (Creaco, Blokker, & Buchberger, 2017). Conocer el comportamiento del

sistema en detalle, y no sólo en las condiciones de mayor demanda, permite analizar el comportamiento de las sustancias contaminantes disueltas y en forma de partículas (Blokker, Vreeburg, & Van Dijk, 2010).

4.1.2. Carácter general de los modelos de demanda

El consumo nodal de agua se modeló en varios estudios con fines de optimización y/o confiabilidad como variable aleatoria. La distribución de probabilidad utilizada para su representación en muchos estudios fue la normal. Este sería un enfoque probabilístico (Giustolisi & Walski, 2012) (Kretzmann & Van Zyl, 2004) (Kapelan, Savic, & Walters, 2005) (Babayán, Kapelan, Savic, & Walters, 2005).

Un enfoque estocástico implica considerar una variación en el tiempo de los parámetros de la demanda. Un ejemplo de esto es considerar a la demanda total de las redes como la suma de dos componentes: el primer representando la variación de la demanda a lo largo del tiempo por factores externos, con un valor determinista, como por ejemplo la variación estacional o semanal; y el otro componente debido propiamente a su naturaleza aleatoria, como una cadena de Márkov. Este modelo fue aplicado al modelamiento de una red completa (Filion, Adams, & Karney, 2007).

A menor escala espacial, existen los modelos de pulsos. Estos modelos consideran que el consumo de agua puede representarse por una serie temporal de pulsos de demanda, cuyas variables con su intensidad, duración y frecuencia (Saldarriaga, Páez, & Vallejo, 2014).

El comportamiento de la demanda varía según la escala espacial y temporal que se considere en el modelo. La escala espacial hace referencia a la cantidad de viviendas o usuarios considerados en el modelo. Existen modelos que pueden aplicarse a pocos usuarios (modelos de pulsos), y pierden precisión cuando se aplican a un grupo importante de usuarios (Alcocer, Tzatchkov, & Arreguín, 2012). Por ello existen también modelos que puede aplicarse a grupos más grandes de usuarios, e incluso a demandas totales de las redes de distribución. Ha habido una propuesta de parte de investigadores italianos de un modelo para aplicarse a ambas escalas (Gargano, Tricarico, & Del Giudice, 2016).

La escala temporal hace referencia al nivel de agregación temporal o intervalo de análisis considerado para el modelo. Por ejemplo, los modelos de pulsos pueden tener intervalos de análisis de 1 segundo, teniendo la capacidad de agrupar y promediar demandas para intervalos de 1 minuto, 5 minutos, e incluso 1 hora (Creaco, Blokker, & Buchberger, 2017).

En este sentido, se puede decir que las curvas de variación horaria tienen un intervalo de análisis de 1 hora, y una escala espacial que agrupa a todos los usuarios de la red. Su poca refinación temporal hace que los picos de demanda se suavicen (los picos instantáneos de demanda, considerados por ejemplo con un intervalo de análisis de un segundo) (Gargano, Tricarico, Granata, Sanpietro, & De Marinis, 2017). Asimismo, al ser originados con la data de toda la red, y tener por tanto una escala espacial grande, no representa bien el comportamiento de los nodos con pocos usuarios, cuya demanda tiene forma de pulsos intercalados con periodos de demanda cercanos a cero (Alcocer, Tzatchkov, García, Buchberger, & León, 2008).

Los modelos de demanda se basan en el análisis de data obtenida de mediciones. Para ello se realizan mediciones de la demanda utilizando medidores de caudal o de volumen. Normalmente los intervalos de medición con fines de modelamiento son de un segundo o un minuto. La data proveniente de mediciones se procesa y se analiza estadísticamente. Cuando la presión es menor a la mínima requerida, es posible que el consumo de los usuarios no sea el que realmente requieren, sino sólo el que disponen debido al mal funcionamiento del sistema (Gargano, Tricarico, & Del Giudice, 2016). Es por ello que durante el monitoreo de la demanda se debe registrar también mediciones de presión. Los días de medición en los cuales hay problemas con la presión no se toman en cuenta para los análisis.

4.1.3. Clasificación de modelos

En el presente trabajo de investigación se han estudiado diversos modelos para el modelamiento de la demanda. Estos modelos pueden clasificarse de diversas maneras según el criterio a considerar.

- Según la naturaleza de la estimación (Blokker, Vreeburg, & Van Dijk, 2010):
 - o Modelos descriptivos: Son modelos que describen la demanda real, y obtienen sus parámetros directamente de las mediciones. Al no correlacionar los parámetros de las series de demanda con las características de la población, es complicado aplicarlos a lugares distintos a aquellos en los que se hicieron mediciones. Un ejemplo de este tipo es el modelo de los Pulsos Rectangulares de Poisson (PRP).

- Modelos predictivos: Se utilizan para predecir la demanda en lugares en los cuales no se realizó mediciones. Un ejemplo de aplicación sería un lugar nuevo. Las series de demanda se generan en base a las características de la población. Un ejemplo es el modelo SIMDEUM (Simulation of Water demand, and End User Model).
- Según su ámbito de aplicación espacial (Alvisi, Franchini, & Marinelli, 2003) (Gargano, Di Palma, De Marinis, Granata, & Greco, 2016)
 - Modelos orientados a residencias individuales: Su ámbito de aplicación generalmente es de edificaciones unifamiliares o grupos pequeños de edificaciones. Los datos con los cuales se originan los parámetros de las series de demanda son mediciones y/o información en viviendas individuales. Un ejemplo de esto es el modelo SIMDEUM.
Es importante señalar que, a pesar de que los modelos de pulsos son aditivos, la correlación entre la demanda de diferentes usuarios hace que la desviación estándar del consumo total varíe de manera no lineal (Magini, Palavicini, & Guercio, 2008). Para superar este inconveniente, investigadores han propuesto metodologías para generar series de pulsos de demanda para un nivel de correlación da (Buchberger & Li, Preserving Spatial Correlation in Network Water Demands, 2008).
 - Modelos orientados a múltiples usuarios: Puede servir para modelar demandas nodales (múltiples usuarios). El modelo se basa en las mediciones realizadas en tuberías que alimentan a un grupo importante de usuarios. Un ejemplo de esto es el Modelo Mixto.
- Según la naturaleza de la incertidumbre (Vertommen, Magini, & Da Conceição, 2015):
 - Modelos estocásticos: Se modela la demanda como procesos estocásticos. Generan series temporales sintéticas de demanda para análisis de tiempo extendido. Un ejemplo sería el modelo de los Pulsos Rectangulares de Neyman-Scott.
 - Modelos probabilísticos: Modelan la demanda como variables aleatorias, con una distribución de probabilidad definida. Representan la variación aleatoria de la demanda. Este enfoque es usado en muchos modelos de optimización y confiabilidad, como se comentó en el inciso anterior. Un ejemplo sería el modelo

propuesto por Rudy Gargano para el cálculo de la demanda pico (Gargano, Tricarico, Granata, Sanpietro, & De Marinis, 2017).

4.1.4. Investigaciones recientes en el tema

No se encontraron evidencias de trabajos de investigación en los últimos años en lo que respecta al modelamiento probabilístico o estocástico de la demanda en el Perú. Los trabajos que se revisaron utilizan metodologías deterministas clásicas, como las curvas de variación horaria o los coeficientes de demanda pico.

A nivel de América Latina, investigadores del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) han realizado diversos trabajos en lo referido al modelamiento estocástico de la demanda, teniendo trabajos conjuntos con investigadores norteamericanos como Steven Buchberger, quien propuso por primera vez modelar la demanda como un proceso de Poisson no homogéneo (Buchberger & Wells, 1996). Asimismo, en colaboración con el CONAGUA y el CONACYT, desarrollaron un programa para el modelamiento hidráulico integrado con GIS, que incluye el cálculo de la demanda máxima basándose en el modelo PRP (Pulsos Rectangulares de Poisson) (Tzatchkov, Alcocer-Yamanaka, Mejía, & Chávez, 2014).

En Colombia el M.Sc. Juan Saldarriaga realizó un trabajo en el que aplicó el modelo PRP a un edificio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes. Muchos de los trabajos anteriores se centraron en la demanda residencial de agua para uso interior, por lo que este trabajo mostró el potencial del modelo (Saldarriaga, Páez, & Vallejo, 2014).

En la sección 4.5 se presentan los trabajos recientes referidos a la aplicación de la teoría de los conjuntos difusos en el análisis y diseño de redes de distribución de agua.

4.2. MODELOS ORIENTADOS A POCOS USUARIOS

4.2.1. Modelo de Pulsos Rectangulares de Poisson (PRP)

El método de los Pulsos Rectangulares de Poisson para el modelamiento de la demanda residencial, fue propuesto en base a mediciones en 21 viviendas de la localidad de Milford, Ohio, Estados Unidos entre 1993 y 1994, utilizando como fundamento matemático la teoría de colas. El monitoreo fue realizado durante un periodo de 7 meses con una resolución temporal de un segundo (Buchberger & Wu, 1995) (Buchberger & Wells, 1996) (Alcocer, Tzatchkov, García, Buchberger, & León, 2008) (Creaco, Blokker, & Buchberger, 2017). Este proceso fue usado

anteriormente en el campo de la hidrología para describir la evolución temporal de las precipitaciones (Guercio, Magini, & Pallavicini, 2001).

El modelo consiste en considerar a la demanda residencial como una serie de pulsos rectangulares, originados cada vez que los usuarios abren una llave, y que se caracterizan por su intensidad y su duración. Ambos parámetros se modelan como variables aleatorias independientes. Para caracterizar la intensidad, diversos autores han usado distribuciones como la exponencial, Weibull o lognormal. Para la duración se han usado distribuciones como la exponencial y la lognormal. Los parámetros de estas distribuciones (ambas se caracterizan con su media y su desviación estándar) se consideran invariantes en el tiempo (Creaco, Blokker, & Buchberger, 2017). En la figura 15 se aprecia un esquema del modelo PRP. Como puede apreciarse, las unidades elementales de modelamiento son los pulsos individuales de demanda, los cuales pueden superponerse eventualmente.

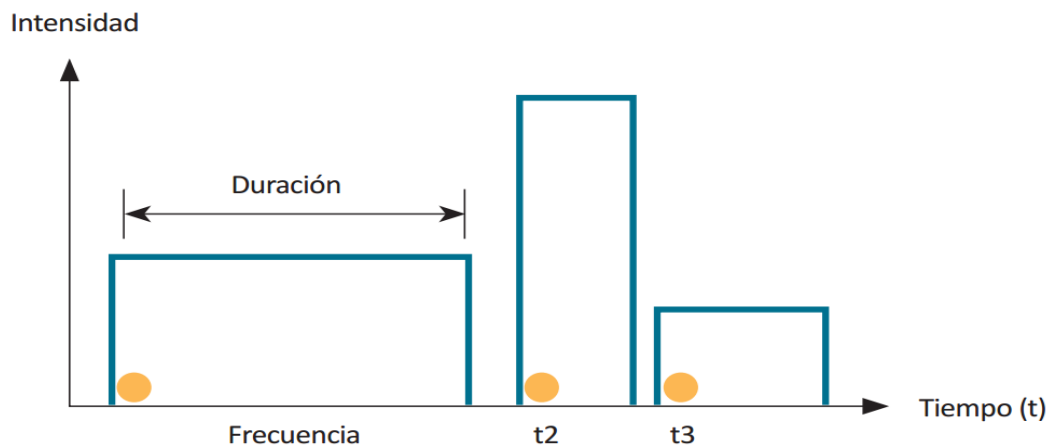


Figura 1. Pulsos rectangulares de demanda

Fig. 15: Modelamiento de la demanda por el método PRP. Los puntos de color mostaza representan el inicio de los pulsos. Fuente: (Saldarriaga, Páez, & Vallejo, 2014)

La ocurrencia de los pulsos sigue un proceso de Poisson no homogéneo. Se denomina proceso de Poisson, porque los eventos (pulsos) tienen una tasa de llegada (cantidad de eventos por unidad de tiempo) que sigue una distribución de Poisson. Esta distribución se modela considerando como parámetro a su media, que se denota como λ . Una característica de los procesos de Poisson es que el tiempo entre el inicio de dos eventos consecutivos sigue una distribución exponencial (Billingsley, 2012). En la figura 16 se muestra la tasa de llegada promedio para una vivienda en Valencia. Puede apreciarse que hay horas pico y horas de mínimo uso de agua.

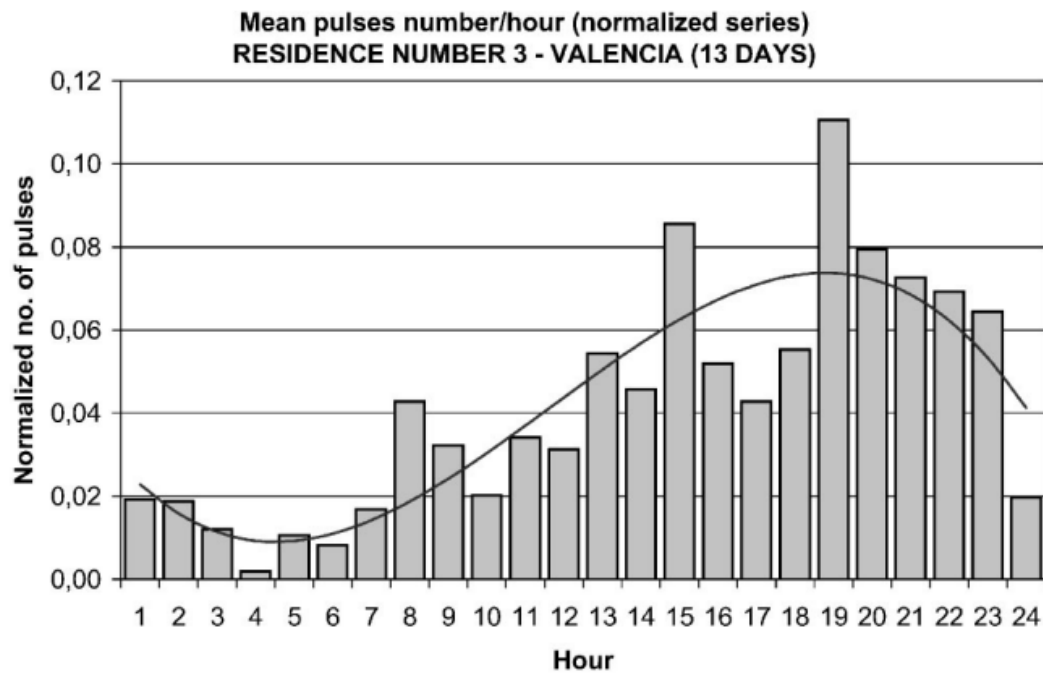


Fig. 16: Tasa de llegada promedio para una vivienda a lo largo del día. Fuente: (García, García-Bartual, Cabrera, Arregui, & García-Sera, 2004)

Asimismo, el proceso se considera como no homogéneo, debido a que la tasa de llegada no es constante a lo largo del tiempo, sino que varía en intervalos discretos. Por simplicidad, se asume que cada hora del día tiene una tasa de llegada λ diferente. Así, la tasa de llegada expresa los hábitos particulares de los usuarios respecto del consumo del agua (Alcocer, Tzatchkov, García, Buchberger, & León, 2008).

Los parámetros de la duración, la intensidad y la frecuencia se calcula en base al análisis de datos medidos en residencias individuales. El intervalo de medición requerido para modelar la demanda con el modelo PRP es de 1 segundo (Alcocer, Tzatchkov, García, Buchberger, & León, 2008). Una desventaja del método PRP es precisamente que requiere medición fina in situ, siendo este proceso muchas veces complicado y costoso (Blokker, Vreeburg, & Van Dijk, 2010).

Con los parámetros ya calculados, se generan series sintéticas de demanda, que se puede usar para el análisis de tiempo extendido.

La validez de este modelo para representar la demanda ha sido verificada para escalas temporales finas, mostrando un mejor desempeño que otros modelos (Creaco, Blokker, & Buchberger, 2017). Sin embargo, debido a que las series sintéticas generadas se comparan siempre con mediciones de las viviendas, es complicado sacar conclusiones sobre su desempeño (Blokker, Vreeburg, & Van Dijk, 2010).

El proceso de Poisson es aditivo, lo que significa que la demanda para N viviendas con tasa de llegada media λ será un proceso de Poisson con una tasa de llegada $N\lambda$. (Tzatchkov & Alcocer, 2016). La duración mantendría sus parámetros individuales, pero la intensidad tendría que ponderarse considerando la duración de los pulsos de las mediciones en cada vivienda (Creaco, Blokker, & Buchberger, 2017).

4.2.2. Modelo de Pulsos Rectangulares de Poisson Correlacionados (Cor-PRP)

Es un modelo derivado del PRP, que incluye una modificación importante: se incorpora la correlación entre la intensidad y la duración. Para su implementación, se toman los logaritmos naturales de la intensidad y la duración de los pulsos, y se ajusta a una distribución normal bivariable (Creaco, Farmani, Kapelan, Vamvakeridou-Lyroudia, & Savic, 2015). Esto es posible debido a que, como se mencionó anteriormente, la duración y la intensidad pueden representarse con una distribución exponencial, cuya propiedad es que su logaritmo natural tiene distribución normal.

Para pocos usuarios, incluir dicha correlación mejora la precisión de la predicción de la demanda al compararse con la demanda total diaria medida. Para un mayor número de usuarios la mejora es irrelevante (Creaco, Blokker, & Buchberger, 2017).

4.2.3. Modelo de Pulsos Rectangulares de Neyman-Scott (NSRPM)

El modelo de los Pulsos Rectangulares de Neyman-Scott (*NSRPM, Neyman-Scott Rectangular Pulse Model*) es un proceso estocástico planteado por investigadores italianos como una alternativa al modelo PRP (Alvisi, Franchini, & Marinelli, 2003) (Creaco, Blokker, & Buchberger, 2017). El modelo fue creado para describir la distribución de las galaxias en el universo en 1958 (Alcocer, Tzatchkov, García, Buchberger, & León, 2008).

La idea principal de este modelo es modelar la demanda no como una serie de pulsos individuales, sino como una serie de grupos o bloques de pulsos. Esto sirve para superar un problema del modelo PRP relativo a los pulsos superpuestos, cuya ocurrencia fue relativamente frecuente (Buchberger & Wells, 1996).

Al igual que en el modelo PRP, la llegada de estos bloques sigue un proceso de Poisson no homogéneo, y se respetan la idea de los intervalos de frecuencia de llegada. A cada bloque de demanda tiene asignado un número de pulsos individuales siguiendo también una distribución de Poisson. Los pulsos individuales se modelan considerando la distribución para su intensidad, su

frecuencia y para el tiempo de inicio desde el inicio del bloque de demanda (Alvisi, Franchini, & Marinelli, 2003). En la figura 17 se ilustra el proceso de generación de una serie de demanda con el modelo NSRPM. En la sub figura 17(a) se muestran los inicios de los bloques de pulsos, mientras que en la figura 17(b) se representa con el símbolo * el inicio de los pulsos individuales. En la figura 17(c) se presentan los pulsos individuales generados con su intensidad y duración. En la figura 17(d) se presentan los pulsos de demanda compuestos como agregación de los pulsos individuales.

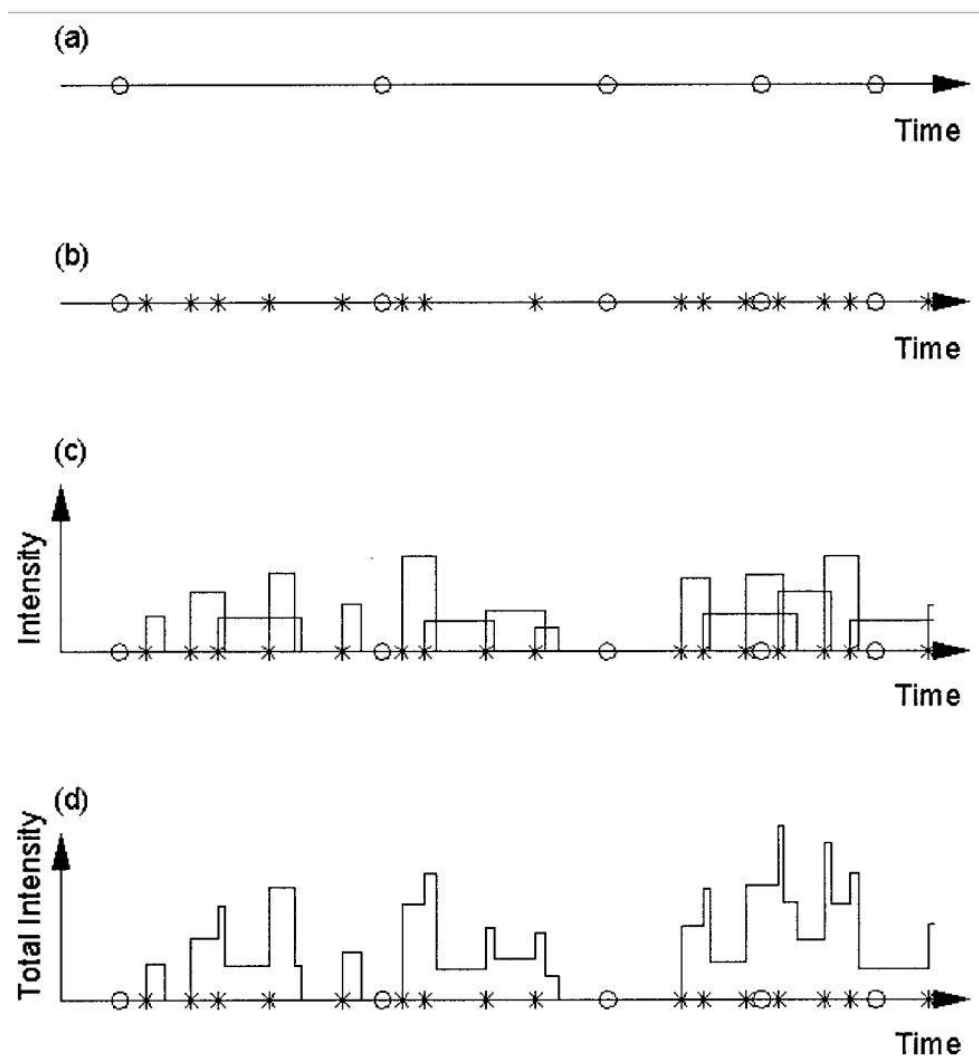


Fig. 17: Esquema de Neyman Scott. Fuente: (Alvisi, Franchini, & Marinelli, 2003)

A diferencia del modelo PRP, los parámetros de modelo NSRPM pueden calcularse en base a mediciones menos refinadas (se pueden usar intervalos de medición de 1 minuto). Esto supone una mejora invaluable, debido a que la cantidad de información proveniente de la medición (que será procesada) será

considerablemente menor (Alcocer, Tzatchkov, García, Buchberger, & León, 2008).

La obtención de los parámetros para el modelo se realiza mediante el análisis de las series medidas de demanda, utilizando procedimientos de optimización basados en el método de los momentos. Esto consiste en calcular algunos indicadores estadísticos de la serie de consumo medida, como la media, la varianza, la autocorrelación y la proporción de periodos secos (con cero demandas). Se calculan de manera analítica esos mismos indicadores para la serie propuesta (que está en función de la media y la desviación estándar de cada una de las características de la demanda, según el modelo NSRPM). Mediante un proceso de optimización que busca minimizar una función de error que relaciona estos dos grupos de estadísticos, se obtienen los valores óptimos de los parámetros (Alcocer, Tzatchkov, & Buchberger, 2006).

El modelo ha sido aplicado y validado para grupos pequeños de usuarios en México e Italia (Alvisi, Franchini, & Marinelli, 2003) (Alcocer, Tzatchkov, García, Buchberger, & León, 2008) (Tzatchkov & Alcocer, 2016).

4.2.4. Modelo del Pulso Total (OP)

El modelo del pulso total (*OP*, *overall pulse*) fue propuesto por investigadores italianos para simplificar algunos aspectos de los otros modelos de pulsos, sin que esto signifique perder complejidad en la representación de la demanda (Gargano, Di Palma, De Marinis, Granata, & Greco, 2016).

La idea básica del modelo es modelar la demanda tal y como es detectada por el medidor, es decir, sin separar los pulsos de demanda individuales, como suele hacerse en el método PRP para hallar los parámetros estadísticos de la demanda. Esto equivale a agrupar el bloque de pulsos de demanda del modelo NSRPM en un solo pulso, denominado pulso total. Los investigadores sostienen que es innecesario modelar al nivel de aparatos sanitarios (cada pulso de demanda en el modelo PRP o NSRPM es originado por la apertura de algún grifo) cuando se quiere usar el modelo para calcular la demanda total de una vivienda o de una ciudad (Gargano, Di Palma, De Marinis, Granata, & Greco, 2016).

Los pulsos totales de demanda también se modelan como un proceso estocástico, considerando como variables la intensidad, la demanda y la frecuencia. La intensidad y la frecuencia se modelan como variables aleatorias con distribución exponencial. La frecuencia se hace, de manera análoga a los métodos anteriores, se modela considerando una tasa de ocurrencia que cambia con el tiempo, siendo

esta variación característica de los usuarios. Se utiliza una distribución exponencial para modelar la llegada de los pulsos (Gargano, Di Palma, De Marinis, Granata, & Greco, 2016).

Los parámetros se generan en base a mediciones en viviendas individuales, y utilizando el método de Monte Carlo se generan series de demanda sintéticas (Gargano, Di Palma, De Marinis, Granata, & Greco, 2016). En la figura 18 se muestra una serie de pulsos medida (a la izquierda), y las series generadas para dicha vivienda por los métodos OP (al centro) y PRP (a la derecha).

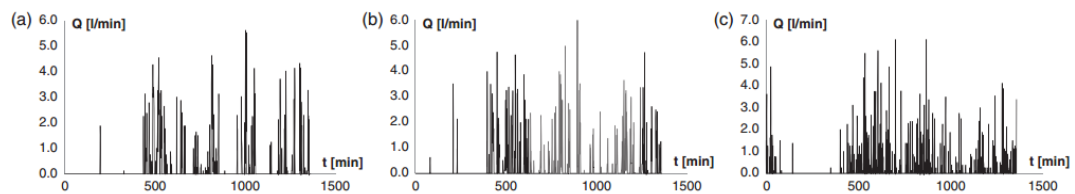


Fig. 18: Comparación entre medición y métodos OP y PRP. Fuente: (Gargano, Di Palma, De Marinis, Granata, & Greco, 2016)

El método se aplicó inicialmente en viviendas individuales, y en un trabajo posterior se validó para grupos de hasta 20 viviendas. El modelo mostró un buen comportamiento (Gargano, Di Palma, De Marinis, Granata, & Greco, 2016) (Di Palma, Gargano, Granata, & Greco, 2016).

4.2.5. Modelo orientado al uso final (SIMDEUM)

El modelo SIMDEUM (*SIMulation of water Demand, and End User Model*) fue propuesto por investigadores holandeses para modelar la demanda en base a información censal de los usuarios respecto al uso del agua, modelando también la demanda como una serie de pulsos rectangulares. Es un método predictivo (calcula la demanda sin necesidad de registro de mediciones), lo que permite su aplicación en redes que no cuentan con medición y en proyectos nuevos (Blokker, Vreeburg, & Van Dijk, 2010).

La información que se requiere tener de los usuarios se tiene que obtener de información de censos anteriores, y realizando encuestas a los usuarios. Se estudia la cantidad de usuarios, sus características y sus hábitos (horarios en de trabajo, escuela, etc.), además de los aparatos sanitarios con los que cuenta la vivienda (Blokker, Vreeburg, & Van Dijk, 2010).

Para estimar la intensidad y la duración de los pulsos de demanda de los aparatos sanitarios, se consideran distribuciones de probabilidad diferentes para cada aparato, cada cual con sus respectivos parámetros. Asimismo, para estimar la probabilidad de ocurrencia de los pulsos de cada aparato, se utiliza la información

sobre los hábitos de los usuarios, y se genera una curva de probabilidad de uso que varía durante el día, como puede apreciarse en la figura 19, que muestra el patrón probabilístico de uso para una persona adulta que trabaja. Se pueden apreciar la probabilidad parcial y acumulada de uso de los aparatos sanitarios, y su relación los hábitos de la persona (Blokker, Vreeburg, & Van Dijk, 2010). Debido a esto, el modelo requiere hasta 99 parámetros (Tzatchkov & Alcocer, 2016).

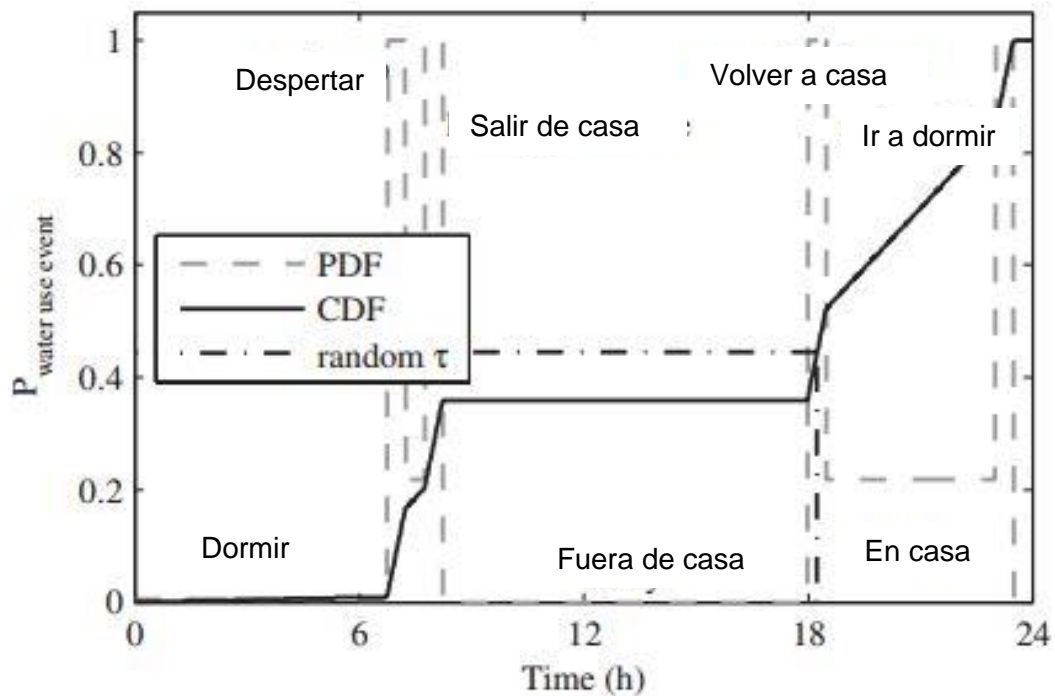


Fig. 19: Ejemplo de un patrón probabilístico de uso para una persona. Fuente: (Blokker, Vreeburg, & Van Dijk, 2010)

Este método tiene una gran ventaja: al estar los parámetros del modelo determinados por los hábitos y a las características de los usuarios y sus aparatos sanitarios, el modelo es altamente transportable, permitiendo su aplicación en cualquier lugar (Blokker, Vreeburg, & Van Dijk, 2010).

El modelo mostró un buen desempeño para modelar la demanda de residencias individuales y para grupos pequeños de usuarios (20 viviendas). Es en este último aspecto en el que muestra un mejor desempeño que los métodos de pulsos convencionales (Creaco, Blokker, & Buchberger, 2017).

Algunos investigadores consideran que, a pesar de ser un modelo muy completo y elegante, en el cual cada parámetro tiene un significado físico, su complejidad hace poco práctica su aplicación (Tzatchkov & Alcocer, 2016) (Gargano, Di Palma, De Marinis, Granata, & Greco, 2016).

4.3. MODELOS ORIENTADOS A MÚLTIPLES USUARIOS

4.3.1. Modelo Mixto (MM)

El Modelo de Distribución Mixta o Modelo Mixto (MM) es un modelo estocástico propuesto como alternativa a los métodos de pulsos tradicionales para mejorar, entre otros aspectos, su escalabilidad. Uno de sus objetivos es su aplicabilidad a grupos importantes de usuarios (Gargano, Tricarico, Buchberger, Del Giudice, & Di Palma, 2014) (Gargano, Tricarico, & Del Giudice, 2016).

Este modelo simplifica algunos aspectos de los modelos de pulsos (PRP, NSRPM) en lo que respecta a la obtención de parámetros y a la agregación de usuarios. Esto se logra estimando los parámetros en base a demandas medidas para grupos de usuarios (Gargano, Tricarico, & Del Giudice, 2016).

El modelo toma como parámetro relevante a la cantidad de usuarios, por lo que se generan directamente, y sin necesidad de procedimientos de agregación, series de demanda para grupos de usuarios (Gargano, Tricarico, Buchberger, Del Giudice, & Di Palma, 2014).

Para este modelo se utilizan dos distribuciones de probabilidad simultáneamente. La primera de ellas se usa para describir la probabilidad de que haya demanda nula, y la segunda para describir la demanda total en el caso en que la demanda es diferente no es nula.

Así, siendo $C_D(t)$ la razón entre el caudal instantáneo y el caudal medio del día en el instante t , su probabilidad acumulada de ocurrencia en un momento dado está definido por (Gargano, Tricarico, & Del Giudice, 2016):

$$F(C_D(t)) = F_0(t) + [1 - F_0(t)] * F^* \quad (4.1)$$

Donde:

$F_0(t)$: Probabilidad de ocurrencia de demanda nula en el momento t .

F^* : Probabilidad de ocurrencia del caudal $C_D(t)$ dado el caso de demanda no nula.

La probabilidad de demanda nula se modela con una distribución de Bernoulli. Se mostró con datos de medición que su valor puede ser representado por la siguiente ecuación para grupos de entre 200 y 1200 usuarios (Gargano, Tricarico, & Del Giudice, 2016):

$$F_0(t) = \exp\left(-5 \frac{N_{us}}{1000} \mu_{C_D}\right) \quad (4.2)$$

Donde:

N_{us} : Número de usuarios considerado.

μ_{C_D} : Es el valor medio cada minuto del valor de C_D .

Para grupos de usuarios menores, se recomienda reemplaza el denominador 1000 por 100 en el exponente (Gargano, Tricarico, Buchberger, Del Giudice, & Di Palma, 2014).

El valor de μ_{C_D} tiene un valor límite para su uso en la ecuación, μ_{C_M} , que está definido por:

$$\mu_{C_M} = -\frac{200}{N_{us}} \ln \left[1 - 0.25 \left(\frac{N_{us}}{1000} \right)^{2.5} \right] \quad (4.3)$$

Para el caudal no nulo, la distribución de probabilidad a usar puede ser la curva normal o log-logística. Los autores usaron esta última por su capacidad de ser integrada analíticamente. En este caso, la función de probabilidad está dada por:

$$F^*[C_D(t)] = \left[\exp \left(-\frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{C_D(t) - \mu_{C_D}(t)}{\sigma_{C_D}(t)} \right) + 1 \right]^{-1} \quad (4.4)$$

σ_{C_D} : Es el la desviación estándar del valor de C_D .

El valor de la desviación estándar puede calcularse con una ecuación empírica en función de su valor medio, utilizando el siguiente valor del coeficiente de variación.

$$CV(t) = 0.1 + \frac{6}{(0.25 \mu_{C_D}(t) N_{us})^{0.75}} \quad (4.5)$$

El modelo estocástico ha sido validado tanto para grupos pequeños como para grupos de hasta 1250 usuarios, mostrando un buen comportamiento en la generación de series sintéticas de demanda (Gargano, Tricarico, & Del Giudice, 2016).

4.3.2. Modelo probabilístico para el cálculo de la demanda pico

Un enfoque probabilístico para estimar la demanda pico fue propuesto por investigadores italianos en lugar el análisis estocástico (Tricarico, De Marinis, Gargano, & Leopardi, 2007) (Gargano, Tricarico, Granata, Sanpietro, & De Marinis, 2017).

Utilizando el análisis de mediciones de demanda para tuberías que suministran a grupos grandes de usuarios, se describe el factor de demanda pico como una variable aleatoria cuyos parámetros dependen principalmente de la cantidad de

usuarios servidos. Como se mencionó en el capítulo anterior, muchos autores han señalado que el fenómeno de la demanda pico es afectado por la cantidad de usuarios, siendo más importante al disminuir la cantidad de usuarios.

Los autores proponen que el fenómeno de pico no se ve afectado por los hábitos de los usuarios, habiendo validado esta hipótesis en tres ciudades (Piedimonte San Germano y Castelfranco en Italia, y Franeker en los Países Bajos) con poblaciones de hábitos distintos (Gargano, Tricarico, Granata, Sanpietro, & De Marinis, 2017). Un trabajo realizado en Australia mostró que la demanda tiene un comportamiento similar al descrito en el modelo (Gato-Trinidad & Gan, 2012).

El parámetro C_p , que es la razón entre el máximo caudal instantáneo (para mediciones cada minuto) y el caudal diario promedio, que suele considerarse un valor fijo en el enfoque tradicional, puede modelarse como una variable aleatoria. El análisis de data experimental para poblaciones entre 239 y 1220 habitantes mostró que puede ajustarse a una distribución de probabilidad log-normal, Gumbel y log-logística. Los autores optaron por la tercera distribución, pues, como se señaló anteriormente, permite la integración analítica (Gargano, Tricarico, Granata, Sanpietro, & De Marinis, 2017).

Siendo así, estimaron la media y el coeficiente de variación de la distribución de probabilidad de C_p :

$$\mu_{C_p} = \frac{10}{N_{us}^{0.2}} \quad (4.6)$$

$$CV_{C_p} = 0.1 + \frac{20}{N_{us}} \quad (4.7)$$

Donde:

N_{us} : Número de usuarios considerado.

Con los valores de estos dos parámetros se puede definir la curva de probabilidad para la demanda máxima, según la distribución que se elija. Así, este enfoque permite estimar el caudal pico para un nivel de confianza definido. En la figura 20 se puede apreciar el valor promedio de C_p (μ_{C_p}), y el valor que asume con diferentes niveles de confianza para una distribución log-logística ($\Pr[S]$ para los niveles de confianza 0.999, 0.99, 0.98 y 0.95). Se muestra también una curva usada tradicionalmente, propuesta por Babbitt con un enfoque determinista.

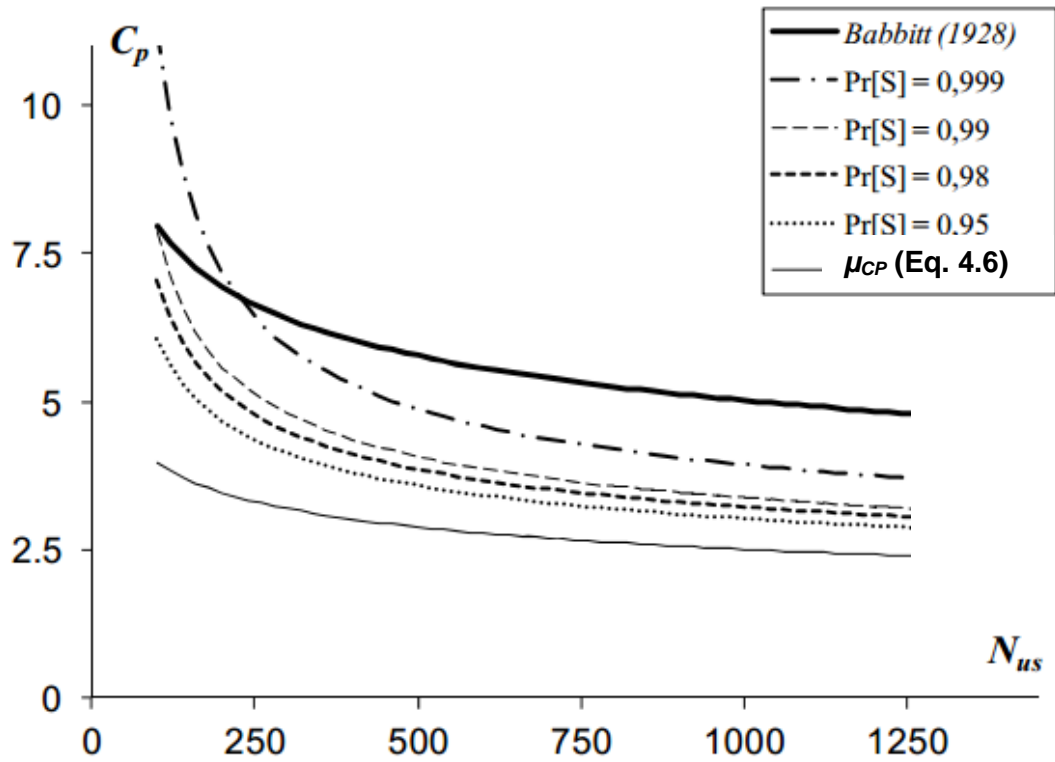


Fig. 20: Curva de probabilidad de C_p para diferentes niveles de confianza. Fuente: (Gargano, Tricarico, Granata, Sanpietro, & De Marinis, 2017)

Las ecuaciones líneas arriba son aplicables para calcular la demanda máxima instantánea (considerando como intervalo de análisis 1 minuto). Este intervalo es, a juicio de los autores, ideal para el modelamiento y diseño de redes de distribución de agua potable, en lugar del intervalo de una hora que se usa tradicionalmente (Tricarico, De Marinis, Gargano, & Leopardi, 2007).

Sin embargo, si se desea estimar los parámetros para intervalos de análisis más amplios, teniendo en cuenta que el valor del caudal pico disminuirá al promediarse los caudales instantáneos, se proponen las siguientes ecuaciones:

$$\mu_{C_p} = k_{\Delta} \frac{10}{N_{us}^{0.2}} \quad (4.8)$$

$$CV_{C_p} = 0.1 + \frac{20}{\beta N_{us}} \quad (4.9)$$

$$k_{\Delta} = 1 + (0.04 \ln(N_{us}) - 0.35) \ln(\Delta t) \quad (4.10)$$

$$\beta = \exp[(\Delta t - 1)^{N_{us}/10^4}] \quad (4.11)$$

Donde k_{Δ} y β son factores de reajuste por agregación temporal, que dependen de Δt , que es el intervalo de medición en minutos (entre 1 y 60 minutos).

4.3.3. Modelo basado en la agregación espacial del PRP

La agregación espacial de pulsos rectangulares PRP fue aplicada para proponer una metodología de estimación de demandas pico para un número arbitrario de usuarios (Zhang, Buchberger, & Van Zyl, 2005).

Usando métodos analíticos, se determinaron fórmulas que permiten calcular el coeficiente de demanda pico en función de los parámetros de los pulsos PRP obtenidos de mediciones. Se consideró que la demanda pico se ajusta a una curva de probabilidad de Gumbel. La fórmula propuesta para el cálculo del coeficiente de demanda pico para un grupo de N pobladores es (Zhang, Buchberger, & Van Zyl, 2005):

$$C_p = \psi \left(1 + \xi_p \sqrt{\frac{1+\theta^2}{\psi N}} \right) \quad (4.12)$$

Donde:

C_p : Coeficiente de demanda pico para un nivel de confianza p .

ψ : Relación entre la máxima cantidad de pulsos diarios y la cantidad promedio.

ξ_p : Percentil p de la distribución acumulada de Gumbel. Puede calcularse de manera analítica como $\xi_p = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} [0.5772 + \ln(\ln[1/p])]$

θ : Coeficiente de variación de los pulsos de demanda interior PRP.

El modelo se aplicó utilizando los datos obtenidos para la localidad Milford (USA) ($\psi = 2.5, \theta = 0.55$), mostrando que el cálculo del factor pico al 99.9% es más conservador que varias fórmulas usuales en el diseño (en el rango de más de 1000 pobladores) (Zhang, Buchberger, & Van Zyl, 2005).

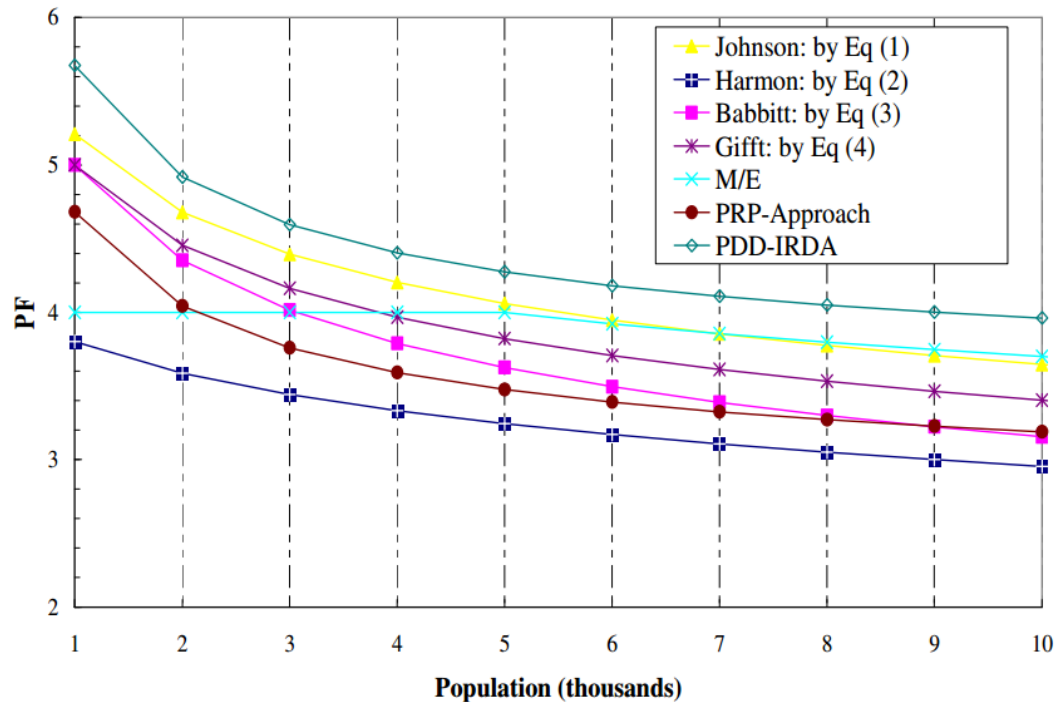


Fig. 21: Valor del factor pico para poblaciones de más de 1000 habitantes. Fuente: (Zhang, Buchberger, & Van Zyl, 2005)

La ventaja de este método es que, debido a que se origina en base a la agregación espacial de pulsos de demanda individuales, puede aplicarse a una cantidad pequeña de usuarios, a diferencia del método descrito en la sección anterior. Una desventaja es que faltaría realizar la validación para poblaciones de gran tamaño.

4.4. CORRELACIÓN ENTRE DEMANDAS NODALES

Cuando se modelan redes de distribución de agua potable utilizando coeficientes de variación deterministas o curvas de variación horaria, es usual asumir que todos los nodos tienen el mismo coeficiente de variación o la misma curva de variación horaria. Si se considera que la demanda en cada nodo es una variable aleatoria, esto sería equivalente a asumir que existe una correlación perfecta entre todos los nodos (Filion, Karney, Moughton, Buchberger, & Adams, 2007).

Es evidente que existe cierto grado de correlación en las demandas nodales en una misma red debido a que la demanda de los usuarios puede verse afectada por diversos factores en común, como clima, hábitos, etc. (Kapelán, Savic, & Walters, 2005).

El grado de correlación a usar en el modelamiento probabilístico de una red es un factor cuya importancia no puede subestimarse. Diversos investigadores establecieron que un incremento en el coeficiente de correlación tienen como consecuencia la desviación estándar de las presiones (Kapelán, Savic, & Walters,

2005). Al existir correlación entre las demandas, es más posible encontrar demandas máximas más altas y menos demandas mínimas, lo que tiende a aumentar la desviación estándar del resultado. Este efecto puede atenuarse con un correcto dimensionamiento del reservorio, cuya función es hacer que el sistema sea menos sensible a las variaciones de presión locales (Filion, Karney, Moughton, Buchberger, & Adams, 2007).

En términos de confiabilidad, un incremento o disminución en el coeficiente de correlación conlleva al consecuente incremento o disminución de los valores de los parámetros utilizados para el diseño, los cuales se determinan en función del nivel de confianza requerido. Dicho de otro modo, para un mismo nivel de confianza, el costo de capital de un sistema de distribución será mayor en un sistema con mayor coeficiente de correlación, debido al incremento de la variabilidad (Tolson, Maier, Simpson, & Lence, 2004) (Filion, Karney, Moughton, Buchberger, & Adams, 2007).

El grado de correlación se ve afectado por la agregación espacial y temporal. Estudios en base al análisis de mediciones han mostrado que tanto el aumento de la escala espacial como la temporal hacen que la media del coeficiente de correlación se incremente. La desviación estándar del coeficiente de correlación, por otro lado, disminuye al aumentar la escala espacial (el valor del coeficiente de variación es menos disperso) y aumenta con la escala temporal (Moughton, Buchberger, Boccelli, Filion, & Karney, 2006).

Una metodología para generar series de demanda para grupos de usuarios considerando la correlación entre las demandas de cada vivienda fue desarrollado por Steven Buchberger y Zhiwei Li. Para ello se basan en la agregación espacial de series de demanda generadas con el modelo PRP (Buchberger & Li, 2008).

El cálculo del coeficiente de correlación para una escala espacial y temporal determinadas deberá hacerse en base análisis de mediciones locales de acuerdo a las necesidades del modelo (Filion, Karney, Moughton, Buchberger, & Adams, 2007). Ha habido relativamente pocos estudios en este tópico a pesar de su importancia (Moughton, Buchberger, Boccelli, Filion, & Karney, 2006). Algunos de los autores consultados realizaron la simulación de los modelos considerando diferentes coeficientes de correlación para tener en cuenta su efecto (Filion, Karney, Moughton, Buchberger, & Adams, 2007). Otros autores utilizaron un valor de 0.5 como representativo (Tolson, Maier, Simpson, & Lence, 2004) (Kapelan, Savic, & Walters, 2005).

4.5. LA TEORÍA DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS EN EL ANÁLISIS DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Debido a que en el análisis de redes se presentan tanto la incertidumbre de naturaleza aleatoria (la cual puede ser tratada con la teoría de la probabilidad), y la incertidumbre de naturaleza epistémica (la cual se puede tratar con la teoría de los conjuntos difusos), ha habido varios trabajos que utilizaron ambos enfoques, ya sea de manera conjunta o por separado.

En el trabajo del 2002 de Revelli y Ridolfi, plantearon por primera vez modelar una red de distribución de agua considerando como variables difusas a las demandas nodales y al coeficiente de rugosidad (Revelli & Ridolfi, 2002). La salida del modelo serían las presiones y los caudales de los componentes de la red, que tendrían que ser números difusos. Esto trajo consigo una dificultad inherente: para calcular los valores extremos de dichos parámetros de salida, es necesario buscar la configuración de la red que conlleve a dichos valores. Esto implica realizar procesos de optimización (búsqueda de mínimos y máximos) para cada nodo de la red. En su trabajo, los autores indican que era necesario mejorar el algoritmo que proponen.

Trabajos posteriores han sido orientados a este fin. Entre ellos se puede mencionar los trabajos de (Spiliotis & Tsakiris, 2012), (Gupta & Bhawe, 2007) y (Moosavian & Lence, 2018). En estos trabajos se proponen enfoques alternativos para reducir el costo computacional del cálculo de los valores difusos de los parámetros de salida de los modelos.

Una aplicación de los conjuntos difusos al diseño de las redes (con orientación a la confiabilidad/desempeño) es el que proponen Fu y Kapelan en su trabajo del 2011. La idea que ellos plantean es usar como una variable aleatoria difusa (*FRV*, *Fuzzy Random Variable* por sus siglas en inglés) para representar al desempeño de la red. Es una variable FRV debido a que se origina como resultado de la combinación de incertidumbre de naturaleza aleatoria y difusa. Las demandas, que son dato de ingreso, se definen como FRV. La presión requerida se define como número difuso, ya que el nivel de satisfacción de los usuarios tiene niveles que varían entre la no satisfacción y la satisfacción. En su modelo, proponen un algoritmo de optimización con dos objetivos, el de minimizar el costo y el de incrementar la confiabilidad. Los autores señalan que la inclusión de la incertidumbre de naturaleza hace que el modelo sea mucho más robusto que modelos presentados por ellos en trabajos anteriores (Fu & Kapelan, 2011).

CAPÍTULO V. MODELO PROPUESTO Y APLICACIÓN

5.1. MODELO DE ANÁLISIS PROPUESTO

Para el presente trabajo de investigación, se propone una metodología para el modelamiento de redes de distribución de agua potable considerando el carácter aleatorio de la demanda con el objetivo de determinar la demanda máxima de diseño de una red. La simulación del modelo se hará utilizando la simulación difusa de Monte Carlo.

Las demandas nodales se modelan como variables aleatorias, considerando para la definición de su función de probabilidad su dependencia de la cantidad de población servida. Asimismo, se define la correlación entre demandas nodales como una variable difusa. De esta manera, se representan en un solo modelo dos tipos diferentes de incertidumbre, contribuyendo así a conformar un modelo de red robusto.

5.1.1. Consideraciones

Los elementos de ingreso (input) del modelo probabilístico son:

- Parámetros de diseño estándar: características geométricas de la red (planta y altimetría), diámetros y coeficientes de rugosidad de las tuberías.
- Demanda: En zonas residenciales, las demandas nodales máximas se modelarán como **variables aleatorias** que siguen una distribución log-normal (la demanda media será estimada utilizando la metodología tradicional, pero su dispersión se calculará considerando las fórmulas expuestas en la sección anterior (4.6 – 4.11), que dependen de la población servida por cada nodo (Gargano, Tricarico, Granata, Sanpietro, & De Marinis, 2017). En sectores no residenciales se utilizarán demandas nodales deterministas, debido a que no se ha encontrado en la bibliografía estudios sobre factores de demanda máxima en dichos sectores.
- Correlación en demandas nodales: La única **variable difusa** a considerar es la correlación entre demandas nodales. Se consideró, por defecto, dicha variable como un número difuso $A = [0,0.5,1]$ (figura 22). Ello se hace considerando que existe correlación positiva, y teniendo que el valor 0.5 fue considerado en investigaciones anteriores debido a que representa un valor intermedio (Tolson, Maier, Simpson, & Lence, 2004). El programa permite el uso de cualquier número difuso trapezoidal para el análisis.

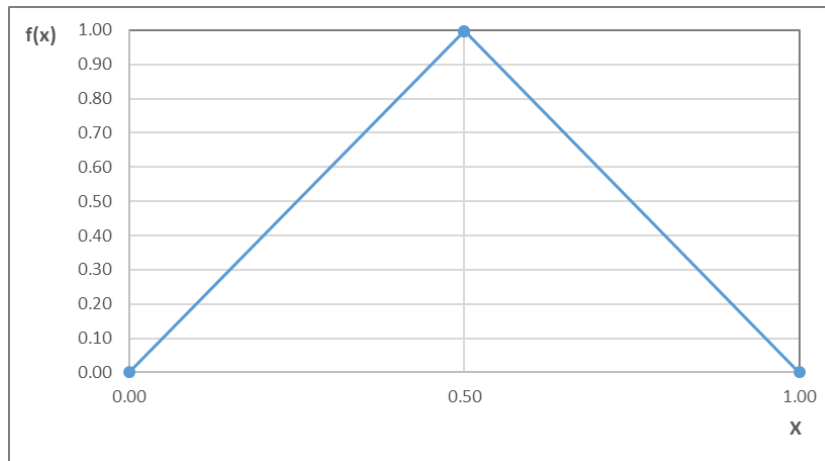


Fig. 22: Número difuso considerado para incluir el efecto de la correlación. Fuente: Elaboración propia.

La metodología para resolver el modelo será la siguiente:

- Se definen y modelan las principales características de la red (longitud de tuberías, rugosidades, demandas, bombas, reservorios, etc.) en el programa EPANET (ver sección 2.1.5). Se exporta el modelo de la red en un archivo para ser usado con el software de análisis presentado.
- Para el análisis hidráulico, se usa el motor de análisis EPANET en un algoritmo en Python. Con este algoritmo se hace la simulación hidráulica de la red en cada iteración.
- El cálculo de la pérdida se realiza con la fórmula de Hazen-Williams. La fórmula de Darcy-Weisbach también puede usarse, pero requiere iteraciones adicionales.
- El análisis será del tipo DDA (*Demand Driven Analysis* por sus siglas en inglés, Análisis Determinado por la Demanda). Ver sección 2.1.3.4.
- Algoritmo para simulación: Se aplica la Simulación Difusa de Monte Carlo. Debido a que se considera que las demandas nodales tienen cierto grado de correlación, se utilizará el generador multivariable normal de la librería numpy utilizando una matriz de correlación, para luego generar serie de demandas correlacionadas con distribución log normal.
- Método de reducción de varianza: Muestreo antitético. Este método se usa para reducir el error durante la simulación de Monte Carlo.

Los elementos de salida del modelo (output) serán:

- Caudales y velocidades en todas las tuberías; presiones en todos los nodos. En el programa se especifican cuáles son las tuberías y nodos a analizar.

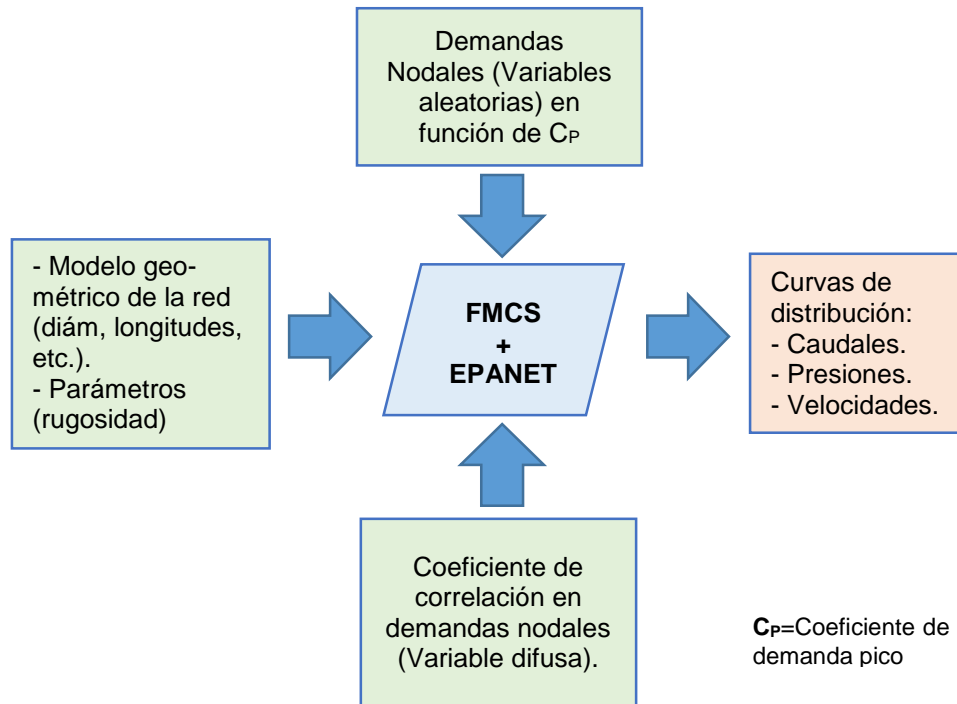


Fig. 23: Esquema de modelo FMCS para redes de distribución de agua. Fuente: Elaboración propia.

5.1.2. Reajuste de fórmulas para poblaciones pequeñas

Las fórmulas propuestas por Gargano y otros en su trabajo del 2017 fue validada para un rango de población entre 200 y 1250 personas. Sin embargo, si se aplican sin corrección alguna a poblaciones pequeñas, los resultados pueden ser incoherentes.

Para poder superar este inconveniente, se propone reajustar los coeficientes de las fórmulas con las cuales se calcula la media y la desviación estándar del factor de pico.

Las fórmulas originales fueron descritas en la sección 4.3.2. Para el proceso de reajuste, los valores de los coeficientes se reemplazaron por las variables w , x , y y z (en la fórmula original estos parámetros toman los valores de 10, 0.2, 0.1 y 20 respectivamente), de la siguiente manera:

$$\mu_{C_p} = \frac{w}{N_{us}^x} \quad (5.1)$$

$$CV_{C_p} = y + \frac{z}{z_{us}} \quad (5.2)$$

Para hacer dicho reajuste, es importante contar con data de medición de campo (nodos con poblaciones pequeñas), debido a que estas fórmulas son empíricas. En el presente trabajo, a modo de ilustración, se hará la consideración que las curvas de factor pico vs población tienen la misma forma que las que se obtienen

al aplicar la fórmula propuesta por Zhang (2005). Con fines de comparación, se utilizaron los parámetros de los pulsos medidos en la localidad de Milford, los cuales fueron usados por el autor del modelo. Los coeficientes pico con la fórmula de Gargano se hicieron utilizando la distribución log normal, que es la que se usará en la simulación de Monte Carlo. Se calcularon las curvas del factor pico para probabilidades de no excedencia de 80%, 90% y 95% para grupos de entre 10 y 1000 personas.

Como puede apreciarse en el rango de 50 a 1000 pobladores, la forma de las curvas tiene cierta similitud. Sin embargo, para una cantidad de pobladores menor que 50, y especialmente en el caso de las curvas de probabilidad 80% y el 90%, las curvas calculadas con las fórmulas de Gargano presentan errores importantes. Asimismo, para valores cercanos a 10, la fórmula de Gargano muestra un valor mucho más alto que la obtenida por Zhang. Obviamente esto se debe a que estas fórmulas no fueron diseñadas para este rango.

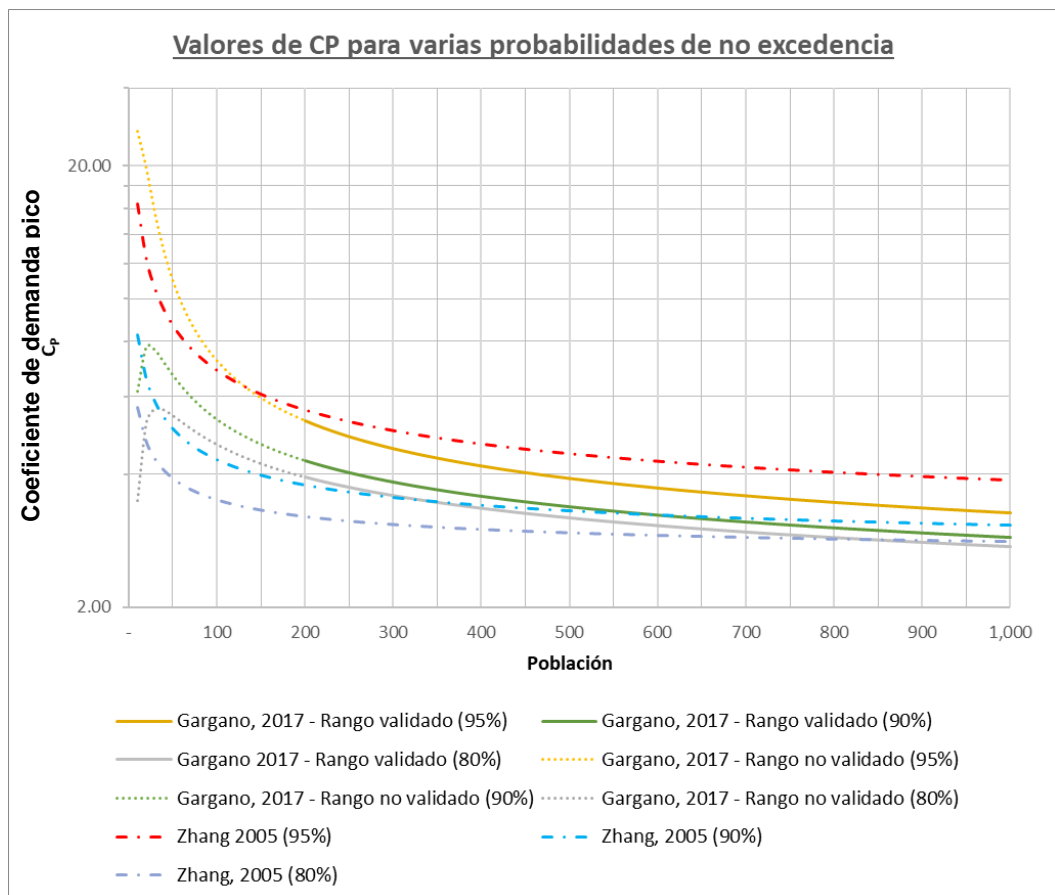


Fig. 24: Comparativa de curvas de factor pico para poblaciones entre 10 y 1000 habitantes.

Fuente: Elaboración propia.

El reajuste de los 4 factores se realizó utilizando una metodología de optimización basada en el método de los momentos. Se calcula el error relativo de una serie de

parámetros a considerar, y se buscar una combinación de parámetros w , x , y y z que minimicen la función de error. Esta función de error total se describirá como:

$$E(w, x, y, z) = \sum_{i=1}^N [P_i \sum_{j=1}^M (\frac{F_{ij}}{G_{ij}} - 1)^2] \quad (5.3)$$

Donde:

N : es la cantidad total de componentes de la función de error.

P_i : es el peso asignado a cada componente.

M : es la cantidad de sumandos de cada componente.

F_{ij} : es el valor del parámetro a incluir en la función de error calculado con los valores de w , x , y y z propuestos.

G_{ij} : es el valor del parámetro a incluir en la función de error calculado con las fórmulas ya definidas.

$(\frac{F_{ij}}{G_{ij}} - 1)^2$: representa el valor del error cuadrático relativo para un parámetro cualquiera.

En este caso, la función de error se definió con 9 componentes, los cuales son la suma de los factores considerados según se indica a continuación:

1. Suma de los errores relativos en las medias de C_p para la fórmula de Gargano y la fórmula con los parámetros reajustados, en el rango de 150 a 250 pobladores. Se considera que en este rango ambas fórmulas deben tener un valor similar. Peso=1.
2. Similar al anterior, para el coeficiente de variación de C_p . Peso=1.
3. Suma de los errores relativos en el valor de C_p para una probabilidad de no excedencia del 80% entre la fórmula de Zhang y la fórmula con los parámetros reajustados en el rango de 10 a 250 pobladores. Se considera que en este rango ambas fórmulas deben tener un comportamiento similar. Peso=1.
4. Similar al anterior, para el porcentaje de no excedencia del 90%. Peso=1.
5. Similar al anterior, para el porcentaje de no excedencia del 95%. Peso=1.
6. Error cuadrático relativo en el valor medio de C_p entre las fórmulas de Gargano y la fórmula con los parámetros modificados para 200 pobladores. Se añadió esta restricción para que en la frontera entre ambas curvas el error sea el menor posible. Peso=3.

7. Similar al anterior, para el coeficiente de variación de C_p . Peso=3.
8. Error cuadrático relativo en el valor medio de C_p entre las fórmulas de Zhang y la fórmula con los parámetros modificados para 10 pobladores. Se añadió esta restricción para que en la frontera inferior entre ambas curvas el error sea el menor posible. Peso=1.
9. Similar al anterior, para el coeficiente de variación de C_p . Peso=1.

Utilizando la función Solver de Excel, se dio solución al problema de optimización.

Los parámetros para la curva entre 10 y 200 habitantes han sido calculados como:

$$w = 8.007$$

$$x = 0.163$$

$$y = 0.167$$

$$z = 6.479$$

Las fórmulas modificadas serían:

$$\mu_{C_p} = \frac{8.007}{N_{us}^{0.163}} \quad (5.4)$$

$$CV_{C_p} = 0.167 + \frac{6.479}{N_{us}} \quad (5.5)$$

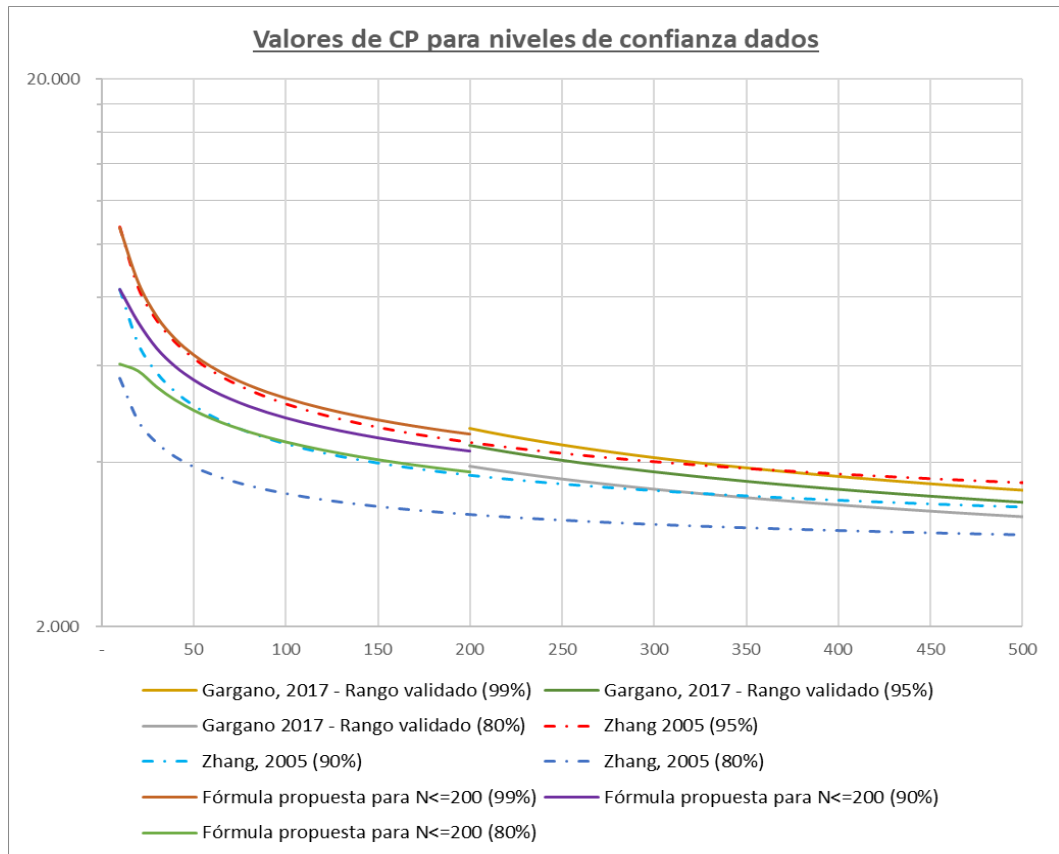


Fig. 25: Curvas de factor reajustadas para poblaciones pequeñas. Fuente: Elaboración propia.

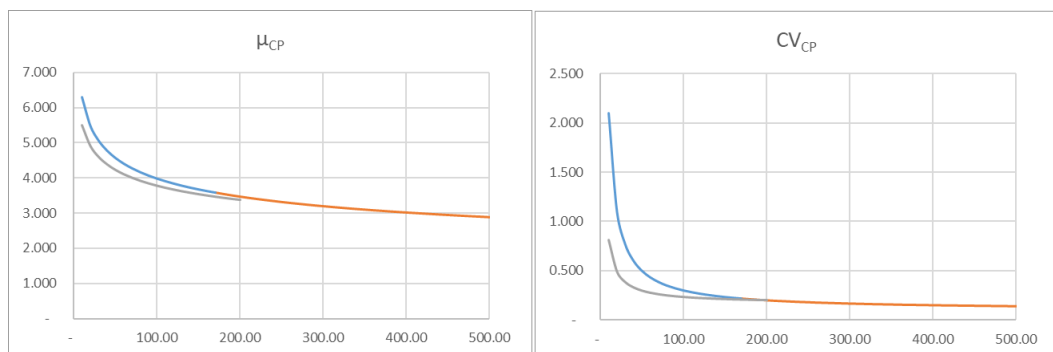


Fig. 26: Valores de la media y el coeficiente de variación de C_P reajustados. Fuente: Elaboración propia.

Se observó una anomalía que ocurre con los valores de población menor a 100, que hacen se forme un punto de inflexión. Esto se corregirá durante la simulación de Monte Carlo al momento de calcular el valor de la media del logaritmo de la variable, considerando como su valor el máximo entre su la fórmula y el inmediato superior desde 100 hasta 10 pobladores.

Se ha revisado también el comportamiento de los factores de corrección por agregación temporal para menos de 200 usuarios. En este caso, debido a que no se cuenta información en la bibliografía, sólo se revisará que la curva tenga un comportamiento monótono, y que no tome valores incoherentes.

El factor de ajuste por agregación temporal k_{Δ} (ver sección 4.3.2) muestra un comportamiento incoherente especialmente para menos de 100 pobladores, llegando a tomar un valor negativo. Para corregir esto de manera sencilla, y debido a que el logaritmo de la curva muestra un comportamiento lineal, se realizó un ajuste logarítmico, obteniéndose que, para grupos de menos de 200 personas, el valor de k_{Δ} puede estimarse como:

$$k_{\Delta 60} = 0.3154e^{\frac{1.61}{1000}N_{us}} \quad (5.6)$$

Este coeficiente aplica sólo para agregación temporal a 60 minutos, que es la que se usará en el modelo. Para otras escalas de agregación será necesario revisar dicha fórmula.

El factor de ajuste β muestra un buen comportamiento, por lo que no se consideró su modificación, manteniéndose de la siguiente forma:

$$\beta = \exp[(\Delta t - 1)N_{us}/10^4] \quad (5.7)$$

Aplicando estos dos factores de corrección en las fórmulas 5.4 y 5.5, el cálculo de la media y el coeficiente de variación del coeficiente de demanda pico para nodos con menos de 200 usuarios y con una agregación temporal de 1 hora, se realizaría de esta manera:

$$\mu_{C_p} = k_{\Delta 60} \times \frac{8.007}{N_{us}^{0.163}} \quad (5.8)$$

$$CV_{C_p} = 0.167 + \frac{6.749}{\beta N_{us}} \quad (5.9)$$

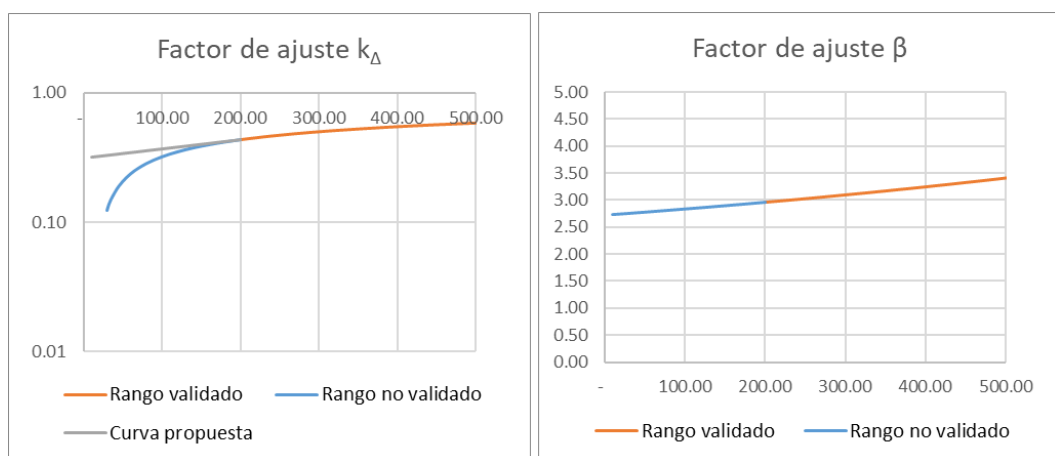


Fig. 27: Coeficientes de reajuste por agregación temporal para 60 minutos. Fuente: Elaboración propia.

5.1.3. Plataforma de desarrollo

Para realizar los análisis hidráulicos de la red, se utilizó el motor de análisis de EPANET (ver sección 2.1.5), mediante la librería de análisis *epanettools*. Este paquete, desarrollado originalmente para C++ (*EPANET Programmer's Toolkit*), cuenta con una versión para Python denominada *epanettools*, desarrollada por el Dr. Assela Pathirana, investigador del Instituto para Educación en Agua de Delft (IHE Delft por sus siglas en inglés). Se utilizó el paquete en su versión 0.9.2 (The Python Software Foundation, 2018).

Debido a problemas de compatibilidad con las versiones actuales del compilador de C++ para Windows, se utilizó el sistema operativo Ubuntu 16.04 (basado en el núcleo Linux) para el desarrollo. Este sistema operativo trae por defecto compiladores de Python (versión 3.5.2) y GCC (versión 5.4.0) que permiten utilizar la librería *epanettools* sin problema alguno.

Se utilizaron además librerías como *numpy* para la simulación numérica, *pandas* para el almacenamiento y análisis de los resultados, entre otros.

5.1.4. Archivos y datos de ingreso

El programa utiliza dos archivos de ingreso, que deben estar en la misma carpeta que la rutina en Python:

- El modelo de la red en formato *.inp. Este archivo se genera al exportar una red desde EPANET o WaterCAD, y contiene información sobre los distintos componentes y parámetros de la red (incluyendo las demandas nodales, los patrones de demanda, las unidades y también la fórmula para el cálculo de las pérdidas de cota piezométricas). Se usa para guardar redes completas. El nombre del archivo a ser cargado debe ser '*modelo_red.inp*', y debe encontrarse en la carpeta llamada '*input*' ubicada en la misma ruta del programa.
- Un archivo en formato *.csv conteniendo los parámetros de la demanda para su modelamiento probabilístico. En la primera columna tiene que incluirse los nombres de los nodos (ID), en la segunda columna el valor medio de la demanda, y en la tercera columna debe indicarse su desviación estándar. Los ID de los nodos deben estar de acuerdo al modelamiento en EPANET o WaterCAD. El nombre del archivo debe ser '*db_resultados.csv*' y se encontrará en la ruta '*output*'.

Para generar el segundo archivo, tiene que partirse del análisis de demanda nodal. Al tener la demanda media según norma y/o datos de medición anual promedio

de la EPS, y al determinarse, de la distribución de la red, la cantidad de usuarios servidos por cada nodo, puede generarse la desviación estándar utilizando las fórmulas descritas en la sección 5.1.2. Si esto se hace en una hoja de cálculo de Excel, se deben exportar las 3 columnas indicadas en un archivo con formato *.csv para su uso en el programa.

Además de estos dos archivos, en el modelo debe definirse el coeficiente de correlación difuso. Para ello, se creó una clase que permite analizar números difusos trapezoidales (definidos por los valores de las ordenadas de sus 4 vértices), siendo los números triangulares un caso especial de este tipo.

5.1.5. Módulo de análisis

El programa desarrollado se compone de dos módulos:

- *water-fmcs.py*: Es el programa principal. En líneas generales, el programa realiza los siguientes pasos secuencialmente:
 - o Importar librerías.
 - o Definir clases y funciones. Se creó una clase para manejar números difusos, que permite, entre otras operaciones, los α -cortes.
 - o Especificar las variables definidas por el usuario, como la cantidad de simulaciones, la correlación difusa, los niveles de confianza de diseño, etc.
 - o Leer el archivo de modelo de la red.
 - o Leer el archivo de demanda
 - o Realizar el proceso de simulación. En cada etapa de la simulación se almacenan progresivamente los resultados en la base de datos.
 - o Graficar la familia de curvas de probabilidad y posibilidad para los nodos indicados. Asimismo, analiza la precisión de la simulación para dicho nodo.
- *plotter.py*: Luego de generada la base de datos con los resultados, este módulo puede utilizarse para generar la familia de curvas para cualquier nodo analizado. Asimismo, realiza el análisis de precisión.

En la figura 28 se presenta el diagrama de flujo del algoritmo de solución, y en el Anexo I se presenta el código fuente escrito en Python 3.5.2.

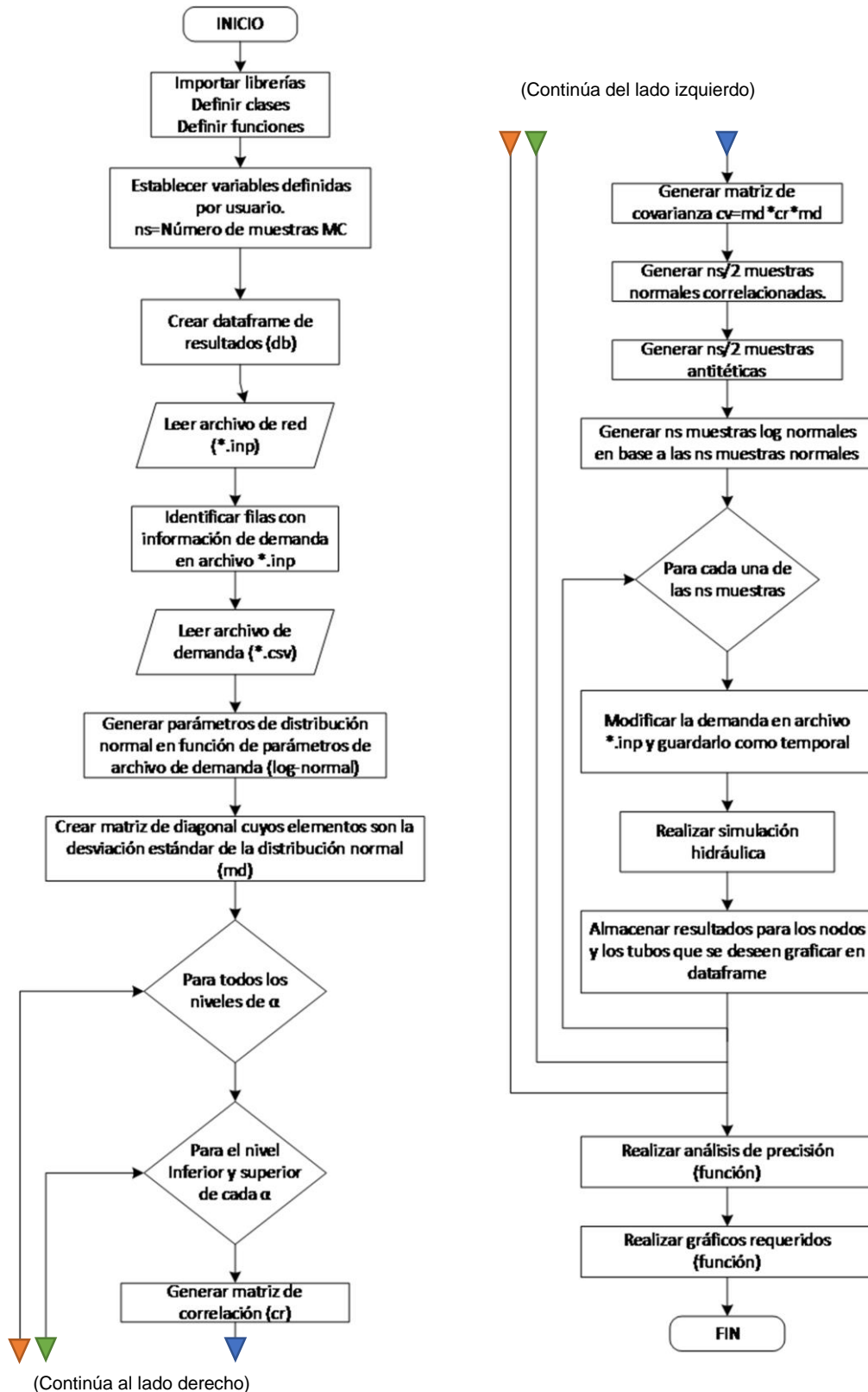


Fig. 28: Algoritmo de solución del modelo FMCS. Fuente: Elaboración propia

5.1.6. Salida del programa

El principal archivo de salida del programa es una tabla de datos (*dataframe*) como resultado de la simulación en forma de un archivo *.csv. Esta tabla es generada utilizando el formato de la librería Pandas.

El archivo almacena la información de cada evento de la simulación en una fila. Las columnas de información que se almacenan son:

- ID: Nombre del nodo o tubería.
- Elem: Tipo de elemento (puede ser “Nod” en el caso de nodos, y “Tub” en el caso de tuberías).
- Alpha: Valor del nivel de membresía. Puede tomar un valor entre 0 y 1.
- Niv: Debido a que cada α -corte tiene dos un valor inferior y un valor superior, en este campo se almacena “Inf” si se trata del nivel inferior, y “Sup” en el otro caso.
- Param: Toma los valores de “P”, “Q” o “V” en si el resultado almacenado en dicha fila es la presión (m), el caudal (l/s) o la velocidad (m/s).
- NS: Indica el número de orden del conjunto de variables aleatorias dentro del conjunto total de muestras generadas. Si se tratase de una simulación de Monte Carlo estándar, sería equivalente al número de experimento.
- Val: Almacena el valor numérico del parámetro.

Con esta información pueden generarse gráficos de diferentes formas según lo que se dese representar. Un gráfico que se considera especialmente útil para el diseño serían las curvas de probabilidad/posibilidad de excedencia. En la figura 29, por ejemplo, se aprecia la familia de curvas para los caudales en el tubo P-119 en el modelo en base a 1000 grupos de muestras aleatorias.

Cada nivel de posibilidad de excedencia, tiene dos curvas de probabilidad asociadas, una al nivel superior y otra al nivel superior. Por ejemplo, si se toma el valor de α igual a 0.1 en el número difuso que representa la correlación, se obtienen dos intervalos en el α -corte, 0.05 y 0.95. Para cada ambos valores se genera una curva de probabilidad de excedencia con los datos generados en la simulación.

La aplicación práctica para el diseño puede mostrarse en la interpretación del gráfico. Por ejemplo, para una *probabilidad* de excedencia del 5%, y considerando una *posibilidad* de excedencia del 10%, el valor del caudal para el tubo P-119 estaría entre 2.10 y 2.50 (ver puntos de intersección entre la línea verde horizontal y las curvas en ambos extremos).

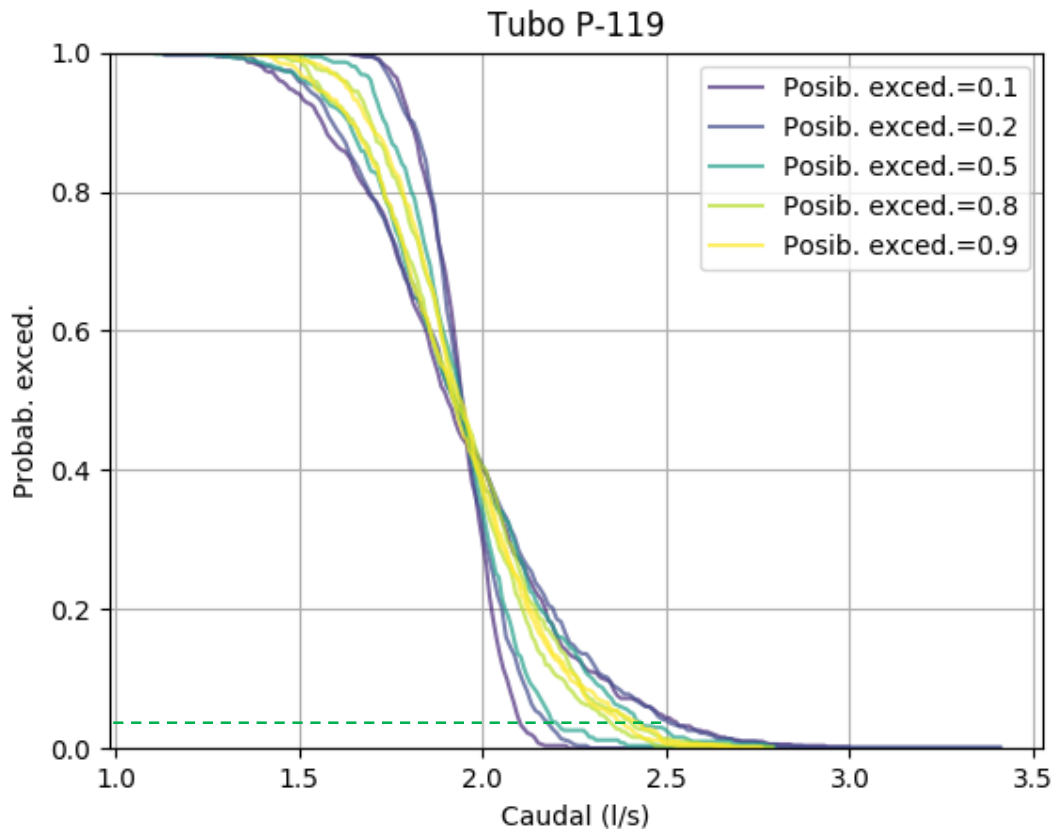


Fig. 29: Curvas de probabilidad/posibilidad en salida de modelo. Fuente: Elaboración propia

5.1.7. Análisis de precisión

El método de análisis propuesto se basa en una simulación de Monte Carlo. Su precisión, por tanto, dependerá de la cantidad de muestras aleatorias que se tomen en su ejecución, siendo mayor la precisión de resultado al incrementarse la cantidad de muestras.

En el caso de la simulación difusa de Monte Carlo, los resultados entre muestras muestran un grado de autocorrelación debido a que se hace la simulación con cada grupo de variables aleatorias para cada nivel de α en un orden determinado y de manera cíclica. Es por ello que se usará el método de lotes, según lo descrito en la sección 2.4.4.2, tomando la media de grupos de $k = 50$ resultados, tomando para ello grupos de 5 muestras de variables aleatorias cada una de ellas evaluada con 5 niveles de α , con sus valores inferior y superior.

Sean $[x_1, x_2, \dots, x_n]$ los resultados de un parámetro medible (caudal, presión o velocidad) para un nodo i . Además, considerando que $n = ck$ donde k es la cantidad de muestras, se define la función de error relativo como:

$$E[c] = \frac{\sigma_c}{\mu_c} \quad (5.10)$$

Donde μ_c y σ_c son la media y la desviación estándar de las c medias agrupadas respectivamente.

5.2. APLICACIÓN

5.2.1. Descripción general del proyecto

Para la aplicación del modelo, se eligió el proyecto “Ampliación y Mejoramiento de los Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado del Esquema Pucusana”, cuyo Expediente Técnico se encuentra publicado en la página web de SEDAPAL. Se encontraron en el Anexo V del Expediente los cálculos hidráulicos y el análisis de demanda (SEDAPAL, 2016).

El proyecto se encuentra ubicado en el distrito de Pucusana, en el departamento y la provincia de Lima. Los límites del sector son: por el Norte, con el distrito de Santa María del Mar, por el Sur y el Este con el distrito de Cañete, por el Oeste con el Océano Pacífico. La altitud de la zona oscila entre los 0 y 60 m.s.n.m. La vía de acceso al sitio desde Lima es por la Panamericana Sur, a la altura del Km 60.

El total de pobladores fue de 21,253 en la fecha del estudio. El área del proyecto se divide en dos Zonas separadas entre sí, Zona A (al oeste, adyacente al océano pacífico) y Zona B (al este, junto a la Panamericana Sur). En la figura 29 se muestran las Zonas, y en los polígonos de color verde y rojo se aprecian las habilitaciones urbanas que conforman en las respectivas zonas. En la tabla 2 se presentan detalles sobre la población.

Tabla 2: Datos demográficos de población del distrito de Pucusana. Fuente: (Consortio Saneamiento Lima Sur, 2016)

DATO	CANTIDAD
Población total afecta por proyecto	21,253
Nº de viviendas afectadas por proyecto	4,437 und.
Cantidad de habilitaciones urbanas	20 (divididos en 2 zonas, A y B)
Densidad poblacional	4.79 hab./viv.

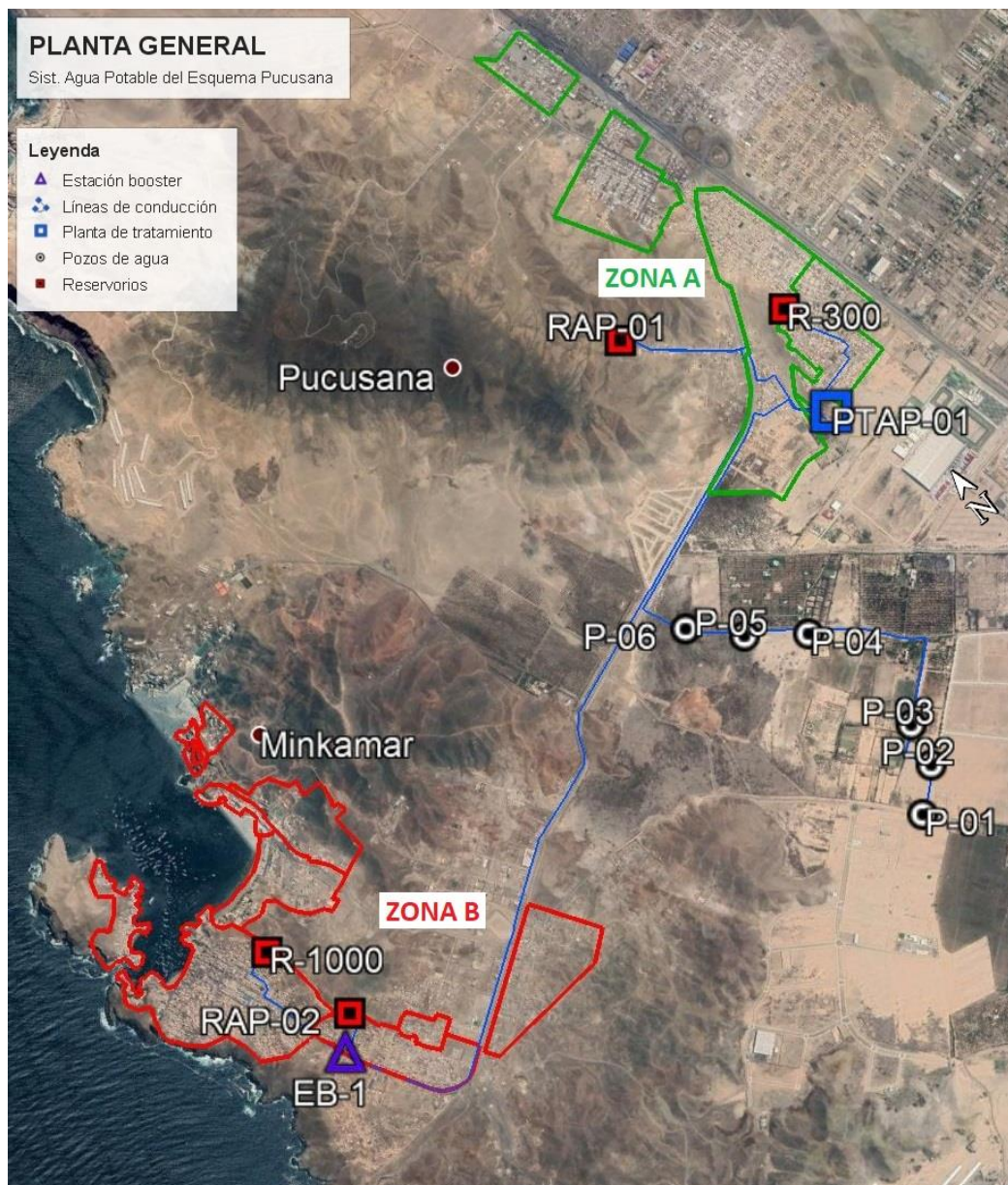


Fig. 30: Planta general del proyecto. Fuente: (Consortio Saneamiento Lima Sur, 2016)

El proyecto tiene por objetivo mejorar el sistema de abastecimiento de agua potable del lugar. Para ello se plantea un sistema de abastecimiento cuya fuente serán 6 pozos tubulares de 80 m de profundidad (desde el pozo P-01 al pozo P-06, como se aprecia en la figura 29), cuya capacidad conjunta es de 180 l/s. Este sistema de pozos se conectará a una Planta de Tratamiento de Agua Potable proyectada, PTAP-01. Asimismo, se plantea la construcción de los reservorios RAP-01 (1200 m³) y RAP-02 (600 m³), y el mejoramiento de los reservorios existentes R-300 (300 m³) y R-1000 (1000 m³). Se considera también una estación booster EB-01 para bombear el agua hasta el reservorio RAP-2. En total serán 10 zonas de presión abastecidas por estos 4 reservorios. En la figura 30 se

aprecia el esquema hidráulico del proyecto. Como se muestra, las líneas de impulsión serán de hierro dúctil y HDPE. Las redes de distribución, por otro lado, serán de PVC y Hierro dúctil.

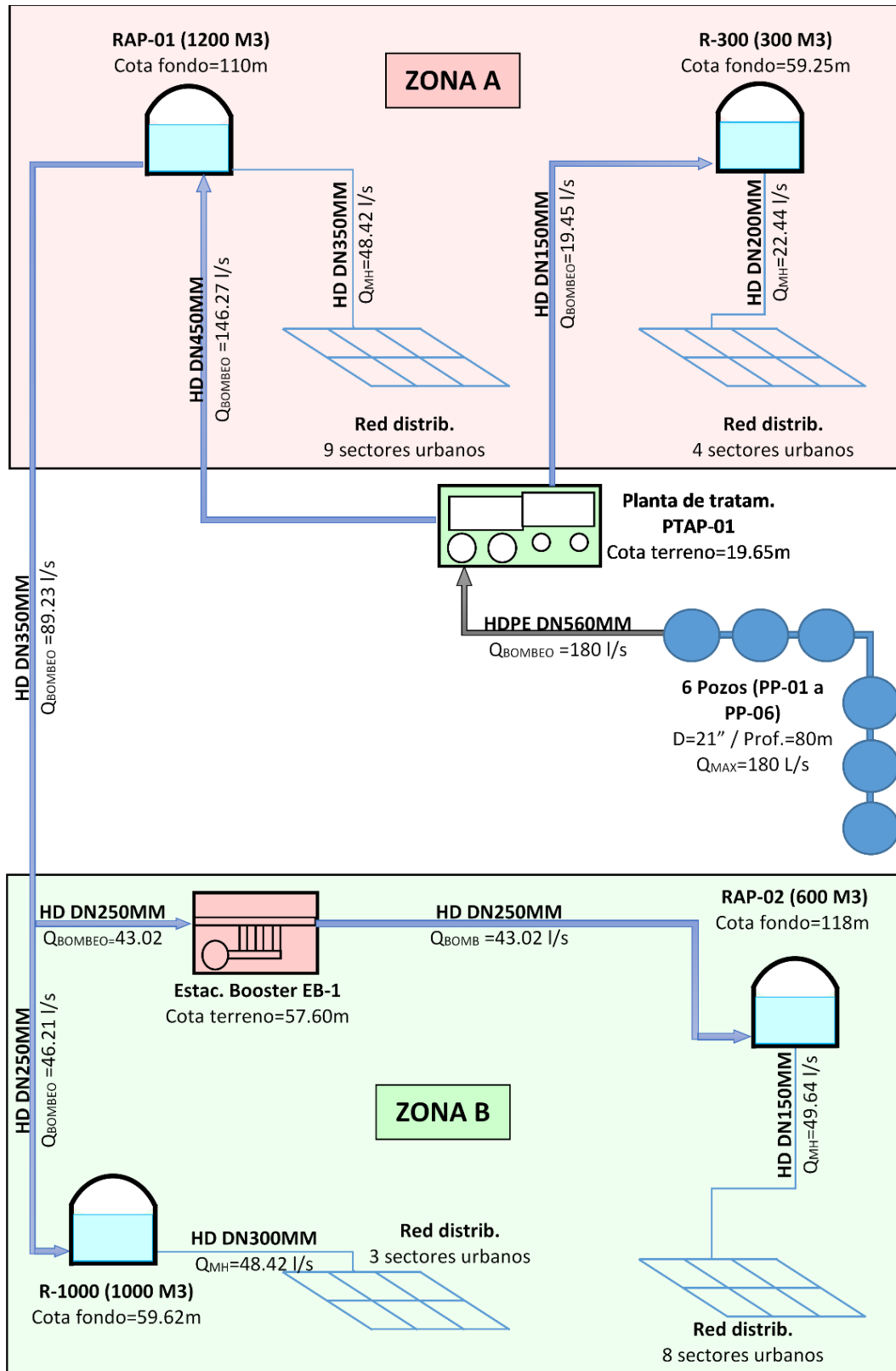


Fig. 31 Esquema hidráulico del proyecto. Fuente: Elaboración propia

5.2.2. Fuentes de agua

Como se mencionó en la sección anterior, el sistema tendrá un abastecimiento de agua subterránea, cuyo origen es el acuífero conformado por el material fluvioaluvial del valle inferior del río Chilca.

Para el estudio de los estratos que conforman el terreno, se realizó una serie de ensayos geoelectrónicos, determinándose que existen 4 estratos superficiales por encima del estrato rocoso. El tercer y el cuarto estrato conformarían el acuífero, teniendo un espesor conjunto que oscila entre 20 y 60 m para el tercer estrato, y entre 20 y 123 m para el cuarto estrato.

Asimismo, se realizaron ensayos de bombeo realizados en pozos aledaños existentes. Se estimó que el coeficiente de permeabilidad del acuífero varía entre 0.13 y 8×10^{-4} m/s, mientras que su coeficiente de transmisividad oscila entre 1.1 y 3.2×10^{-2} m²/s.

Considerando un caudal de 30 l/s por pozo (considerando que los pozos existentes tienen un caudal de explotación que oscila entre 5 y 65 l/s), y considerando también un bombeo diario de 18 horas continuas, el radio de influencia será de 123 m. Los pozos se ubicaron considerando una distancia mínima entre pozos adyacentes de 250 m.

Las características de los pozos son:

- Número de pozos : 6
- Profundidad del pozo : 80 m
- Nivel de agua aproximada : 12 - 16 m
- Diámetro de perforación : 21"
- Diámetro de entubado : 15"
- Longitud del filtro \varnothing 15" : 25 m
- Tipo de tubería : Acero inoxidable
- Espesor de tubería : e=4 mm
- Espesor del empaque de grava : 3"
- Radio de Influencia : 123 m

5.2.3. Calidad del agua

Los ensayos realizados a muestras de agua en pozos existentes aledaños al proyecto muestran que el agua presenta un exceso de salinidad. El agua se clasifica según sus parámetros como *clorurada sódica*.

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos químicos. Como puede apreciarse, el agua obtenida presenta parámetros superiores a los valores límite para considerarse potable en todos los parámetros con excepción del pH, siendo clasificada como agua no apta para el consumo humano.

Tabla 3: Resultados de ensayos de calidad del agua. (Consorcio Saneamiento Lima Sur, 2016)

Parámetro	Valor límite SUNASS	Valor obtenido
Cloruros	250 mg/l	2,963 – 4,953 mg/l
Sulfatos	250 mg/l	980-1,370 mg/l
Nitratos	50 mg/l	29.86 – 199.86 mg/l
Magnesio	0.3 mg/l	465 – 883 mg/l
pH	6.5 – 8.5	7.3 – 7.5
Dureza	500 ppm	1,880 – 3,700 ppm
Turbidez (UNT)	5	15-224
Hierro	0.3 mg/l	0.97 – 68.99 ml/g

Donde UNT es la Unidad Nefelométrica de Turbidez.

Para potabilizar el agua, el proyecto consideró la construcción de la planta de tratamiento PTAP-01, que considera filtros de zeolita, filtros de cartucho y ósmosis inversa

5.2.4. Población y periodo óptimo de diseño

En base a los 4 censos poblacionales que se muestran en la Tabla 4, se realizaron 3 curvas para estimar el crecimiento poblacional: aritmético, geométrico y parabólico. Estas curvas se realizaron en base a la interpolación de las tasas de crecimiento intercensales. Como puede apreciarse en la figura 31, las 3 curvas muestran un comportamiento similar. Se eligió para la proyección de crecimiento de la población la curva geométrica, cuya tasa de crecimiento equivalente es del 4.13%.

Tabla 4: Información censal de población del distrito de Pucusana. Fuente: (Consorcio Saneamiento Lima Sur, 2016)

Año de censo	Población (hab.)
1972	2,935
1981	3,788
1993	4,233
2007	10,633

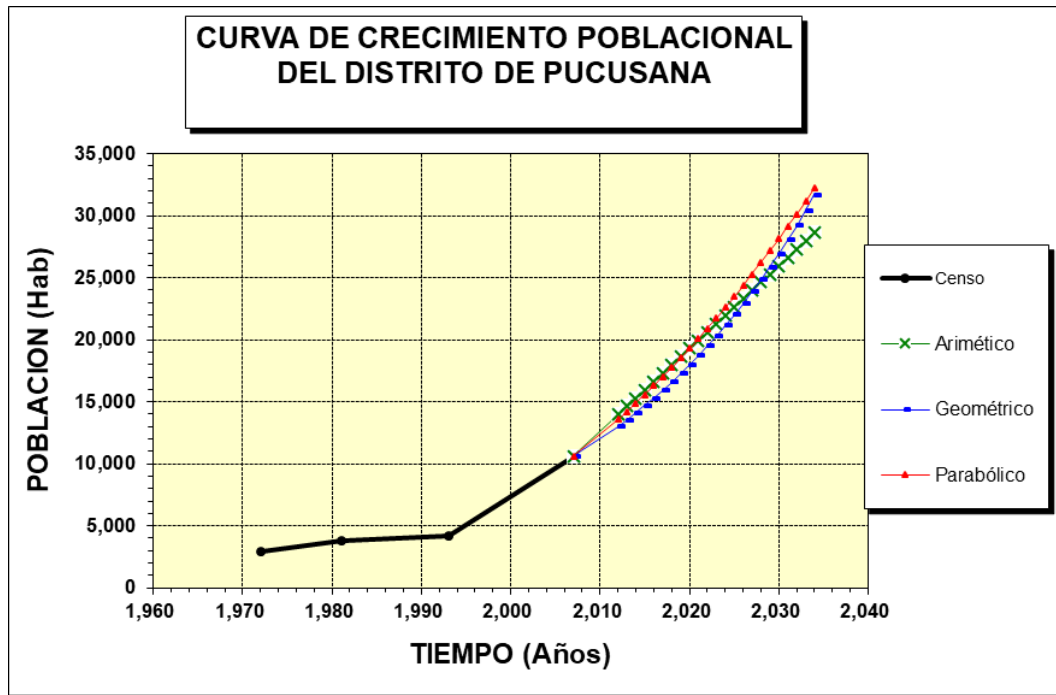


Fig. 32: Curvas de crecimiento poblacional. Fuente: (Consortio Saneamiento Lima Sur, 2016)

Para la estimación del periodo de diseño de la red de distribución se utilizó un factor de economía de escala estimado en 0.50, y una tasa de interés del 9%, que es equivalente a la Tasa Social de Descuento. Se estimó el periodo de déficit en 19.3 años interpolando la data de la proyección de crecimiento de demanda. Aplicando las ecuaciones 2.5 y 2.6, según recomendaciones del Ministerio de Economía y Finanzas, se obtiene que el periodo de retorno considerando déficit inicial es de 18.2 años. Se utilizó para los cálculos un periodo de retorno de 20 años.

5.2.5. Parámetros de demanda

Los consumos promedio obtenidos del expediente técnico se muestran en la Tabla 5. Estos datos fueron obtenidos por la empresa proyectista del Estudio de Pre-Inversión, y validados con datos de mediciones mensuales obtenidos de la Entidad Prestadora de Servicio local.

Tabla 5: Consumo promedio de agua. (Consortio Saneamiento Lima Sur, 2016)

Tipo de usuario	Cons. prom. mens. (m3/mes/conex.)
Doméstico	17.28
Comercial	29.96
Industrial	27.00
Social	84.88
Estatad	41.64

Para la estimación de la demanda máxima, en el proyecto se consideraron los siguientes valores de demanda máxima:

- Factor para el caudal máximo diario (K1) : 1.3
- Factor para el caudal máximo horario (K2) : 2.0

Estos factores fueron usados en el expediente para todos los tipos de usuario de la red. En el expediente se pudo apreciar que el principal tipo de consumidor es el doméstico.

En el expediente no se utilizaron patrones de demanda en el modelamiento.

5.2.6. Datos para el cálculo hidráulico

Considerando el área de influencia de los reservorios, el sistema de distribución se puede dividir en 4 redes, según el reservorio que suministra cada red (reservorios R-300 y RAP-01 en la Zona A, y reservorios RAP-02 y R-1000 en la Zona B). Para efectos de la aplicación del modelo presente, se analizará la sub red abastecida por el reservorio RAP-02. En la figura 33 se presenta una vista general de la red.

La población inicial de esta red es de 6,006 habitantes según la información catastral. Considerando el periodo de diseño de 20 años, una curva de crecimiento geométrica con una tasa de crecimiento del 4.3% (ver sección 5.2.4), la población en el año 20 del proyecto es de 13,476 habitantes. El detalle del cálculo, así como la composición y evolución de la demanda, se presentan en el Anexo VII.

Para el cálculo de las pérdidas por fricción, se consideraron los siguientes coeficientes de Hazen y Williams:

Tabla 6: Coeficientes de fricción para el sistema de abastecimiento de agua del distrito de Pucusana. Fuente: (Consortio Saneamiento Lima Sur, 2016)

MATERIAL	$C_{\text{HAZEN-WILLIAMS}}$
Poli cloruro de vinilo (PVC)	140
Hierro Dúctil (HD)	130

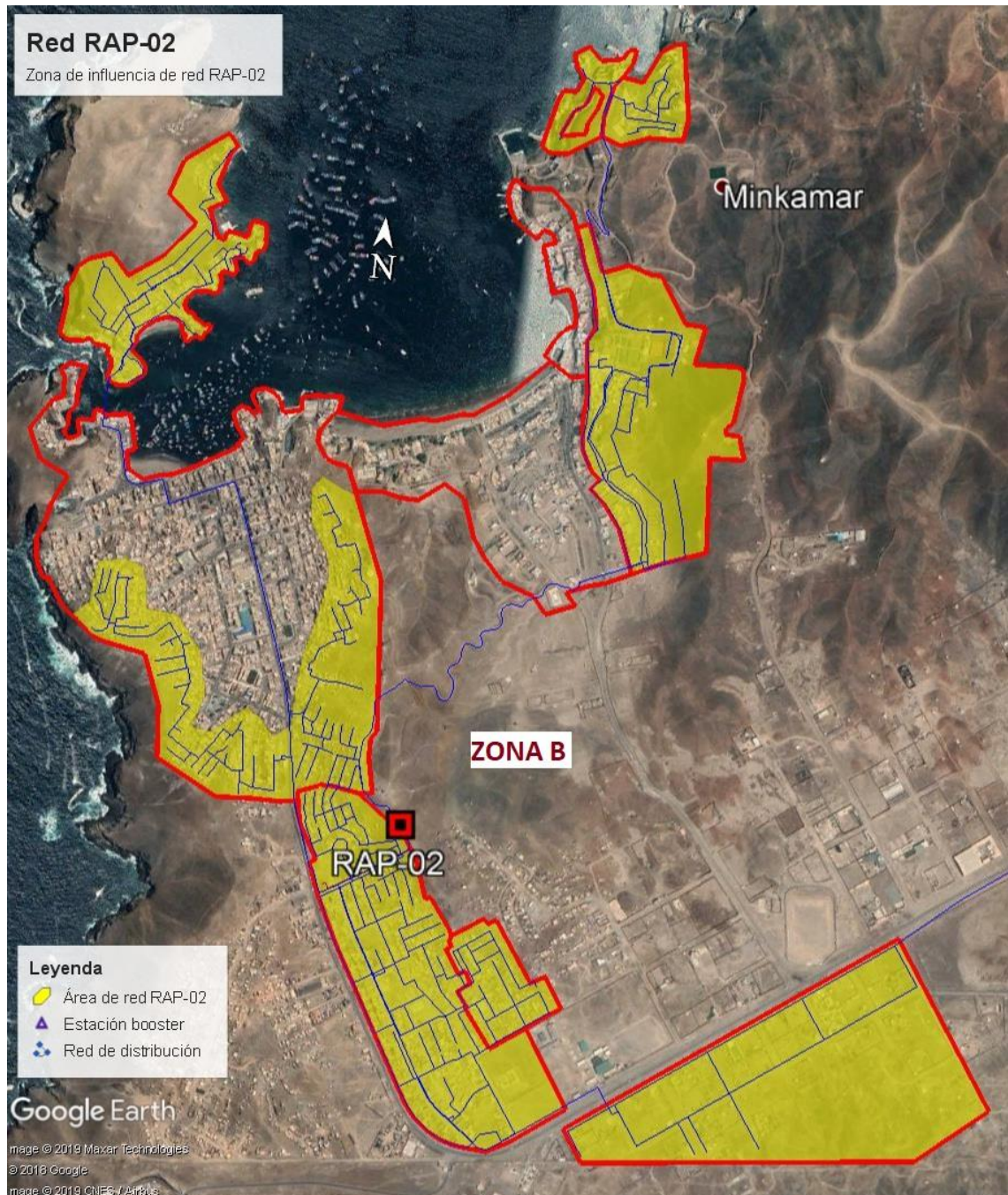


Fig. 33: Vista en planta de la red RAP-02 dentro de la Zona B. El área de influencia de la red se muestra en color amarillo. Las redes de distribución se muestran como líneas azules. Fuente: Elaboración propia.

5.2.7. Descripción del esquema hidráulico RAP-02

La red se encuentra ubicada en la Zona B del proyecto, y es abastecida por el reservorio RAP-02, que se encuentra en una posición central (ver figura 33). La distribución se hace por gravedad utilizando tuberías de hierro dúctil y PVC. En el Anexo VIII se muestran a detalle la configuración de la red la red.

El modelamiento de la red en el proyecto fue realizado utilizando WaterCAD. El archivo del modelo forma parte del expediente técnico. El archivo se exportó al formato *.inp para su uso en EPANET y en el programa desarrollado en el presente trabajo.

Los detalles principales de la red se mencionan en la tabla 7.

Tabla 7: Resumen de componentes de la red de distribución RAP-02. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Cantidad / Tipo
Total de nodos	338 und
Nodos con demanda	322 und
Tuberías	412 und – Total : 28,326.82 m
Material de tuberías	Hierro dúctil (HD) : 6,490.91 m PVC : 21,835.91 m
Diámetros	81.4 mm (PVC) : 11,534.37 m 99.4 mm (PVC) : 10,293.79 m 100.8 mm (HD) : 1,605.57 m 144.6 mm (PVC) : 7.75 m 152.4 mm (HD) : 4,656.65 m 204.2 mm (HD) : 160.50 m 255.4 mm (HD) : 68.19 m
Reservorios	RAP-02 Capacidad : 600 m ³ Cota de fondo : 118 m.s.n.m.
Válvulas	18 und
Rango de cotas - nodos	40.90 – 121.00 m.s.n.m.
Unidades de caudal	l/s
Fórmula de pérdida de carga	Hazen-Williams

5.2.8. Análisis de variación de demanda

Con la información procedente del expediente técnico, se elaboró un cuadro que resume la demanda de todos los nodos de la red y las conexiones asignadas a dicho nodo según su tipo (domésticas, comerciales, estatales y sociales). El objetivo es calcular la media y la desviación estándar esperadas para dicha demanda.

La información obtenida en el expediente no plasma la cantidad de usuarios servidos por cada nodo. Este dato se estimó en función de la cantidad total de conexiones servidas y su tipo. A las conexiones no domésticas, se le asignó una cantidad equivalente de personas en función de su consumo promedio. La demanda promedio se estimó de manera similar al Expediente Técnico, considerando una demanda unitaria proporcional al número de conexiones equivalentes (conexiones domésticas más conexiones comerciales, estatales e industriales con sus respectivos factores de consumo) servidas por cada nodo.

Para el reajuste por agregación temporal, se considera que el intervalo de análisis es de 1 hora, con el fin de que el valor máximo será coherente con el considerado por el método determinista. Con este dato se calcularon los factores de reajuste, según lo indicado en la sección 5.12. Los cálculos realizados con los enfoques determinista y probabilístico se muestran en las tablas 8 y 9 respectivamente. Como ya se indicó en la sección 5.1.4, la primera y las dos últimas columnas de la tabla 9, que contienen el ID del nodo, la media de la demanda máxima y su desviación estándar respectivamente se exportan para su uso en el programa.

Para dicho nodo, el cálculo de los parámetros para la demanda probabilística se realiza de la siguiente manera:

$$k_{\Delta} = 0.3154e^{\frac{1.61 \times 77.56}{1000}} = 0.357 \quad (\text{utilizando fórmula 5.6})$$

$$\beta = \exp \left[(60 - 1) \frac{77.56}{10^4} \right] = 2.807 \quad (\text{utilizando fórmula 5.7})$$

$$\mu_{C_p} = 0.357 \times \frac{8.007}{77.56^{0.163}} = 1.408 \quad (\text{utilizando fórmula 5.8})$$

$$CV_{C_p} = 0.167 + \frac{6.749}{2.807 \times 77.56} = 0.197 \quad (\text{Utilizando fórmula 5.9})$$

Con estos parámetros, se estiman la media y la demanda de la demanda máxima horaria:

$$\mu_{Q.M.H.} = 1.408 \times 0.143 = 0.20 \text{ l/s}$$

$$\sigma_{Q.M.H.} = 0.197 \times 0.143 = 0.028 \text{ l/s}$$

Tabla 8: Estimación determinista de demanda. Fuente: Elaboración propia

ID Nodo	Tipo de usuario					Conexiones Equivalentes	Población Equivalente	Q PROM. (l/s)	Q.M.H. determinista (l/s)
	Doméstico	Comercial	Estatad	Social	Total				
J-33	10.00	-	-	-	10.00	10.00	77.56	0.143	0.286

Tabla 9: Estimación probabilística de demanda nodal. Fuente: Elaboración propia.

Ítem	ID Nodo	Factor de ajuste k_{Δ}	Factor de ajuste β	μ_{CP}	CV_{CP}	Q.M.H. probabilíst. [media] (l/s)	Q.M.H. probabilíst. [σ] (l/s)
13	J-33	0.357	2.807	1.408	0.197	0.201	0.028

El detalle completo de los cálculos para todos los nodos puede se adjunta en el Anexo II.

En la figura 34 se grafica la demanda máxima resultante del modelo probabilístico (la curva de color azul) en contraste con la demanda máxima determinista (la línea vertical discontinua azul). Mientras esta última ofrece un solo valor, la curva probabilística ofrece un rango de valores y sus probabilidades, información que será útil para la simulación.

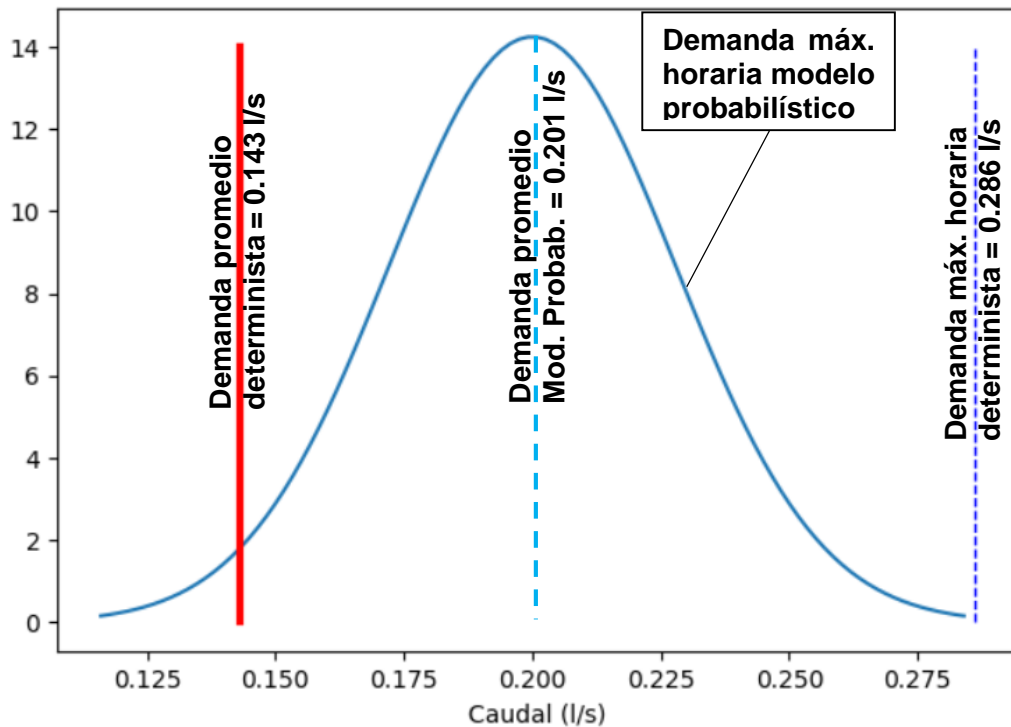


Fig. 34: Demanda probabilística vs demanda determinista para el nodo J-33. Fuente: Elaboración propia.

5.3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.3.1. Parámetros para el análisis

Para la simulación, se tuvo en cuenta los siguientes valores y límite:

- Correlación difusa: [0,0.5,0.5,1]
- Número de muestras: 1000
- Tuberías a analizar (se almacenarán y graficarán los resultados):

Se analizarán con el método probabilístico las 20 tuberías con los mayores caudales. En orden descendente de caudal, estas son:

ID	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Q determinista (l/s)	ID	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Q determinista (l/s)
P-4	5.95	255.4	51.64	P-17	94.98	152.4	9.50
P-15	62.24	255.4	43.64	P-13	18.25	100.8	8.10
P-20	160.50	204.2	39.29	P-176	13.67	99.4	8.10
P-11	13.97	152.4	21.69	P-182	17.54	99.4	8.01
P-22	210.50	152.4	21.69	P-9	13.75	152.4	8.00
P-2	5.47	152.4	17.60	P-30	1230.67	152.4	8.00
P-24	357.29	152.4	17.60	P-7	8.26	100.8	7.93
P-25	365.52	100.8	10.90	P-44	12.24	99.4	7.93
P-10	10.39	100.8	10.80	P-6	8.34	152.4	7.86
P-58	25.78	99.4	10.80	P-27	449.65	152.4	7.86

- Nodos a analizar (se almacenarán y graficarán los resultados):

Se analizarán con el método probabilístico los 10 nodos con las mayores presiones y los 10 nodos con las menores presiones. En orden descendente de presión, estos son:

Nodos con mayor presión				Nodos con menor presión			
ID	Demand a nodal (l/s)	Cota de terreno (m)	Presión (mH ₂ O)	ID	Demand a nodal (l/s)	Cota de terreno (m)	Presión (mH ₂ O)
J-236	0.057	70.781	50.12	J-286	0.086	71.097	13.23
J-126	0.114	5.519	49.52	J-332	0.229	72.466	13.19
J-371	0.257	39.5	49.02	J-357	0.200	72.685	12.99
J-191	0.057	39.567	49.00	J-299	0.057	73.204	12.76
J-112	0.143	6.292	48.75	J-361	0.257	73.09	12.76
J-80	0.143	72.409	48.49	J-297	0.086	72.966	12.68
J-145	0.429	16.665	47.93	J-253	0.057	73.175	12.50
J-143	0.171	16.802	47.80	J-266	0.086	73.742	11.93
J-336	0.086	73.132	47.56	J-304	0.086	109.132	11.62
J-74	0.057	73.343	47.35	J-292	0.086	78.622	9.97

- Valores de α : [0.1, 0.2, 0.5, 0.8, 0.9]
- Niveles de confianza para estimar el rango de diseño:
 - o Nivel de confianza probabilístico: 95%
 - o Nivel de confianza difuso (posibilístico): 90%
- Nivel de precisión requerido: 1.5 %

El archivo de salida tendrá en total $1000 * [20(2) + 20(1) + 20(1)] * 5 * 2 = 600,000$ filas.

5.3.2. Análisis determinista

El análisis determinista se realizó utilizando el archivo del modelo en la interfaz de EPANET. Los resultados completos para todas las tuberías y los nodos se muestran en los Anexos III y IV respectivamente.

Se presentan a continuación dos gráficos interesantes generados en EPANET. El primero (fig. 35) muestra la distribución de caudales de la red. Puede apreciarse que, según el análisis determinista, cerca del 95% de las tuberías conducen un caudal de menos de 5 litros por segundo. Asimismo, se muestra que el límite superior es ligeramente mayor que 51 l/s. Precisamente, el caudal de la tubería principal, P-4, es de 51.64 l/s.

Respecto al análisis de presión, puede apreciarse en la figura 36 que menos del 5% de los nodos de la red tienen una presión menor de 15 m, y que el 95% de los nodos de la red tienen una presión menor de 70 m. No se aprecian presiones negativas en la red.

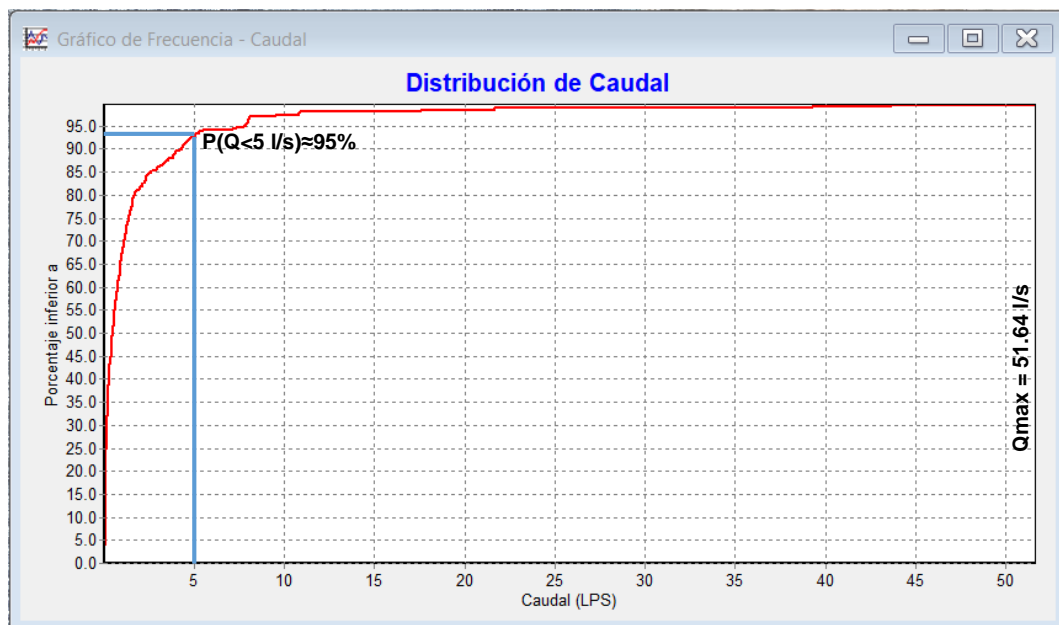


Fig. 35: Distribución de caudales. Fuente: Elaboración propia.

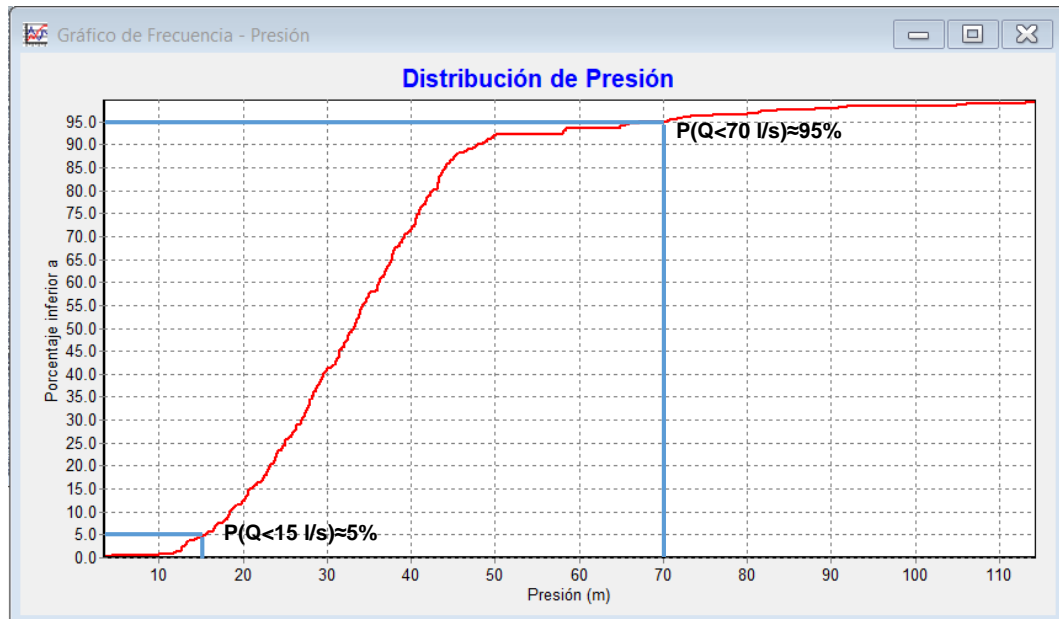


Fig. 36: Distribución de presiones según análisis determinista. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3. Análisis probabilístico

Se generó el archivo de base de datos de resultados según lo especificado en la sección anterior. Durante su ejecución, el programa muestra el porcentaje de avance de los cálculos y el tiempo restante, como puede apreciarse en la figura 37. El tiempo total para la simulación fue de 65 minutos utilizando dos procesadores en paralelo.

```

/usr/bin/python3.5 /mnt/hgfs/LINUX/nsolver1.3/fmcs_1.6_1.py
/usr/lib/python3.5/importlib/_bootstrap.py:222: RuntimeWarning: numpy.dtype size ch
return f(*args, **kwargs)
Nodos en total= 386
Nodos con demanda= 322
Total de tubos= 412
0% [#####] 100% | ETA: 00:52:16
    
```

Fig. 37: Vista de consola de ejecución del programa. Fuente: Elaboración propia.

5.3.4. Gráficos generados

Una vez con la base de datos, se utilizó el módulo graficador para obtener las curvas de probabilidad y posibilidad para todos los nodos seleccionados.

Se muestra en la figura 38 la variación de caudal para la tubería que transporta el mayor caudal en la red, el tubo P-4. Como puede apreciarse, para los niveles de confianza elegidos, el rango de valores del caudal máximo horario está en el intervalo [40.22, 47.96], con un valor promedio de 44.09 l/s. El caudal según el análisis determinista es de 51.64 l/s (línea vertical color verde), valor que estaría

por encima de este rango. Si se tomara en cuenta el valor promedio de la simulación, se lograría reducir en un 14.62% el valor de caudal de diseño.

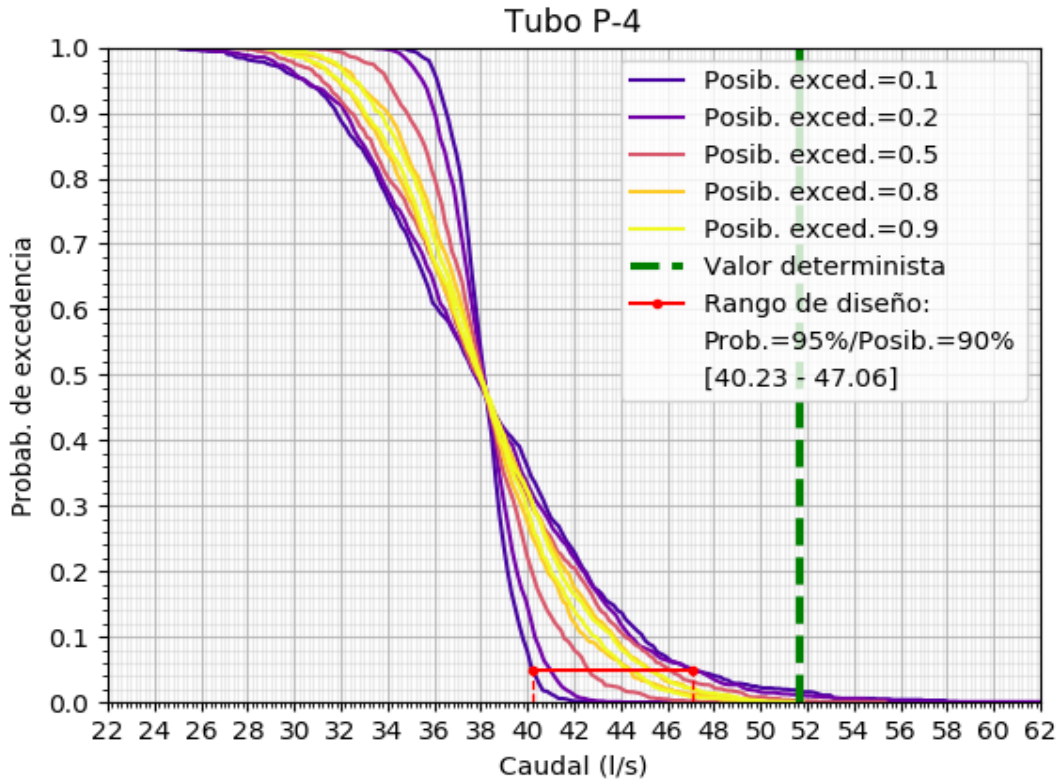


Fig. 38: Curvas de caudales para tubo P-4. Fuente: Elaboración propia.

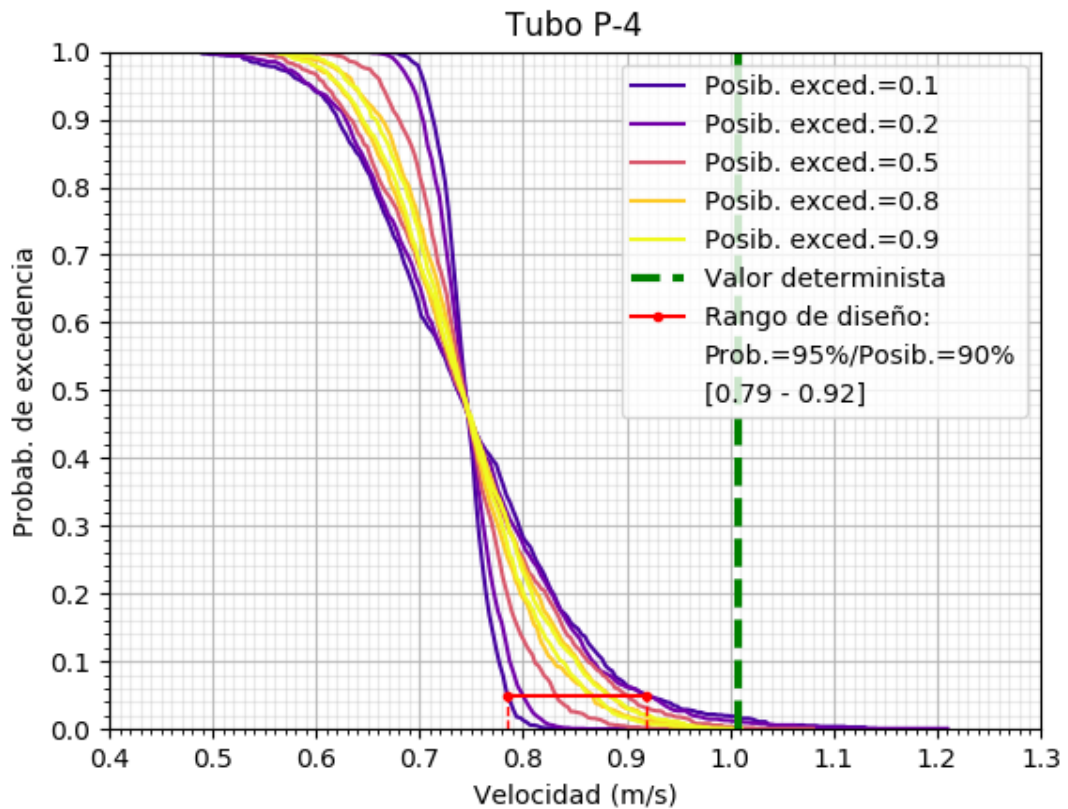


Fig. 39: Curvas de velocidades para tubo P-4. Fuente: Elaboración propia.

En lo referente a la velocidad, se puede apreciar en la figura 39 que el valor estimado al intervalo de confianza máximo está por debajo de 0.94 m/s. La velocidad máxima con el enfoque determinista es de 1.01 m/s (línea vertical verde). Puede notarse la coherencia entre ambos resultados.

Se generaron también las curvas de presiones para los nodos en análisis. Se muestra en la figura 40 los resultados para el nodo J-236, que es el que soporta mayores presiones. La presión según el análisis determinista, es igual a 50.12 m, y se encuentra por debajo del rango de presiones máximas esperadas según el análisis probabilístico. Puede notarse que las presiones máximas esperadas son mayores, lo que concuerda con los menores caudales requeridos en general.

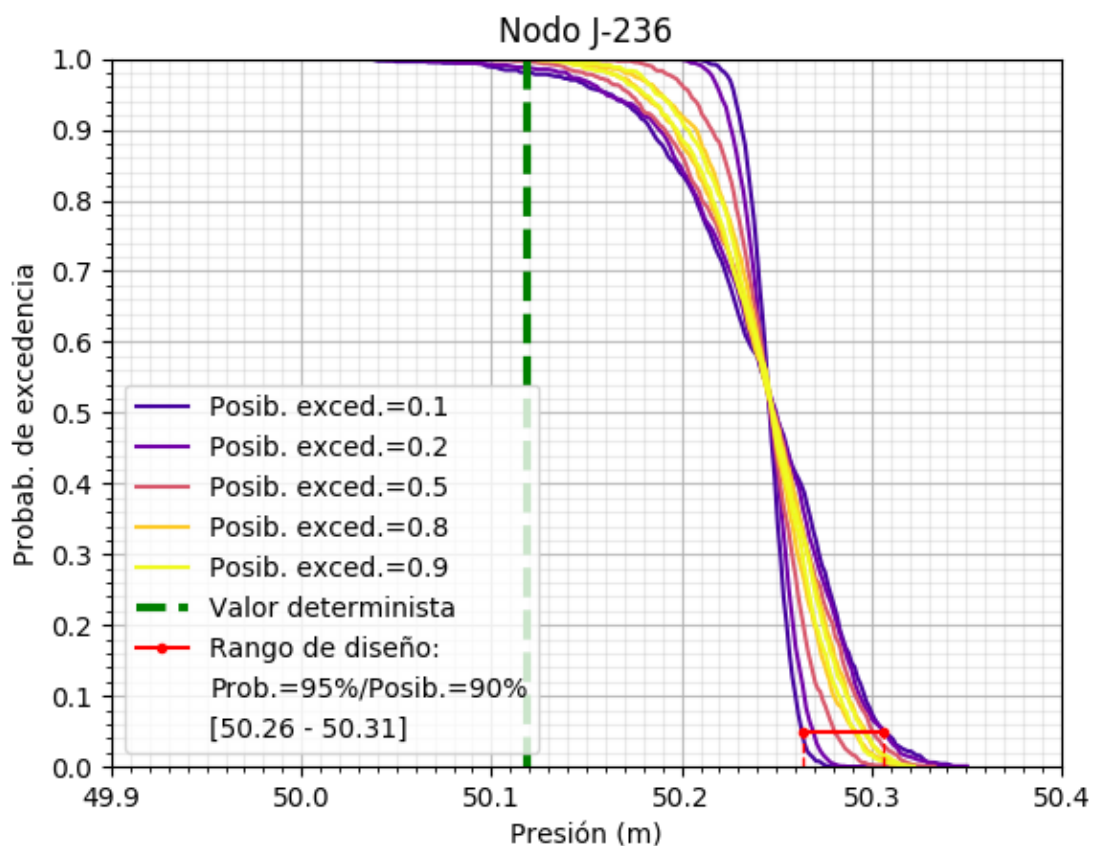


Fig. 40: Curvas de presiones para nodo J-236. Fuente: Elaboración propia.

En los Anexos V y VI se adjuntan todas las curvas que se generaron para el presente trabajo.

5.3.5. Resultados: Tuberías

Se muestran los resultados para los caudales (tabla 10) y las velocidades (tabla 11) en las tuberías con mayor caudal de la red como resultado del análisis probabilístico.

En todos los casos, los caudales determinados con un enfoque determinista resultaron mayores que el rango máximo resultante del análisis probabilístico. La razón entre el caudal promedio probabilístico y el caudal determinista máximo varía entre el 80.94% y el 86.06%.

En el caso de las velocidades, el fenómeno sigue el mismo comportamiento, en parte porque no se han modificado las áreas de las secciones transversales de los tubos. En este caso, las velocidades resultantes del análisis probabilístico son menores que las del análisis determinista en la misma relación que los caudales.

Tabla 10: Cuadro comparativo probabilístico vs determinista - Caudales. Fuente: Elaboración propia.

Elemento	ID	Parámetro	Unidad	Rango de result. FMCS				Resultado determinista	Ratio result. (%)
				Inferior	Superior	Promed	Precisic		
Tubería	P-2	Caudal	l/s	13.80	16.30	15.05	1.37%	17.60	85.50
Tubería	P-4	Caudal	l/s	40.23	47.06	43.64	1.25%	51.64	84.52
Tubería	P-6	Caudal	l/s	6.14	7.11	6.63	1.32%	7.86	84.29
Tubería	P-7	Caudal	l/s	5.99	6.85	6.42	1.25%	7.93	80.94
Tubería	P-9	Caudal	l/s	6.25	7.24	6.75	1.32%	8.00	84.32
Tubería	P-10	Caudal	l/s	8.25	9.64	8.94	1.31%	10.80	82.79
Tubería	P-11	Caudal	l/s	16.94	19.45	18.20	1.13%	21.69	83.89
Tubería	P-13	Caudal	l/s	6.42	7.52	6.97	1.34%	8.10	86.06
Tubería	P-15	Caudal	l/s	34.08	39.77	36.92	1.24%	43.64	84.61
Tubería	P-17	Caudal	l/s	7.45	8.78	8.11	1.40%	9.50	85.41
Tubería	P-20	Caudal	l/s	30.67	35.76	33.21	1.23%	39.29	84.53
Tubería	P-22	Caudal	l/s	16.94	19.45	18.20	1.13%	21.69	83.89
Tubería	P-24	Caudal	l/s	13.80	16.30	15.05	1.37%	17.60	85.50
Tubería	P-25	Caudal	l/s	8.77	9.83	9.30	0.97%	10.90	85.29
Tubería	P-27	Caudal	l/s	6.14	7.11	6.63	1.32%	7.86	84.29
Tubería	P-30	Caudal	l/s	6.25	7.24	6.75	1.32%	8.00	84.32
Tubería	P-44	Caudal	l/s	5.99	6.85	6.42	1.25%	7.93	80.94
Tubería	P-58	Caudal	l/s	8.25	9.64	8.94	1.31%	10.80	82.79
Tubería	P-176	Caudal	l/s	6.42	7.52	6.97	1.34%	8.10	86.06
Tubería	P-182	Caudal	l/s	6.34	7.42	6.88	1.34%	8.01	85.93

Tabla 11: Cuadro comparativo probabilístico vs determinista – Velocidades. Fuente: Elaboración propia.

Elemento	ID	Parámetro	Unidad	Rango de result. FMCS				Resultado determinis	Ratio result. (%)
				Inferio	Superic	Promed	Precisic		
Tubería	P-2	Velocidad	m/s	0.76	0.89	0.82	1.37%	0.96	85.93
Tubería	P-4	Velocidad	m/s	0.79	0.92	0.85	1.25%	1.01	84.35
Tubería	P-6	Velocidad	m/s	0.34	0.39	0.36	1.32%	0.43	84.47
Tubería	P-7	Velocidad	m/s	0.75	0.86	0.80	1.25%	0.99	81.24
Tubería	P-9	Velocidad	m/s	0.34	0.40	0.37	1.32%	0.44	84.03
Tubería	P-10	Velocidad	m/s	1.03	1.21	1.12	1.31%	1.35	83.00
Tubería	P-11	Velocidad	m/s	0.93	1.07	1.00	1.13%	1.19	83.82
Tubería	P-13	Velocidad	m/s	0.80	0.94	0.87	1.34%	1.01	86.49
Tubería	P-15	Velocidad	m/s	0.67	0.78	0.72	1.24%	0.85	84.79
Tubería	P-17	Velocidad	m/s	0.41	0.48	0.44	1.40%	0.52	85.55
Tubería	P-20	Velocidad	m/s	0.94	1.09	1.01	1.23%	1.20	84.51
Tubería	P-22	Velocidad	m/s	0.93	1.07	1.00	1.13%	1.19	83.82
Tubería	P-24	Velocidad	m/s	0.76	0.89	0.82	1.37%	0.96	85.93
Tubería	P-25	Velocidad	m/s	1.10	1.23	1.16	0.97%	1.37	85.03
Tubería	P-27	Velocidad	m/s	0.34	0.39	0.36	1.32%	0.43	84.45
Tubería	P-30	Velocidad	m/s	0.34	0.40	0.37	1.32%	0.44	84.03
Tubería	P-44	Velocidad	m/s	0.77	0.88	0.83	1.25%	1.02	81.09
Tubería	P-58	Velocidad	m/s	1.06	1.24	1.15	1.31%	1.39	82.90
Tubería	P-176	Velocidad	m/s	0.83	0.97	0.90	1.34%	1.04	86.38
Tubería	P-182	Velocidad	m/s	0.82	0.96	0.89	1.34%	1.03	86.12

5.3.6. Resultados: Nodos

Se muestran los resultados de los análisis para los nodos (con demanda) de mayor y menor presión en la red en las tablas 12 y 13 respectivamente.

En el caso de los nodos con mayor presión, se aprecia que las presiones máximas sufren poca variación, tendiendo a mostrar un ligero incremento respecto a los resultados del análisis determinista. Dicho incremento varía entre el 0.02% y el 0.61%. Este incremento se corresponde con la disminución del caudal evidenciada en la sección anterior.

En el caso de los nodos con menor presión, el incremento de su valor es más notorio. Los valores se ven aumentados entre el 0.63% y el 8.11% respecto al análisis determinista.

Tabla 12: Cuadro comparativo probabilístico vs determinista – Presiones máximas. Fuente: Elaboración propia.

Elemento	ID	Parámetro	Unidad	Rango de result. FMCS				Resultado determinis	Ratio result. (%)
				Inferio	Superic	Promed	Precisic		
Nodo	J-74	Presión	m (H2O)	47.60	47.67	47.64	0.016%	47.35	100.61
Nodo	J-336	Presión	m (H2O)	47.81	47.88	47.85	0.016%	47.56	100.60
Nodo	J-143	Presión	m (H2O)	47.84	47.85	47.84	0.002%	47.80	100.09
Nodo	J-145	Presión	m (H2O)	47.97	47.98	47.98	0.002%	47.93	100.10
Nodo	J-80	Presión	m (H2O)	48.64	48.68	48.66	0.009%	48.49	100.35
Nodo	J-112	Presión	m (H2O)	48.76	48.76	48.76	0.001%	48.75	100.02
Nodo	J-191	Presión	m (H2O)	49.03	49.03	49.03	0.002%	49.00	100.06
Nodo	J-371	Presión	m (H2O)	49.08	49.09	49.08	0.003%	49.02	100.13
Nodo	J-126	Presión	m (H2O)	49.53	49.53	49.53	0.001%	49.52	100.02
Nodo	J-236	Presión	m (H2O)	50.26	50.31	50.28	0.009%	50.12	100.33

Tabla 13: Cuadro comparativo probabilístico vs determinista – Presiones mínimas. Fuente: Elaboración propia.

Elemento	ID	Parámetro	Unidad	Rango de result. FMCS				Resultado determinis	Ratio result. (%)
				Inferio	Superic	Promed	Precisic		
Nodo	J-292	Presión	m (H2O)	10.03	10.04	10.03	0.014%	9.97	100.63
Nodo	J-304	Presión	m (H2O)	11.88	11.95	11.91	0.067%	11.62	102.53
Nodo	J-266	Presión	m (H2O)	12.31	12.40	12.35	0.081%	11.93	103.55
Nodo	J-253	Presión	m (H2O)	12.87	12.97	12.92	0.077%	12.50	103.35
Nodo	J-297	Presión	m (H2O)	13.07	13.17	13.12	0.079%	12.68	103.44
Nodo	J-299	Presión	m (H2O)	12.78	12.79	12.79	0.006%	12.76	100.22
Nodo	J-361	Presión	m (H2O)	12.84	12.87	12.86	0.020%	12.76	100.75
Nodo	J-357	Presión	m (H2O)	13.36	13.45	13.41	0.075%	12.99	103.21
Nodo	J-332	Presión	m (H2O)	13.57	13.67	13.62	0.075%	13.19	103.24
Nodo	J-286	Presión	m (H2O)	14.17	14.44	14.30	0.208%	13.23	108.11

5.3.7. Análisis de sensibilidad

Como se mencionó anteriormente, la correlación cruzada de demanda nodal influye de manera importante en la variabilidad de los resultados.

Para comprobar esta relación con los datos de salida del modelo, se muestra en la figura 41 la importancia que tiene la correlación sobre la desviación estándar, que es la medida de la variación de una variable. En este caso, los resultados corresponden a los caudales de salida para la tubería P-4. El valor de la desviación estándar fluctúa entre 18.70 y 19.10. El coeficiente de correlación de Pearson obtenido para este caso es igual a 0.996.

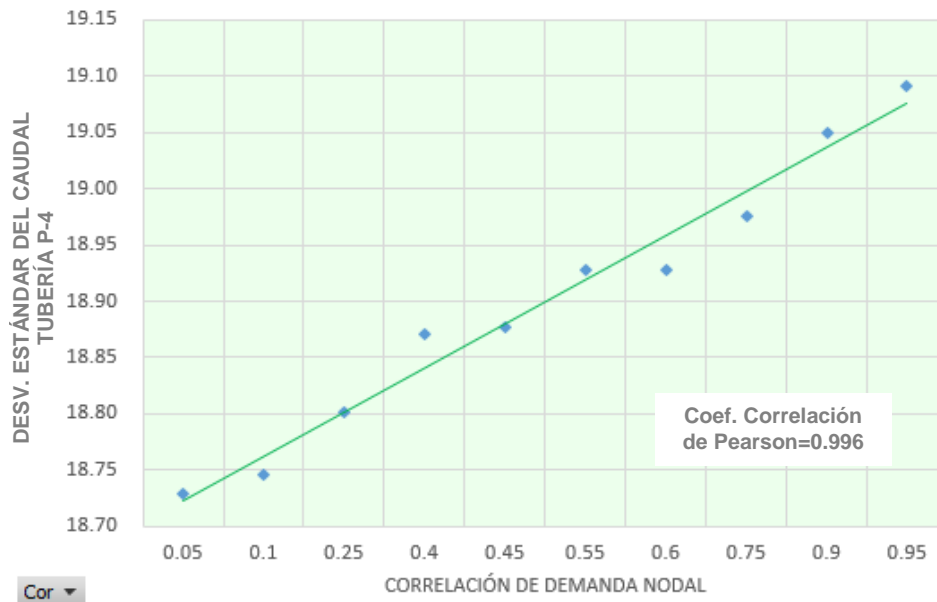


Fig. 41: Desviación estándar para los caudales de la tubería P-4 vs Coeficiente de correlación cruzada de demanda nodal. Fuente: Elaboración propia

Si se hace un análisis similar sobre la media de los valores de salida, puede apreciarse que la relación es débil. Así, el valor de la media fluctúa entre 19.44 y

19.46 (0.1%). El coeficiente de correlación obtenido es en este caso igual a -0.06, coherente con la poca correlación entre las variables.

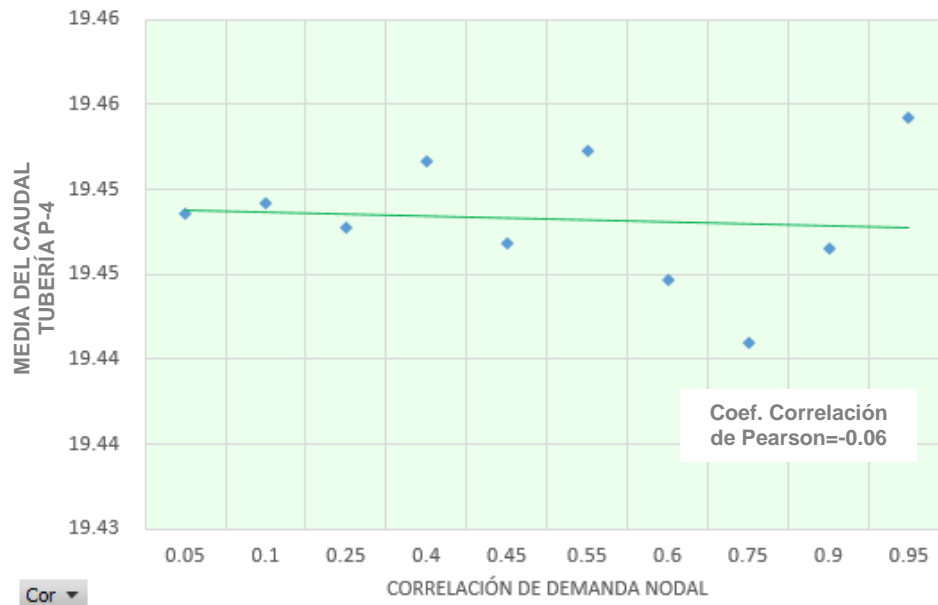


Fig. 42: Media de los caudales de la tubería P-4. Fuente: Elaboración propia.

En este sentido, se puede concluir que la relación entre la variabilidad de las variables de salida y las variables de entrada es coherente.

5.3.8. Aplicación al diseño

Como puede apreciarse, los resultados evidencian que utilizar un modelamiento realista de la demanda, puede llevar a una optimización del caudal de diseño. Consiguientemente, se podría optimización el diseño de la red.

Asimismo, a diferencia del enfoque determinista, en un enfoque probabilístico como el propuesto, el diseñador puede definir los niveles de confianza que se consideren ideales para el proyecto.

Además de un posible ahorro al reducirse los diámetros de las tuberías, la aplicación del modelo permite considerar valores más altos para las presiones nodales en los nodos con menor presión. Esto es consecuencia de la optimización de los caudales.

5.4. LIMITACIONES

Entre las principales limitaciones que pueden mencionarse luego de la aplicación del modelo, podemos mencionar:

1. Las fórmulas para la determinación de la media y la desviación estándar no fueron validadas con mediciones en campo en el Perú. Un programa de medición de caudales podría permitir una mejora notoria en los parámetros

de diseño. Cabe mencionarse que, a pesar de ello, el modelo propuesto no pierde validez como método de análisis.

2. El algoritmo de solución del modelo hidráulico, que se basó en la librería EPANETTOOLS para Python, podría hacerse más eficiente si se modificara su código para poder hacer uso de *dataframes* de Pandas (librería para análisis de bases de datos). Esto podría permitir reducir de manera importante el tiempo de ejecución de las simulaciones, e incluso mejorar la precisión del análisis (debido a que se puede considerar una mayor cantidad de muestras en menor tiempo).
3. En el modelo no se consideró la incertidumbre producida por los coeficientes de rugosidad. Para un análisis más refinado, podrían considerarse como nuevas variables probabilísticas o difusas.
4. El tipo de análisis realizado fue del tipo DDA (análisis dirigido por la demanda). Esto se hizo con el fin de poder comparar los resultados en las mismas condiciones con el enfoque determinista. En los modelos de optimización y confiabilidad sin embargo es usual realizar análisis PDA (análisis dirigido por la presión), debido a que se representa mejor la dependencia entre la demanda y la presión.
5. Para el diseño de la red, es decir, la definición de las dimensiones y características de sus componentes, es necesario utilizar un algoritmo de optimización que considere minimizar su costo y/o maximizar su confiabilidad. Este es un proceso iterativo que implica la implementación de un algoritmo adicional, que no se consideró como parte del presente estudio, pero que puede tener como punto de partida la metodología propuesta.

CONCLUSIONES

El análisis tradicional de redes de distribución de agua potable tiene un enfoque predominantemente determinista, utilizando los factores de demanda máxima y las curvas de variación horaria. Ninguno de estos enfoques considera el carácter aleatorio de la demanda. Sin embargo, desde mediados de la década de los 90 diversos investigadores en diferentes partes del mundo han propuesto métodos para modelar la demanda considerando su carácter estocástico, ayudados por el incremento exponencial de la capacidad de procesamiento de las computadoras. Estos modelos se han usado para modelar el comportamiento de la demanda de agua en escalas temporales y espaciales muy finas.

Con base en el trabajo realizado por investigadores de la Universidad de Cassino y Lazzio del Sur respecto a los factores de demanda pico probabilísticos (Gargano, Tricarico, Granata, Sanpietro, & De Marinis, 2017), y aplicando un método heurístico de análisis probabilístico/difuso propuesto por investigadores de la Universidad de Alberta, que se denomina Simulación Difusa de Monte Carlo (Sadeghi, Fawek, & Pedrycz, 2010), se propuso una metodología de análisis para redes de distribución de agua potable, cuya finalidad es calcular los valores máximos de diseño, y que considera las demandas nodales como variables aleatorias (cuya media y desviación estándar dependen del tamaño de la población y de la escala temporal considerada). Asimismo, se considera a la correlación entre demandas nodales como una variable difusa cuyo valor varía entre 0 y 1. Se desarrolló un programa en Python que permite aplicar dicha metodología a cualquier red de distribución de agua potable. El programa permite simular una red creada en EPANET o WaterCAD. Para ello se utiliza el motor de análisis EPANETTOOLS.

El modelo se aplicó a un sector del proyecto de ampliación y mejoramiento de la red de abastecimiento de la localidad de Pucusana, en el Departamento de Lima.

Como resultado del presente trabajo, se tienen las siguientes conclusiones.

1. Entre las ventajas más importantes que presenta el modelo es que permite representar la demanda considerando su naturaleza aleatoria. Utilizando factores de demanda validados para la zona de estudio, se pueden optimizar los caudales resultantes del análisis hidráulico, y como consecuencia, optimizar el diseño de las redes de distribución de agua. Asimismo, el método propuesto permite establecer niveles de confianza

para el diseño, al basarse en un análisis probabilístico y posibilístico (difuso).

2. Se mostró en la sección 5.3.5 que la aplicación del modelo propuesto puede significar una reducción de los caudales de diseño. Utilizando las demandas promedio según lo considerado en el Expediente Técnico del proyecto en estudio, y coeficientes de variación demanda validados por estudios en Italia y Países Bajos, se llegaron a obtener valores que fluctúan entre el 80.94% y 86.06% del valor obtenido con un enfoque determinista, comprobándose así la hipótesis del trabajo. El nivel de confianza para las variables aleatorias fue del 95%, y para las variables difusas fue del 90%. Una disminución de los caudales de diseño producto de un análisis probabilístico/difuso podría significar durante el proceso de diseño una disminución en las dimensiones de la infraestructura, y como consecuencia, una reducción en el costo de la inversión.
3. El alto costo computacional es la principal desventaja encontrada en el modelo. Al hacerse un análisis difuso de correlación de demanda nodal, se requiere multiplicar la cantidad de muestras que se utilizarían en un análisis de Monte Carlo tradicional por el doble de la cantidad de α -cortes a considerar. Almacenar esta información en cada iteración, y realizar el análisis hidráulico completo de la red para cada muestra puede hacer que el tiempo de ejecución del programa sea importante (del rango de varias horas para la red que se tomó como ejemplo). Para redes de mayor tamaño y/o complejidad, esto podría suponer una limitación importante.

RECOMENDACIONES

1. Es necesario implementar un programa de medición de caudales para distintos tamaños de población en el Perú, abarcando desde mediciones en domicilios individuales hasta redes que puedan abastecer a decenas de miles de usuarios. De esta manera será posible obtener factores para caracterizar la demanda máxima en función de la cantidad de pobladores con un enfoque probabilístico, en lugar de usar factores de demanda fijos. Asimismo, con esto se podrán validar modelos estocásticos para el análisis de demanda.
2. Un aspecto que queda pendiente al terminar este trabajo es la implementación de un algoritmo de optimización que busque minimizar el costo de inversión del proyecto, y que busque maximizar la confiabilidad de la red. Este algoritmo puede integrarse al modelo de simulación propuesto para lograr una metodología completa de diseño.
3. En trabajos posteriores sería muy importante incluir al modelo otras fuentes de incertidumbre en las redes de agua potable, como el coeficiente de rugosidad de las tuberías. Este factor de incertidumbre ya se incluyó en modelos anteriores de optimización (Giustolisi, Laucelli, & Colombo, 2009).
4. Si bien el programa desarrollado cumple con su función principal, para poder aplicarse a otros proyectos en la práctica del diseño es necesario desarrollar una interfaz gráfica completa, que sea intuitiva y amigable con el usuario. Esto no forma parte del alcance del presente trabajo, por lo que quedaría pendiente para un proyecto posterior.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcocer, V., Tzatchkov, V., & Arreguín, F. (2012). Modeling of drinking water networks using stochastic demand. *Water Resources Management*, 26(7), 1779-1792.
- Alcocer, V., Tzatchkov, V., & Buchberger, S. (2006). Instantaneous Water demand Parameter Estimation from Coarse Meter Readings. *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium* (págs. 1-14). Cincinnati: American Society of Civil Engineers.
- Alcocer, V., Tzatchkov, V., García, R., Buchberger, S. A., & León, T. (2008). Modelación estocástica del consumo doméstico de agua potable, empleando el esquema de Neyman-Scott. *Ingeniería Hidráulica en México*, 23(3), 105-121.
- Alvisi, S., Franchini, M., & Marinelli, A. (2003). A Stochastic Model for Representing Drinking Water Demand at Residential Level. *Water Resources Management*, 17(3), 197-222.
- American Water Works Association. (2014). *Manual of Water Supply Practices M22: Sizing Water Service Lines and Meters*. Denver: American Water Works Association.
- Arocha, S. (1997). *Abastecimientos de Agua*. Caracas: Editorial Innovación Tecnológica.
- Autoridad Nacional del Agua. (2015). *Compendio Nacional de Estadísticas de Recursos Hídricos*. Lima: Autoridad Nacional del Agua.
- Babayan, A., Kapelan, Z., Savic, D., & Walters, G. (2005). Least-Cost Design of Water Distribution Networks Under Demand Uncertainty. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(5), 375-382.
- Billingsley, P. (2012). *Probability and Measure: Anniversary Edition*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Blokker, M., Vreeburg, J., & Van Dijk, J. (2010). Simulating Residential Water Demand with a Stochastic End-Use Model. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(1), 19-26.
- Brandimarte, P. (2014). *Handbook in Monte Carlo Simulation*. Nueva Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.

- Buchberger, S., & Li, Z. (2008). Preserving Spatial Correlation in Network Water Demands. *10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference (WDSA2008)* (págs. 197-208). Kruger National Park: American Society of Civil Engineers.
- Buchberger, S., & Wells, G. (1996). Intensity, Duration, and Frequency of Residential Water Demands. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(1).
- Buchberger, S., & Wu, L. (1995). Model for Instantaneous Residential Water Demands. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(3), 232-246.
- Buchberger, S., Omaghomí, T., Wolfe, T., Hewitt, J., & Cole, D. (2017). *Peak Water Demand Study: Probaility Estimates for Efficient Fixtures in Single and Multi-family Residential Buildings*. Ontario: International Association of Plumbing and Mechanical Officials.
- Canavos, G. (1988). *Probabilidad y Estadística: Aplicaciones y Métodos*. Ciudad de México: McGraw-Hill.
- Carvalho, L., Bassanezi, R., & Lodwick, W. (2017). *A Fisrt Course in Fuzzy Logic, Fuzzy Dynamical Systems, and Biomathematics*. Berlín: Springer-Verlag GmbH.
- Castro, N., Garzón, J., & Ortiz, R. (2006). Aplicación de los métodos para el cálculo de caudales máximos probables instantáneos en edificaciones de diferente tipo. *VI Seminario Iberoamericano de Redes de Agua y Drenaje* (págs. 1-14). Joao Pessoa: Universidad Federal da Paraíba.
- Comisión Nacional del Agua. (2016). Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado. En C. N. Agua, *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Coyoacán: Comisión Nacional del Agua.
- Consortio Saneamiento Lima Sur. (2016). Ampliación y Mejoramiento de los Sistema de Agua Potable y Alcantarillado para el Esquema Pucusana. *Estudio Definitivo y Expediente Técnico*. Lima: SEDAPAL.
- Creaco, E., Blokker, M., & Buchberger, S. (2017). Model for Generating Household Water Demand Pulses: Literature Review and Comparison. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(6).
- Creaco, E., Farmani, R., Kapelan, Z., Vamvakeridou-Lyroudia, L., & Savic, D. (2015). Considering the Mutual Dependence of Pulse Duration and

- Intensity in Models for Generating Residential Water Demand. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(11), 1-9.
- Davis, M. (2010). *Water and Waterwater Engineering*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Di Palma, F., Gargano, R., Granata, F., & Greco, R. (2016). The Overall Pulse model for Water Demand of Agregated Residential Users. *XVIII International Conference on Water Distribution Systems Analysis (WDSA2016)* (págs. 483-490). Cartagena: American Society of Civil Engineers.
- Filion, Y., Adams, B., & Karney, B. (2007). Stochastic Design of Water Distribution Systems with Expected Annual Damages. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(3), 244-252.
- Filion, Y., Karney, B., Moughton, L., Buchberger, S., & Adams, B. (2007). Cross Correlation of Demands in Water Distribution Network Design. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(2).
- Forbes, C., Merran, E., Hastings, N., & Peacock, B. (2011). *Statistical Distributions*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Fu, G., & Kapelan, Z. (2011). Fuzzy Probabilistic Design of Water Distribution Networks. *Water Resources Research*(47), 1-12.
- Gaines, B., & Kohout, L. (1975). Possible Automata. *International Symposium on Multiple-Valued Logic* (págs. 183-196). Indiana: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- García, V., García-Bartual, R., Cabrera, E., Arregui, F., & García-Sera, J. (2004). Stochastic Model to Evaluate Residential Water Demands. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(5), 386-394.
- Gargano, R., Di Palma, F., De Marinis, G., Granata, F., & Greco, R. (2016). A Stochastic Approach for the Water Demand of Residential End Users. *Urban Water Journal*, 13(6), 1-14.
- Gargano, R., Tricarico, C., & Del Giudice, G. (2016). A Stochastic Model For Daily Residential Water Demand. *Water Science & Technology: Water Supply*, 16(6), 1753-1767.
- Gargano, R., Tricarico, C., Buchberger, S., Del Giudice, G., & Di Palma, F. (2014). The Mixed Model for the Residential Flow Demand of a Small Number of

- Users. *16th Conference on Water Distribution System Analysis (WDSA 2014)* (págs. 975-981). Bari: American Society of Civil Engineers.
- Gargano, R., Tricarico, C., Granata, F., Sanpietro, S., & De Marinis, G. (2017). Probabilistic Models for the Peak Residential Water Demand. *Water*, 9(6), 1-15.
- Gato-Trinidad, S., & Gan, K. (2012). Characterizing Maximum Residential Water Demand. *Urban Water*, 122, 15-24.
- Gheisi, A., Forsyth, M., & Naser, B. (2016). Water Distribution Systems Reliability. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(11), 1-12.
- Giustolisi, O., & Walski, T. (2012). Demand Components in Water Distribution Network Analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(4), 356-367.
- Giustolisi, O., Laucelli, D., & Colombo, A. (2009). Deterministic Versus Stochastic Design of Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135(2), 117-127.
- Gorban, I. (2018). *Randomness and Hyper-Randomness*. Londres: Springer.
- Guercio, R., Magini, R., & Pallavicini, I. (2001). Instantaneous Residential Water Demand as Stochastic Point Process. *Water Resources Management*, 48, 129-138.
- Guibo, J. (15 de 12 de 2018). *Ministerio de Economía y Finanzas. Curso Formulación y Evaluación en PIP del Sector Saneamiento*. Obtenido de https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/docs/capacidades/capac/Formulacion_Saneamiento.pdf
- Gupta, R., & Bhave, P. (2007). Fuzzy Parameters in Pipe Network Analysis. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 24(1), 33-54.
- Hall, A. (2005). *Generalized Method of Moments*. Nueva York: Oxford University Press.
- Kallenberg, O. (1997). *Foundations of Modern Probability*. Nueva York: Springer.
- Kapelan, Z., Savic, D., & Walters, G. (2005). Multiobjective Design of Water Distribution Systems Under Uncertainty. *Water Resources Research*, 41(11), 1-15.

- Koch, P. (2010). *Water Sources*. Denver: American Water Works Associations.
- Kolmógorov, A. (1987). Fundamentos de la Teoría de Probabilidades (Traducido por R. Matos. Trabajo Original Publicado en 1973). *Revista Colombiana de Estadística*, 15(16).
- Kretzmann, H., & Van Zyl, J. (2004). Stochastic Analysis of Water Distribution Systems. *World Water and Environmental Resources Congress* (págs. 1-10). Salt Lake City: American Society of Civil Engineers.
- Kroese, D., Taimre, T., & Botev, Z. (2011). *Handbook of Monte Carlo Methods*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Magini, R., Palavicini, I., & Guercio, R. (2008). Spatial and Temporal Properties of Water Demand. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(3).
- Matsumoto, M., & Nishimura, T. (1998). Mersenne Twister: A 623-Dimensionally Equidistributed Uniform Pseudo-Random Number Generator. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 8(1), 3-30.
- Mays, L. (2000). *Water Distribution Systems Handbook*. Nueva York: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Mays, L. (2010). *Water Transmission and Distribution*. Denver: American Water Works Association.
- McGhee, T. (1999). *Abastecimiento de Agua y Alcantarillado*. Colombia: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- McKay, M., Beckman, R., & Conover, W. (2000). A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output From a Computer Code. *Technometrics*, 42(1), 55-61.
- Ministerio de Salud. (2011). *Reglamento de Calidad del Agua para Consumo Humano*. Lima.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006). *Norma OS.030 Almacenamiento de Agua para Consumo Humano*. Lima.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006). *Norma OS.100 Consideraciones Básicas de Diseño de Infraestructura Sanitaria*. Lima.

- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2009). *Norma OS.050 Redes de Distribución de Agua para Consumo Humano*. Lima.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2012). *Norma IS.010 Instalaciones Sanitarias para Edificaciones*. Lima.
- Mizgalewicz, J. (1991). *An analysis of monthly water demand in Phoenix, Arizona*. Austin: The University of Texas at Austin.
- Montgomery, D., & Runger, G. (2014). *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Moosavian, N., & Lence, B. J. (2018). Approximation of Fuzzy Membership Functions in Water Distribution Network Analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(7), 1-8.
- Moughton, L., Buchberger, S., Boccelli, D., Filion, Y., & Karney, B. (2006). Effect of Time Step and Data Aggregation on Cross Correlation of Residential Demands. *8th Annual Symposium on Water Distribution Systems Analysis* (págs. 1-11). Cincinnati: American Society of Civil Engineers.
- Nahmias, S. (1978). Fuzzy Variables. *Fuzzy Sets and Systems*, 1(2), 97-110.
- Omaghomi, T. (2014). *Analysis of Methods for Estimating Water Demand in Buildings*. Cincinnati: University of Cincinnati.
- Omaghomi, T., & Buchberger, S. (2014). Estimating Water Demands in Buildings. *16th Conference on Water Distribution System Analysis (WDSA 2014)* (págs. 1013 - 1022). Bari: American Society of Civil Engineers.
- Palisade Corporation. (2018). *Correlation Tornado versus Regression Tornado*. Recuperado el 2 de Mayo de 2018, de <http://kb.palisade.com/index.php?pg=kb.page&id=1431>
- Papoulis, A., & Pillai, U. (2002). *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. Nueva York: McGraw Hill.
- Regal, A. (2008). *Abastecimiento de Agua y Alcantarillado*. Lima: Editorial Ciencias.
- Revelli, R., & Ridolfi, L. (2002). Fuzzy Approach for Analysis of Pipe Networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), 93-101.

- Rodríguez, P. (2001). *Abastecimiento de Agua*. Oaxaca: Instituto Tecnológico de Oaxaca.
- Rossman, L. (2000). Computer Models/EPANET. En L. Mays, *Water Distribution Systems Handbook* (págs. 12.1-12.23). Nueva York: McGraw-Hill.
- Rossman, L. (2000). *EPANET 2 Users Manual*. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency.
- Sadeghi, N., Fawek, A., & Pedrycz, W. (2010). Fuzzy Monte Carlo Simulation and Risk Assesment in Construction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 25(4).
- Saldarriaga, J., Páez, D., & Vallejo, D. (2014). Modelo Estocástico de demanda de agua en edificaciones y la recolección y procesamiento de datos para su formulación. *Revista de Ingeniería*, 40, 33-38.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., . . . Tarantola, S. (2008). *Global Sensitivity Analysis*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- SEDAPAL. (2014). Estimación Oferta - Demanda de los Servicios. En SEDAPAL, *Plan Maestro de los Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado* (pág. 361). Lima: SEDAPAL.
- SEDAPAL. (15 de Abril de 2016). *Expedientes Técnicos - SEDAPAL*. Recuperado el 30 de Julio de 2018, de <http://www.sedapal.com.pe/expedientes-tecnicos>
- Shaheen, A., Robinson, A., & AbouRizk, S. (2007). Fuzzy Numbers in Cost Range Estimating. *Journal of Construction Engineering and Management*, 133(4), 325-334.
- Shammas, N., & Wang, L. (2016). *Water Engineering: Hydraulics, Distribution and Treatment*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Spiliotis, M., & Tsakiris, G. (2012). Water Distribution Networks Analysis Under Fuzzy Demands. *Civil Engineering and Environmental*, 29(2), 107-122.
- Surendran, S., Tanyimboh, T., & Tabesh, M. (2005). Peaking Demand Factor-based Reliability Analysis of Water Distribution Systems. *Advances in ENgineering Software*, 36(11-12), 789-796.

- Swamee, P., & Sharma, A. (2008). *Design of Water Supply Pipe Networks*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- The Python Software Foundation. (29 de Abril de 2018). 9.6. *random* — *Generate pseudo-random numbers*. Recuperado el 2018 de Mayo de 23, de <https://docs.python.org/2/library/random.html>
- The Python Software Foundation. (30 de Julio de 2018). *EPANETTOOLS 0.9.2*. Recuperado el 30 de Julio de 2018, de <https://pypi.org/project/EPANETTOOLS/>
- The R Foundation. (14 de Febrero de 2018). *Randtoolbox: Toolbox for Pseudo and Quasi Random Number Generation and RNG Tests*. Recuperado el 23 de Mayo de 2018, de <https://cran.r-project.org/web/packages/randtoolbox/index.html>
- The Scipy community. (2018). *Statistical functions (scipy.stats)*. Recuperado el 04 de Mayo de 2018, de <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/stats.html>
- Todini, E., & Pilati, S. (1988). A Gradient Algorithm for the Analysis of Pipe Networks. En B. Coulbeck, & C.-H. Orr, *Computer Applications in Water Supply: Volume 1 - Systems Analysis and Simulation* (págs. 1-20). Taunton: Research Studies Press Ltd.
- Tolson, B., Maier, H., Simpson, A., & Lence, B. (2004). Genetic Algorithms for Realibility-Based Optimization of Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(1).
- Tricarico, C., De Marinis, G., Gargano, R., & Leopardi, A. (2007). Peak Residential Water Demand. *Water Management*, 160(WM2), 115-121.
- Tzatchkov, V., & Alcocer, V. (2016). Modelación de la variación del consumo de agua potable con métodos estocásticos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(III), 115-113.
- Tzatchkov, V., Alcocer-Yamanaka, V., Mejía, E., & Chávez, A. (2014). *Modelación y Diseño de Redes de Agua Potable con Demanda Estocástica Integrados con Sistema de Integración Geográfica*. Ciudad de México: CONACYT – CONAGUA - IMTA.
- Vegas, O., Martínez, F., Alonso, J., & Tzatchkov, V. (2017). *Iniciación a la Programación con la Toolkit de Epanet V2.00.12*. Jiutepec: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

- Vertommen, I., Magini, R., & Da Conceição, M. (2015). Scaling Water Consumption Statistics. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(5), 1-10.
- Vierendel. (2009). *Abastecimiento de Agua y Alcantarillado*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Wichmann, B., & Hill, D. (1982). An Efficient and Portable Pseudo-Random Number Generator. (R. S. Society, Ed.) *Journal of the Royal Statistical Society - Series C (Applied Statistics)*, 31(2), 188-190.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.
- Zadeh, L. A. (1999). Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 100(1), 9-34.
- Zhang, X., Buchberger, S., & Van Zyl, J. (2005). A Theoretical Explanation for Peaking Factors. *World Water and Environmental Resources Congress 2005* (págs. 1-12). Anchorage: American Society of Civil Engineers.
- Zio, E. (2013). *The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis*. Londres: Springer.

ANEXOS

Anexo I: Código fuente del programa

Anexo II: Análisis de variación de demanda nodal

Anexo III: Resultados del análisis determinista - Tuberías

Anexo IV: Resultados del análisis determinista – Nodos

Anexo V: Resultados del análisis probabilístico – Tuberías

Anexo VI: Resultados del análisis probabilístico – Nodos

Anexo VII: Composición y crecimiento poblacional de la red RAP-02

Anexo VIII: Plano de nodos y tuberías de la red RAP-02

Anexo I: Código fuente del programa

Anexo I - Código fuente del programa
Módulo 'water-fmcs' - Página 1 de 6

```
1 # Simulador Difuso de Monte Carlo para WDN
2 import sys
3 import os
4 import numpy as np
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 from epanettools.epanettools import EPANetSimulation, Node, Link, Network,
  Nodes, Links, Patterns, Pattern, Controls, Control
7 from math import log, pow, sqrt, ceil, floor
8 import pandas as pd
9 import matplotlib.colors as colors
10 import matplotlib.cm as cm
11 import pyprind
12
13
14 # Clases - Numeros Difusos trapeciales
15 class Difuso:
16     def __init__(self, a, b, c, d):
17         self.a = a
18         self.b = b
19         self.c = c
20         self.d = d
21         assert a <= b <= c <= d, "Los parámetros tienen que ir de menor a
  mayor"
22
23     def __str__(self):
24         return "{}, {}, {}, {}".format(self.a, self.b, self.c, self.d)
25
26     def __add__(self, other):
27         return Difuso(self.a + other.a, self.b + other.b, self.c + other.c,
  self.d + other.d)
28
29     def __sub__(self, other):
30         return Difuso(self.a - other.a, self.b - other.b, self.c - other.c,
  self.d - other.d)
31
32     def a_cut(self, alpha):
33         assert 0 <= alpha <= 1, "El valor de alpha debe estar en [0,1]"
34         return [self.a + alpha * (self.b - self.a), self.d - alpha * (self.
  d - self.c)]
35
36     def graf(self):
37         plt.figure(1)
38         plt.plot([self.a, self.b, self.c, self.d], [0, 1, 1, 0])
39         plt.fill([self.a, self.b, self.c, self.d], [0, 1, 1, 0], alpha=0.3)
40         plt.subplot(111).set_ylim(0, 1)
41         plt.xlabel("Valor de x")
42         plt.ylabel("Función de membresía")
43         plt.show()
44
45
46 # Definiendo funciones
47 def m_log(m, s):
48     return log(m / (pow(s / m, 2) + 1))
49
50
```

Anexo I - Código fuente del programa
Módulo 'water-fmcs' - Página 2 de 6

```
51 def s_log(m, s):
52     return sqrt(log(pow(s / m, 2) + 1))
53
54
55 def plot_res(e, p, id, nx, prb, psb):
56     # nx es el número de puntos a tomar en el gráfico
57     fig = plt.figure()
58     ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
59     # Definiendo parámetros del gráfico
60     dic_par = {'Q': 'Caudal (l/s)', 'V': 'Velocidad (m/s)', 'P': 'Presión
61     (m)'}
62     a_total = db.Alpha.unique()
63     # Definiendo mapas de colores
64     cmap_t = plt.get_cmap('plasma')
65     cnorm = colors.Normalize(0, max(a_total))
66     cmap_sm = cm.ScalarMappable(norm=cnorm, cmap=cmap_t)
67     # Ploteo iterativo
68     for a in a_total:
69         d_i = db[(db.Elem == e) & (db.Param == p) & (db.ID == id) & (db.
70         Alpha == a) & (db.Niv == 'Inf')].Val
71         d_s = db[(db.Elem == e) & (db.Param == p) & (db.ID == id) & (db.
72         Alpha == a) & (db.Niv == 'Sup')].Val
73         n = d_i.count()
74         pl1 = []
75         pl2 = []
76         bins = np.linspace(min(d_i.min(), d_s.min()), max(d_i.max(), d_s.
77         max()), nx)
78         for x in bins:
79             pl1.append(sum([1 for y in d_i if y >= x]) / n)
80             pl2.append(sum([1 for y in d_s if y >= x]) / n)
81         cval = cmap_sm.to_rgba(a)
82         ax.plot(bins, pl1, color=cval, label='Posib. exced.={}'.format(a))
83         ax.plot(bins, pl2, color=cval)
84         if psb == 1 - a:
85             pr1 = np.percentile(d_i, 100 * prb, axis=0)
86             pr2 = np.percentile(d_s, 100 * prb, axis=0)
87             print("Rango de diseño:", [round(min(pr1, pr2), 4), round(max(pr1, pr2
88             ), 4)])
89             ax.plot([min(pr1, pr2), max(pr1, pr2)], [1 - prb, 1 - prb], color='Red
90             ', marker='o', markersize=3, label="Rango de diseño:")
91             ax.plot([min(pr1, pr2), min(pr1, pr2)], [0, 1 - prb], color='Red',
92             linestyle='--', linewidth=1)
93             ax.plot([max(pr1, pr2), max(pr1, pr2)], [0, 1 - prb], color='Red',
94             linestyle='--', linewidth=1)
95             ax.plot([], [], ' ', label="Probab.={:.0%}/Posib.={:.0%}".format(prb,
96             psb))
97             ax.plot([], [], ' ', label="[{:.2f} - {:.2f}].format(min(pr1, pr2),
98             max(pr1, pr2)))
99
100     ax.set_title(e+"o "+id)
101     ax.set_xlabel(dic_par[p])
102     ax.set_ylabel('Probab. de excedencia')
103     xmin = floor(min(db[(db.Elem == e) & (db.Param == p) & (db.ID == id)].
104     Val))
105     xmax = ceil(max(db[(db.Elem == e) & (db.Param == p) & (db.ID == id)].
```


Anexo I - Código fuente del programa
Módulo 'water-fmcs' - Página 3 de 6

```
94 Val))
95     ax.set_xlim(xmin, xmax)
96     ax.set_ylim(0, 1)
97     ax.set_xticks(np.arange(xmin, xmax + 1, 1))
98     ax.set_xticks(np.arange(xmin, xmax + 1, 0.1), minor=True)
99     ax.set_yticks(np.arange(0, 1.1, 0.1))
100    ax.set_yticks(np.arange(0, 1.1, 0.02), minor=True)
101    ax.grid(which='major', alpha=0.75)
102    ax.grid(which='minor', alpha=0.25)
103    ax.legend()
104    plt.show()
105
106
107 def error(e, p, id, st):
108     # st es la cantidad de elementos en cada grupo
109     pm = np.zeros(10000)
110     a_total = db.Alpha.unique()
111     dp = db[(db.Elem == e) & (db.Param == p) & (db.ID == id)]
112     k = 0
113     i = 0
114     for index, row in dp.iterrows():
115         # print("Fila ", index, " - Row", row)
116         if i <= st-1:
117             pm[k] = pm[k] + row.Val / st
118         else:
119             i = 0
120             k = k+1
121             pm[k] = pm[k] + row.Val / st
122             i = i+1
123     pm = pm[:k, ]
124     print("Error en estimación de {} en {}: {:.4%}".format(p, id, pm.std()
125 / pm.mean()))
126     return pm.std() / pm.mean() / np.sqrt(len(pm))
127
128 # Definiendo variables principales del sistema (a ser modificadas por el
129 usuario si se requiere)
130 ns = 10 # Numero de experimentos aleatorios - Simulacion de monte Carlo
131 archivo_red = 'input/modelo_red.inp' # Nombre del archivo de la red a
132 analizar
133 archivo_temp = 'temp/temp.inp' # Nombre para el archivo de red temporal
134 archivo_dem = 'input/demanda_prob.csv' # Nombre del archivo con los datos
135 de la demanda
136 archivo_resultados = 'output/db_resultados.csv' # Nombre del archivo base
137 de datos de los resultados
138 prb = 0.95 # Nivel de confianza probabilístico
139 psb = 0.90 # Nivel de confianza posibilística
140 n_an = ['J-74', 'J-80', 'J-112', 'J-126', 'J-143', 'J-145', 'J-191', 'J-
141 236', 'J-253', 'J-266',
142         'J-286', 'J-292', 'J-297', 'J-299', 'J-304', 'J-332', 'J-336', 'J-
143 357', 'J-361', 'J-371'] # ID de los nodos a mostrar
144 t_an = ['P-2', 'P-4', 'P-6', 'P-7', 'P-9', 'P-10', 'P-11', 'P-13', 'P-15',
145         'P-17', 'P-20', 'P-22',
146         'P-24', 'P-25', 'P-27', 'P-30', 'P-44', 'P-58', 'P-176', 'P-182']
147 # ID de los tubos a mostrar
```

Anexo I - Código fuente del programa
Módulo 'water-fmcs' - Página 4 de 6

```
140 cor = Difuso(0, 0.5, 0.5, 1) # Valores de la correlación difusa
141 a = [0.1, 0.2, 0.5, 0.8, 0.9] # Valores de a-cut para el análisis Difuso
142 st = 50 # Cantidad de muestras agrupadas para análisis de precisión
143 nx = 100 # Número de puntos a tomar para el gráfico
144
145 # Definiendo el nodo a graficar y analizar error:
146 e = "Tub"
147 p = "Q"
148 id = "P-4"
149
150 # Definiendo variables de uso interno
151 nn = 0 # Numero total de nodos
152 nd = 0 # Numero de nodos con demanda
153 nl = 0 # Numero de tuberias
154 nr = 0 # Numero de reservorios
155 nb = 0 # Numero de bombas
156 nt = 0 # Numero de tanques
157 tt = 0 # Numero de tubos
158
159 # Definiendo tipos de valores en red Epanet
160 de = Node.value_type['EN_DEMAND']
161 pr = Node.value_type['EN_PRESSURE']
162 pa = Node.value_type['EN_PATTERN']
163 h = Node.value_type['EN_HEAD']
164 di = Link.value_type['EN_DIAMETER']
165 l = Link.value_type['EN_LENGTH']
166 v = Link.value_type['EN_VELOCITY']
167 q = Link.value_type['EN_FLOW']
168
169 # Creando la db en pandas
170 ind = ['ID', 'Elem', 'Alpha', 'Niv', 'Param', 'NS', 'Val']
171 db=pd.DataFrame([],columns=ind) # Activar esta linea para un análisis
    desde cero
172 #db = pd.read_csv(archivo_resultados, index_col=0) # Activar esta linea
    para usar una DB existente
173
174 # Leyendo archivo red de Epanet (archivo *.inp)
175 file = os.path.join(os.getcwd(), archivo_red)
176 es = EPANetSimulation(file)
177 es.run()
178
179 # Definiendo tuberias, reservorios y nodos
180 nodos_total = es.network.nodes
181 lineas_total = es.network.links
182
183 # Datos varios
184 for i in np.arange(len(nodos_total)):
185     if nodos_total[i+1].node_type == 0:
186         nn += 1
187     if nodos_total[i+1].node_type == 1:
188         nr += 1
189     if nodos_total[i+1].node_type == 2:
190         nt += 1
191     if nodos_total[i+1].results[de][0] > 0:
192         nd += 1
```

Anexo I - Código fuente del programa
Módulo 'water-fmcs' - Página 5 de 6

```
193
194 for i in np.arange(len(lineas_total)):
195     if lineas_total[i+1].link_type == 1:
196         tt += 1
197
198 print("Nodos en total=", nn)
199 print("Nodos con demanda=", nd)
200 print("Total de tubos=", tt)
201
202 # Definiendo fila de inicio de las demandas en archivo
203 red_ini = open(archivo_red, 'r')
204 fi = 0
205 for line in red_ini:
206     fi += 1
207     if "[DEMANDS]" in line:
208         break
209 fi += 1
210 red_ini.close()
211
212 # Leyendo archivo de demanda
213 temp = np.loadtxt(archivo_dem, delimiter=",", dtype='str')
214 dn = list(temp[:, 0]) # ID de nodo
215 dm = list(map(float, temp[:, 1])) # Media de la demanda nodal
216 dd = list(map(float, temp[:, 2])) # Desviacion estandar de la demanda
    nodal
217
218 # Generando parámetros de distribución normal
219 dm_l = list(map(m_log, dm, dd))
220 dd_l = list(map(s_log, dm, dd))
221 dm_m = np.array(dm_l)
222 dd_m = np.array(dd_l)
223
224 mu = dm_l
225 md = np.identity(nd)
226 for i in np.arange(nd):
227     md[i][i] = dd_l[i]
228
229 # Inicio del proceso SDMC <-----
230 barra = pyprind.ProgBar(ns * len(a) * 2, stream=sys.stdout)
231
232 for niv in a:
233     for co in cor.a_cut(niv):
234         if co == cor.a_cut(niv)[0]:
235             tipo = 'Inf'
236         else:
237             tipo = 'Sup'
238         # -->Simulación de Monte Carlo<--
239
240         # Generación de demanda correlacionada
241         cr = np.full((nd, nd), co)
242         for i in np.arange(nd):
243             cr[i][i] = 1
244         cv = np.dot(np.dot(md, cr), md)
245         rm = np.random.multivariate_normal(mu, cv, size=int(ns / 2))
246         rl = rm
```

Anexo I - Código fuente del programa
Módulo 'water-fmcs' - Página 6 de 6

```
247     for x in rm:
248         d = 2 * dm_m - x
249         d = d[np.newaxis]
250         rl = np.vstack([rl, d])
251     rl = np.exp(rl)
252
253     red_ini = open(archivo_red, 'r')
254     for j in np.arange(ns):
255         # Leyendo demanda en el archivo
256         red_ini.seek(0)
257         red_temp = open(archivo_temp, 'w+')
258         i = 1
259         for line in red_ini:
260             if fi <= i < fi + nd:
261                 red_temp.write("{} {:.6}\n".format(dn[i - fi], rl[j][i
- fi]))
262             else:
263                 red_temp.write(line)
264             i += 1
265         red_temp.close()
266         # Simulación con el archivo temporal
267         file = os.path.join(os.getcwd(), archivo_temp)
268         es = EPANetSimulation(file)
269         es.run()
270         nodos_total = es.network.nodes
271         lineas_total = es.network.links
272         # Guardando datos de nodos en db
273         for nod in n_an:
274             se = pd.Series([nod, 'Nod', niv, tipo, 'P', j, nodos_total
[nod].results[pr][0]], index=ind)
275             db = db.append(se, ignore_index=True)
276         # Guardando datos de tubos en db
277         for tub in t_an:
278             se = pd.Series([tub, 'Tub', niv, tipo, 'Q', j,
lineas_total[tub].results[q][0]], index=ind)
279             db = db.append(se, ignore_index=True)
280             se = pd.Series([tub, 'Tub', niv, tipo, 'V', j,
lineas_total[tub].results[v][0]], index=ind)
281             db = db.append(se, ignore_index=True)
282         # Limpiando
283         es.clean()
284         es._close()
285         barra.update()
286         red_ini.close()
287     barra.stop()
288
289 # Exportando CSV
290 db.to_csv(archivo_resultados)
291
292 # Ploteos
293 plot_res(e, p, id, nx, prb, psb)
294 error(e, p, id, st)
295
296 plt.show()
297
```

Anexo I - Código fuente del programa
Módulo 'plotter.py' - Página 1 de 3

```
1 import pandas as pd
2 import os
3 import numpy as np
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 import matplotlib.colors as colors
6 import matplotlib.cm as cm
7 from epanettools.epanettools import EPANetSimulation, Node, Link, Network,
  Nodes, Links, Patterns, Pattern, Controls, Control
8 from math import ceil, floor
9
10
11 def plot_res(e, p, id, nx, prb, psb):
12     # nx es el número de puntos a tomar en el gráfico
13     fig = plt.figure()
14     ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
15     # Definiendo parámetros del gráfico
16     dic_par = {'Q': 'Caudal (l/s)', 'V': 'Velocidad (m/s)', 'P': 'Presión (
  m)'}
17     a_total = db.Alpha.unique()
18     # Definiendo mapas de colores
19     cmap_t = plt.get_cmap('plasma')
20     cnorm = colors.Normalize(0, max(a_total))
21     cmap_sm = cm.ScalarMappable(norm=cnorm, cmap=cmap_t)
22     # Ploteo iterativo
23     for a in a_total:
24         d_i = db[(db.Elem == e) & (db.Param == p) & (db.ID == id) & (db.
  Alpha == a) & (db.Niv == 'Inf')].Val
25         d_s = db[(db.Elem == e) & (db.Param == p) & (db.ID == id) & (db.
  Alpha == a) & (db.Niv == 'Sup')].Val
26         n = d_i.count()
27         pl1 = []
28         pl2 = []
29         bins = np.linspace(min(d_i.min(), d_s.min()), max(d_i.max(), d_s.
  max()), nx)
30         for x in bins:
31             pl1.append(sum([1 for y in d_i if y >= x]) / n)
32             pl2.append(sum([1 for y in d_s if y >= x]) / n)
33         cval = cmap_sm.to_rgba(a)
34         ax.plot(bins, pl1, color=cval, label='Posib. exced.=' + format(a))
35         ax.plot(bins, pl2, color=cval)
36         if psb == 1-a:
37             pr1 = np.percentile(d_i, 100 * prb, axis=0)
38             pr2 = np.percentile(d_s, 100 * prb, axis=0)
39         print("Rango de diseño:", [round(min(pr1, pr2), 4), round(max(pr1, pr2)
  , 4)])
40
41     if e == 'Nod':
42         dt = nodos_total[id].results[pr][0]
43     else:
44         if p == 'Q':
45             dt = lineas_total[id].results[q][0]
46         else:
47             dt = lineas_total[id].results[v][0]
48     ax.plot([dt, dt], [0, 1], color='Green', linestyle='--', linewidth=3,
  label='Valor determinista')
```

Anexo I - Código fuente del programa
Módulo 'plotter.py' - Página 2 de 3

```
49     ax.plot([min(pr1, pr2), max(pr1, pr2)], [1 - prb, 1 - prb], color='Red',
50            ', marker='o', markersize=3, label="Rango de diseño:")
51     ax.plot([min(pr1, pr2), min(pr1, pr2)], [0, 1 - prb], color='Red',
52            linestyle='--', linewidth=1)
53     ax.plot([max(pr1, pr2), max(pr1, pr2)], [0, 1 - prb], color='Red',
54            linestyle='--', linewidth=1)
55     ax.plot([], [], ' ', label="Prob.={:.0%}/Posib.={:.0%}".format(prb,
56            psb))
57     ax.plot([], [], ' ', label="[{:.2f} - {:.2f}]".format(min(pr1, pr2),
58            max(pr1, pr2)))
59     ax.set_title(e + "o " + id)
60     ax.set_xlabel(dic_par[p])
61     ax.set_ylabel('Probab. de excedencia')
62     xmin = min(db[(db.Elem == e) & (db.Param == p) & (db.ID == id)].Val)
63     xmax = max(db[(db.Elem == e) & (db.Param == p) & (db.ID == id)].Val)
64     if xmax - xmin < 0.1:
65         fe = 100
66     elif xmax - xmin < 1:
67         fe = 10
68     elif xmax - xmin < 10:
69         fe = 1
70     else:
71         fe = 0.5
72     xmin = floor(xmin * fe) / fe
73     xmax = ceil(xmax * fe) / fe
74     ax.set_xticks(np.arange(xmin, xmax + 1, 1 / fe))
75     ax.set_xticks(np.arange(xmin, xmax + 1, 0.1 / fe), minor=True)
76     ax.set_yticks(np.arange(0, 1.1, 0.1))
77     ax.set_yticks(np.arange(0, 1.1, 0.02), minor=True)
78     ax.grid(which='major', alpha=0.75)
79     ax.grid(which='minor', alpha=0.25)
80     ax.set_xlim(xmin, xmax)
81     ax.set_ylim(0, 1)
82     ax.legend()
83     # plt.show()
84     plt.savefig("plots/" + e + " " + id + " - " + p)
85
86 def error(e, p, id, st):
87     # st es la cantidad de elementos en cada grupo
88     pm = np.zeros(10000)
89     a_total = db.Alpha.unique()
90     dp = db[(db.Elem == e) & (db.Param == p) & (db.ID == id)]
91     k = 0
92     i = 0
93     for index, row in dp.iterrows():
94         # print("Fila ", index, " - Row", row)
95         if i <= st - 1:
96             pm[k] = pm[k] + row.Val / st
97         else:
98             i = 0
99             k = k + 1
100            pm[k] = pm[k] + row.Val / st
101            i = i + 1
102            pm = pm[:k, ]
```

Anexo I - Código fuente del programa
Módulo 'plotter.py' - Página 3 de 3

```
99     print("Error en estimación de {} en {}: {:.4%}".format(p, id, pm.std()  
/ pm.mean()))  
100     return pm.std() / pm.mean() / np.sqrt(len(pm))  
101  
102  
103 n_an = ['J-74', 'J-80', 'J-112', 'J-126', 'J-143', 'J-145', 'J-191', 'J-  
236', 'J-253', 'J-266',  
104         'J-286', 'J-292', 'J-297', 'J-299', 'J-304', 'J-332', 'J-336', 'J-  
357', 'J-361', 'J-371'] # ID de los nodos a mostrar  
105 t_an = ['P-2', 'P-4', 'P-6', 'P-7', 'P-9', 'P-10', 'P-11', 'P-13', 'P-15',  
        'P-17', 'P-20', 'P-22',  
106         'P-24', 'P-25', 'P-27', 'P-30', 'P-44', 'P-58', 'P-176', 'P-182']  
        # ID de los tubos a mostrar  
107 e = 'Tub' # Tipo de elemento a analizar (Tub o Nod)  
108 p = 'V' # Parámetro a calcular ('Q', 'V' o 'P')  
109 id = 'P-2' # ID del emento  
110 nx = 200 # Cantidad de puntos a graficar  
111 prb = 0.95 # Nivel de confianza probabilístico  
112 psb = 0.9 # Nivel de confianza posibilístico  
113 st = 50 # Cantidad de muestras agrupadas para análisis de error  
114 archivo_red_det = 'input/modelo_red.inp' # Nombre del modelo determinista  
        de la red  
115 archivo_salida = 'output/db_resultados_total.csv' # Nombre del archivo de  
        DB de salida  
116  
117 db = pd.read_csv(archivo_salida,index_col=0) # Leyendo DB de resultados  
        FMCS  
118  
119 # Definiendo tipos de valores en red Epanet  
120 de =Node.value_type['EN_DEMAND']  
121 pr = Node.value_type['EN_PRESSURE']  
122 pa = Node.value_type['EN_PATTERN']  
123 h = Node.value_type['EN_HEAD']  
124 di = Link.value_type['EN_DIAMETER']  
125 l = Link.value_type['EN_LENGTH']  
126 v = Link.value_type['EN_VELOCITY']  
127 q = Link.value_type['EN_FLOW']  
128 # Leyendo archivo red de Epanet (archivo *.inp)  
129 file = os.path.join(os.getcwd(), archivo_red_det)  
130 es = EPANetSimulation(file)  
131 es.run()  
132 # Definiendo tuberías, reservorios y nodos  
133 nodos_total = es.network.nodes  
134 lineas_total = es.network.links  
135  
136 # plot_res(e,p,id,nx,prb,psb)  
137  
138 for tub in t_an:  
139     plot_res('Tub', 'Q', tub, nx, prb, psb)  
140     # error('Tub', 'Q', tub, st)  
141     plot_res('Tub', 'V', tub, nx, prb, psb)  
142     # error('Tub', 'V', tub, st)  
143 # for nod in n_an:  
144 #     plot_res('Nod', 'P', nod, nx, prb, psb)  
145
```

Anexo II: Análisis de variación de demanda nodal

ANEXO II: ANÁLISIS DE VARIACIÓN DE DEMANDA NODAL

RED: RAP02

Año el horizonte del proye	20	Densidad equivalente	7.76 hab/viv	(Cant. poblac. entre N° de conex. equiv.)
Intervalo de análisis	60 min	Caudal equiv. Por conex	0.01429 l/s	(Caudal medio total entre N° conex. equiv.)
Número de usuarios	13476	Coef. dem. max. Horaria	2	

Ítem	ID Nodo	Tipo de usuario					Conexiones Equivalentes	Población Equivalente	Q PROM. (l/s)	Q.M.H. determinista (l/s)	Factor de ajuste k_{Δ}	Factor de ajuste β	μ_{CP}	CV _{CP}	Q.M.H. probabilíst. [media] (l/s)	Q.M.H. probabilíst. [σ] (l/s)
		Doméstico	Comercial	Estatal	Social	Total										
1	J-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	J-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	J-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	J-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	J-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	J-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	J-14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	J-16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	J-19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	J-22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	J-24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	J-25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	J-33	10.00	-	-	-	10.00	10.00	77.56	0.143	0.286	0.357	2.807	1.408	0.197	0.201	0.028
14	J-34	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
15	J-35	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
16	J-36	-	-	-	3.00	3.00	14.74	114.30	0.211	0.421	0.379	2.851	1.402	0.187	0.295	0.039
17	J-37	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
18	J-38	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
19	J-39	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
20	J-40	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
21	J-41	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
22	J-42	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
23	J-43	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
24	J-45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	J-46	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
26	J-47	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
27	J-48	9.00	-	-	-	9.00	9.00	69.81	0.129	0.257	0.353	2.798	1.414	0.200	0.182	0.026
28	J-49	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
29	J-50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Ítem	ID Nodo	Tipo de usuario					Conexiones Equivalentes	Población Equivalente	Q PROM. (l/s)	Q.M.H. determinista (l/s)	Factor de ajuste k_{Δ}	Factor de ajuste β	μ_{CP}	CV _{CP}	Q.M.H. probabilíst. [media] (l/s)	Q.M.H. probabilíst. [σ] (l/s)
		Doméstico	Comercial	Estatal	Social	Total										
30	J-51	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
31	J-52	1.00	-	-	3.00	4.00	15.74	122.05	0.225	0.450	0.384	2.861	1.405	0.186	0.316	0.042
32	J-53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	J-54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	J-55	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
35	J-56	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
36	J-57	16.00	-	-	-	16.00	16.00	124.10	0.229	0.457	0.385	2.863	1.405	0.185	0.321	0.042
37	J-58	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
38	J-59	11.00	-	-	-	11.00	11.00	85.32	0.157	0.314	0.362	2.816	1.404	0.194	0.221	0.031
39	J-60	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
40	J-61	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
41	J-62	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
42	J-63	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
43	J-64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	J-65	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
45	J-66	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
46	J-67	3.00	-	-	1.00	4.00	7.91	61.37	0.113	0.226	0.348	2.788	1.425	0.205	0.161	0.023
47	J-68	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
48	J-69	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
49	J-70	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
50	J-71	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
51	J-72	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
52	J-73	-	-	-	2.00	2.00	9.82	76.20	0.140	0.281	0.357	2.805	1.409	0.197	0.198	0.028
53	J-74	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
54	J-75	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
55	J-76	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
56	J-77	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
57	J-78	2.00	-	-	1.00	3.00	6.91	53.61	0.099	0.197	0.344	2.779	1.439	0.210	0.142	0.021
58	J-79	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
59	J-80	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
60	J-81	11.00	-	-	-	11.00	11.00	85.32	0.157	0.314	0.362	2.816	1.404	0.194	0.221	0.031
61	J-82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	J-83	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
63	J-84	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
64	J-85	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
65	J-86	2.00	-	-	1.00	3.00	6.91	53.61	0.099	0.197	0.344	2.779	1.439	0.210	0.142	0.021
66	J-87	5.00	-	-	1.00	6.00	9.91	76.88	0.142	0.283	0.357	2.806	1.408	0.197	0.199	0.028

Ítem	ID Nodo	Tipo de usuario					Conexiones Equivalentes	Población Equivalente	Q PROM. (l/s)	Q.M.H. determinista (l/s)	Factor de ajuste k_{Δ}	Factor de ajuste β	μ_{CP}	CV _{CP}	Q.M.H. probabilíst. [media] (l/s)	Q.M.H. probabilíst. [σ] (l/s)
		Doméstico	Comercial	Estatal	Social	Total										
67	J-88	7.00	-	-	1.00	8.00	11.91	92.39	0.170	0.340	0.366	2.825	1.401	0.192	0.239	0.033
68	J-89	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
69	J-90	-	-	-	3.00	3.00	14.74	114.30	0.211	0.421	0.379	2.851	1.402	0.187	0.295	0.039
70	J-91	10.00	-	-	-	10.00	10.00	77.56	0.143	0.286	0.357	2.807	1.408	0.197	0.201	0.028
71	J-92	8.00	-	-	1.00	9.00	12.91	100.15	0.184	0.369	0.371	2.834	1.400	0.190	0.258	0.035
72	J-93	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
73	J-94	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
74	J-95	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
75	J-96	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
76	J-97	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
77	J-98	15.00	-	-	-	15.00	15.00	116.34	0.214	0.429	0.380	2.854	1.403	0.187	0.301	0.040
78	J-99	7.00	-	-	-	7.00	7.00	54.29	0.100	0.200	0.344	2.780	1.437	0.210	0.144	0.021
79	J-100	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
80	J-101	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
81	J-102	7.00	-	-	-	7.00	7.00	54.29	0.100	0.200	0.344	2.780	1.437	0.210	0.144	0.021
82	J-103	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
83	J-104	4.00	-	-	1.00	5.00	8.91	69.12	0.127	0.255	0.353	2.797	1.415	0.201	0.180	0.026
84	J-105	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
85	J-106	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
86	J-107	6.00	-	-	1.00	7.00	10.91	84.64	0.156	0.312	0.361	2.815	1.404	0.194	0.219	0.030
87	J-108	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
88	J-109	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
89	J-110	11.00	-	-	-	11.00	11.00	85.32	0.157	0.314	0.362	2.816	1.404	0.194	0.221	0.031
90	J-111	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
91	J-112	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
92	J-113	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
93	J-114	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
94	J-115	13.00	-	-	-	13.00	13.00	100.83	0.186	0.371	0.371	2.835	1.400	0.190	0.260	0.035
95	J-116	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
96	J-117	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
97	J-118	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
98	J-119	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
99	J-120	12.00	-	-	-	12.00	12.00	93.08	0.171	0.343	0.366	2.825	1.401	0.192	0.240	0.033
100	J-121	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
101	J-122	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
102	J-123	20.00	-	-	-	20.00	20.00	155.13	0.286	0.571	0.405	2.902	1.425	0.181	0.407	0.052
103	J-124	6.00	-	-	1.00	7.00	10.91	84.64	0.156	0.312	0.361	2.815	1.404	0.194	0.219	0.030

Ítem	ID Nodo	Tipo de usuario					Conexiones Equivalentes	Población Equivalente	Q PROM. (l/s)	Q.M.H. determinista (l/s)	Factor de ajuste k_{Δ}	Factor de ajuste β	μ_{CP}	CV _{CP}	Q.M.H. probabilíst. [media] (l/s)	Q.M.H. probabilíst. [σ] (l/s)
		Doméstico	Comercial	Estatal	Social	Total										
104	J-125	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
105	J-126	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
106	J-127	11.00	-	1.00	-	12.00	13.41	104.01	0.192	0.383	0.373	2.839	1.400	0.189	0.268	0.036
107	J-128	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
108	J-129	14.00	-	-	-	14.00	14.00	108.59	0.200	0.400	0.376	2.844	1.401	0.188	0.280	0.038
109	J-130	15.00	-	-	1.00	16.00	19.91	154.44	0.284	0.569	0.404	2.901	1.424	0.181	0.405	0.052
110	J-131	10.00	-	1.00	-	11.00	12.41	96.25	0.177	0.355	0.368	2.829	1.401	0.191	0.248	0.034
111	J-132	12.00	-	-	-	12.00	12.00	93.08	0.171	0.343	0.366	2.825	1.401	0.192	0.240	0.033
112	J-133	14.00	-	-	-	14.00	14.00	108.59	0.200	0.400	0.376	2.844	1.401	0.188	0.280	0.038
113	J-134	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
114	J-135	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
115	J-136	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
116	J-137	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
117	J-138	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
118	J-139	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
119	J-140	-	-	-	-	-	-	-	1.000	2.000	-	-	-	-	2.000	-
120	J-141	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
121	J-142	7.00	-	-	-	7.00	7.00	54.29	0.100	0.200	0.344	2.780	1.437	0.210	0.144	0.021
122	J-143	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
123	J-144	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
124	J-145	15.00	-	-	-	15.00	15.00	116.34	0.214	0.429	0.380	2.854	1.403	0.187	0.301	0.040
125	J-146	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
126	J-147	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
127	J-148	7.00	-	-	-	7.00	7.00	54.29	0.100	0.200	0.344	2.780	1.437	0.210	0.144	0.021
128	J-149	7.00	-	-	-	7.00	7.00	54.29	0.100	0.200	0.344	2.780	1.437	0.210	0.144	0.021
129	J-150	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
130	J-151	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
131	J-152	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
132	J-153	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
133	J-154	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
134	J-155	9.00	-	-	-	9.00	9.00	69.81	0.129	0.257	0.353	2.798	1.414	0.200	0.182	0.026
135	J-156	14.00	-	-	-	14.00	14.00	108.59	0.200	0.400	0.376	2.844	1.401	0.188	0.280	0.038
136	J-157	16.00	-	-	-	16.00	16.00	124.10	0.229	0.457	0.385	2.863	1.405	0.185	0.321	0.042
137	J-158	3.00	-	1.00	-	4.00	5.41	41.96	0.077	0.155	0.337	2.766	1.469	0.223	0.114	0.017
138	J-159	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
139	J-160	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
140	J-161	10.00	-	1.00	-	11.00	12.41	96.25	0.177	0.355	0.368	2.829	1.401	0.191	0.248	0.034

Ítem	ID Nodo	Tipo de usuario					Conexiones Equivalentes	Población Equivalente	Q PROM. (l/s)	Q.M.H. determinista (l/s)	Factor de ajuste k_{Δ}	Factor de ajuste β	μ_{CP}	CV _{CP}	Q.M.H. probabilíst. [media] (l/s)	Q.M.H. probabilíst. [σ] (l/s)
		Doméstico	Comercial	Estatal	Social	Total										
141	J-162	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
142	J-163	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
143	J-164	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
144	J-165	10.00	-	-	-	10.00	10.00	77.56	0.143	0.286	0.357	2.807	1.408	0.197	0.201	0.028
145	J-166	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
146	J-167	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
147	J-168	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
148	J-169	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
149	J-170	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
150	J-171	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
151	J-172	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
152	J-173	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
153	J-174	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
154	J-175	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
155	J-176	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
156	J-177	10.00	-	-	-	10.00	10.00	77.56	0.143	0.286	0.357	2.807	1.408	0.197	0.201	0.028
157	J-178	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
158	J-179	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
159	J-180	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
160	J-181	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
161	J-182	7.00	-	-	-	7.00	7.00	54.29	0.100	0.200	0.344	2.780	1.437	0.210	0.144	0.021
162	J-183	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
163	J-184	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
164	J-185	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
165	J-186	7.00	-	-	-	7.00	7.00	54.29	0.100	0.200	0.344	2.780	1.437	0.210	0.144	0.021
166	J-187	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
167	J-188	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
168	J-189	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
169	J-190	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
170	J-191	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
171	J-192	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
172	J-193	11.00	-	-	-	11.00	11.00	85.32	0.157	0.314	0.362	2.816	1.404	0.194	0.221	0.031
173	J-194	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
174	J-195	7.00	-	-	1.00	8.00	11.91	92.39	0.170	0.340	0.366	2.825	1.401	0.192	0.239	0.033
175	J-196	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
176	J-197	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
177	J-198	9.00	-	-	-	9.00	9.00	69.81	0.129	0.257	0.353	2.798	1.414	0.200	0.182	0.026

Ítem	ID Nodo	Tipo de usuario					Conexiones Equivalentes	Población Equivalente	Q PROM. (l/s)	Q.M.H. determinista (l/s)	Factor de ajuste k_{Δ}	Factor de ajuste β	μ_{CP}	CV _{CP}	Q.M.H. probabilíst. [media] (l/s)	Q.M.H. probabilíst. [σ] (l/s)
		Doméstico	Comercial	Estatal	Social	Total										
178	J-199	12.00	-	-	-	12.00	12.00	93.08	0.171	0.343	0.366	2.825	1.401	0.192	0.240	0.033
179	J-201	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
180	J-202	10.00	-	-	-	10.00	10.00	77.56	0.143	0.286	0.357	2.807	1.408	0.197	0.201	0.028
181	J-203	8.00	-	-	-	8.00	8.00	62.05	0.114	0.229	0.349	2.789	1.424	0.204	0.163	0.023
182	J-204	28.00	-	-	-	28.00	28.00	217.18	0.400	0.800	0.448	2.982	1.528	0.131	0.611	0.052
183	J-205	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
184	J-206	14.00	-	-	-	14.00	14.00	108.59	0.200	0.400	0.376	2.844	1.401	0.188	0.280	0.038
185	J-207	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
186	J-208	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
187	J-209	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
188	J-210	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
189	J-211	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
190	J-212	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
191	J-213	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
192	J-214	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
193	J-215	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
194	J-216	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
195	J-217	10.00	-	-	-	10.00	10.00	77.56	0.143	0.286	0.357	2.807	1.408	0.197	0.201	0.028
196	J-218	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
197	J-219	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
198	J-220	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
199	J-221	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
200	J-222	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
201	J-223	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
202	J-224	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
203	J-225	1.00	-	1.00	-	2.00	3.41	26.45	0.049	0.097	0.329	2.748	1.545	0.256	0.075	0.013
204	J-226	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
205	J-227	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
206	J-228	10.00	-	-	-	10.00	10.00	77.56	0.143	0.286	0.357	2.807	1.408	0.197	0.201	0.028
207	J-229	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
208	J-230	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
209	J-231	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
210	J-232	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
211	J-233	33.00	-	-	-	33.00	33.00	255.96	0.471	0.943	0.475	3.034	1.567	0.126	0.739	0.059
212	J-234	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
213	J-235	7.00	-	-	-	7.00	7.00	54.29	0.100	0.200	0.344	2.780	1.437	0.210	0.144	0.021
214	J-236	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009

Ítem	ID Nodo	Tipo de usuario					Conexiones Equivalentes	Población Equivalente	Q PROM. (l/s)	Q.M.H. determinista (l/s)	Factor de ajuste k_{Δ}	Factor de ajuste β	μ_{CP}	CV_{CP}	Q.M.H. probabilíst. [media] (l/s)	Q.M.H. probabilíst. [σ] (l/s)
		Doméstico	Comercial	Estatal	Social	Total										
215	J-237	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
216	J-238	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
217	J-239	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
218	J-240	1.00	1.00	-	-	2.00	2.73	21.20	0.039	0.078	0.326	2.742	1.588	0.278	0.062	0.011
219	J-241	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
220	J-242	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
221	J-243	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
222	J-244	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
223	J-245	8.00	-	-	-	8.00	8.00	62.05	0.114	0.229	0.349	2.789	1.424	0.204	0.163	0.023
224	J-246	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
225	J-247	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
226	J-248	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
227	J-249	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
228	J-250	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
229	J-251	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
230	J-252	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
231	J-253	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
232	J-254	8.00	-	-	-	8.00	8.00	62.05	0.114	0.229	0.349	2.789	1.424	0.204	0.163	0.023
233	J-255	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
234	J-256	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
235	J-257	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
236	J-258	3.00	1.00	-	-	4.00	4.73	36.72	0.068	0.135	0.335	2.760	1.489	0.231	0.101	0.016
237	J-259	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
238	J-260	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
239	J-261	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
240	J-262	8.00	-	-	-	8.00	8.00	62.05	0.114	0.229	0.349	2.789	1.424	0.204	0.163	0.023
241	J-263	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
242	J-264	8.00	-	-	-	8.00	8.00	62.05	0.114	0.229	0.349	2.789	1.424	0.204	0.163	0.023
243	J-265	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
244	J-266	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
245	J-267	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
246	J-268	9.00	-	-	-	9.00	9.00	69.81	0.129	0.257	0.353	2.798	1.414	0.200	0.182	0.026
247	J-269	10.00	-	-	-	10.00	10.00	77.56	0.143	0.286	0.357	2.807	1.408	0.197	0.201	0.028
248	J-270	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
249	J-271	7.00	-	-	-	7.00	7.00	54.29	0.100	0.200	0.344	2.780	1.437	0.210	0.144	0.021
250	J-272	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
251	J-273	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012

Ítem	ID Nodo	Tipo de usuario					Conexiones Equivalentes	Población Equivalente	Q PROM. (l/s)	Q.M.H. determinista (l/s)	Factor de ajuste k_{Δ}	Factor de ajuste β	μ_{CP}	CV _{CP}	Q.M.H. probabilíst. [media] (l/s)	Q.M.H. probabilíst. [σ] (l/s)
		Doméstico	Comercial	Estatal	Social	Total										
252	J-274	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
253	J-275	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
254	J-276	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
255	J-277	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
256	J-278	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
257	J-279	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
258	J-280	9.00	-	-	-	9.00	9.00	69.81	0.129	0.257	0.353	2.798	1.414	0.200	0.182	0.026
259	J-281	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
260	J-282	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
261	J-283	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
262	J-284	9.00	-	-	-	9.00	9.00	69.81	0.129	0.257	0.353	2.798	1.414	0.200	0.182	0.026
263	J-285	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
264	J-286	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
265	J-287	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
266	J-288	1.00	-	-	-	1.00	1.00	7.76	0.014	0.029	0.319	2.727	1.831	0.473	0.026	0.007
267	J-289	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
268	J-290	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
269	J-291	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
270	J-292	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
271	J-293	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
272	J-294	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
273	J-295	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
274	J-296	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
275	J-297	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
276	J-298	12.00	1.00	-	-	13.00	13.73	106.52	0.196	0.392	0.374	2.842	1.401	0.188	0.275	0.037
277	J-299	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
278	J-300	11.00	-	-	-	11.00	11.00	85.32	0.157	0.314	0.362	2.816	1.404	0.194	0.221	0.031
279	J-301	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
280	J-302	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
281	J-303	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
282	J-304	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
283	J-305	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
284	J-306	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
285	J-307	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
286	J-308	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
287	J-309	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
288	J-310	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012

Ítem	ID Nodo	Tipo de usuario					Conexiones Equivalentes	Población Equivalente	Q PROM. (l/s)	Q.M.H. determinista (l/s)	Factor de ajuste k_{Δ}	Factor de ajuste β	μ_{CP}	CV_{CP}	Q.M.H. probabilíst. [media] (l/s)	Q.M.H. probabilíst. [σ] (l/s)
		Doméstico	Comercial	Estatal	Social	Total										
289	J-311	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
290	J-312	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
291	J-313	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
292	J-314	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
293	J-315	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
294	J-316	2.00	-	-	1.00	3.00	6.91	53.61	0.099	0.197	0.344	2.779	1.439	0.210	0.142	0.021
295	J-317	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
296	J-318	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
297	J-319	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
298	J-320	14.00	-	-	-	14.00	14.00	108.59	0.200	0.400	0.376	2.844	1.401	0.188	0.280	0.038
299	J-321	10.00	-	-	-	10.00	10.00	77.56	0.143	0.286	0.357	2.807	1.408	0.197	0.201	0.028
300	J-322	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
301	J-323	9.00	-	-	-	9.00	9.00	69.81	0.129	0.257	0.353	2.798	1.414	0.200	0.182	0.026
302	J-324	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
303	J-325	7.00	1.00	-	1.00	9.00	13.65	105.84	0.195	0.390	0.374	2.841	1.401	0.189	0.273	0.037
304	J-326	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
305	J-327	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
306	J-328	4.00	-	-	1.00	5.00	8.91	69.12	0.127	0.255	0.353	2.797	1.415	0.201	0.180	0.026
307	J-329	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
308	J-330	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
309	J-331	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
310	J-332	8.00	-	-	-	8.00	8.00	62.05	0.114	0.229	0.349	2.789	1.424	0.204	0.163	0.023
311	J-333	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
312	J-334	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
313	J-335	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
314	J-336	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
315	J-337	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
316	J-338	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
317	J-339	10.00	-	-	-	10.00	10.00	77.56	0.143	0.286	0.357	2.807	1.408	0.197	0.201	0.028
318	J-340	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
319	J-341	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
320	J-342	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
321	J-343	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
322	J-344	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
323	J-345	10.00	-	-	-	10.00	10.00	77.56	0.143	0.286	0.357	2.807	1.408	0.197	0.201	0.028
324	J-346	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
325	J-347	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016

Ítem	ID Nodo	Tipo de usuario					Conexiones Equivalentes	Población Equivalente	Q PROM. (l/s)	Q.M.H. determinista (l/s)	Factor de ajuste k_{Δ}	Factor de ajuste β	μ_{CP}	CV _{CP}	Q.M.H. probabilíst. [media] (l/s)	Q.M.H. probabilíst. [σ] (l/s)
		Doméstico	Comercial	Estatal	Social	Total										
326	J-348	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
327	J-349	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
328	J-350	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
329	J-351	3.00	-	-	-	3.00	3.00	23.27	0.043	0.086	0.327	2.744	1.570	0.268	0.067	0.012
330	J-352	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
331	J-353	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
332	J-354	11.00	-	-	-	11.00	11.00	85.32	0.157	0.314	0.362	2.816	1.404	0.194	0.221	0.031
333	J-355	2.00	-	-	-	2.00	2.00	15.51	0.029	0.057	0.323	2.736	1.656	0.320	0.047	0.009
334	J-356	7.00	-	-	-	7.00	7.00	54.29	0.100	0.200	0.344	2.780	1.437	0.210	0.144	0.021
335	J-357	7.00	-	-	-	7.00	7.00	54.29	0.100	0.200	0.344	2.780	1.437	0.210	0.144	0.021
336	J-358	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
337	J-359	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
338	J-360	9.00	-	-	-	9.00	9.00	69.81	0.129	0.257	0.353	2.798	1.414	0.200	0.182	0.026
339	J-361	9.00	-	-	-	9.00	9.00	69.81	0.129	0.257	0.353	2.798	1.414	0.200	0.182	0.026
340	J-362	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
341	J-363	14.00	-	-	-	14.00	14.00	108.59	0.200	0.400	0.376	2.844	1.401	0.188	0.280	0.038
342	J-364	8.00	1.00	-	-	9.00	9.73	75.50	0.139	0.278	0.356	2.805	1.409	0.198	0.196	0.028
343	J-365	6.00	-	-	-	6.00	6.00	46.54	0.086	0.171	0.340	2.771	1.456	0.217	0.125	0.019
344	J-366	5.00	-	-	1.00	6.00	9.91	76.88	0.142	0.283	0.357	2.806	1.408	0.197	0.199	0.028
345	J-367	4.00	-	-	-	4.00	4.00	31.03	0.057	0.114	0.332	2.753	1.517	0.243	0.087	0.014
346	J-368	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
347	J-369	9.00	-	-	-	9.00	9.00	69.81	0.129	0.257	0.353	2.798	1.414	0.200	0.182	0.026
348	J-370	5.00	-	-	-	5.00	5.00	38.78	0.071	0.143	0.336	2.762	1.481	0.227	0.106	0.016
349	J-371	9.00	-	-	-	9.00	9.00	69.81	0.129	0.257	0.353	2.798	1.414	0.200	0.182	0.026

TOTAL	1,589.00	5.00	5.00	26.00	1,625.00	1,737.43	13,476.00	25.82	51.64					38.57	5.49
-------	----------	------	------	-------	----------	----------	-----------	-------	-------	--	--	--	--	-------	------

Factor por tipo de usuario	
Doméstico	1.00
Comercial	1.73
Industrial	1.56
Social	4.91
Estatal	2.41

Los factores por tipo de usuarios indican la razón entre el caudal promedio por tipo de conexión y el caudal promedio doméstico (17.28 m3/mes/conexión). Se usan para calcular la demanda nodal.

Ítem	ID Nodo	Tipo de usuario					Conexiones Equivalentes	Población Equivalente	Q PROM. (l/s)	Q.M.H. determinista (l/s)	Factor de ajuste k_{Δ}	Factor de ajuste β	μ_{CP}	CV _{CP}	Q.M.H. probabilíst. [media] (l/s)	Q.M.H. probabilíst. [σ] (l/s)
		Doméstico	Comercial	Estatal	Social	Total										

El nodo J-140 es aledaño al cementerio de Pucusana. Se modelará como un valor fijo al no tener mayor información.

Elaborado con información del expediente técnico.

Anexo III: Resultados del análisis determinista - Tuberías

ANEXO III
RESULTADOS DE ANÁLISIS DETERMINISTA - TUBERÍAS

Scenario: Base

Tabla de Red - Líneas

Ítem	ID de tubería	Long. (m)	Diám. (mm)	Área (cm ²)	Material	Coef. de rugosidad	Caudal l/s	Velocidad m/s	Pérd. Unit. m/km
001	P-1	6.29	100.8	79.80	Hierro Dúctil	130	2.37	0.30	1.28
002	P-2	5.47	152.4	182.41	Hierro Dúctil	130	17.60	0.96	6.97
003	P-3	8.14	100.8	79.80	Hierro Dúctil	130	3.59	0.45	2.75
004	P-4	5.95	255.4	512.31	Hierro Dúctil	130	51.64	1.01	4.14
005	P-5	9.33	100.8	79.80	Hierro Dúctil	130	1.11	0.14	0.32
006	P-6	8.34	152.4	182.41	Hierro Dúctil	130	7.86	0.43	1.57
007	P-7	8.26	100.8	79.80	Hierro Dúctil	130	7.93	0.99	11.92
008	P-8	12.07	100.8	79.80	Hierro Dúctil	130	4.35	0.54	3.92
009	P-9	13.75	152.4	182.41	Hierro Dúctil	130	8.00	0.44	1.62
010	P-10	10.39	100.8	79.80	Hierro Dúctil	130	10.80	1.35	21.12
011	P-11	13.97	152.4	182.41	Hierro Dúctil	130	21.69	1.19	10.27
012	P-12	14.49	100.8	79.80	Hierro Dúctil	130	3.83	0.48	3.10
013	P-13	18.25	100.8	79.80	Hierro Dúctil	130	8.10	1.01	12.40
014	P-14	37.88	100.8	79.80	Hierro Dúctil	130	4.39	0.55	4.00
015	P-15	62.24	255.4	512.31	Hierro Dúctil	130	43.64	0.85	3.03
016	P-16	95.95	100.8	79.80	Hierro Dúctil	130	0.14	0.02	0.01
017	P-17	94.98	152.4	182.41	Hierro Dúctil	130	9.50	0.52	2.22
018	P-18	125.88	152.4	182.41	Hierro Dúctil	130	5.49	0.30	0.80
019	P-19	147.10	152.4	182.41	Hierro Dúctil	130	5.10	0.28	0.70
020	P-20	160.50	204.2	327.49	Hierro Dúctil	130	39.29	1.20	7.42
021	P-21	240.52	100.8	79.80	Hierro Dúctil	130	1.51	0.19	0.56
022	P-22	210.50	152.4	182.41	Hierro Dúctil	130	21.69	1.19	10.27
023	P-23	322.10	100.8	79.80	Hierro Dúctil	130	0.40	0.05	0.05
024	P-24	357.29	152.4	182.41	Hierro Dúctil	130	17.60	0.96	6.97
025	P-25	365.52	100.8	79.80	Hierro Dúctil	130	10.90	1.37	21.49
026	P-26	456.38	100.8	79.80	Hierro Dúctil	130	2.97	0.37	1.94
027	P-27	449.65	152.4	182.41	Hierro Dúctil	130	7.86	0.43	1.57
028	P-28	992.65	152.4	182.41	Hierro Dúctil	130	1.66	0.09	0.09
029	P-29	1,006.40	152.4	182.41	Hierro Dúctil	130	5.10	0.28	0.70
030	P-30	1,230.67	152.4	182.41	Hierro Dúctil	130	8.00	0.44	1.62
031	P-32	1.40	99.4	77.60	PVC	140	1.58	0.20	0.56
032	P-33	1.69	99.4	77.60	PVC	140	3.94	0.51	3.04
033	P-34	2.13	99.4	77.60	PVC	140	1.25	0.16	0.36
034	P-35	4.08	99.4	77.60	PVC	140	1.17	0.15	0.32
035	P-36	4.30	99.4	77.60	PVC	140	0.97	0.12	0.23
036	P-37	4.47	99.4	77.60	PVC	140	0.66	0.08	0.11
037	P-38	5.97	99.4	77.60	PVC	140	4.39	0.57	3.73
038	P-39	6.50	99.4	77.60	PVC	140	0.75	0.10	0.14
039	P-40	7.02	99.4	77.60	PVC	140	0.91	0.12	0.20
040	P-41	11.46	99.4	77.60	PVC	140	2.37	0.31	1.19
041	P-42	7.82	99.4	77.60	PVC	140	3.44	0.44	2.37
042	P-43	8.84	99.4	77.60	PVC	140	4.35	0.56	3.66
043	P-44	12.24	99.4	77.60	PVC	140	7.93	1.02	11.12
044	P-45	10.14	99.4	77.60	PVC	140	0.57	0.07	0.08
045	P-46	10.42	99.4	77.60	PVC	140	4.81	0.62	4.41
046	P-47	15.06	99.4	77.60	PVC	140	0.11	0.01	-
047	P-48	15.33	99.4	77.60	PVC	140	3.11	0.40	1.97
048	P-49	15.61	99.4	77.60	PVC	140	0.20	0.03	0.01
049	P-50	15.99	99.4	77.60	PVC	140	3.31	0.43	2.20
050	P-51	16.30	99.4	77.60	PVC	140	1.62	0.21	0.59
051	P-52	23.02	99.4	77.60	PVC	140	2.97	0.38	1.81

Ítem	ID de tubería	Long. (m)	Diám. (mm)	Área (cm ²)	Material	Coef. de rugosidad	Caudal l/s	Velocidad m/s	Pérd. Unit. m/km
052	P-53	17.00	99.4	77.60	PVC	140	0.05	0.01	-
053	P-54	18.68	99.4	77.60	PVC	140	0.80	0.10	0.16
054	P-55	18.70	99.4	77.60	PVC	140	1.57	0.20	0.55
055	P-56	19.04	99.4	77.60	PVC	140	1.40	0.18	0.45
056	P-57	19.81	99.4	77.60	PVC	140	1.29	0.17	0.39
057	P-58	25.78	99.4	77.60	PVC	140	10.80	1.39	19.71
058	P-59	20.97	99.4	77.60	PVC	140	0.59	0.08	0.09
059	P-60	21.86	99.4	77.60	PVC	140	0.43	0.06	0.05
060	P-61	22.00	99.4	77.60	PVC	140	0.58	0.07	0.09
061	P-62	22.24	99.4	77.60	PVC	140	0.22	0.03	0.01
062	P-63	22.71	99.4	77.60	PVC	140	0.57	0.07	0.08
063	P-64	22.84	99.4	77.60	PVC	140	0.29	0.04	0.02
064	P-65	23.09	99.4	77.60	PVC	140	1.00	0.13	0.24
065	P-66	23.11	99.4	77.60	PVC	140	0.91	0.12	0.20
066	P-67	23.15	99.4	77.60	PVC	140	1.09	0.14	0.28
067	P-68	35.03	99.4	77.60	PVC	140	1.23	0.16	0.35
068	P-69	24.48	99.4	77.60	PVC	140	0.80	0.10	0.16
069	P-70	33.37	99.4	77.60	PVC	140	2.90	0.37	1.73
070	P-71	25.16	99.4	77.60	PVC	140	0.82	0.11	0.17
071	P-72	25.25	99.4	77.60	PVC	140	0.28	0.04	0.02
072	P-73	25.35	99.4	77.60	PVC	140	0.55	0.07	0.08
073	P-74	25.71	99.4	77.60	PVC	140	1.09	0.14	0.28
074	P-75	26.00	99.4	77.60	PVC	140	1.24	0.16	0.36
075	P-76	36.07	99.4	77.60	PVC	140	0.97	0.13	0.23
076	P-77	26.62	99.4	77.60	PVC	140	5.06	0.65	4.85
077	P-78	26.79	99.4	77.60	PVC	140	0.09	0.01	-
078	P-79	36.19	99.4	77.60	PVC	140	0.92	0.12	0.21
079	P-80	27.82	99.4	77.60	PVC	140	0.39	0.05	0.04
080	P-81	27.55	99.4	77.60	PVC	140	1.38	0.18	0.43
081	P-82	27.63	99.4	77.60	PVC	140	5.26	0.68	5.20
082	P-83	27.85	99.4	77.60	PVC	140	0.49	0.06	0.06
083	P-84	28.34	99.4	77.60	PVC	140	0.57	0.07	0.09
084	P-85	28.50	99.4	77.60	PVC	140	0.75	0.10	0.14
085	P-86	30.76	99.4	77.60	PVC	140	0.92	0.12	0.21
086	P-87	30.90	99.4	77.60	PVC	140	0.40	0.05	0.04
087	P-88	32.34	99.4	77.60	PVC	140	0.67	0.09	0.11
088	P-89	43.35	99.4	77.60	PVC	140	0.89	0.11	0.19
089	P-90	33.19	99.4	77.60	PVC	140	0.18	0.02	0.01
090	P-91	34.45	99.4	77.60	PVC	140	1.21	0.16	0.34
091	P-92	35.29	99.4	77.60	PVC	140	0.90	0.12	0.20
092	P-93	35.37	99.4	77.60	PVC	140	1.62	0.21	0.59
093	P-94	40.35	99.4	77.60	PVC	140	1.00	0.13	0.24
094	P-95	38.46	99.4	77.60	PVC	140	1.34	0.17	0.41
095	P-96	39.00	99.4	77.60	PVC	140	0.43	0.06	0.05
096	P-97	47.23	99.4	77.60	PVC	140	2.37	0.31	1.19
097	P-98	40.24	99.4	77.60	PVC	140	0.95	0.12	0.22
098	P-99	42.29	99.4	77.60	PVC	140	0.95	0.12	0.22
099	P-100	41.13	99.4	77.60	PVC	140	2.17	0.28	1.01
100	P-101	41.57	99.4	77.60	PVC	140	1.77	0.23	0.70
101	P-102	43.45	99.4	77.60	PVC	140	0.60	0.08	0.09
102	P-103	52.43	99.4	77.60	PVC	140	0.79	0.10	0.16
103	P-104	44.60	99.4	77.60	PVC	140	2.28	0.29	1.11
104	P-105	44.82	99.4	77.60	PVC	140	0.53	0.07	0.07
105	P-106	47.17	99.4	77.60	PVC	140	0.09	0.01	-
106	P-107	62.37	99.4	77.60	PVC	140	0.46	0.06	0.06
107	P-108	50.28	99.4	77.60	PVC	140	0.65	0.08	0.11

Ítem	ID de tubería	Long. (m)	Diám. (mm)	Área (cm ²)	Material	Coef. de rugosidad	Caudal l/s	Velocidad m/s	Pérd. Unit. m/km
108	P-109	51.46	99.4	77.60	PVC	140	1.04	0.13	0.26
109	P-110	55.97	99.4	77.60	PVC	140	0.74	0.10	0.14
110	P-111	51.80	99.4	77.60	PVC	140	0.47	0.06	0.06
111	P-112	56.00	99.4	77.60	PVC	140	1.51	0.19	0.52
112	P-113	79.98	99.4	77.60	PVC	140	0.94	0.12	0.21
113	P-114	56.09	99.4	77.60	PVC	140	0.23	0.03	0.02
114	P-115	66.04	99.4	77.60	PVC	140	1.21	0.16	0.34
115	P-116	67.24	99.4	77.60	PVC	140	0.59	0.08	0.09
116	P-117	78.79	99.4	77.60	PVC	140	0.06	0.01	-
117	P-118	67.52	99.4	77.60	PVC	140	1.92	0.25	0.81
118	P-119	76.03	99.4	77.60	PVC	140	2.59	0.33	1.40
119	P-120	68.97	99.4	77.60	PVC	140	0.34	0.04	0.03
120	P-121	100.49	99.4	77.60	PVC	140	2.25	0.29	1.08
121	P-122	73.96	99.4	77.60	PVC	140	1.24	0.16	0.36
122	P-123	71.74	99.4	77.60	PVC	140	2.50	0.32	1.31
123	P-124	97.55	99.4	77.60	PVC	140	0.94	0.12	0.21
124	P-125	73.91	99.4	77.60	PVC	140	1.06	0.14	0.27
125	P-126	75.41	99.4	77.60	PVC	140	2.91	0.37	1.74
126	P-127	78.15	99.4	77.60	PVC	140	0.67	0.09	0.12
127	P-128	78.69	99.4	77.60	PVC	140	1.02	0.13	0.25
128	P-129	89.40	99.4	77.60	PVC	140	0.14	0.02	0.01
129	P-130	106.00	99.4	77.60	PVC	140	0.36	0.05	0.04
130	P-131	88.68	99.4	77.60	PVC	140	0.29	0.04	0.02
131	P-132	93.37	99.4	77.60	PVC	140	2.60	0.34	1.41
132	P-133	93.65	99.4	77.60	PVC	140	1.75	0.23	0.68
133	P-134	189.02	99.4	77.60	PVC	140	0.71	0.09	0.13
134	P-135	103.09	99.4	77.60	PVC	140	1.43	0.18	0.46
135	P-136	104.41	99.4	77.60	PVC	140	1.63	0.21	0.60
136	P-137	104.49	99.4	77.60	PVC	140	0.24	0.03	0.02
137	P-138	104.64	99.4	77.60	PVC	140	0.07	0.01	-
138	P-139	104.81	99.4	77.60	PVC	140	0.70	0.09	0.12
139	P-140	104.99	99.4	77.60	PVC	140	0.89	0.11	0.19
140	P-141	106.06	99.4	77.60	PVC	140	1.15	0.15	0.31
141	P-142	126.13	99.4	77.60	PVC	140	2.43	0.31	1.25
142	P-143	193.80	99.4	77.60	PVC	140	1.35	0.17	0.42
143	P-144	237.85	99.4	77.60	PVC	140	1.45	0.19	0.48
144	P-145	240.35	99.4	77.60	PVC	140	0.92	0.12	0.21
145	P-146	240.46	99.4	77.60	PVC	140	1.11	0.14	0.29
146	P-147	243.67	99.4	77.60	PVC	140	1.09	0.14	0.28
147	P-148	243.84	99.4	77.60	PVC	140	1.08	0.14	0.28
148	P-149	611.20	99.4	77.60	PVC	140	2.00	0.26	0.87
149	P-150	7.75	144.6	164.22	PVC	140	1.66	0.10	0.10
150	P-151	24.72	99.4	77.60	PVC	140	5.27	0.68	5.22
151	P-152	24.80	99.4	77.60	PVC	140	1.40	0.18	0.45
152	P-153	36.80	99.4	77.60	PVC	140	1.00	0.13	0.24
153	P-154	76.58	99.4	77.60	PVC	140	1.54	0.20	0.54
154	P-155	49.00	99.4	77.60	PVC	140	0.09	0.01	-
155	P-156	53.20	99.4	77.60	PVC	140	0.66	0.08	0.11
156	P-157	55.62	99.4	77.60	PVC	140	4.20	0.54	3.43
157	P-158	60.66	99.4	77.60	PVC	140	1.48	0.19	0.49
158	P-159	68.33	99.4	77.60	PVC	140	4.60	0.59	4.06
159	P-160	134.84	99.4	77.60	PVC	140	0.23	0.03	0.02
160	P-161	146.07	99.4	77.60	PVC	140	0.26	0.03	0.02
161	P-162	280.84	99.4	77.60	PVC	140	0.46	0.06	0.06
162	P-163	23.38	81.4	52.04	PVC	140	0.27	0.05	0.06
163	P-164	26.90	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01

Ítem	ID de tubería	Long. (m)	Diám. (mm)	Área (cm ²)	Material	Coef. de rugosidad	Caudal l/s	Velocidad m/s	Pérd. Unit. m/km
164	P-165	27.51	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
165	P-166	47.13	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
166	P-167	65.38	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
167	P-168	2.24	99.4	77.60	PVC	140	2.03	0.26	0.89
168	P-169	3.64	99.4	77.60	PVC	140	4.36	0.56	3.68
169	P-170	3.79	99.4	77.60	PVC	140	1.16	0.15	0.32
170	P-171	5.04	99.4	77.60	PVC	140	1.11	0.14	0.29
171	P-172	6.42	99.4	77.60	PVC	140	0.48	0.06	0.06
172	P-173	6.60	99.4	77.60	PVC	140	1.73	0.22	0.67
173	P-174	9.56	99.4	77.60	PVC	140	1.11	0.14	0.29
174	P-175	10.75	99.4	77.60	PVC	140	3.83	0.49	2.89
175	P-176	13.67	99.4	77.60	PVC	140	8.10	1.04	11.58
176	P-177	11.65	99.4	77.60	PVC	140	2.33	0.30	1.15
177	P-178	14.55	99.4	77.60	PVC	140	4.53	0.58	3.95
178	P-179	14.84	99.4	77.60	PVC	140	4.65	0.60	4.14
179	P-180	15.91	99.4	77.60	PVC	140	0.62	0.08	0.10
180	P-181	16.01	99.4	77.60	PVC	140	1.40	0.18	0.45
181	P-182	17.54	99.4	77.60	PVC	140	8.01	1.03	11.35
182	P-183	19.75	99.4	77.60	PVC	140	1.62	0.21	0.59
183	P-184	20.52	99.4	77.60	PVC	140	2.20	0.28	1.04
184	P-185	20.56	99.4	77.60	PVC	140	3.99	0.51	3.12
185	P-186	21.84	99.4	77.60	PVC	140	1.41	0.18	0.46
186	P-187	24.62	99.4	77.60	PVC	140	5.04	0.65	4.81
187	P-188	22.90	99.4	77.60	PVC	140	4.43	0.57	3.78
188	P-189	24.01	99.4	77.60	PVC	140	1.22	0.16	0.35
189	P-190	25.34	99.4	77.60	PVC	140	7.14	0.92	9.18
190	P-191	26.38	99.4	77.60	PVC	140	3.26	0.42	2.14
191	P-192	28.00	99.4	77.60	PVC	140	3.54	0.46	2.50
192	P-193	35.15	99.4	77.60	PVC	140	0.40	0.05	0.04
193	P-194	32.33	99.4	77.60	PVC	140	1.27	0.16	0.37
194	P-195	33.87	99.4	77.60	PVC	140	7.34	0.95	9.66
195	P-196	33.85	99.4	77.60	PVC	140	1.49	0.19	0.50
196	P-197	38.15	99.4	77.60	PVC	140	3.59	0.46	2.57
197	P-198	40.02	99.4	77.60	PVC	140	4.73	0.61	4.28
198	P-199	42.51	99.4	77.60	PVC	140	3.83	0.49	2.89
199	P-200	39.50	99.4	77.60	PVC	140	0.14	0.02	0.01
200	P-201	41.56	99.4	77.60	PVC	140	0.66	0.08	0.11
201	P-202	42.64	99.4	77.60	PVC	140	1.33	0.17	0.41
202	P-203	67.38	99.4	77.60	PVC	140	4.00	0.52	3.13
203	P-204	69.10	99.4	77.60	PVC	140	3.36	0.43	2.27
204	P-205	93.23	99.4	77.60	PVC	140	0.89	0.11	0.19
205	P-206	117.07	99.4	77.60	PVC	140	7.74	1.00	10.65
206	P-207	79.29	99.4	77.60	PVC	140	1.54	0.20	0.53
207	P-208	88.98	99.4	77.60	PVC	140	1.02	0.13	0.25
208	P-209	93.94	99.4	77.60	PVC	140	2.11	0.27	0.96
209	P-210	89.78	99.4	77.60	PVC	140	1.59	0.21	0.57
210	P-211	91.56	99.4	77.60	PVC	140	0.23	0.03	0.02
211	P-212	133.29	99.4	77.60	PVC	140	0.40	0.05	0.04
212	P-213	175.20	99.4	77.60	PVC	140	1.60	0.21	0.57
213	P-214	194.71	99.4	77.60	PVC	140	0.46	0.06	0.06
214	P-215	281.87	99.4	77.60	PVC	140	0.83	0.11	0.17
215	P-216	5.42	81.4	52.04	PVC	140	0.03	0.01	-
216	P-217	6.05	81.4	52.04	PVC	140	0.03	0.01	-
217	P-218	6.85	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
218	P-219	7.32	81.4	52.04	PVC	140	0.69	0.13	0.32
219	P-220	9.41	81.4	52.04	PVC	140	0.13	0.02	0.01

Ítem	ID de tubería	Long. (m)	Diám. (mm)	Área (cm2)	Material	Coef. de rugosidad	Caudal l/s	Velocidad m/s	Pérd. Unit. m/km
220	P-221	9.56	81.4	52.04	PVC	140	0.03	0.01	-
221	P-222	9.56	81.4	52.04	PVC	140	0.03	0.01	-
222	P-223	11.85	81.4	52.04	PVC	140	0.32	0.06	0.08
223	P-224	12.33	81.4	52.04	PVC	140	0.03	0.01	-
224	P-225	12.26	81.4	52.04	PVC	140	0.03	0.01	-
225	P-226	12.66	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
226	P-227	12.94	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
227	P-228	13.37	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
228	P-229	13.47	81.4	52.04	PVC	140	0.10	0.02	0.01
229	P-230	17.56	81.4	52.04	PVC	140	0.11	0.02	0.01
230	P-231	14.70	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
231	P-232	14.97	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
232	P-233	15.44	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
233	P-234	15.58	81.4	52.04	PVC	140	0.28	0.05	0.06
234	P-235	16.84	81.4	52.04	PVC	140	0.94	0.18	0.57
235	P-236	16.01	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
236	P-237	16.26	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
237	P-238	16.47	81.4	52.04	PVC	140	0.36	0.07	0.10
238	P-239	21.53	81.4	52.04	PVC	140	0.08	0.02	0.01
239	P-240	23.93	81.4	52.04	PVC	140	0.11	0.02	0.01
240	P-241	17.45	81.4	52.04	PVC	140	0.60	0.11	0.24
241	P-242	17.98	81.4	52.04	PVC	140	0.13	0.02	0.01
242	P-243	21.59	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
243	P-244	19.77	81.4	52.04	PVC	140	0.77	0.15	0.39
244	P-245	19.18	81.4	52.04	PVC	140	0.65	0.13	0.29
245	P-246	19.24	81.4	52.04	PVC	140	0.14	0.03	0.02
246	P-247	19.29	81.4	52.04	PVC	140	1.76	0.34	1.82
247	P-248	19.73	81.4	52.04	PVC	140	0.03	0.01	-
248	P-249	26.13	81.4	52.04	PVC	140	0.05	0.01	-
249	P-250	20.06	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
250	P-251	20.72	81.4	52.04	PVC	140	0.04	0.01	-
251	P-252	24.21	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
252	P-253	20.87	81.4	52.04	PVC	140	0.18	0.04	0.03
253	P-254	21.38	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
254	P-255	21.44	81.4	52.04	PVC	140	0.03	0.01	-
255	P-256	21.43	81.4	52.04	PVC	140	0.12	0.02	0.01
256	P-257	21.66	81.4	52.04	PVC	140	0.14	0.03	0.02
257	P-258	21.65	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
258	P-259	21.82	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
259	P-260	22.13	81.4	52.04	PVC	140	0.46	0.09	0.15
260	P-261	23.02	81.4	52.04	PVC	140	0.19	0.04	0.03
261	P-262	22.42	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
262	P-263	22.77	81.4	52.04	PVC	140	0.23	0.04	0.04
263	P-264	22.94	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
264	P-265	23.78	81.4	52.04	PVC	140	0.59	0.11	0.24
265	P-266	23.96	81.4	52.04	PVC	140	0.08	0.02	0.01
266	P-267	24.69	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
267	P-268	24.81	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
268	P-269	24.92	81.4	52.04	PVC	140	0.03	0.01	-
269	P-270	25.90	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
270	P-271	25.40	81.4	52.04	PVC	140	0.42	0.08	0.13
271	P-272	35.41	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
272	P-273	25.53	81.4	52.04	PVC	140	0.27	0.05	0.06
273	P-274	25.66	81.4	52.04	PVC	140	0.14	0.03	0.02
274	P-275	25.68	81.4	52.04	PVC	140	0.40	0.08	0.12
275	P-276	33.47	81.4	52.04	PVC	140	0.51	0.10	0.18

Ítem	ID de tubería	Long. (m)	Diám. (mm)	Área (cm2)	Material	Coef. de rugosidad	Caudal l/s	Velocidad m/s	Pérd. Unit. m/km
276	P-277	26.71	81.4	52.04	PVC	140	0.52	0.10	0.19
277	P-278	26.18	81.4	52.04	PVC	140	0.54	0.10	0.20
278	P-279	26.57	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
279	P-280	40.81	81.4	52.04	PVC	140	0.03	0.01	-
280	P-281	28.68	81.4	52.04	PVC	140	0.38	0.07	0.11
281	P-282	27.33	81.4	52.04	PVC	140	0.03	0.01	-
282	P-283	28.72	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
283	P-284	33.56	81.4	52.04	PVC	140	0.43	0.08	0.13
284	P-285	28.42	81.4	52.04	PVC	140	0.44	0.08	0.14
285	P-286	28.91	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
286	P-287	29.16	81.4	52.04	PVC	140	1.27	0.24	0.99
287	P-288	29.17	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
288	P-289	29.30	81.4	52.04	PVC	140	0.22	0.04	0.04
289	P-290	29.35	81.4	52.04	PVC	140	0.15	0.03	0.02
290	P-291	29.46	81.4	52.04	PVC	140	0.04	0.01	-
291	P-292	29.50	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
292	P-293	41.28	81.4	52.04	PVC	140	0.58	0.11	0.23
293	P-294	30.61	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
294	P-295	44.45	81.4	52.04	PVC	140	0.03	0.01	-
295	P-296	32.07	81.4	52.04	PVC	140	0.21	0.04	0.03
296	P-297	46.32	81.4	52.04	PVC	140	0.23	0.04	0.04
297	P-298	32.50	81.4	52.04	PVC	140	0.30	0.06	0.07
298	P-299	33.79	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
299	P-300	34.02	81.4	52.04	PVC	140	0.14	0.03	0.02
300	P-301	35.06	81.4	52.04	PVC	140	0.75	0.14	0.37
301	P-302	35.41	81.4	52.04	PVC	140	0.69	0.13	0.32
302	P-303	37.75	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
303	P-304	50.18	81.4	52.04	PVC	140	0.11	0.02	0.01
304	P-305	38.18	81.4	52.04	PVC	140	0.16	0.03	0.02
305	P-306	40.23	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
306	P-307	52.29	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
307	P-308	38.58	81.4	52.04	PVC	140	0.25	0.05	0.05
308	P-309	39.73	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
309	P-310	52.32	81.4	52.04	PVC	140	0.17	0.03	0.02
310	P-311	53.79	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
311	P-312	41.22	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
312	P-313	41.75	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
313	P-314	42.01	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
314	P-315	43.67	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
315	P-316	43.56	81.4	52.04	PVC	140	0.11	0.02	0.01
316	P-317	43.75	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
317	P-318	56.86	81.4	52.04	PVC	140	0.26	0.05	0.05
318	P-319	50.01	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
319	P-320	47.92	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
320	P-321	45.45	81.4	52.04	PVC	140	0.11	0.02	0.01
321	P-322	45.69	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
322	P-323	45.97	81.4	52.04	PVC	140	0.68	0.13	0.32
323	P-324	69.11	81.4	52.04	PVC	140	0.40	0.08	0.12
324	P-325	46.96	81.4	52.04	PVC	140	0.20	0.04	0.03
325	P-326	47.15	81.4	52.04	PVC	140	0.74	0.14	0.36
326	P-327	47.36	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
327	P-328	48.19	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
328	P-329	48.20	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
329	P-330	48.57	81.4	52.04	PVC	140	0.17	0.03	0.02
330	P-331	67.65	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
331	P-332	49.31	81.4	52.04	PVC	140	1.26	0.24	0.97

Ítem	ID de tubería	Long. (m)	Diám. (mm)	Área (cm2)	Material	Coef. de rugosidad	Caudal l/s	Velocidad m/s	Pérd. Unit. m/km
332	P-333	49.48	81.4	52.04	PVC	140	0.13	0.03	0.02
333	P-334	49.88	81.4	52.04	PVC	140	0.26	0.05	0.05
334	P-335	52.13	81.4	52.04	PVC	140	0.11	0.02	0.01
335	P-336	52.56	81.4	52.04	PVC	140	0.23	0.04	0.04
336	P-337	62.35	81.4	52.04	PVC	140	0.54	0.10	0.20
337	P-338	52.79	81.4	52.04	PVC	140	0.11	0.02	0.01
338	P-339	65.66	81.4	52.04	PVC	140	0.11	0.02	0.01
339	P-340	56.82	81.4	52.04	PVC	140	0.25	0.05	0.05
340	P-341	53.31	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
341	P-342	55.18	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
342	P-343	56.65	81.4	52.04	PVC	140	0.17	0.03	0.02
343	P-344	57.77	81.4	52.04	PVC	140	0.58	0.11	0.23
344	P-345	57.99	81.4	52.04	PVC	140	0.23	0.04	0.04
345	P-346	58.53	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
346	P-347	58.67	81.4	52.04	PVC	140	0.37	0.07	0.10
347	P-348	59.12	81.4	52.04	PVC	140	0.32	0.06	0.08
348	P-349	59.58	81.4	52.04	PVC	140	0.25	0.05	0.05
349	P-350	60.11	81.4	52.04	PVC	140	0.11	0.02	0.01
350	P-351	59.91	81.4	52.04	PVC	140	0.26	0.05	0.05
351	P-352	59.93	81.4	52.04	PVC	140	0.28	0.05	0.06
352	P-353	66.30	81.4	52.04	PVC	140	0.18	0.03	0.03
353	P-354	61.02	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
354	P-355	67.65	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
355	P-356	65.62	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
356	P-357	61.60	81.4	52.04	PVC	140	0.15	0.03	0.02
357	P-358	62.92	81.4	52.04	PVC	140	0.11	0.02	0.01
358	P-359	63.40	81.4	52.04	PVC	140	0.45	0.09	0.15
359	P-360	63.35	81.4	52.04	PVC	140	0.11	0.02	0.01
360	P-361	108.16	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
361	P-362	84.68	81.4	52.04	PVC	140	0.29	0.05	0.06
362	P-363	67.02	81.4	52.04	PVC	140	0.11	0.02	0.01
363	P-364	67.82	81.4	52.04	PVC	140	0.74	0.14	0.36
364	P-365	68.03	81.4	52.04	PVC	140	0.28	0.05	0.06
365	P-366	68.81	81.4	52.04	PVC	140	0.14	0.03	0.02
366	P-367	69.07	81.4	52.04	PVC	140	0.22	0.04	0.04
367	P-368	69.97	81.4	52.04	PVC	140	0.29	0.05	0.06
368	P-369	72.63	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
369	P-370	87.14	81.4	52.04	PVC	140	0.56	0.11	0.22
370	P-371	72.98	81.4	52.04	PVC	140	0.14	0.03	0.02
371	P-372	92.66	81.4	52.04	PVC	140	0.66	0.13	0.29
372	P-373	76.73	81.4	52.04	PVC	140	0.02	-	-
373	P-374	77.93	81.4	52.04	PVC	140	0.14	0.03	0.02
374	P-375	79.18	81.4	52.04	PVC	140	0.14	0.03	0.02
375	P-376	80.00	81.4	52.04	PVC	140	0.14	0.03	0.02
376	P-377	80.79	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
377	P-378	82.07	81.4	52.04	PVC	140	0.11	0.02	0.01
378	P-379	88.65	81.4	52.04	PVC	140	0.17	0.03	0.02
379	P-380	88.82	81.4	52.04	PVC	140	0.31	0.06	0.07
380	P-381	89.64	81.4	52.04	PVC	140	0.06	0.01	-
381	P-382	103.05	81.4	52.04	PVC	140	0.20	0.04	0.03
382	P-383	92.04	81.4	52.04	PVC	140	0.20	0.04	0.03
383	P-384	92.39	81.4	52.04	PVC	140	0.83	0.16	0.46
384	P-385	111.51	81.4	52.04	PVC	140	2.13	0.41	2.57
385	P-386	101.27	81.4	52.04	PVC	140	0.11	0.02	0.01
386	P-387	99.27	81.4	52.04	PVC	140	0.11	0.02	0.01
387	P-388	119.65	81.4	52.04	PVC	140	0.73	0.14	0.35

Ítem	ID de tubería	Long. (m)	Diám. (mm)	Área (cm ²)	Material	Coef. de rugosidad	Caudal l/s	Velocidad m/s	Pérd. Unit. m/km
388	P-389	119.63	81.4	52.04	PVC	140	0.90	0.17	0.52
389	P-390	100.52	81.4	52.04	PVC	140	0.11	0.02	0.01
390	P-391	100.69	81.4	52.04	PVC	140	0.86	0.16	0.48
391	P-392	104.26	81.4	52.04	PVC	140	0.26	0.05	0.05
392	P-393	105.21	81.4	52.04	PVC	140	0.35	0.07	0.09
393	P-394	109.67	81.4	52.04	PVC	140	0.25	0.05	0.05
394	P-395	121.77	81.4	52.04	PVC	140	0.14	0.03	0.02
395	P-396	114.22	81.4	52.04	PVC	140	0.40	0.08	0.12
396	P-397	115.90	81.4	52.04	PVC	140	0.28	0.05	0.06
397	P-398	117.34	81.4	52.04	PVC	140	0.17	0.03	0.02
398	P-399	149.75	81.4	52.04	PVC	140	0.28	0.05	0.06
399	P-400	122.54	81.4	52.04	PVC	140	0.44	0.08	0.14
400	P-401	124.30	81.4	52.04	PVC	140	0.47	0.09	0.16
401	P-402	148.61	81.4	52.04	PVC	140	0.09	0.02	0.01
402	P-403	183.95	81.4	52.04	PVC	140	0.11	0.02	0.01
403	P-404	143.40	81.4	52.04	PVC	140	0.14	0.03	0.02
404	P-405	207.58	81.4	52.04	PVC	140	0.50	0.10	0.17
405	P-406	162.93	81.4	52.04	PVC	140	0.26	0.05	0.05
406	P-407	173.45	81.4	52.04	PVC	140	0.32	0.06	0.08
407	P-408	182.50	81.4	52.04	PVC	140	0.22	0.04	0.04
408	P-409	205.24	81.4	52.04	PVC	140	0.14	0.03	0.02
409	P-410	208.77	81.4	52.04	PVC	140	0.42	0.08	0.13
410	P-411	245.00	81.4	52.04	PVC	140	0.26	0.05	0.05
411	P-412	236.11	81.4	52.04	PVC	140	0.81	0.16	0.43
412	P-413	277.31	81.4	52.04	PVC	140	0.49	0.09	0.17

Resumen de tuberías por material		
Tipo	Longitud (m)	%
Hierro dúctil	6,490.91	22.91%
PVC	21,835.91	77.09%
Total	28,326.82	

Resumen de tuberías por diámetro			
Diámetro		Longitud (m)	%
81.4	mm	11,534.37	40.72%
99.4	mm	10,293.79	36.34%
100.8	mm	1,605.57	5.67%
144.6	mm	7.75	0.03%
152.4	mm	4,656.65	16.44%
204.2	mm	160.50	0.57%
255.4	mm	68.19	0.24%
Total		28,326.82	

Notas:

Las tuberías resaltadas (amarillo) fueron consideradas para el análisis probabilístico.

Anexo IV: Resultados del análisis determinista – Nodos

ANEXO IV
RESULTADOS DE ANÁLISIS DETERMINISTA - NODOS

Scenario: Base

Tabla de Red - Nodos

Ítem	ID de nudo	Cota de terreno (m)	Presión (mH ₂ O)	Cota piezométrica (m)	Demanda nodal (l/s)
001	J-33	60.18	23.89	84.07	0.29
002	J-34	49.33	36.27	85.60	0.11
003	J-35	48.77	36.83	85.60	0.09
004	J-36	51.89	33.80	85.69	0.42
005	J-37	52.04	33.65	85.69	0.14
006	J-38	80.04	40.67	120.71	0.06
007	J-39	80.21	40.50	120.71	0.09
008	J-40	51.20	34.40	85.60	0.03
009	J-41	52.05	33.54	85.59	0.09
010	J-42	51.00	34.65	85.65	0.06
011	J-43	49.34	36.31	85.65	0.14
012	J-44	30.99	24.11	55.10	-
013	J-45	29.16	25.94	55.10	-
014	J-46	41.68	44.25	85.93	0.09
015	J-47	62.80	22.86	85.66	0.14
016	J-48	63.50	22.16	85.66	0.26
017	J-49	58.25	27.68	85.93	0.06
018	J-50	60.93	25.01	85.94	-
019	J-51	36.97	27.73	64.70	0.17
020	J-52	92.69	28.24	120.93	0.45
021	J-53	91.66	29.29	120.95	-
022	J-54	36.89	25.26	62.15	-
023	J-55	56.84	28.75	85.59	0.11
024	J-56	57.26	28.33	85.59	0.03
025	J-57	37.00	25.09	62.09	0.46
026	J-58	69.00	16.96	85.96	0.06
027	J-59	36.61	25.51	62.12	0.31
028	J-60	9.90	45.15	55.05	0.06
029	J-61	9.24	45.81	55.05	0.03
030	J-62	34.00	27.88	61.88	0.11
031	J-63	33.86	27.98	61.84	0.17
032	J-64	24.77	28.31	53.08	-
033	J-65	24.79	28.28	53.07	0.06
034	J-66	9.46	45.59	55.05	0.06
035	J-67	86.93	33.80	120.73	0.23
036	J-68	91.75	28.98	120.73	0.09
037	J-69	61.01	24.66	85.67	0.03
038	J-70	44.97	40.96	85.93	0.09
039	J-71	76.73	44.00	120.73	0.09
040	J-72	84.05	36.70	120.75	0.06
041	J-73	50.91	34.93	85.84	0.28
042	J-74	73.34	47.35	120.69	0.06

Ítem	ID de nudo	Cota de terreno (m)	Presión (mH ₂ O)	Cota piezométrica (m)	Demanda nodal (l/s)
043	J-75	84.52	36.19	120.71	0.14
044	J-76	98.44	22.31	120.75	0.09
045	J-77	65.78	19.88	85.66	0.09
046	J-78	83.14	37.78	120.92	0.20
047	J-79	94.76	26.19	120.95	0.17
048	J-80	72.41	48.49	120.90	0.14
049	J-81	52.15	33.44	85.59	0.31
050	J-82	54.09	31.51	85.60	-
051	J-83	53.37	32.56	85.93	0.09
052	J-84	53.96	31.72	85.68	0.17
053	J-85	58.19	27.74	85.93	0.06
054	J-86	102.40	18.49	120.89	0.20
055	J-87	40.11	21.69	61.80	0.28
056	J-88	35.00	26.78	61.78	0.34
057	J-89	77.43	43.27	120.70	0.09
058	J-90	87.61	33.11	120.72	0.42
059	J-91	61.59	24.07	85.66	0.29
060	J-92	46.44	15.49	61.93	0.37
061	J-93	46.78	15.14	61.92	0.11
062	J-94	21.95	31.03	52.98	0.03
063	J-95	21.56	31.42	52.98	0.03
064	J-96	48.74	36.83	85.57	0.17
065	J-97	53.03	32.55	85.58	0.11
066	J-98	50.87	34.84	85.71	0.43
067	J-99	57.89	27.75	85.64	0.20
068	J-100	67.00	18.66	85.66	0.06
069	J-101	39.42	22.48	61.90	-
070	J-102	65.34	20.32	85.66	0.20
071	J-103	46.91	38.67	85.58	0.14
072	J-104	53.84	31.79	85.63	0.26
073	J-105	25.99	29.10	55.09	0.11
074	J-106	46.41	39.22	85.63	0.09
075	J-107	49.25	36.39	85.64	0.31
076	J-108	44.86	40.76	85.62	0.03
077	J-109	65.86	19.77	85.63	0.09
078	J-110	65.95	19.69	85.64	0.31
079	J-111	87.16	33.57	120.73	0.11
080	J-112	6.29	48.75	55.04	0.14
081	J-113	44.58	41.03	85.61	0.06
082	J-114	48.61	37.00	85.61	0.11
083	J-115	56.30	29.32	85.62	0.37
084	J-116	8.53	46.52	55.05	0.17
085	J-117	54.43	31.19	85.62	0.06
086	J-118	24.06	31.02	55.08	0.09
087	J-119	43.86	41.84	85.70	0.09
088	J-120	41.29	20.66	61.95	0.34
089	J-121	33.08	28.72	61.80	0.17
090	J-122	75.68	45.23	120.91	0.09

Ítem	ID de nudo	Cota de terreno (m)	Presión (mH ₂ O)	Cota piezométrica (m)	Demanda nodal (l/s)
091	J-123	34.68	27.10	61.78	0.57
092	J-124	32.19	29.58	61.77	0.31
093	J-125	70.44	15.20	85.64	0.14
094	J-126	5.52	49.52	55.04	0.11
095	J-127	35.64	26.40	62.04	0.38
096	J-128	89.20	31.52	120.72	0.14
097	J-129	41.88	43.91	85.79	0.40
098	J-130	32.36	29.61	61.97	0.57
099	J-131	56.81	28.77	85.58	0.36
100	J-132	59.26	26.40	85.66	0.34
101	J-133	56.60	29.06	85.66	0.40
102	J-134	19.56	33.38	52.94	0.11
103	J-135	20.05	32.89	52.94	0.17
104	J-136	15.71	37.16	52.87	0.06
105	J-137	15.05	37.82	52.87	0.09
106	J-138	12.27	40.52	52.79	-
107	J-139	11.32	41.49	52.81	0.03
108	J-140	7.54	44.71	52.25	2.00
109	J-141	47.88	35.67	83.55	0.14
110	J-142	43.10	40.57	83.67	0.20
111	J-143	16.80	47.80	64.60	0.17
112	J-144	23.68	40.95	64.63	0.09
113	J-145	16.67	47.93	64.60	0.43
114	J-146	37.70	26.98	64.68	0.06
115	J-147	44.27	20.42	64.69	0.09
116	J-148	37.73	26.97	64.70	0.20
117	J-149	38.58	44.28	82.86	0.20
118	J-150	50.05	33.02	83.07	0.17
119	J-151	42.44	41.26	83.70	0.14
120	J-152	62.62	20.56	83.18	0.17
121	J-153	48.81	34.62	83.43	0.17
122	J-154	34.83	29.81	64.64	0.11
123	J-155	44.94	43.43	88.37	0.26
124	J-156	50.85	37.53	88.38	0.40
125	J-157	28.55	36.06	64.61	0.46
126	J-158	57.05	26.40	83.45	0.16
127	J-159	60.65	22.92	83.57	0.09
128	J-160	46.29	39.24	85.53	0.06
129	J-161	51.29	34.25	85.54	0.36
130	J-162	60.26	23.58	83.84	0.03
131	J-163	60.90	22.94	83.84	0.09
132	J-164	46.93	38.60	85.53	0.09
133	J-165	49.79	32.61	82.40	0.29
134	J-166	49.86	32.54	82.40	0.11
135	J-167	50.59	33.16	83.75	0.11
136	J-168	52.26	31.51	83.77	0.09
137	J-169	3.35	42.33	45.68	-
138	J-170	3.36	42.31	45.67	0.09

Ítem	ID de nudo	Cota de terreno (m)	Presión (mH ₂ O)	Cota piezométrica (m)	Demanda nodal (l/s)
139	J-171	58.51	23.80	82.31	0.14
140	J-172	57.75	24.56	82.31	0.09
141	J-173	54.98	27.32	82.30	0.09
142	J-174	55.20	27.10	82.30	0.06
143	J-175	49.40	34.33	83.73	0.06
144	J-176	52.32	31.41	83.73	0.03
145	J-177	25.04	31.20	56.24	0.29
146	J-178	47.51	41.10	88.61	0.09
147	J-179	46.92	39.13	86.05	0.06
148	J-180	47.92	40.67	88.59	0.11
149	J-181	68.30	15.62	83.92	-
150	J-182	61.18	21.15	82.33	0.20
151	J-183	47.97	37.88	85.85	0.17
152	J-184	51.69	30.73	82.42	0.11
153	J-185	50.88	37.72	88.60	0.09
154	J-186	2.68	43.01	45.69	0.20
155	J-187	64.12	20.20	84.32	0.11
156	J-188	40.79	41.67	82.46	0.14
157	J-189	35.81	46.71	82.52	-
158	J-190	46.22	36.06	82.28	0.14
159	J-191	39.57	49.00	88.57	0.06
160	J-192	46.10	42.47	88.57	0.11
161	J-193	60.99	23.64	84.63	0.31
162	J-194	11.81	33.92	45.73	0.17
163	J-195	2.08	43.65	45.73	0.34
164	J-196	1.29	44.59	45.88	0.14
165	J-197	40.34	42.31	82.65	0.09
166	J-198	44.88	19.82	64.70	0.26
167	J-199	55.16	33.23	88.39	0.34
168	J-201	51.31	37.28	88.59	0.14
169	J-202	1.93	43.72	45.65	0.29
170	J-203	70.12	18.44	88.56	0.23
171	J-204	52.44	36.00	88.44	0.80
172	J-205	48.29	33.99	82.28	0.17
173	J-206	2.72	38.10	40.82	0.40
174	J-207	43.31	38.97	82.28	0.03
175	J-208	64.25	21.42	85.67	0.03
176	J-209	9.57	36.14	45.71	0.09
177	J-210	10.55	35.16	45.71	0.06
178	J-211	55.05	30.88	85.93	0.14
179	J-212	81.83	38.88	120.71	0.03
180	J-213	78.89	41.82	120.71	-
181	J-214	47.15	38.89	86.04	0.03
182	J-215	43.90	41.68	85.58	0.03
183	J-216	44.97	40.61	85.58	0.06
184	J-217	40.95	21.00	61.95	0.29
185	J-218	44.39	37.89	82.28	0.03
186	J-219	59.22	23.19	82.41	0.06

Ítem	ID de nudo	Cota de terreno (m)	Presión (mH ₂ O)	Cota piezométrica (m)	Demanda nodal (l/s)
187	J-220	59.22	23.20	82.42	0.03
188	J-221	43.73	38.66	82.39	0.06
189	J-222	51.66	30.63	82.29	0.06
190	J-223	52.68	29.61	82.29	0.09
191	J-224	45.23	40.35	85.58	0.06
192	J-225	45.88	39.97	85.85	0.10
193	J-226	21.36	43.25	64.61	0.11
194	J-227	23.50	22.23	45.73	0.06
195	J-228	26.50	19.23	45.73	0.29
196	J-229	49.84	33.89	83.73	0.06
197	J-230	77.61	43.09	120.70	0.09
198	J-231	75.56	45.13	120.69	0.06
199	J-232	97.10	23.63	120.73	-
200	J-233	49.80	32.61	82.41	0.94
201	J-234	45.83	40.07	85.90	0.06
202	J-235	48.19	37.72	85.91	0.20
203	J-236	70.78	50.12	120.90	0.06
204	J-237	2.46	43.18	45.64	0.14
205	J-238	4.59	41.05	45.64	0.06
206	J-239	5.89	39.75	45.64	0.03
207	J-240	2.32	43.31	45.63	0.08
208	J-241	49.28	36.33	85.61	0.11
209	J-242	11.68	34.03	45.71	0.14
210	J-243	1.99	43.64	45.63	-
211	J-244	50.99	34.67	85.66	0.09
212	J-245	48.84	34.92	83.76	0.23
213	J-246	43.57	18.34	61.91	0.03
214	J-247	100.08	20.65	120.73	0.14
215	J-248	3.00	42.68	45.68	0.06
216	J-249	68.80	16.86	85.66	0.09
217	J-250	2.31	43.32	45.63	0.06
218	J-251	48.52	37.04	85.56	0.14
219	J-252	45.00	40.54	85.54	0.09
220	J-253	73.18	12.50	85.68	0.06
221	J-254	67.22	18.45	85.67	0.23
222	J-255	48.36	13.57	61.93	0.03
223	J-256	64.99	20.60	85.59	0.14
224	J-257	63.03	22.55	85.58	0.14
225	J-258	43.35	40.40	83.75	0.14
226	J-259	45.27	37.79	83.06	0.06
227	J-260	43.77	41.79	85.56	0.09
228	J-261	27.81	28.44	56.25	0.06
229	J-262	29.86	26.39	56.25	0.23
230	J-263	23.08	31.99	55.07	0.03
231	J-264	55.61	29.97	85.58	0.23
232	J-265	76.89	43.81	120.70	0.14
233	J-266	73.74	11.93	85.67	0.09
234	J-267	62.79	25.84	88.63	0.06

Ítem	ID de nudo	Cota de terreno (m)	Presión (mH ₂ O)	Cota piezométrica (m)	Demanda nodal (l/s)
235	J-268	28.68	27.55	56.23	0.26
236	J-269	35.49	20.76	56.25	0.29
237	J-270	38.94	22.85	61.79	0.17
238	J-271	38.62	23.18	61.80	0.20
239	J-272	30.50	34.14	64.64	0.06
240	J-273	102.68	18.06	120.74	0.09
241	J-274	57.27	28.67	85.94	0.06
242	J-275	57.25	28.40	85.65	0.14
243	J-276	64.20	18.23	82.43	0.06
244	J-277	62.55	23.14	85.69	0.03
245	J-278	10.48	44.58	55.06	0.03
246	J-279	59.12	24.78	83.90	0.09
247	J-280	15.67	30.04	45.71	0.26
248	J-281	54.79	33.79	88.58	-
249	J-282	65.74	22.88	88.62	0.09
250	J-283	72.70	13.26	85.96	0.06
251	J-284	54.18	31.38	85.56	0.26
252	J-285	44.34	41.21	85.55	0.11
253	J-286	71.10	13.23	84.33	0.09
254	J-287	2.50	43.13	45.63	0.06
255	J-288	1.50	44.13	45.63	0.03
256	J-289	91.27	29.45	120.72	0.06
257	J-290	46.07	15.74	61.81	0.09
258	J-291	62.69	22.93	85.62	0.14
259	J-292	78.62	9.97	88.59	0.09
260	J-293	47.98	37.65	85.63	0.09
261	J-294	50.33	32.34	82.67	0.09
262	J-295	12.07	33.59	45.66	0.11
263	J-296	53.31	30.46	83.77	0.09
264	J-297	72.97	12.68	85.65	0.09
265	J-298	41.67	20.28	61.95	0.39
266	J-299	73.20	12.76	85.96	0.06
267	J-300	62.61	25.80	88.41	0.31
268	J-301	50.05	32.24	82.29	0.09
269	J-302	16.93	28.77	45.70	0.06
270	J-303	58.46	27.49	85.95	0.09
271	J-304	109.13	11.62	120.75	0.09
272	J-305	17.29	37.78	55.07	0.09
273	J-306	61.08	24.53	85.61	0.11
274	J-307	87.34	33.37	120.71	0.06
275	J-308	13.15	41.90	55.05	0.11
276	J-309	17.21	37.85	55.06	0.06
277	J-310	20.50	34.58	55.08	0.09
278	J-311	67.39	18.56	85.95	0.11
279	J-312	37.22	17.89	55.11	0.09
280	J-313	44.17	17.65	61.82	0.17
281	J-314	18.29	27.44	45.73	0.17
282	J-315	18.38	27.35	45.73	0.17

Ítem	ID de nudo	Cota de terreno (m)	Presión (mH ₂ O)	Cota piezométrica (m)	Demanda nodal (l/s)
283	J-316	60.04	25.81	85.85	0.20
284	J-317	48.09	16.61	64.70	0.06
285	J-318	18.50	27.22	45.72	0.09
286	J-319	71.46	14.22	85.68	0.09
287	J-320	50.51	35.15	85.66	0.40
288	J-321	59.57	26.08	85.65	0.29
289	J-322	46.07	39.57	85.64	0.17
290	J-323	45.46	16.34	61.80	0.26
291	J-324	33.54	28.24	61.78	0.17
292	J-325	48.87	36.76	85.63	0.39
293	J-326	61.07	22.39	83.46	0.11
294	J-327	83.55	37.15	120.70	0.11
295	J-328	59.75	24.01	83.76	0.26
296	J-329	77.74	43.16	120.90	0.09
297	J-330	74.66	46.25	120.91	0.09
298	J-331	23.99	21.70	45.69	0.17
299	J-332	72.47	13.19	85.66	0.23
300	J-333	50.28	32.00	82.28	0.11
301	J-334	44.71	37.56	82.27	0.09
302	J-335	52.66	33.00	85.66	0.11
303	J-336	73.13	47.56	120.69	0.09
304	J-337	50.82	31.46	82.28	0.09
305	J-338	72.13	13.51	85.64	0.09
306	J-339	49.33	39.22	88.55	0.29
307	J-340	45.20	43.34	88.54	0.11
308	J-341	71.14	14.53	85.67	0.11
309	J-342	2.75	43.13	45.88	0.09
310	J-343	45.55	40.05	85.60	0.11
311	J-344	62.25	20.26	82.51	0.14
312	J-345	58.75	23.81	82.56	0.29
313	J-346	44.08	40.51	84.59	0.09
314	J-347	48.69	36.92	85.61	0.14
315	J-348	53.43	32.49	85.92	0.14
316	J-349	60.07	25.86	85.93	0.14
317	J-350	44.79	37.49	82.28	0.14
318	J-351	23.55	29.44	52.99	0.09
319	J-352	82.50	38.35	120.85	0.11
320	J-353	75.49	45.42	120.91	0.17
321	J-354	44.39	17.53	61.92	0.31
322	J-355	23.27	29.71	52.98	0.06
323	J-356	44.03	18.09	62.12	0.20
324	J-357	72.69	12.99	85.68	0.20
325	J-358	2.33	43.35	45.68	0.11
326	J-359	33.59	31.04	64.63	0.11
327	J-360	30.00	31.99	61.99	0.26
328	J-361	73.09	12.76	85.85	0.26
329	J-362	20.99	34.08	55.07	0.14
330	J-363	42.86	18.91	61.77	0.40

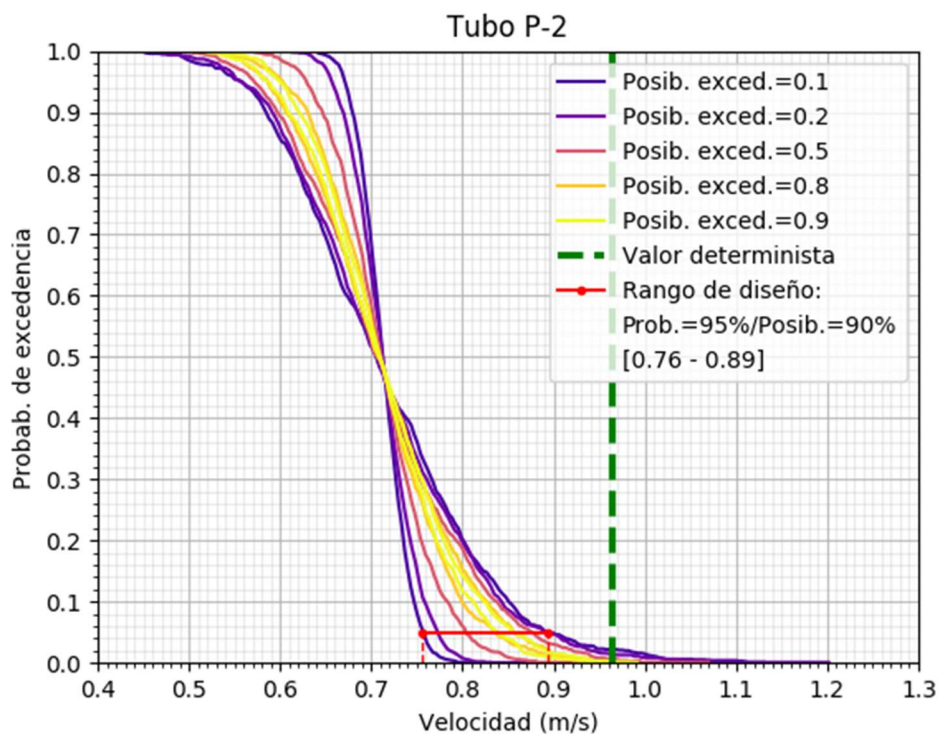
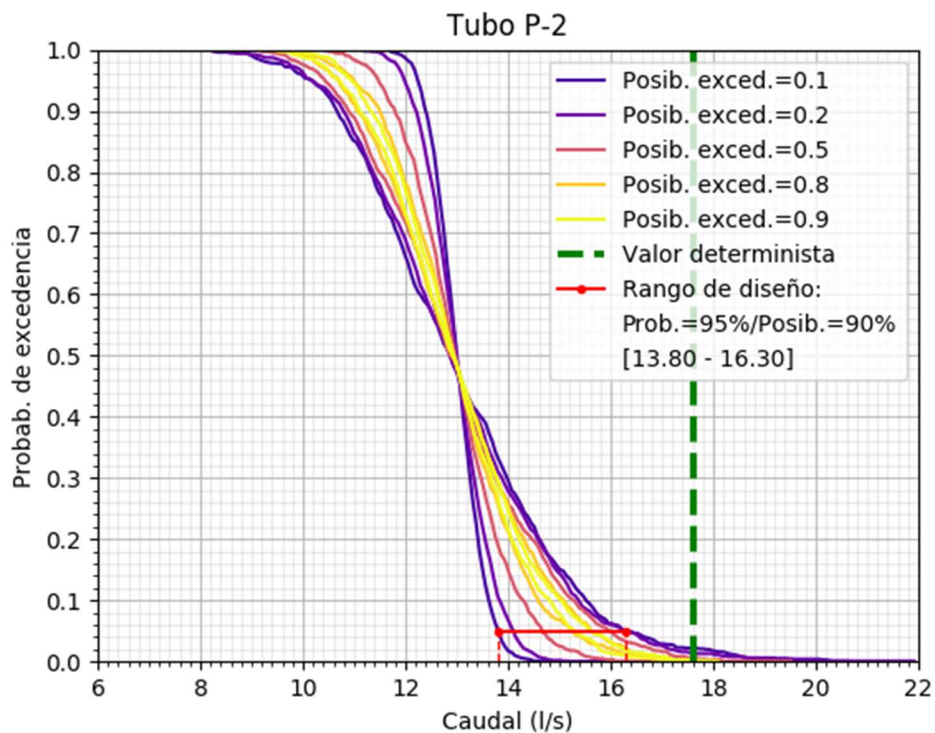
Ítem	ID de nudo	Cota de terreno (m)	Presión (mH ₂ O)	Cota piezométrica (m)	Demanda nodal (l/s)
331	J-364	45.39	16.56	61.95	0.28
332	J-365	45.39	16.57	61.96	0.17
333	J-366	49.54	36.01	85.55	0.28
334	J-367	28.10	24.97	53.07	0.11
335	J-368	26.00	26.95	52.95	0.14
336	J-369	27.09	28.00	55.09	0.26
337	J-370	102.60	16.62	119.22	0.14
338	J-371	39.50	49.02	88.52	0.26

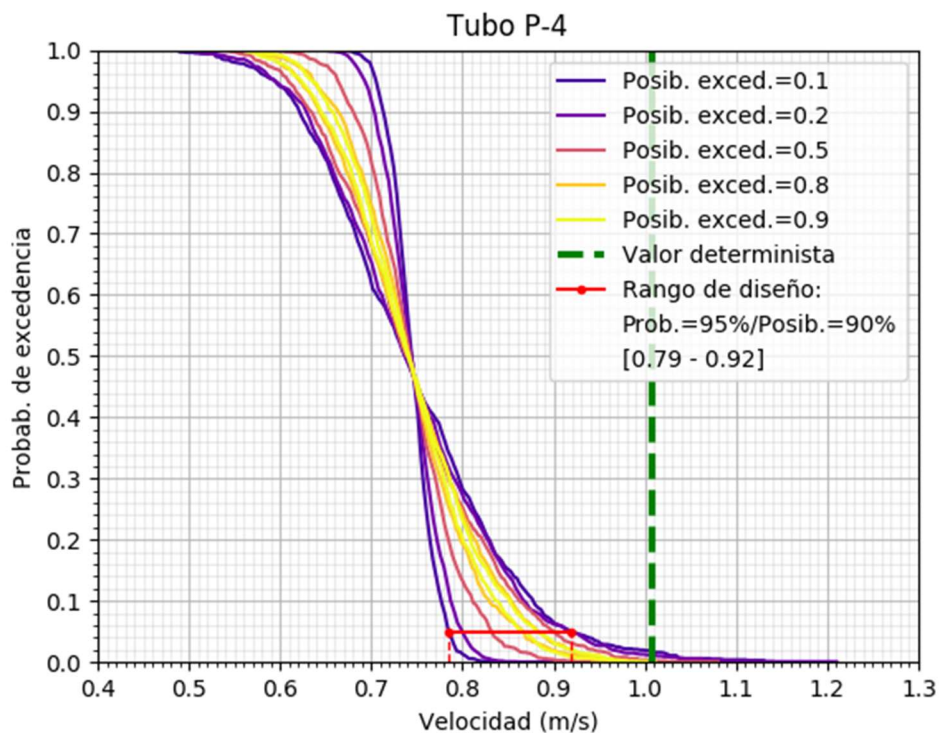
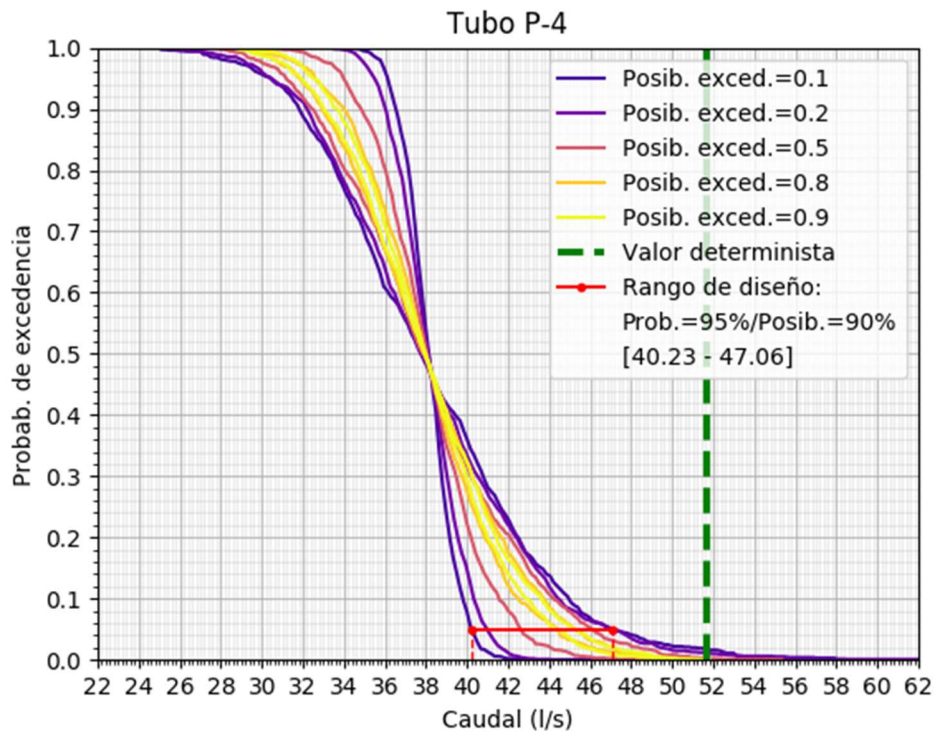
Notas:

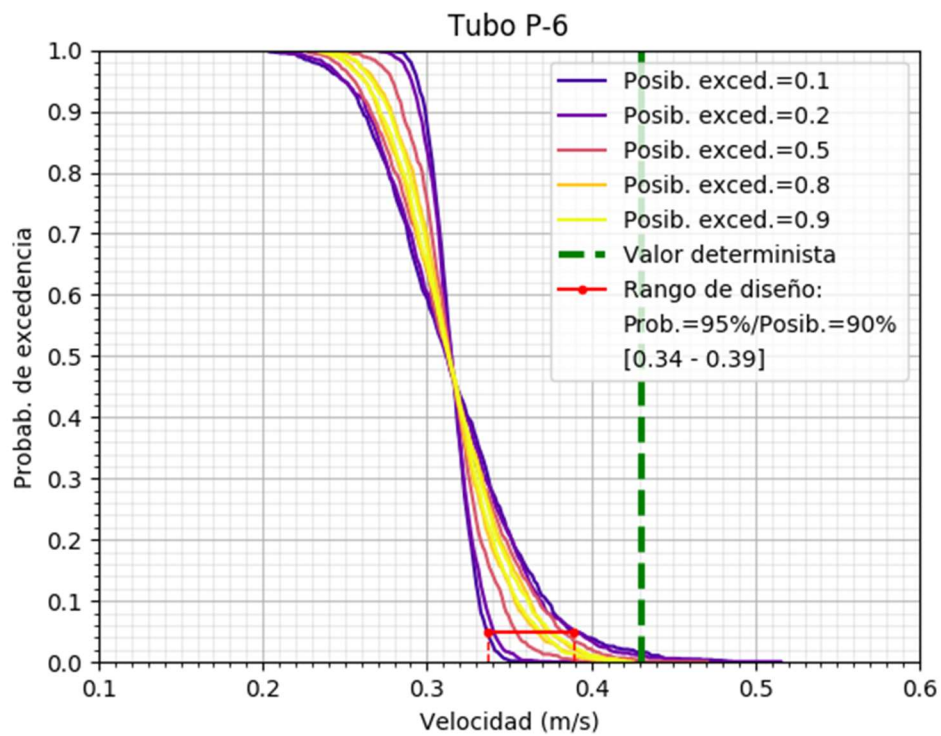
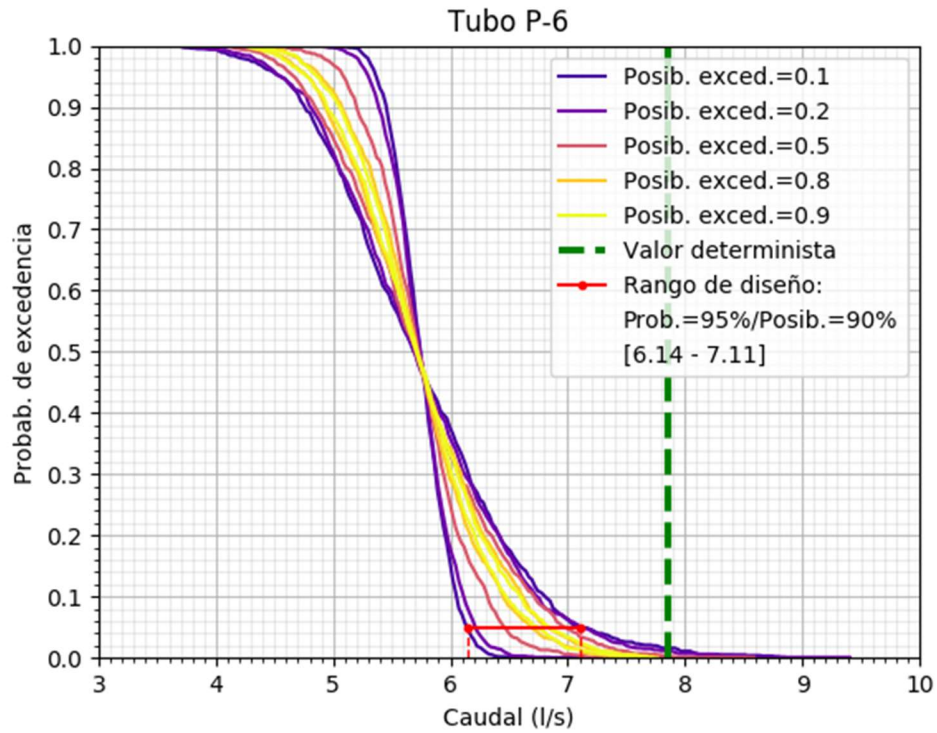
Las tuberías resaltadas (amarillo) fueron consideradas para el análisis probabilístico.

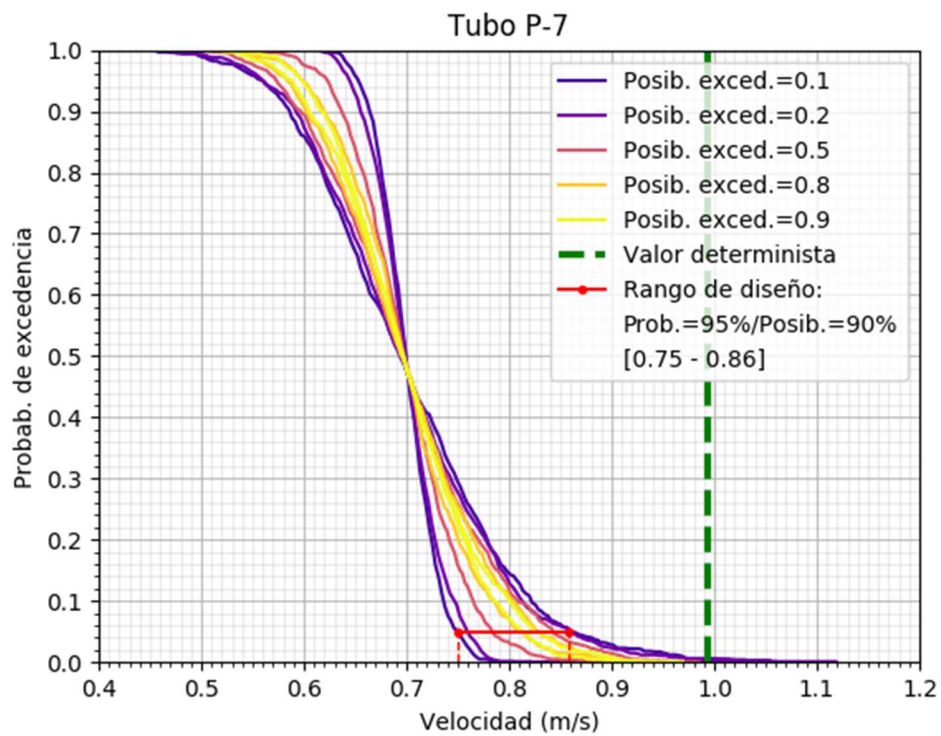
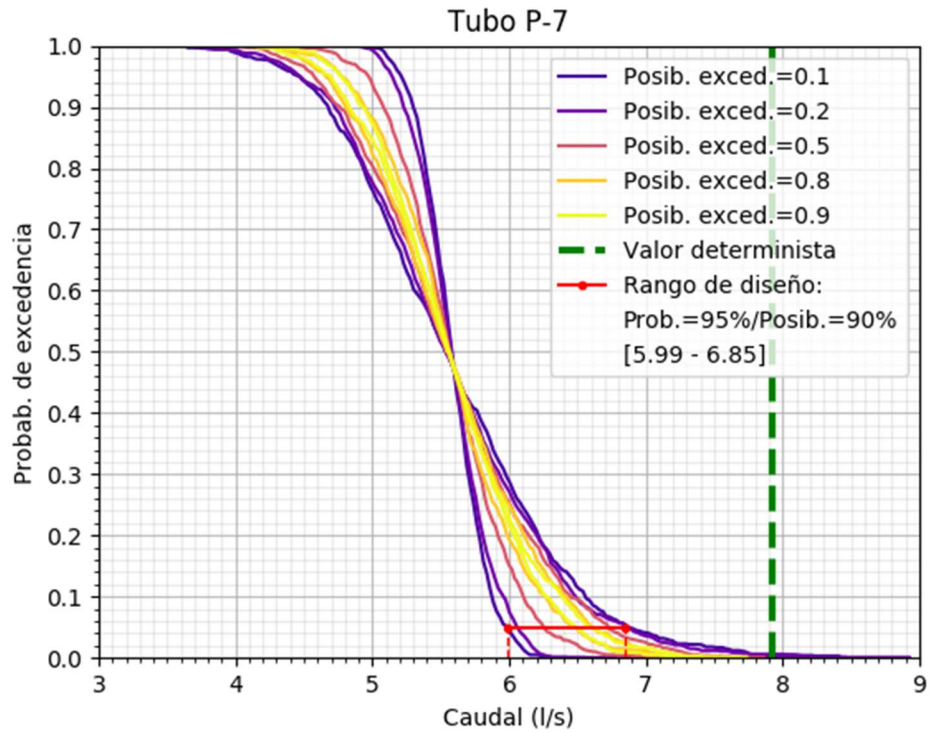
Anexo V: Resultados del análisis probabilístico – Tuberías

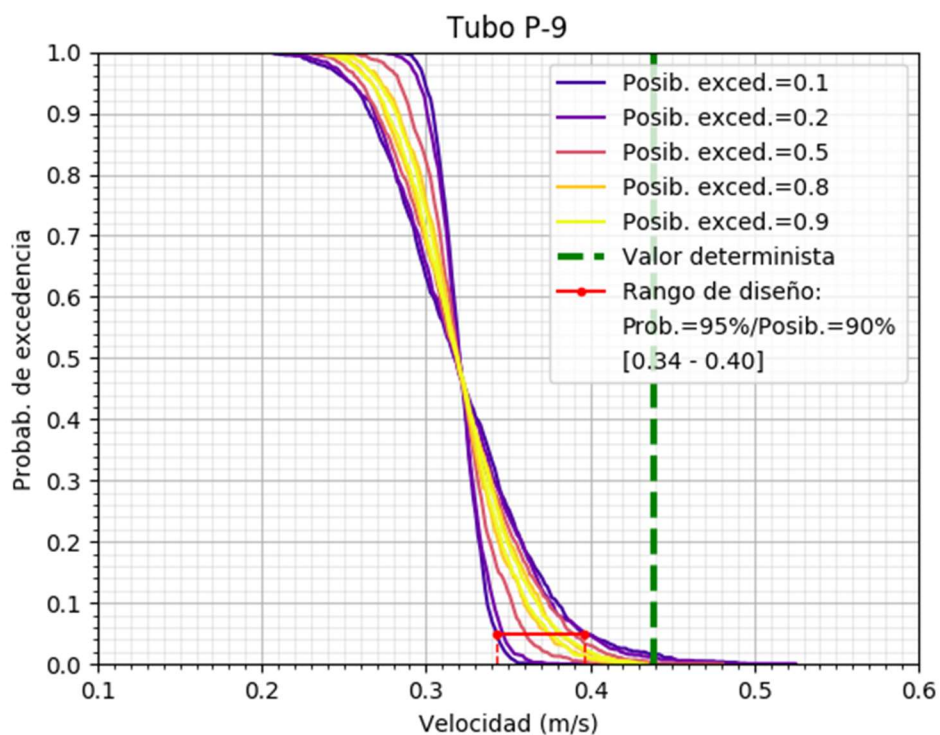
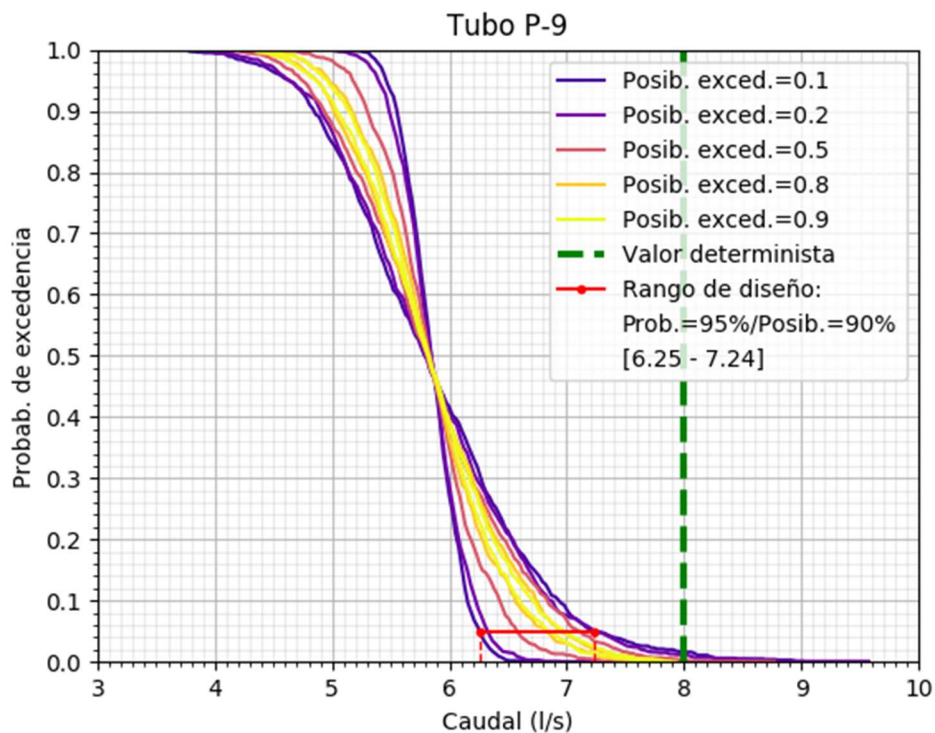
Anexo V: Resultados del análisis probabilístico – Tuberías

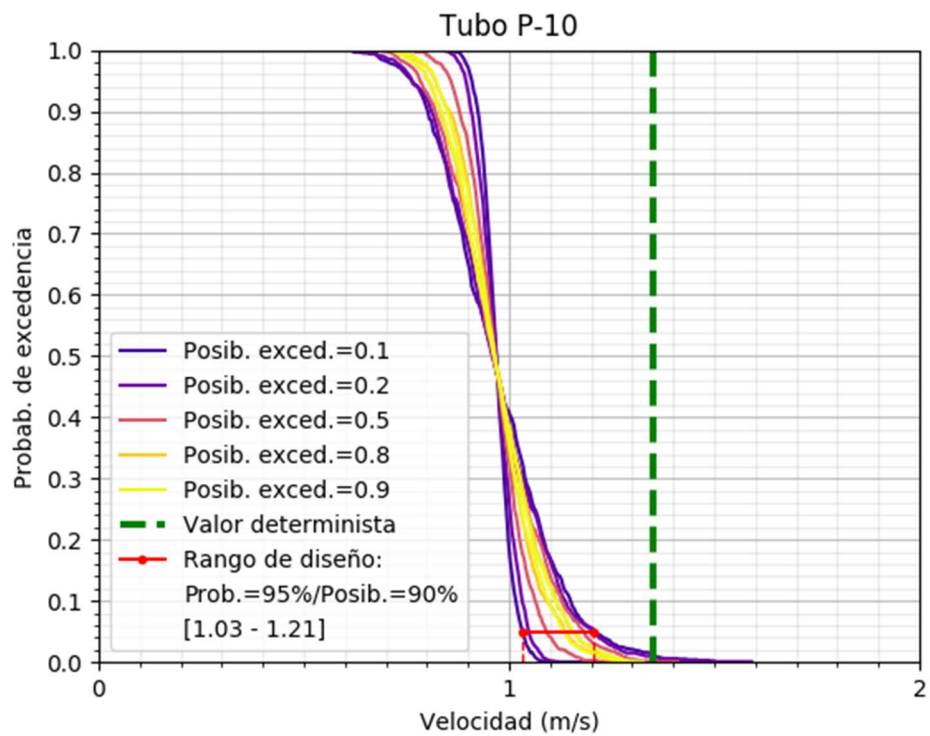
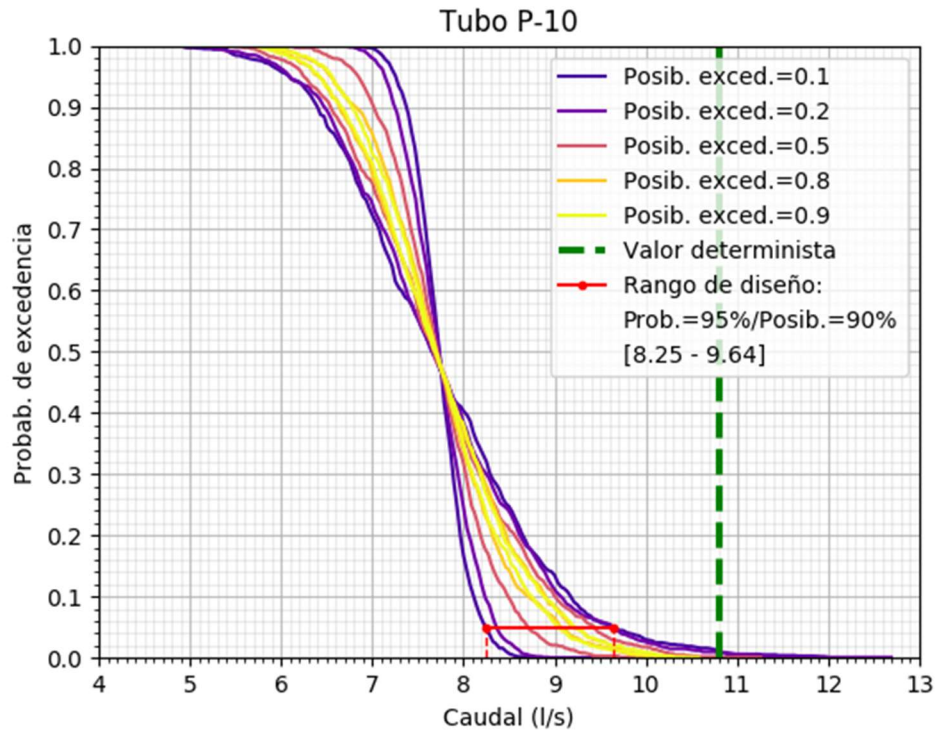


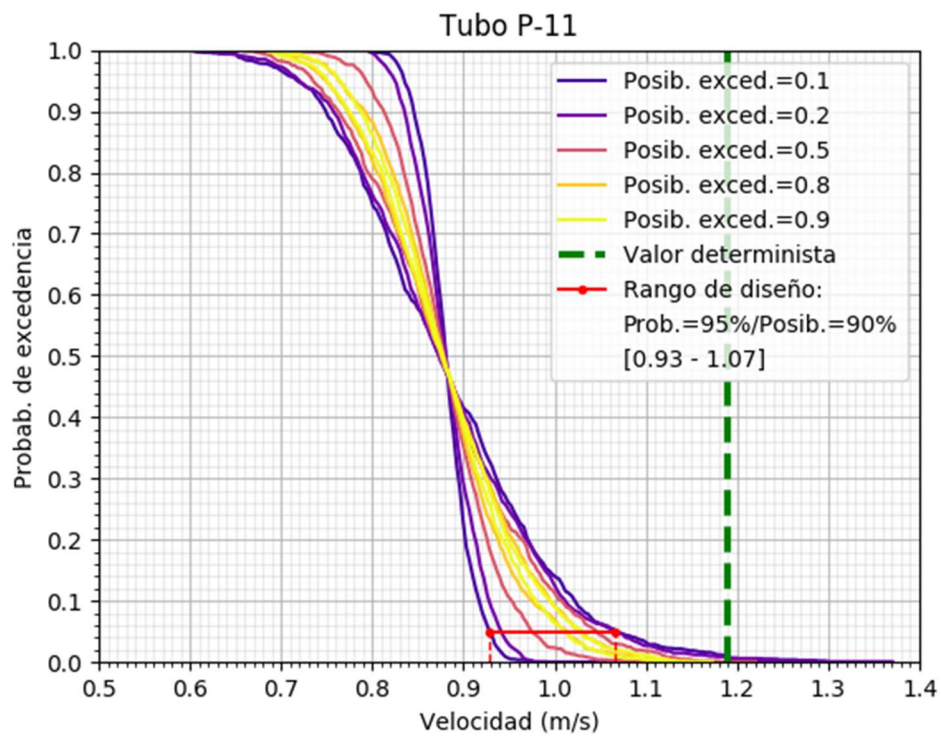
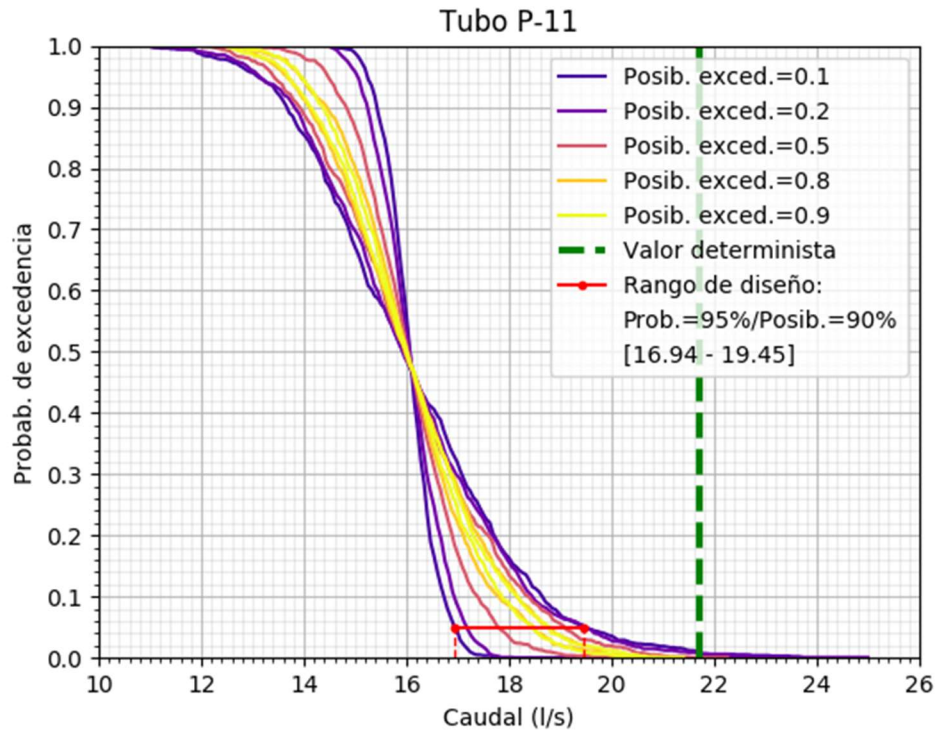


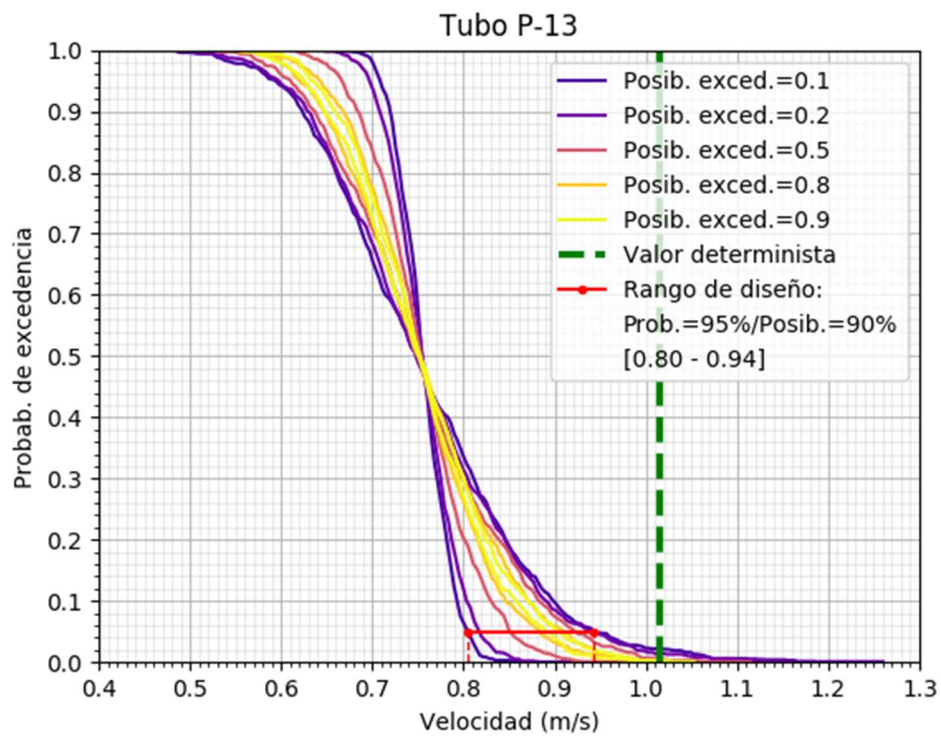
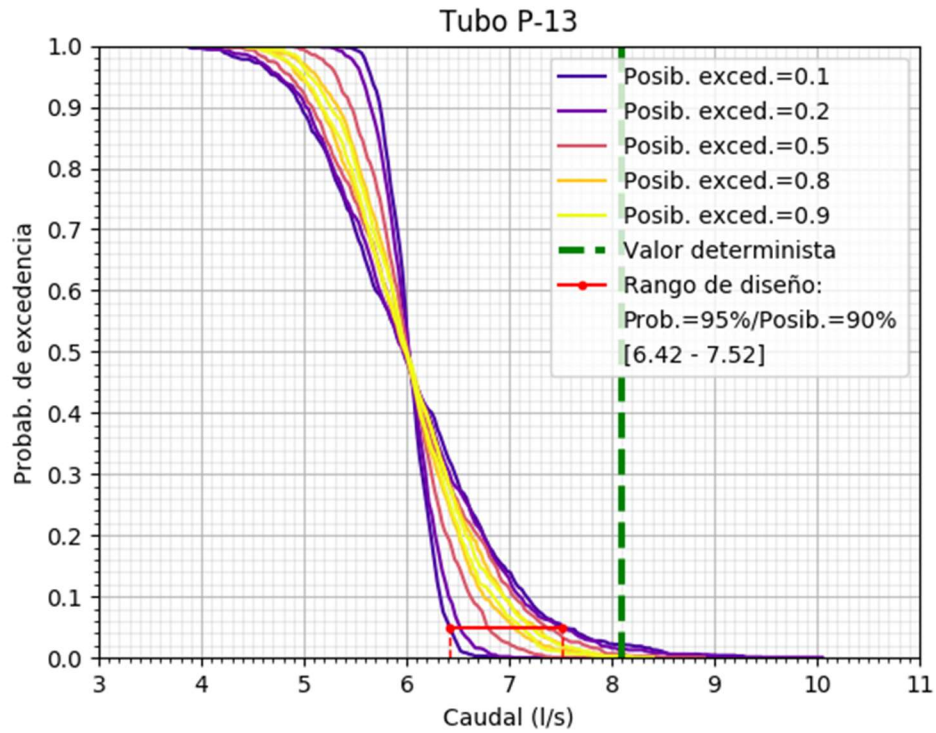


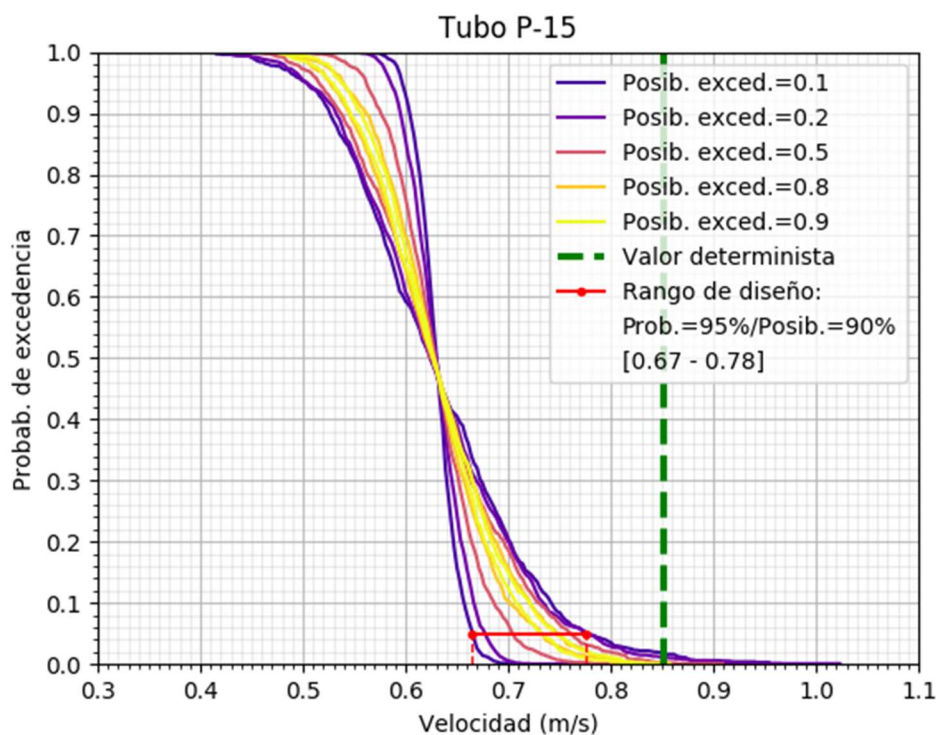
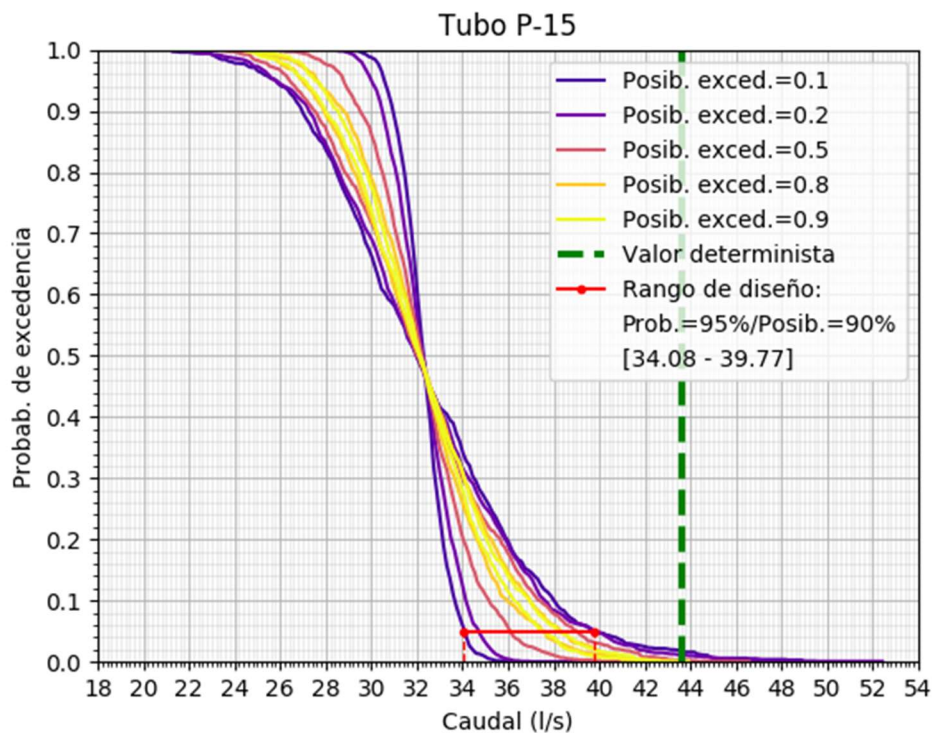


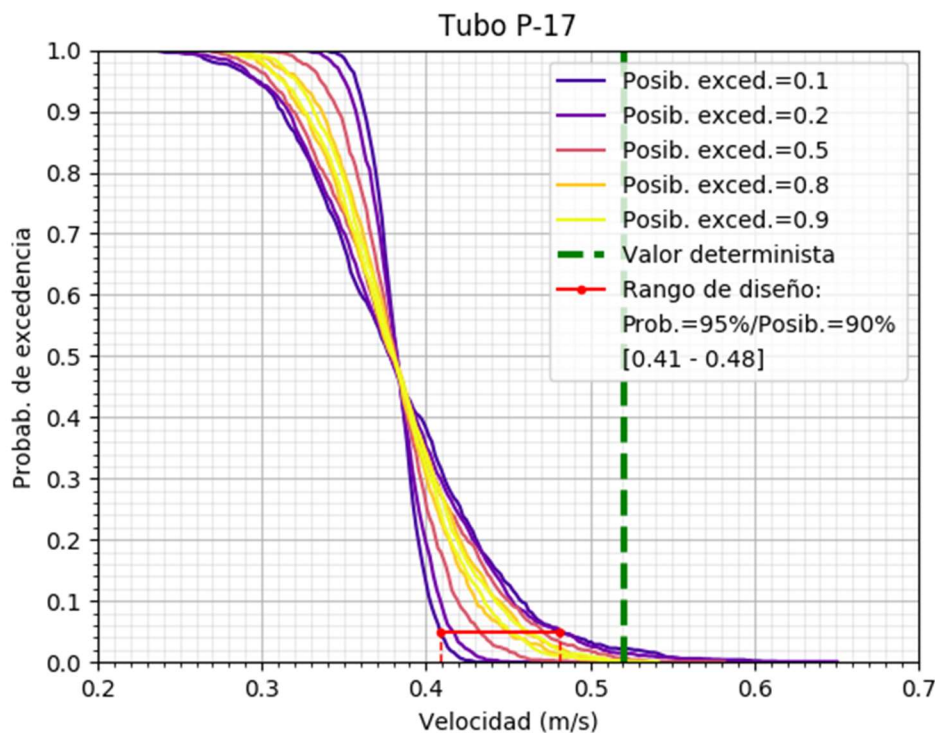
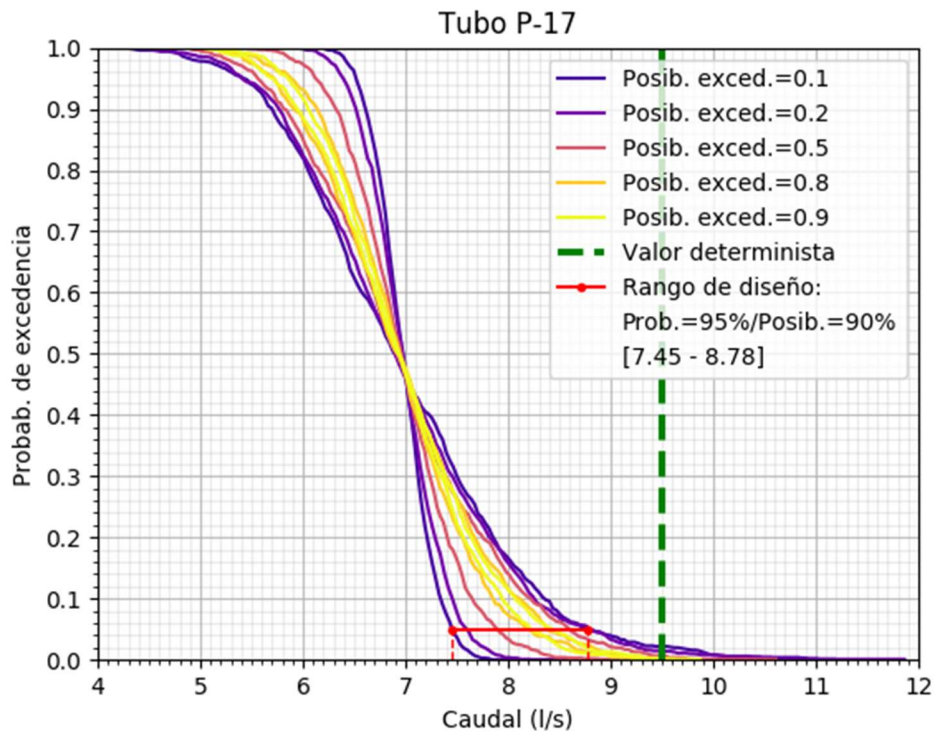


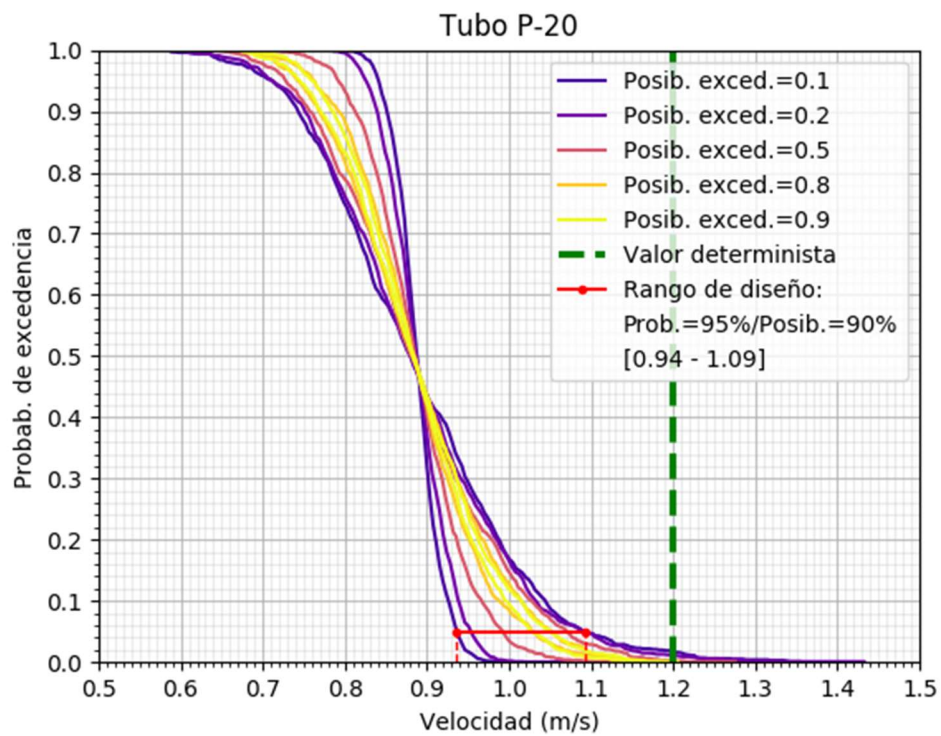
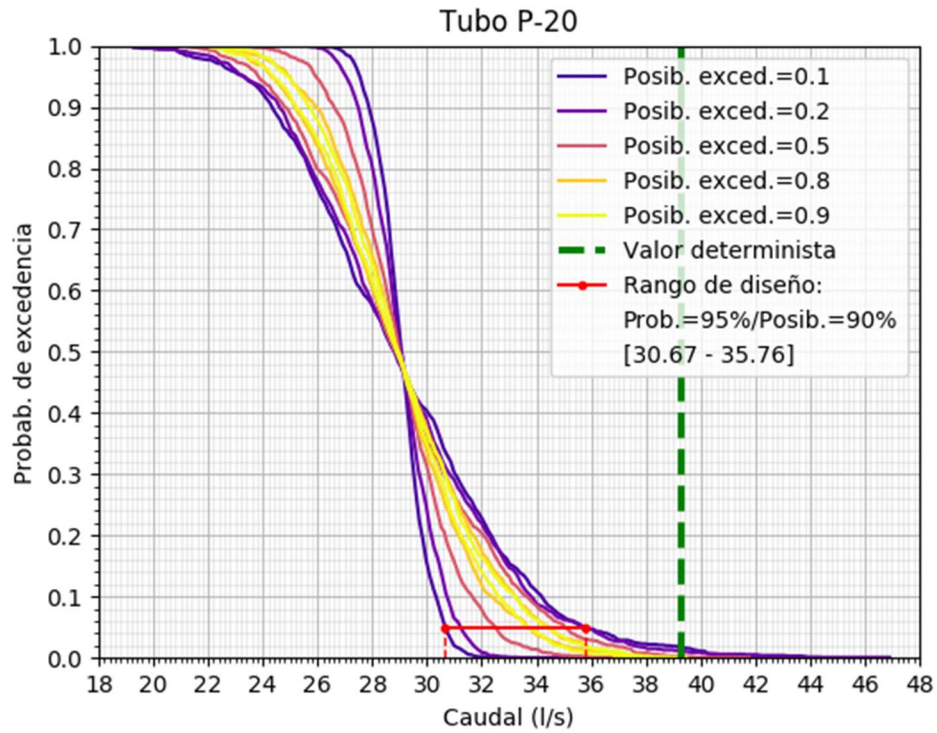


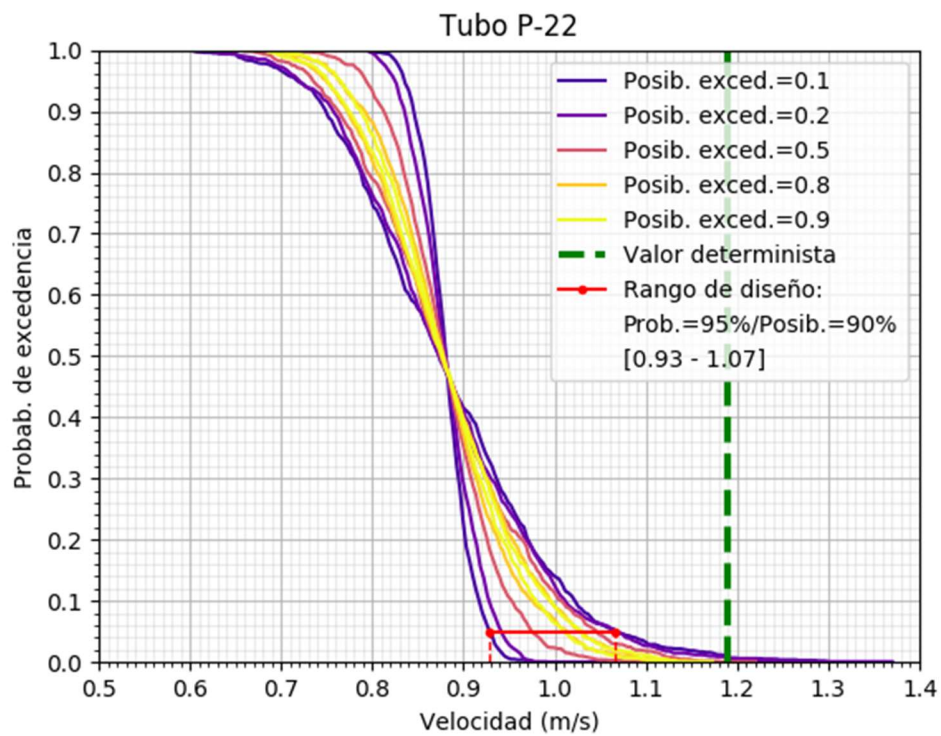
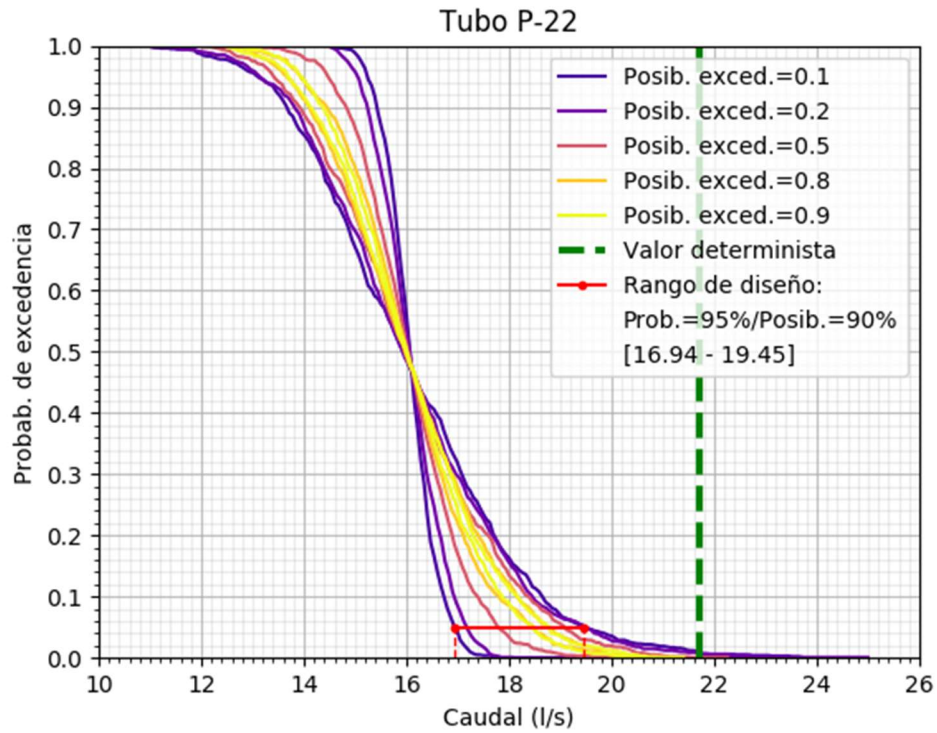


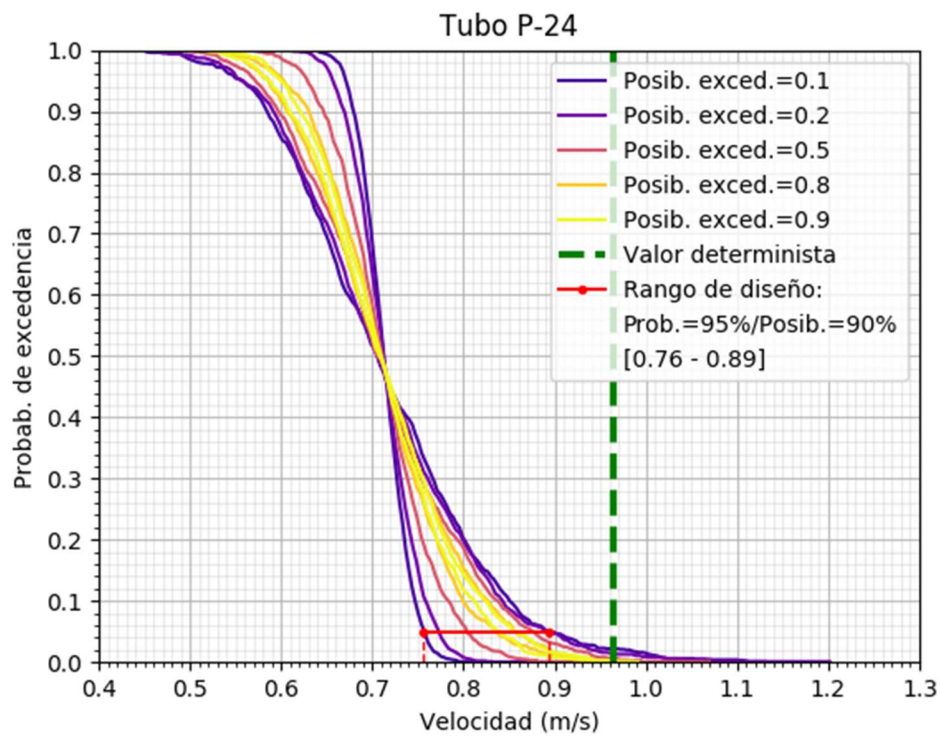
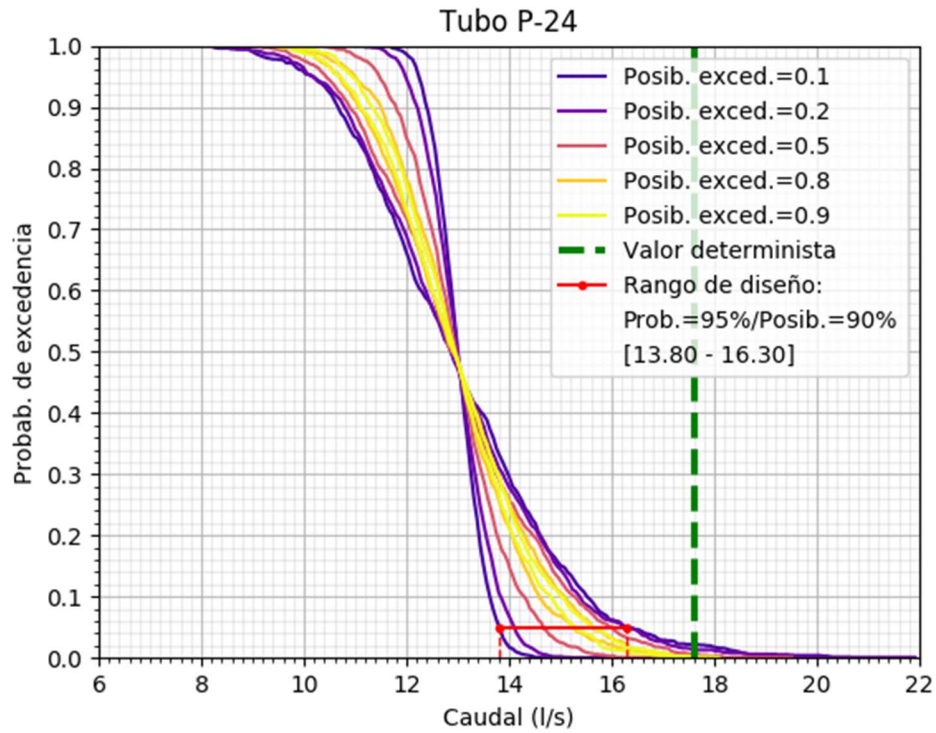


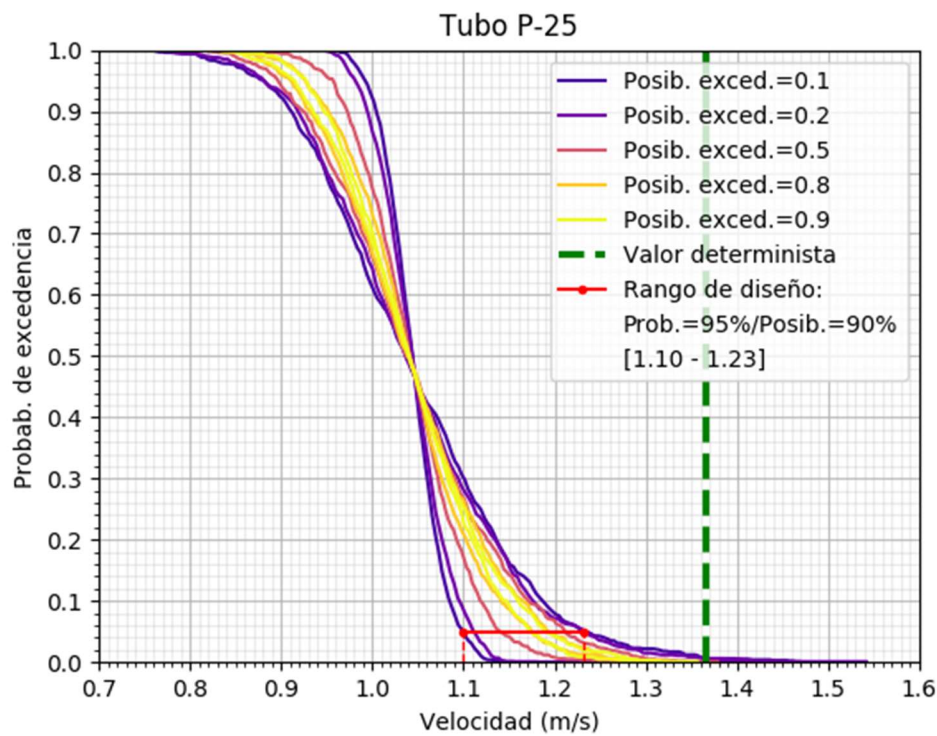
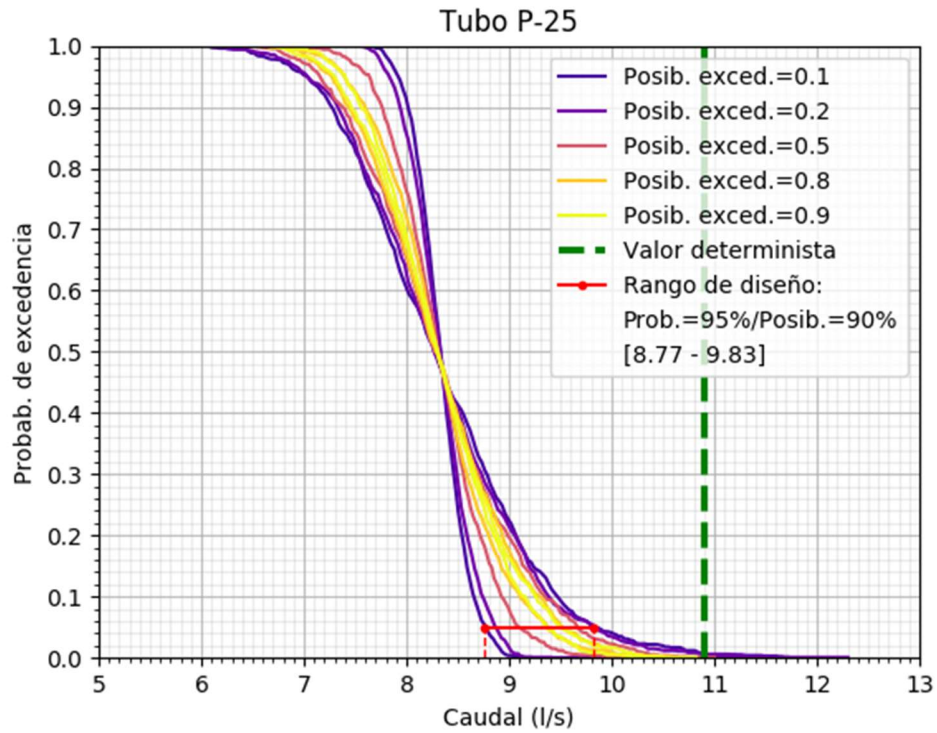


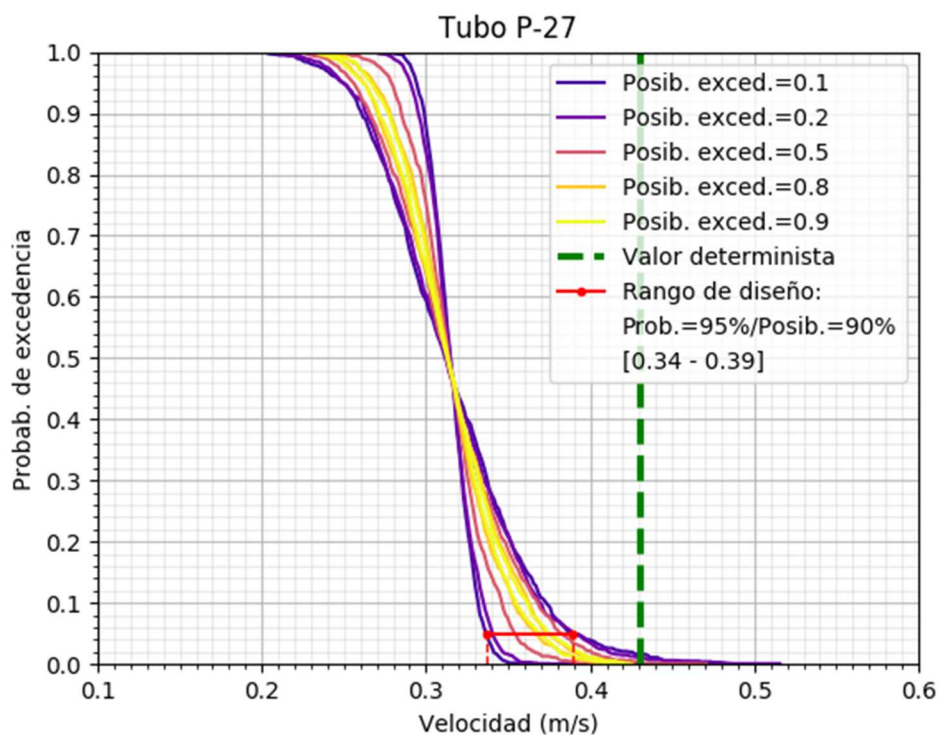
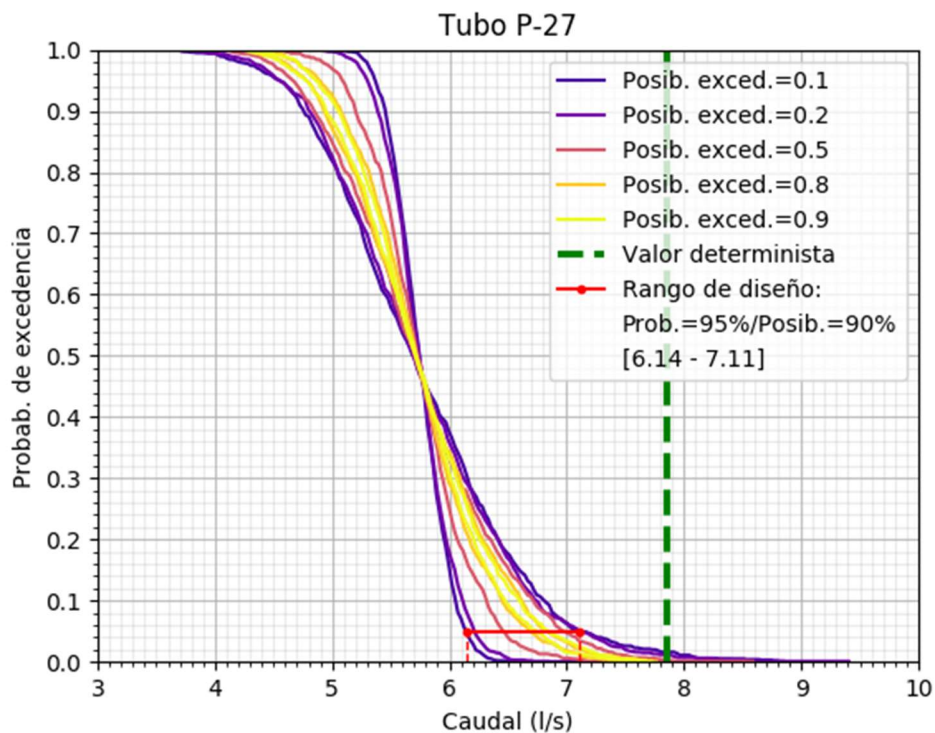


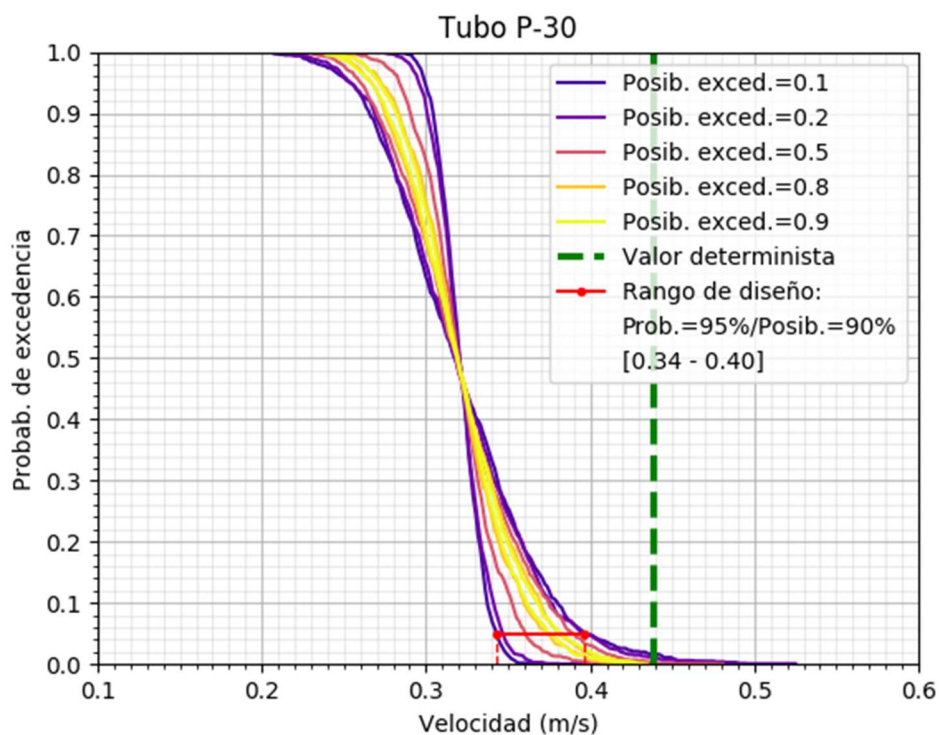
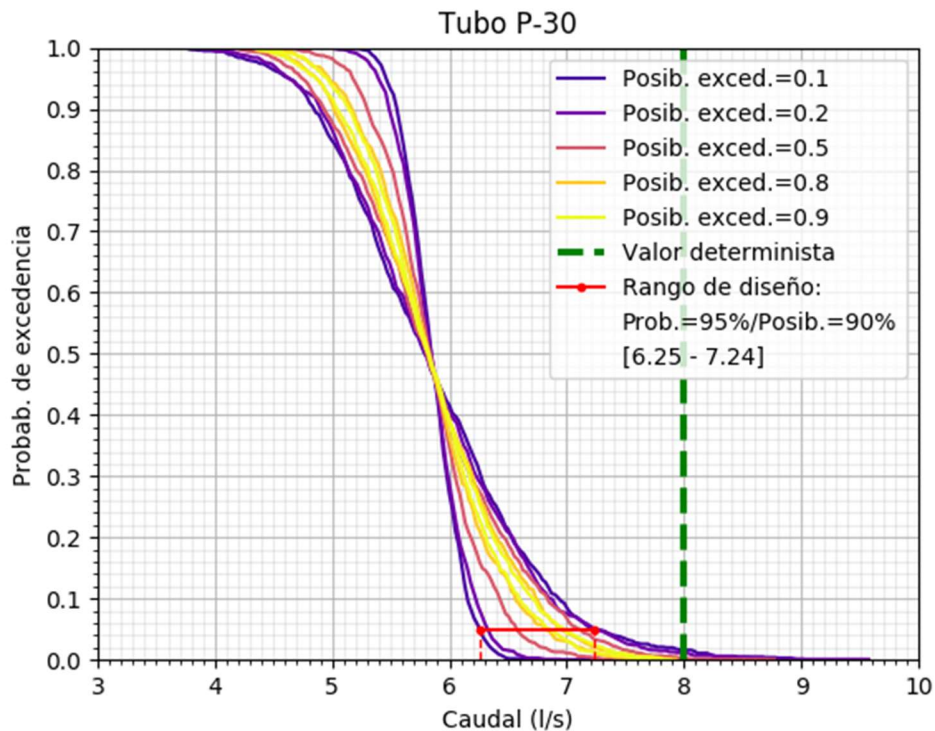


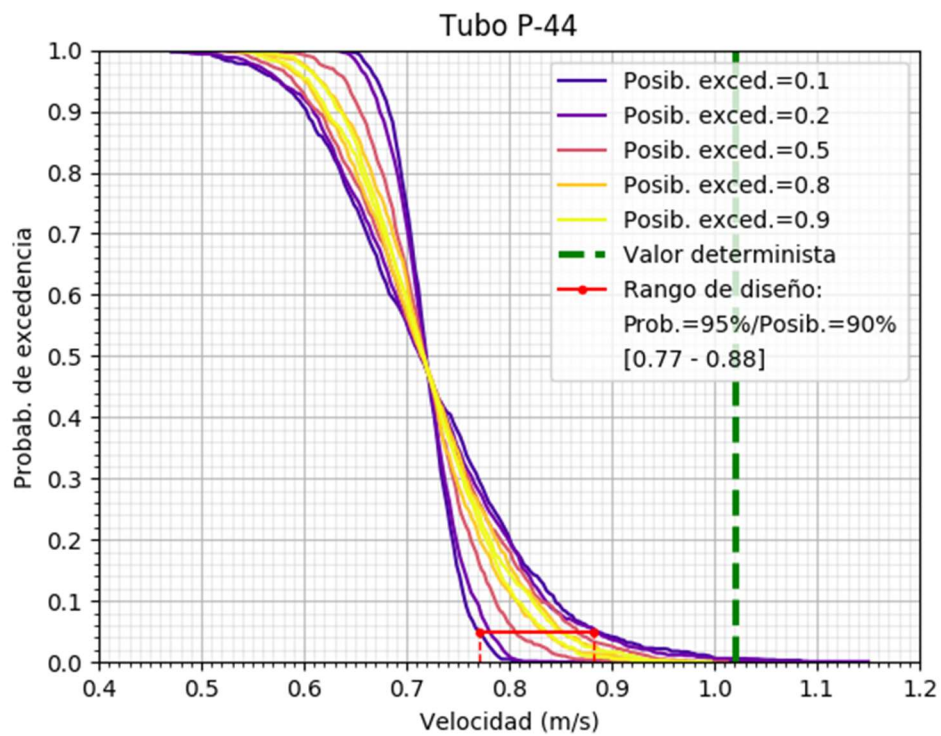
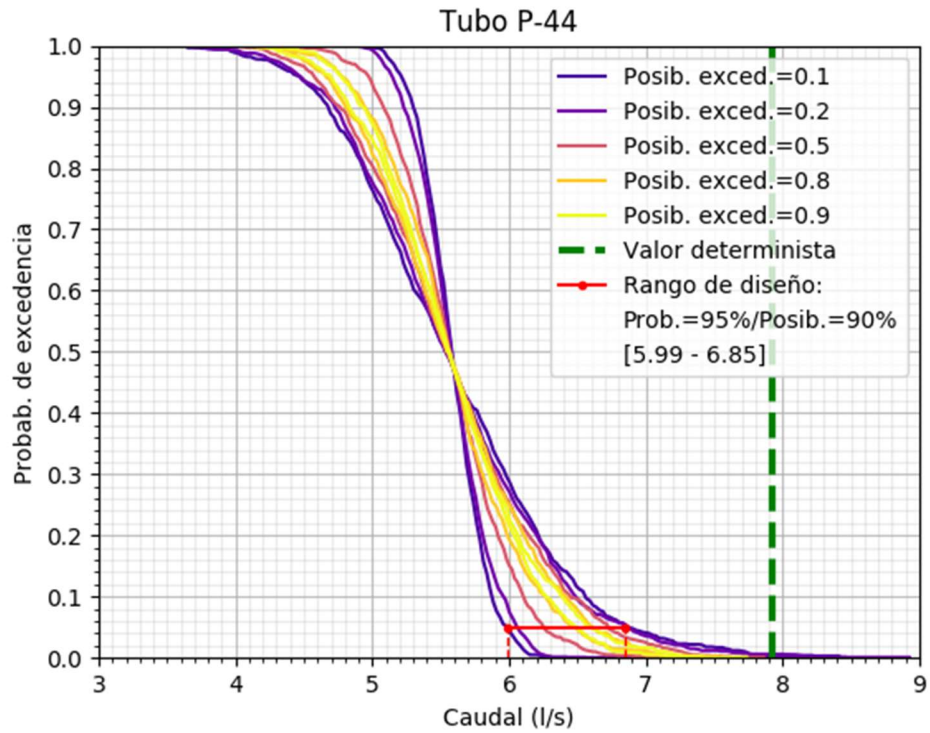


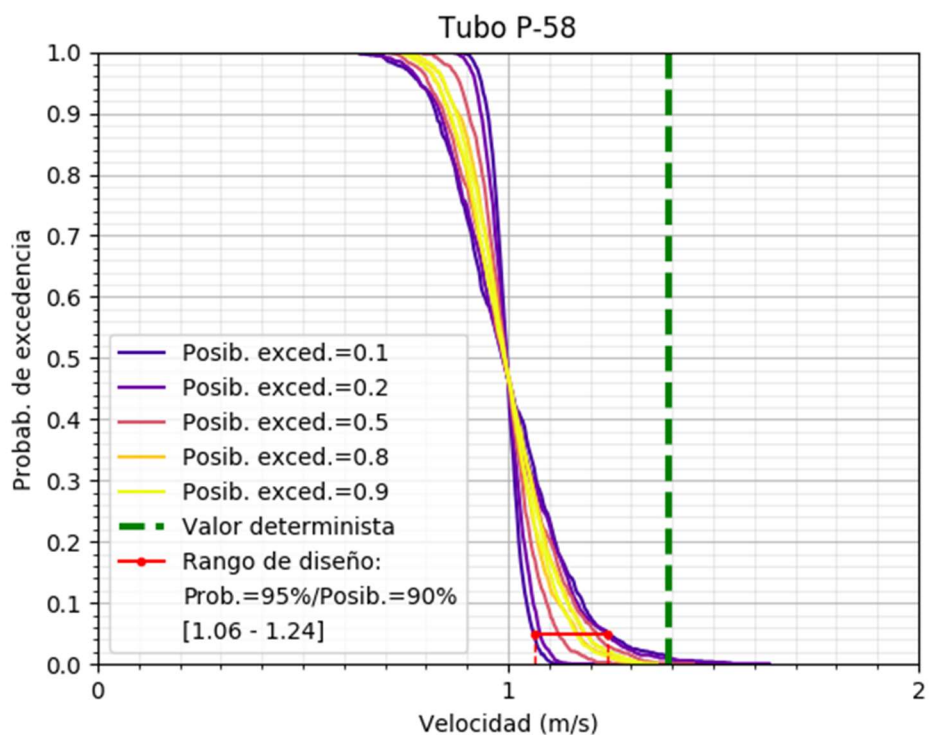
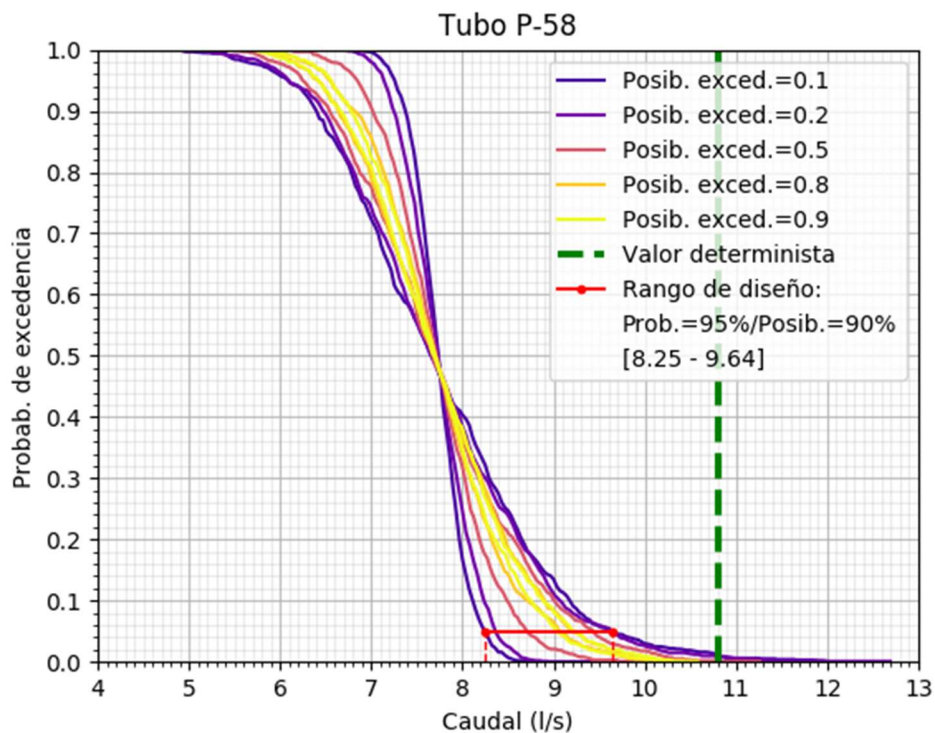


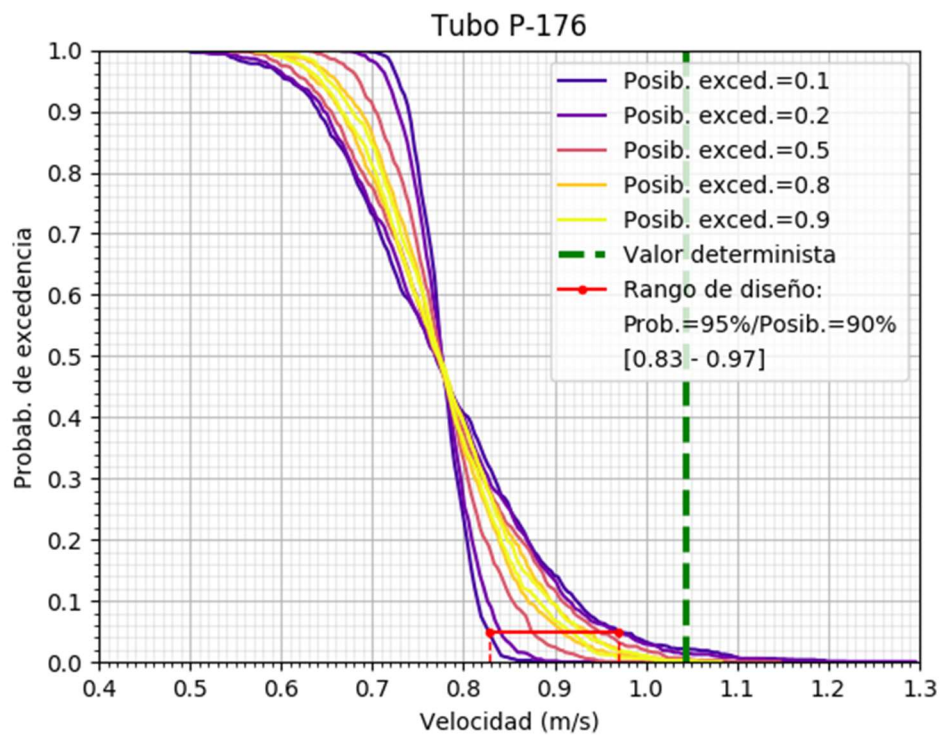
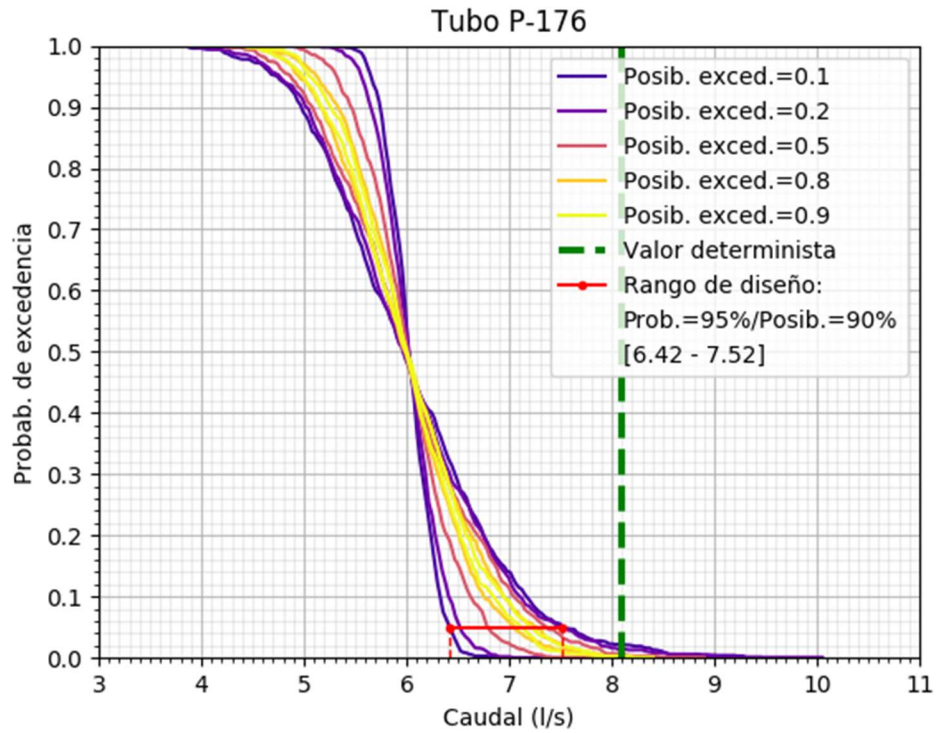


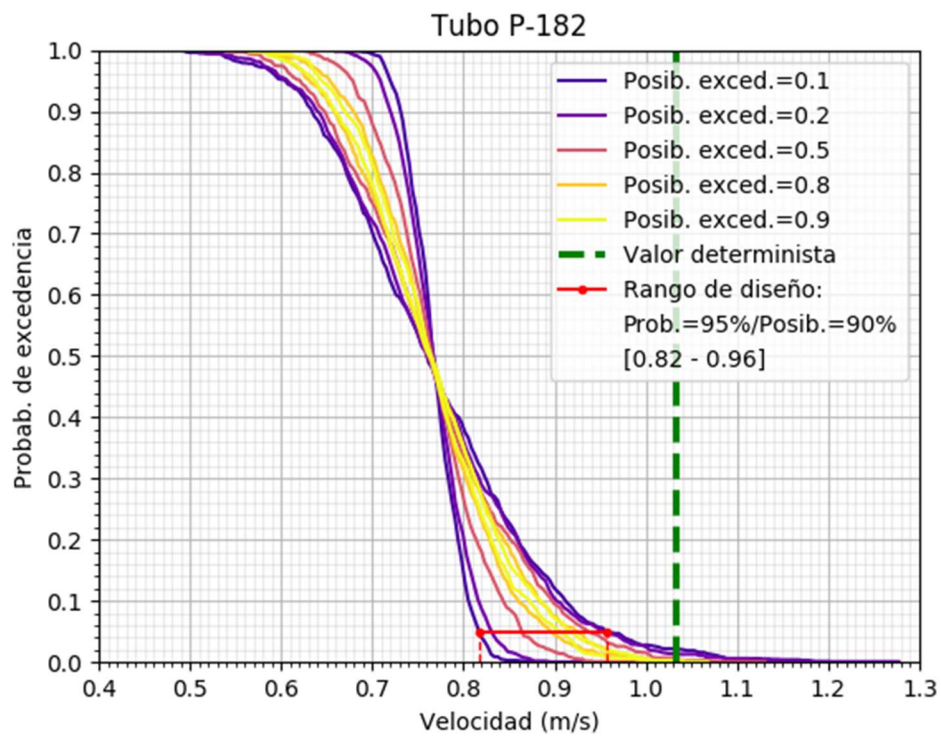
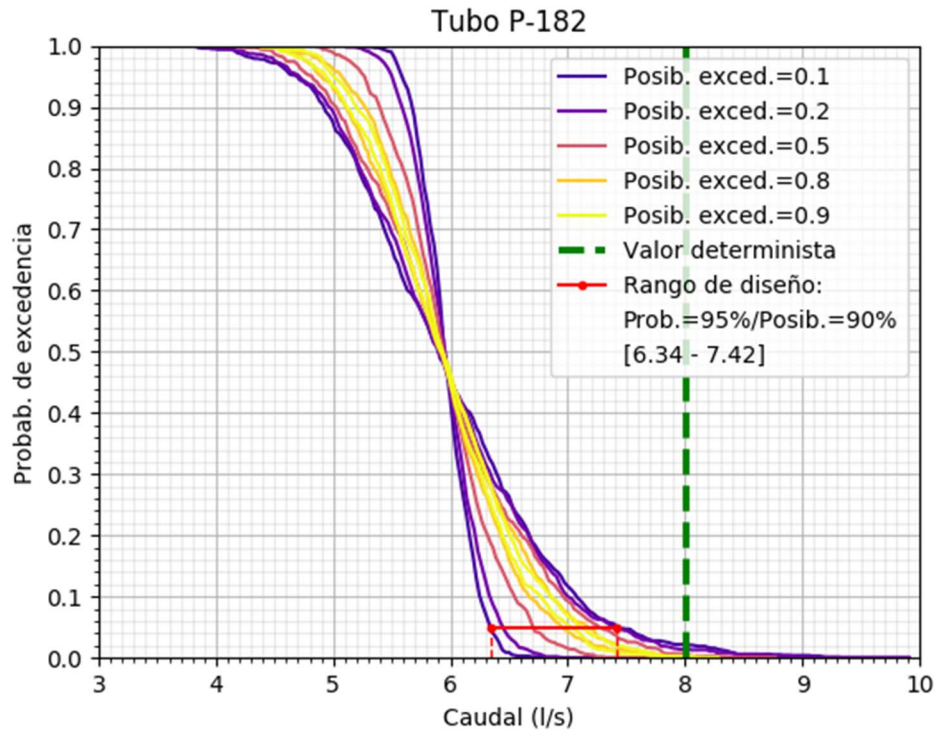






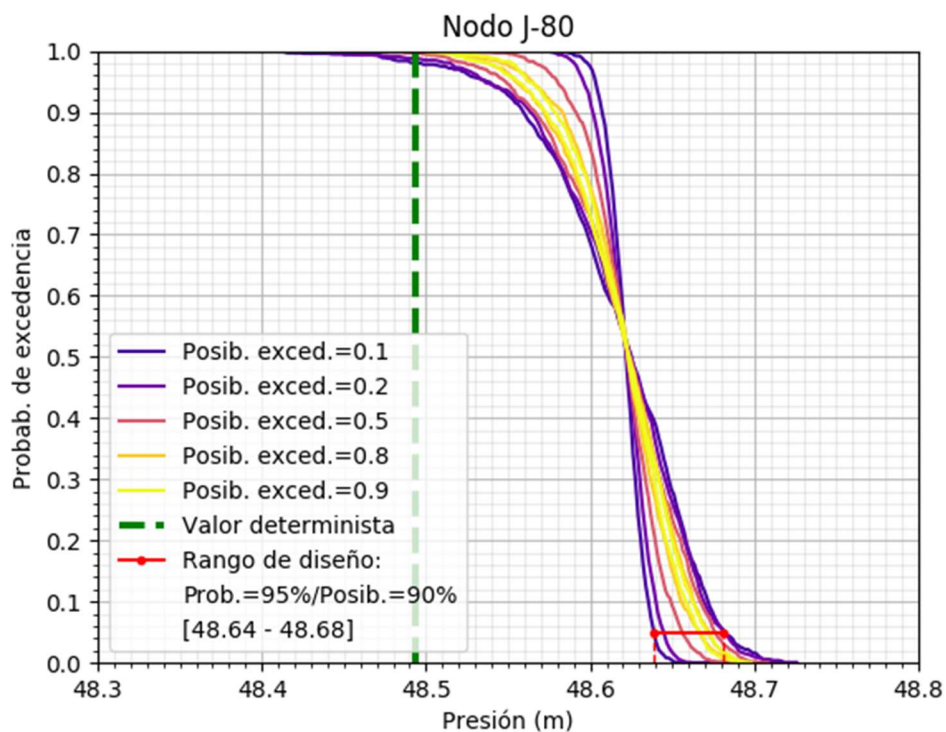
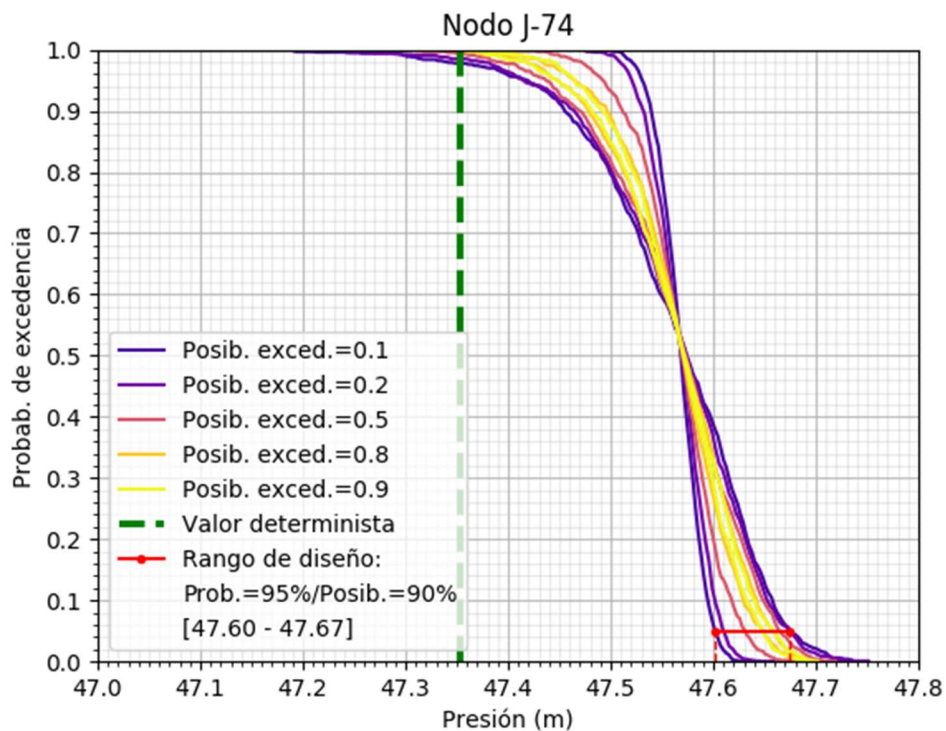


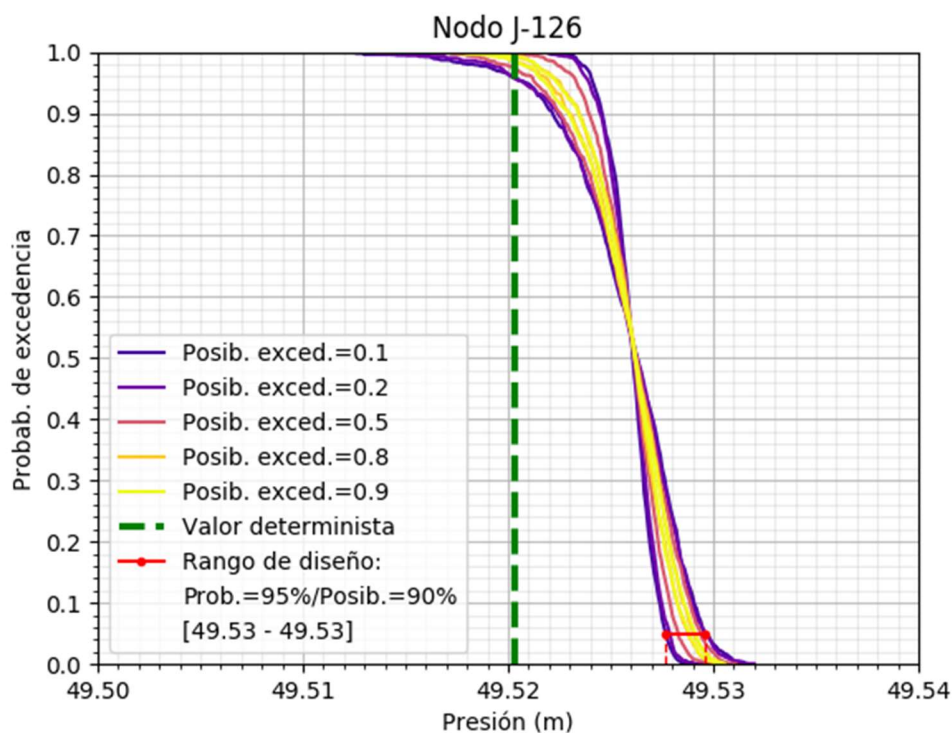
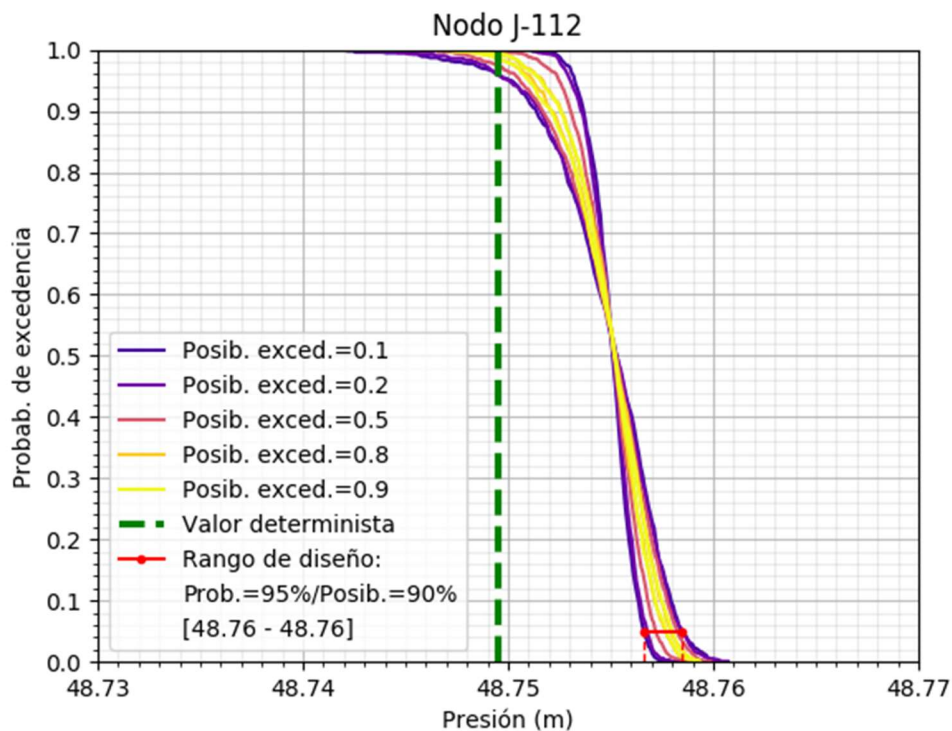


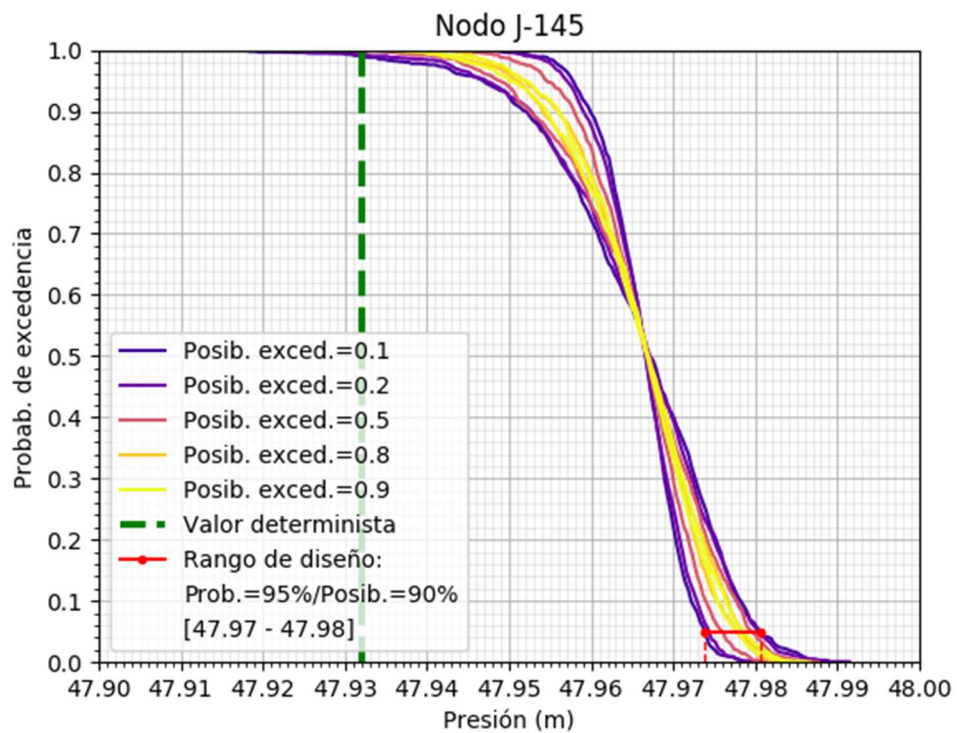
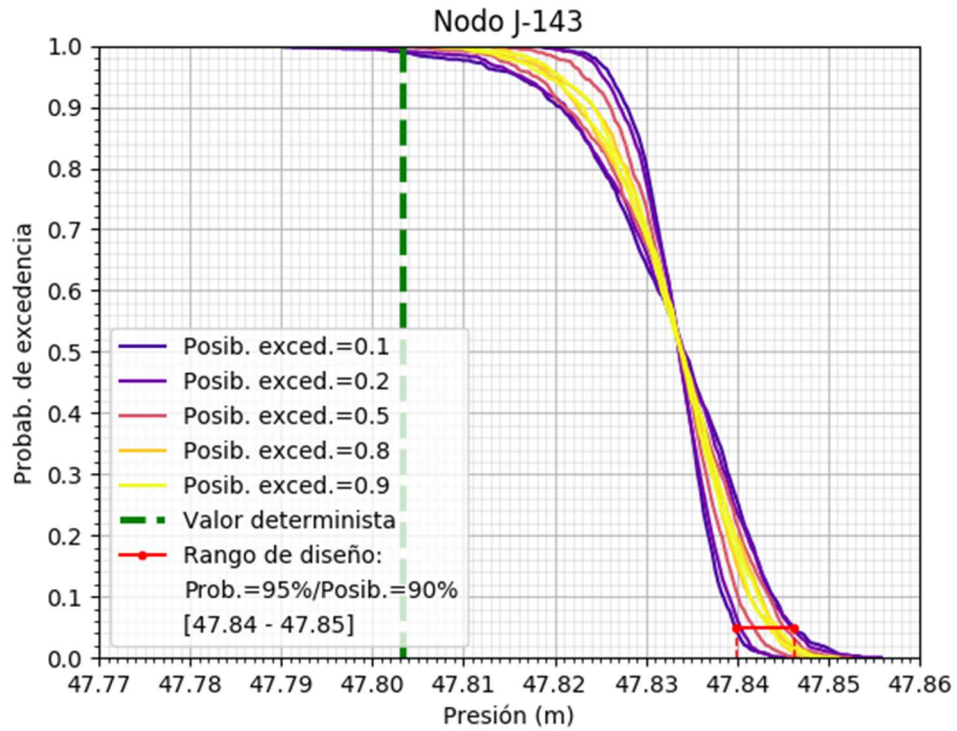


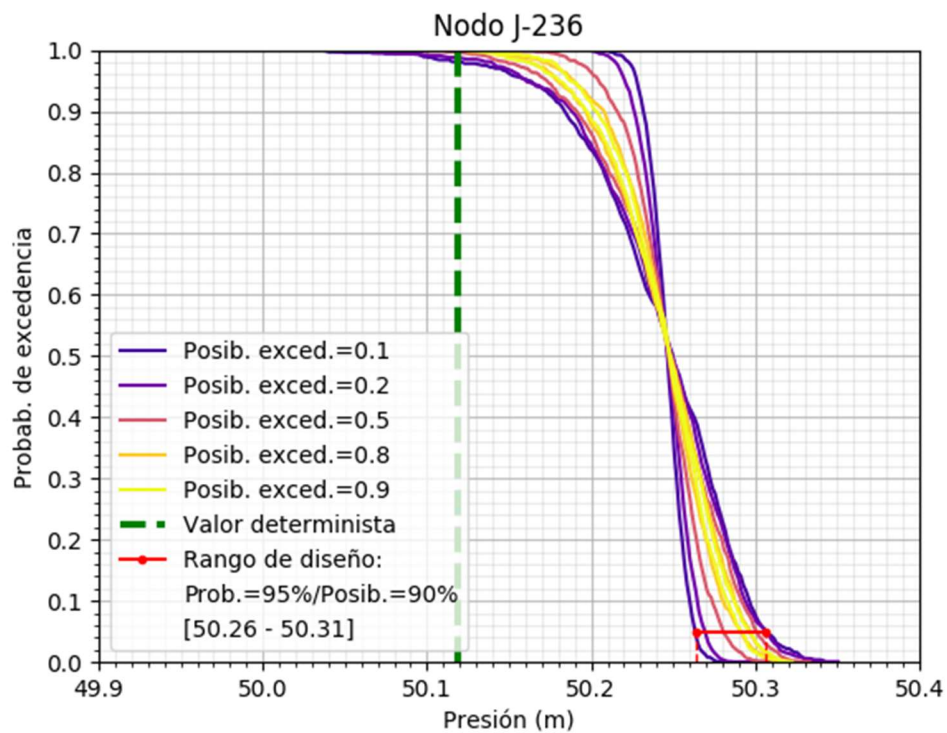
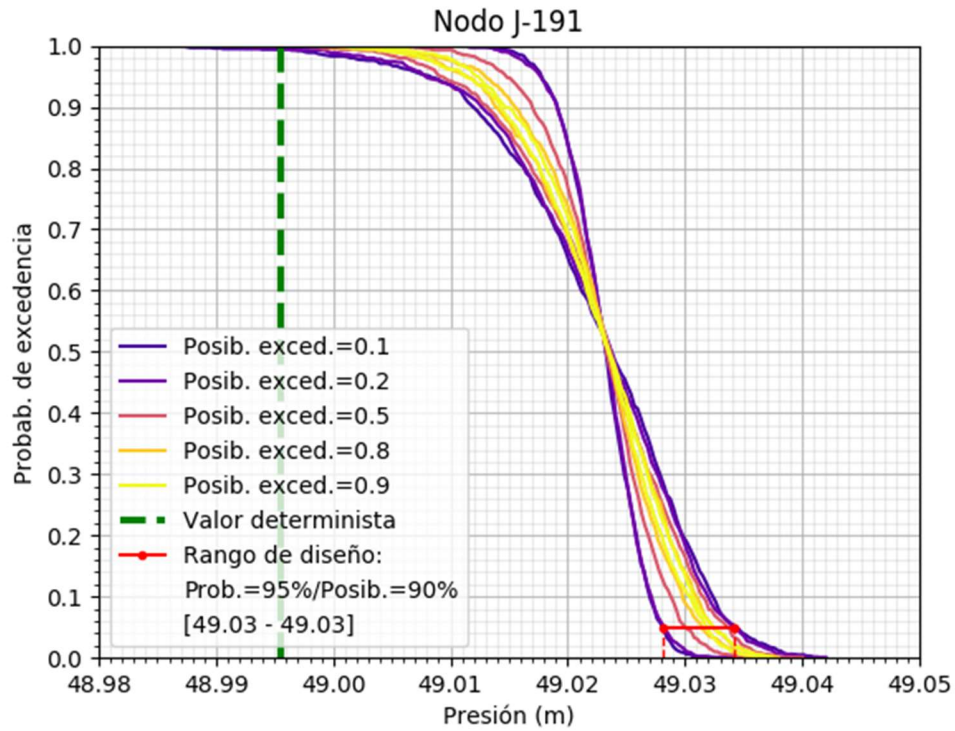
Anexo VI: Resultados del análisis probabilístico – Nodos

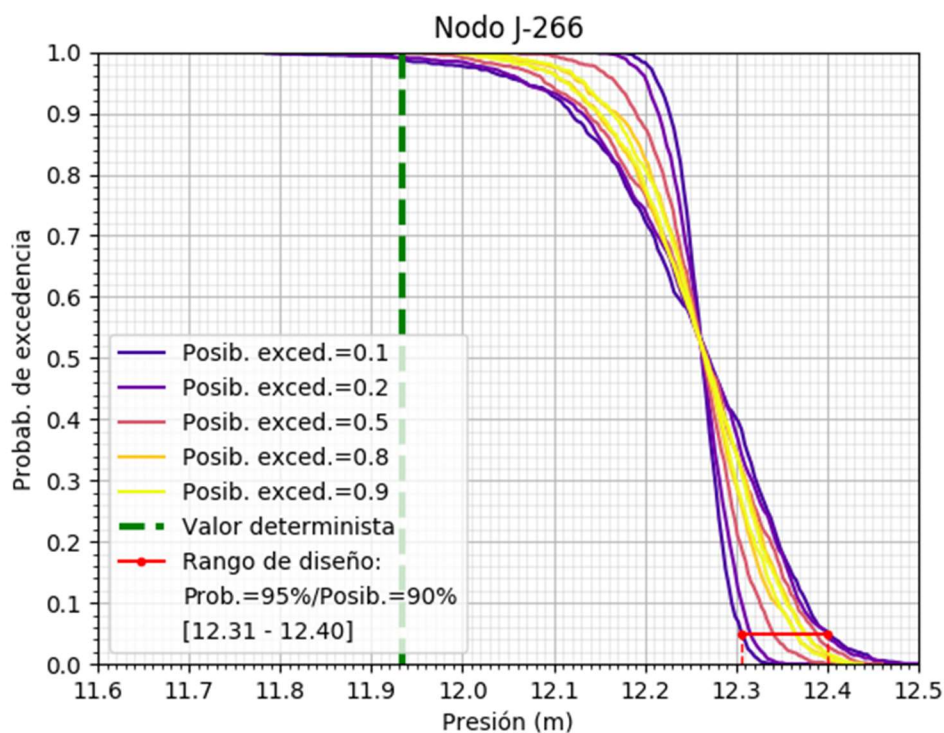
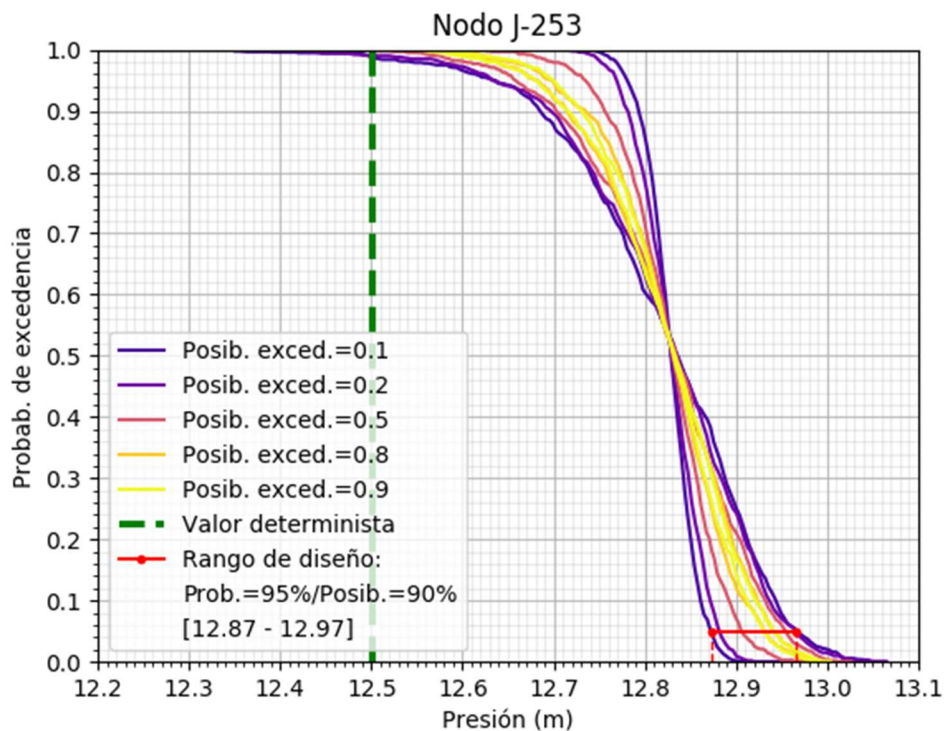
Anexo VI: Resultados del análisis probabilístico – Nodos

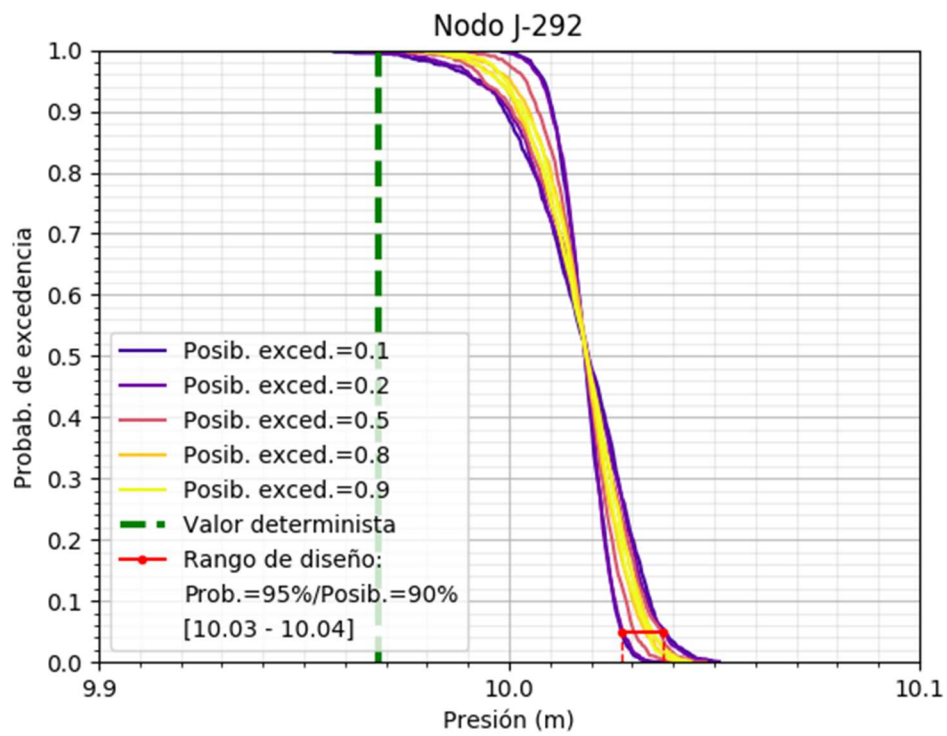
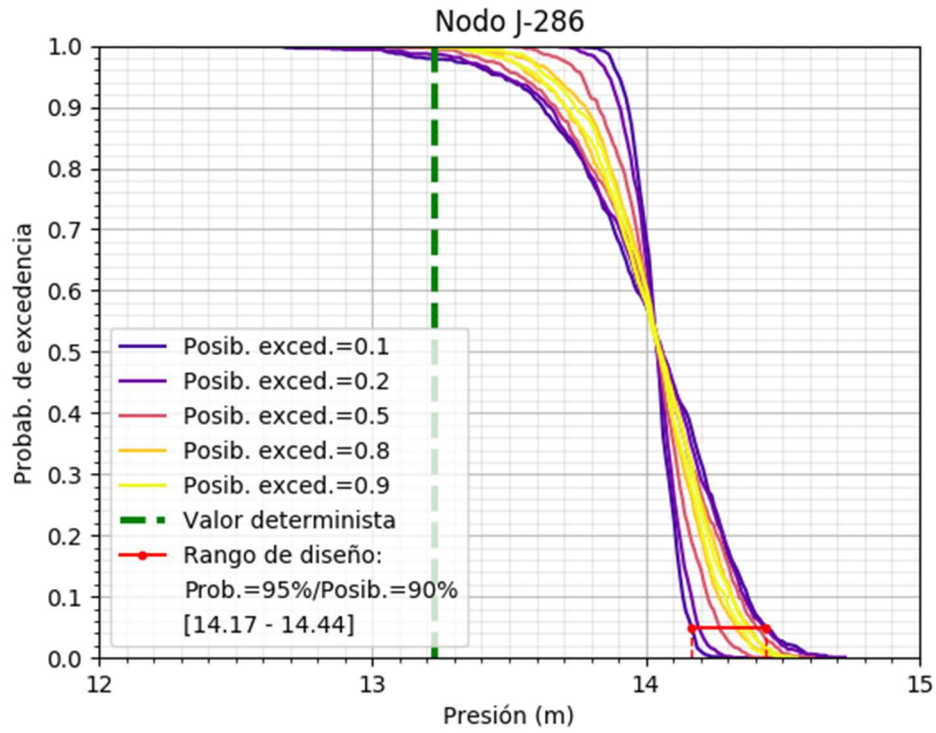


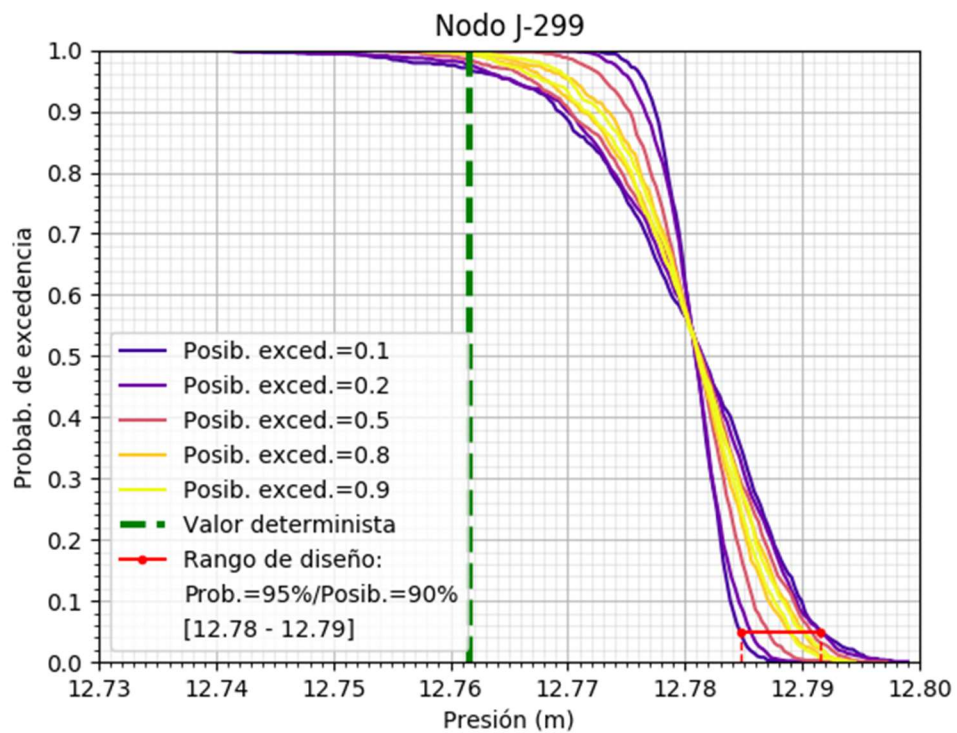
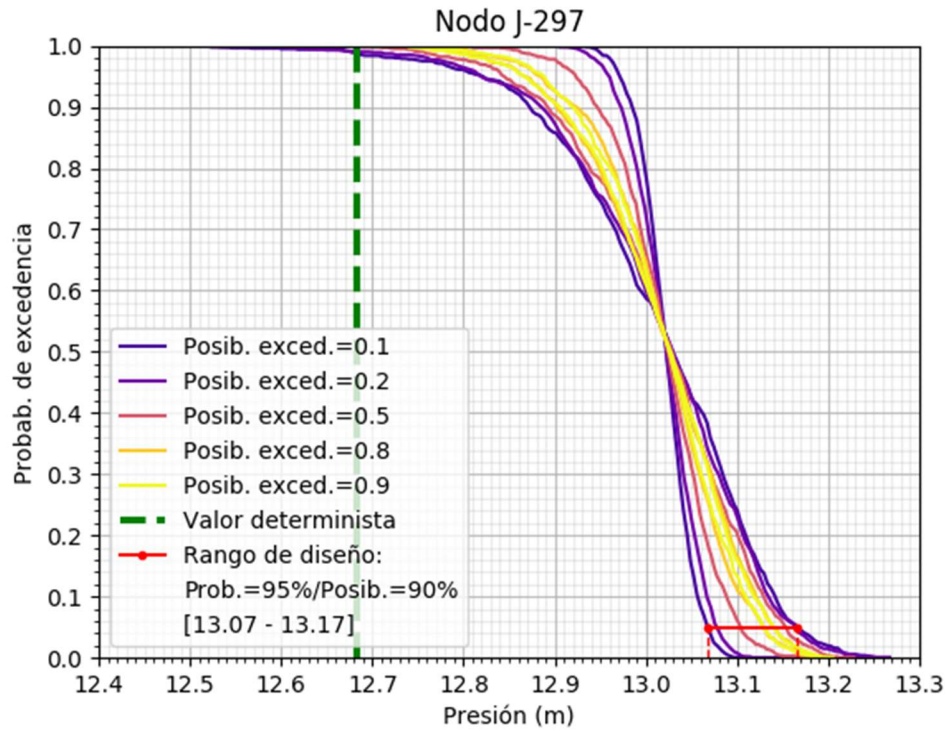


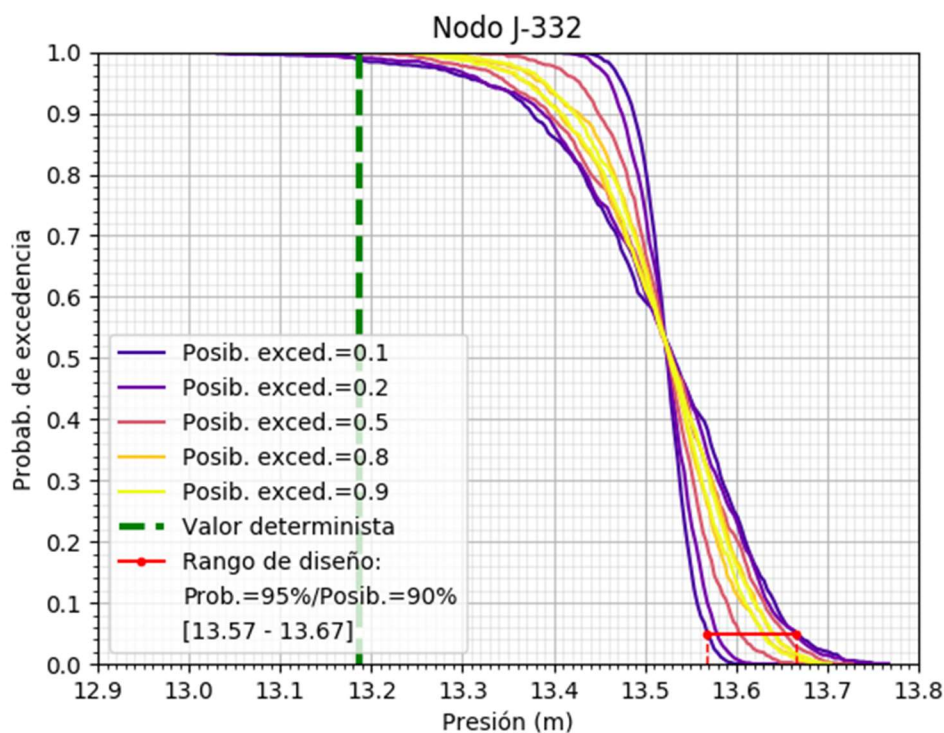
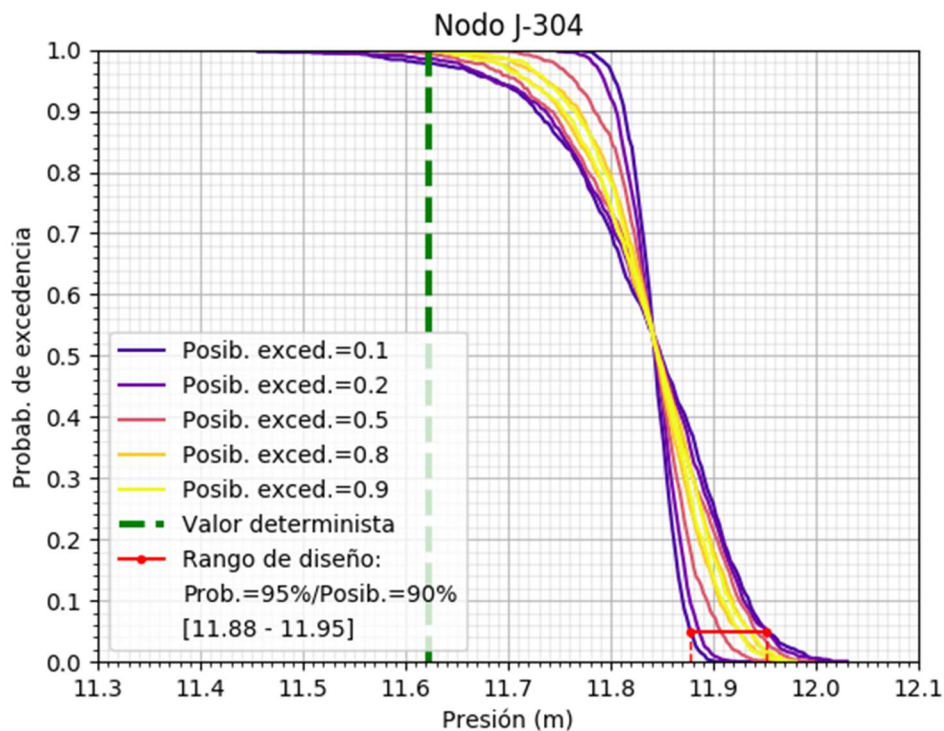


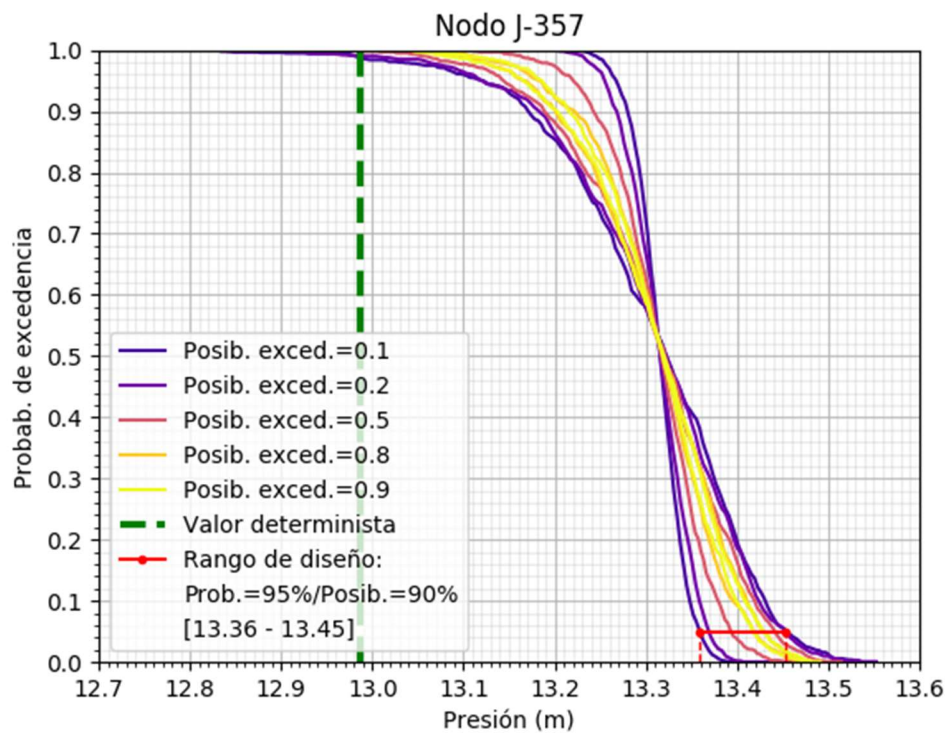
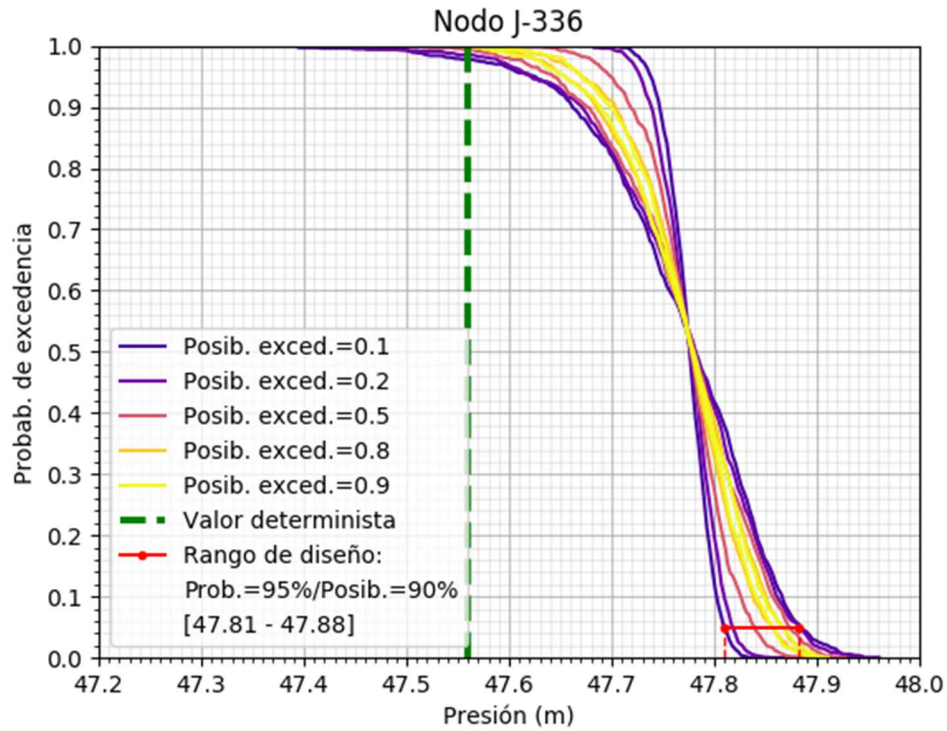


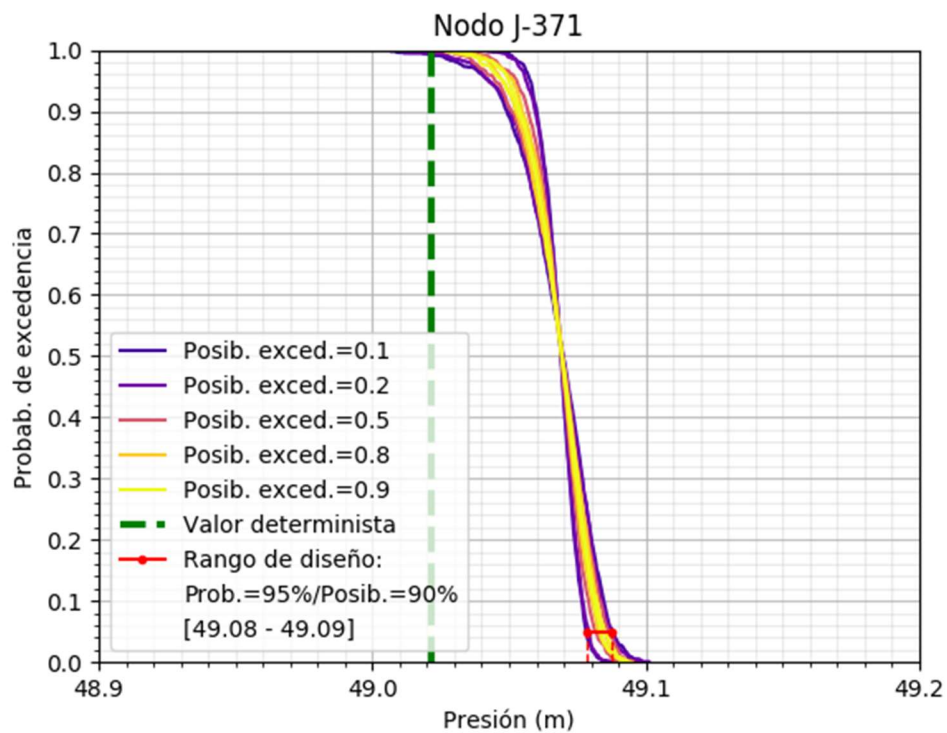
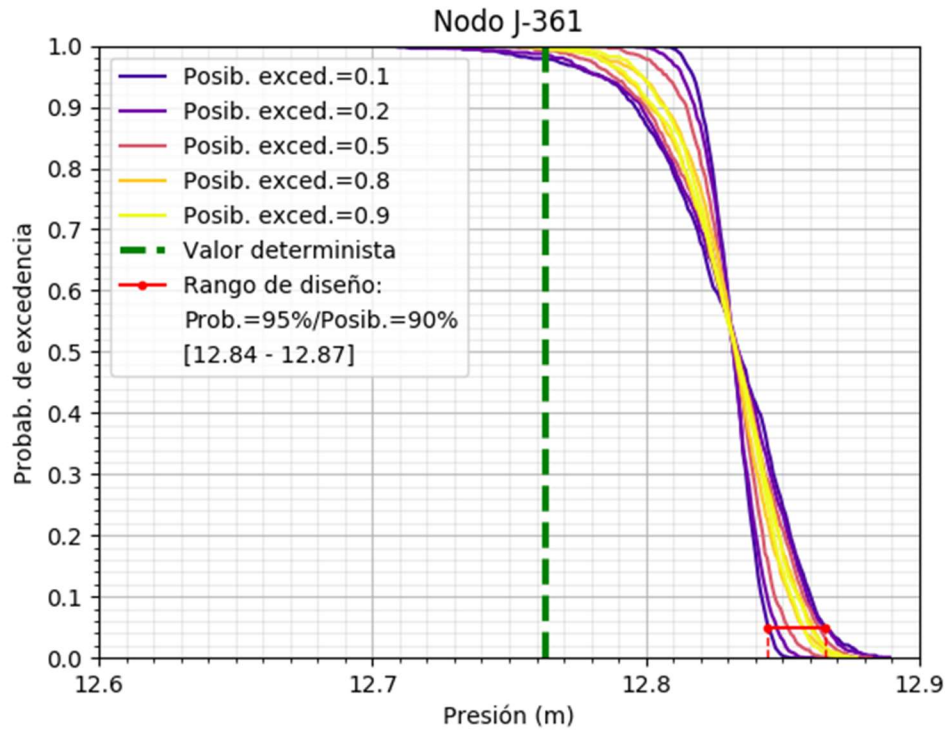












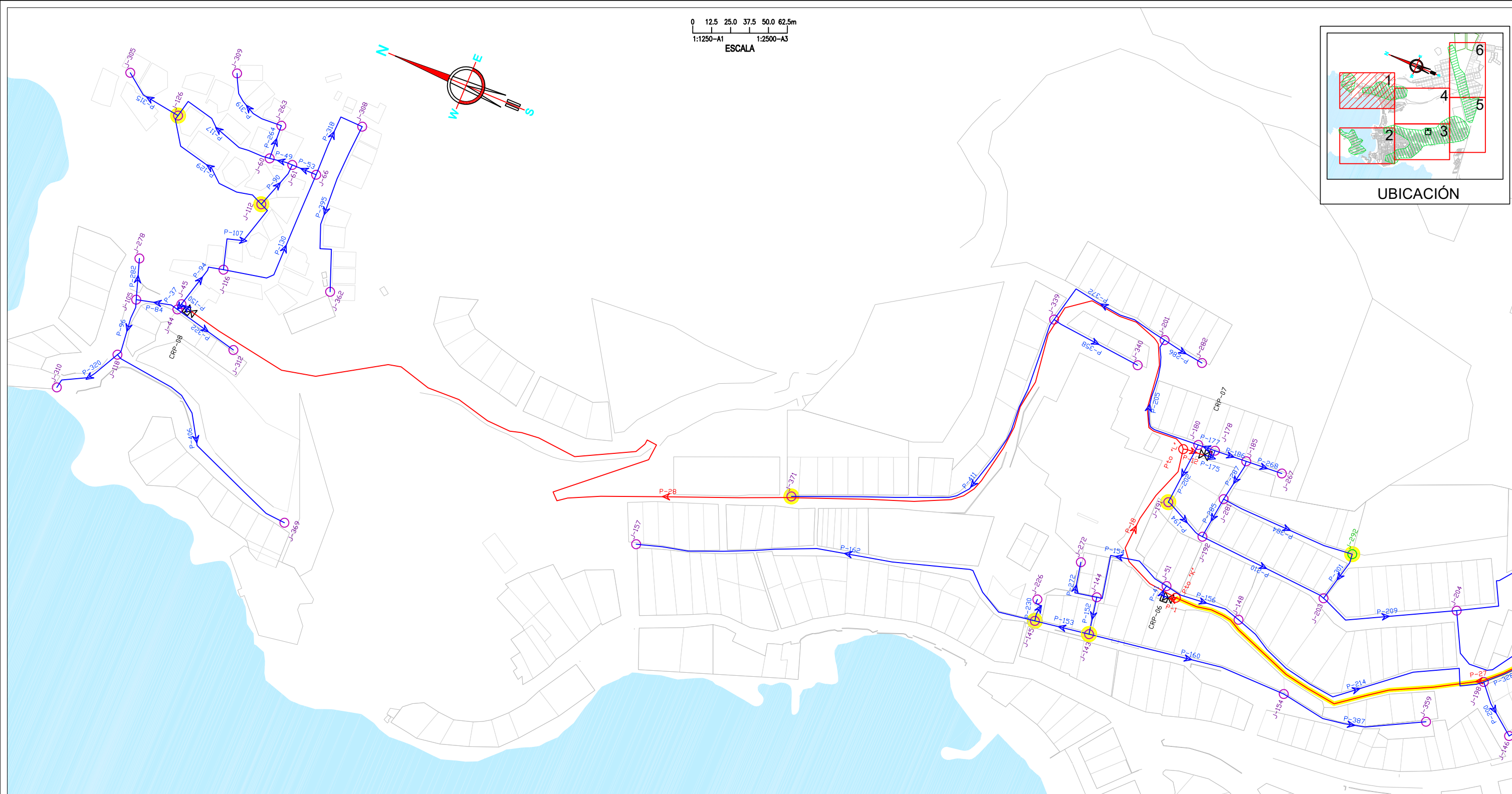
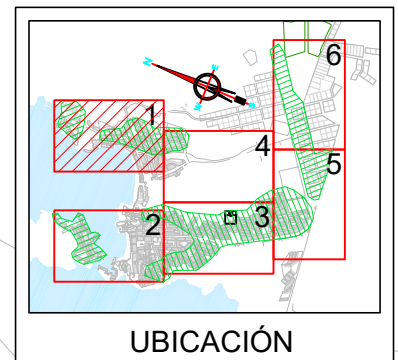
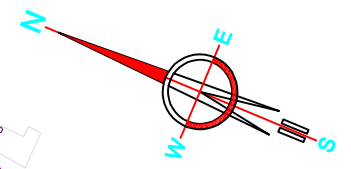
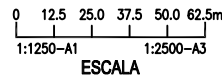
Anexo VII: Composición y crecimiento poblacional de la red RAP-02

ANEXO VII
COMPOSICIÓN Y PROYECCION DE CRECIMIENTO POBLACIONAL - RED RAP-02

AÑO	POBLAC. (Hab.)	COBERTURA (%)		POBLAC. SERVIDA (Hab.)	LOTES SERVIDOS (und)	CONEXIONES																		
		CONEX.	OTROS MEDIOS (*)			DOMÉSTICAS			COMERCIALES			INDUSTRIALES			ESTATALES			SOCIALES			TOTAL			
						C/MED.	S/MED.	TOTAL	C/MED.	S/MED.	TOTAL	C/MED.	S/MED.	TOTAL	C/MED.	S/MED.	TOTAL	C/MED.	S/MED.	TOTAL	C/MED.	S/MED.	TOTAL	
2,013	Base	5,537	8.48%	91.5%	471	98	98	0	98	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	99	0	99
2,014	Exp.	5,767	8.17%	91.8%	471	98	98	0	98	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	99	0	99
2,015	0	6,006	7.84%	92.2%	471	98	98	0	98	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	99	0	99
2,016	1	6,254	100.00%	0.0%	6,254	1,306	1,306	0	1,306	4	0	4	0	0	0	4	0	4	26	0	26	1,340	0	1,340
2,017	2	6,512	100.00%	0.0%	6,512	1,359	1,359	0	1,359	4	0	4	0	0	0	4	0	4	26	0	26	1,393	0	1,393
2,018	3	6,781	100.00%	0.0%	6,781	1,416	1,416	0	1,416	4	0	4	0	0	0	4	0	4	26	0	26	1,450	0	1,450
2,019	4	7,061	100.00%	0.0%	7,061	1,473	1,473	0	1,473	4	0	4	0	0	0	4	0	4	26	0	26	1,507	0	1,507
2,020	5	7,352	100.00%	0.0%	7,352	1,536	1,536	0	1,536	4	0	4	0	0	0	4	0	4	26	0	26	1,570	0	1,570
2,021	6	7,655	100.00%	0.0%	7,655	1,598	1,598	0	1,598	4	0	4	0	0	0	4	0	4	27	0	27	1,633	0	1,633
2,022	7	7,970	100.00%	0.0%	7,970	1,664	1,664	0	1,664	4	0	4	0	0	0	4	0	4	27	0	27	1,699	0	1,699
2,023	8	8,299	100.00%	0.0%	8,299	1,733	1,733	0	1,733	4	0	4	0	0	0	4	0	4	27	0	27	1,768	0	1,768
2,024	9	8,642	100.00%	0.0%	8,642	1,804	1,804	0	1,804	4	0	4	0	0	0	4	0	4	27	0	27	1,839	0	1,839
2,025	10	8,998	100.00%	0.0%	8,998	1,880	1,880	0	1,880	4	0	4	0	0	0	4	0	4	27	0	27	1,915	0	1,915
2,026	11	9,367	100.00%	0.0%	9,367	1,956	1,956	0	1,956	4	0	4	0	0	0	4	0	4	28	0	28	1,992	0	1,992
2,027	12	9,754	100.00%	0.0%	9,754	2,036	2,036	0	2,036	4	0	4	0	0	0	4	0	4	28	0	28	2,072	0	2,072
2,028	13	10,156	100.00%	0.0%	10,156	2,120	2,120	0	2,120	4	0	4	0	0	0	4	0	4	28	0	28	2,156	0	2,156
2,029	14	10,574	100.00%	0.0%	10,574	2,208	2,208	0	2,208	4	0	4	0	0	0	4	0	4	28	0	28	2,244	0	2,244
2,030	15	11,011	100.00%	0.0%	11,011	2,298	2,298	0	2,298	4	0	4	0	0	0	4	0	4	29	0	29	2,335	0	2,335
2,031	16	11,465	100.00%	0.0%	11,465	2,394	2,394	0	2,394	4	0	4	0	0	0	4	0	4	29	0	29	2,431	0	2,431
2,032	17	11,937	100.00%	0.0%	11,937	2,493	2,493	0	2,493	4	0	4	0	0	0	4	0	4	29	0	29	2,530	0	2,530
2,033	18	12,430	100.00%	0.0%	12,430	2,597	2,597	0	2,597	4	0	4	0	0	0	4	0	4	29	0	29	2,634	0	2,634
2,034	19	12,942	100.00%	0.0%	12,942	2,701	2,701	0	2,701	4	0	4	0	0	0	4	0	4	29	0	29	2,738	0	2,738
2,035	20	13,476	100.00%	0.0%	13,476	2,812	2,812	0	2,812	4	0	4	0	0	0	4	0	4	30	0	30	2,850	0	2,850
2,036	21	14,032	100.0%	0.0%	14,032	2,930	2,930	0	2,930	4	0	4	0	0	0	4	0	4	30	0	30	2,968	0	2,968

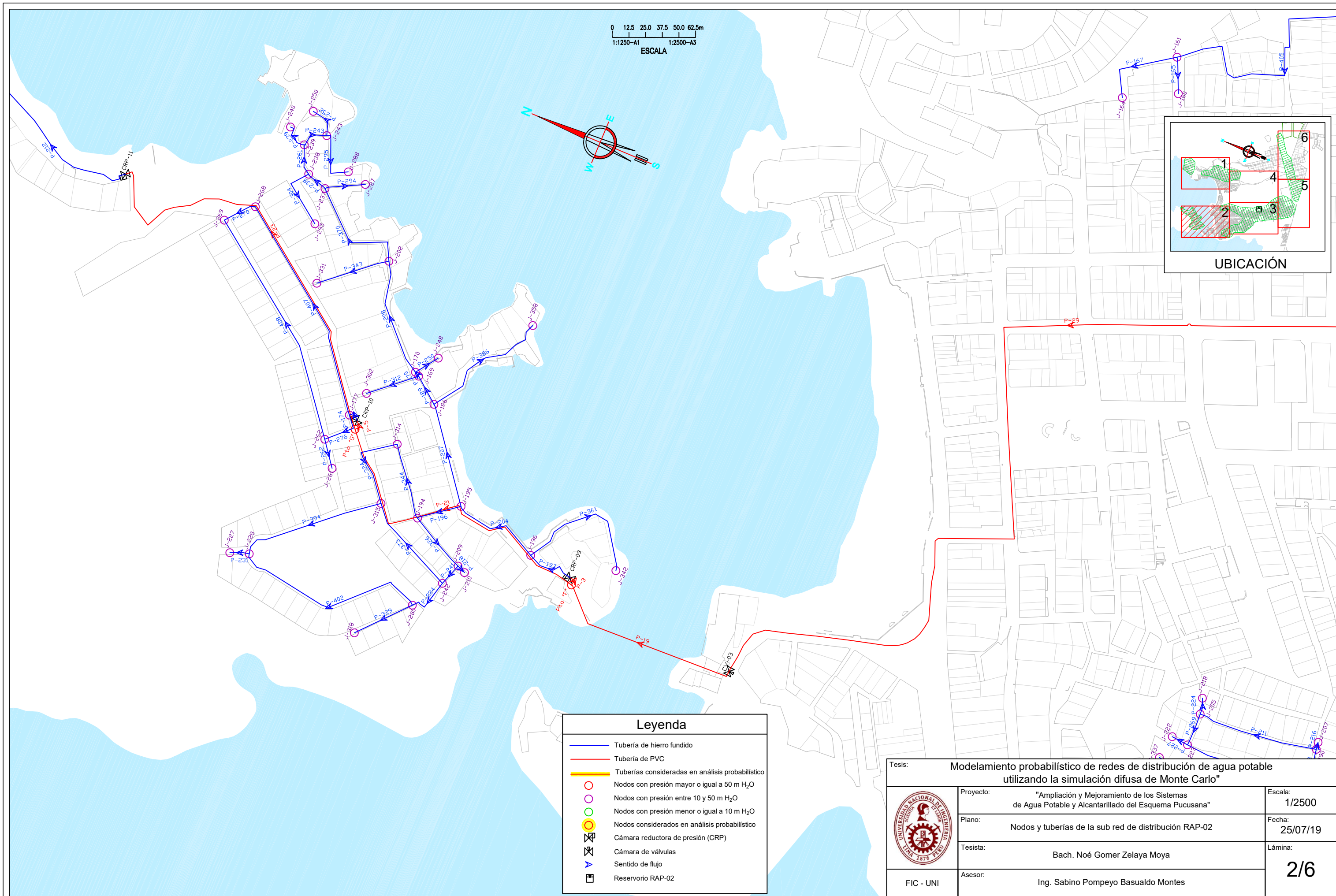
(*) Fuente: Consorcio Saneamiento Lima Sur

Anexo VIII: Plano de nodos y tuberías de la red RAP-02

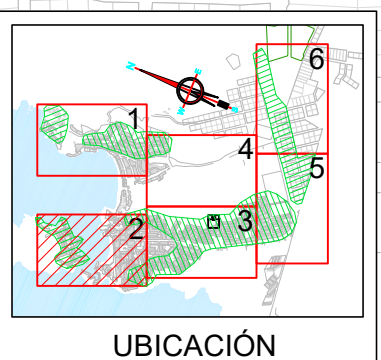
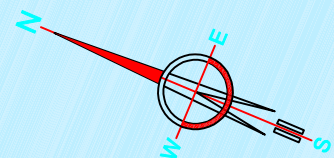


Leyenda	
	Tubería de hierro fundido
	Tubería de PVC
	Tuberías consideradas en análisis probabilístico
	Nodos con presión mayor o igual a 50 m H ₂ O
	Nodos con presión entre 10 y 50 m H ₂ O
	Nodos con presión menor o igual a 10 m H ₂ O
	Nodos considerados en análisis probabilístico
	Cámara reductora de presión (CRP)
	Cámara de válvulas
	Sentido de flujo
	Reservorio RAP-02

Tesis: Modelamiento probabilístico de redes de distribución de agua potable utilizando la simulación difusa de Monte Carlo				
	Proyecto:	"Ampliación y Mejoramiento de los Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado del Esquema Pucusana"	Escala:	1/2500
	Plano:	Nodos y tuberías de la sub red de distribución RAP-02	Fecha:	25/07/19
	Tesista:	Bach. Noé Gomer Zelaya Moya	Lámina:	1/6
	Asesor:	Ing. Sabino Pompeyo Basualdo Montes		
FIC - UNI				

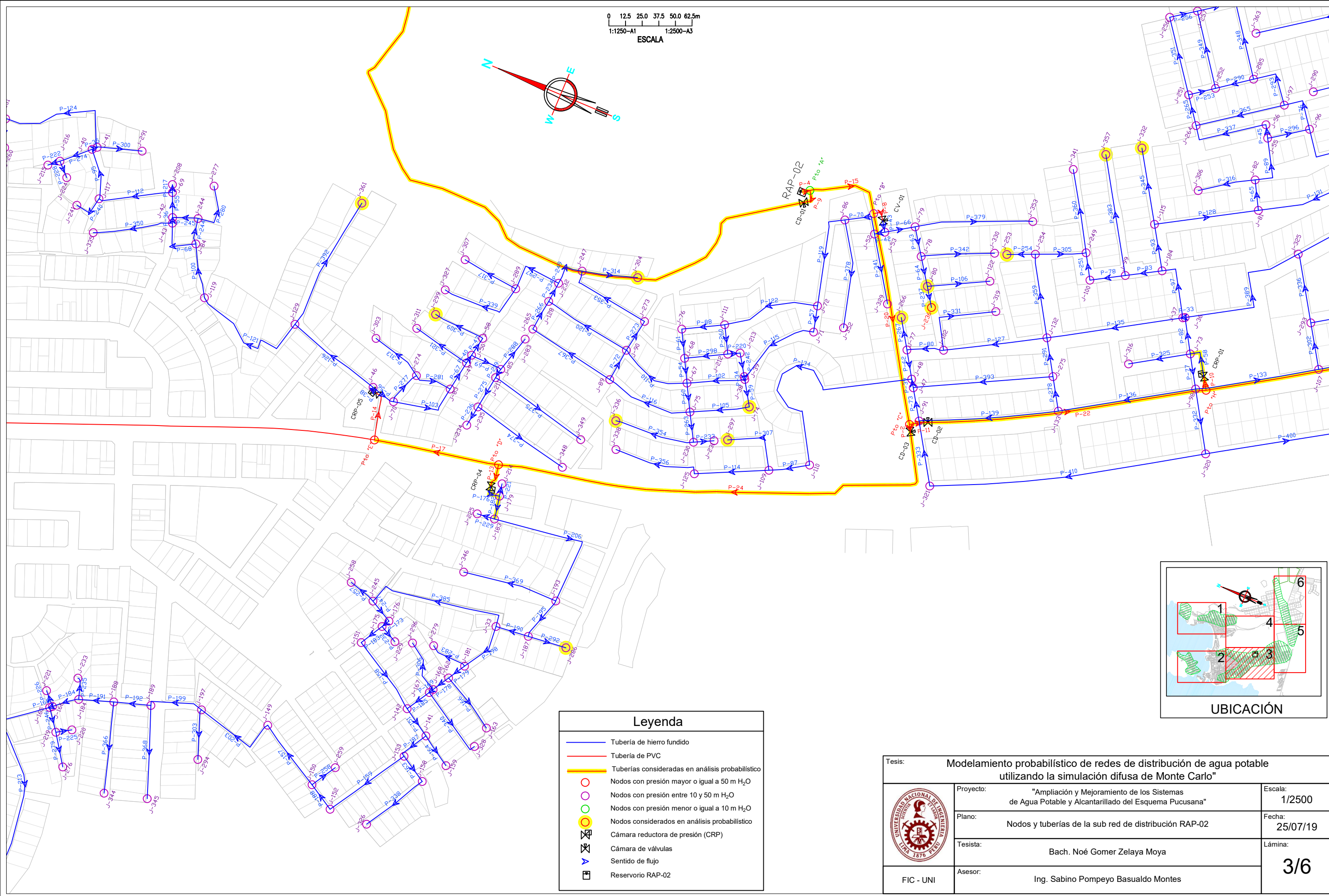
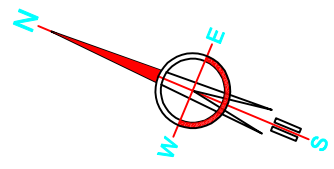
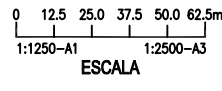


0 12.5 25.0 37.5 50.0 62.5m
 1:1250-A1 1:2500-A3
 ESCALA

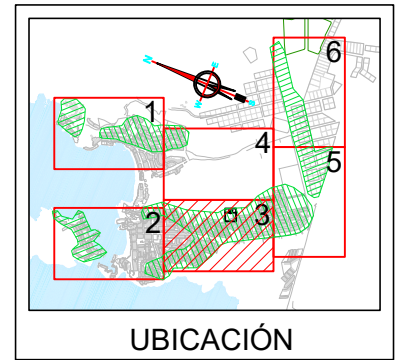


Leyenda	
	Tubería de hierro fundido
	Tubería de PVC
	Tuberías consideradas en análisis probabilístico
	Nodos con presión mayor o igual a 50 m H ₂ O
	Nodos con presión entre 10 y 50 m H ₂ O
	Nodos con presión menor o igual a 10 m H ₂ O
	Nodos considerados en análisis probabilístico
	Cámara reductora de presión (CRP)
	Cámara de válvulas
	Sentido de flujo
	Reservorio RAP-02

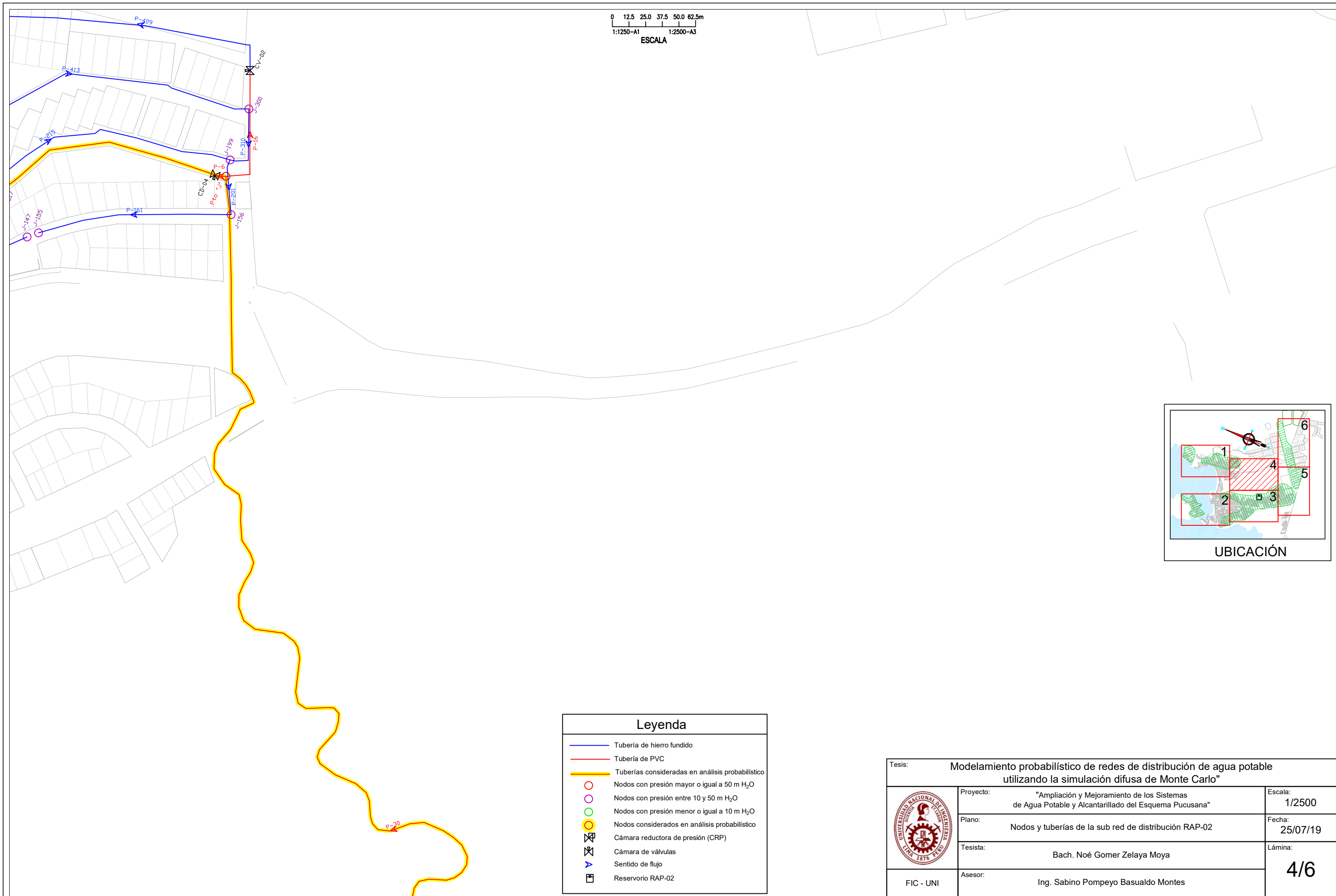
Tesis: Modelamiento probabilístico de redes de distribución de agua potable utilizando la simulación difusa de Monte Carlo		
	Proyecto: "Ampliación y Mejoramiento de los Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado del Esquema Pucusana"	Escala: 1/2500
	Plano: Nodos y tuberías de la sub red de distribución RAP-02	Fecha: 25/07/19
	Tesista: Bach. Noé Gomer Zelaya Moya	Lámina: 2/6
	Asesor: Ing. Sabino Pompeyo Basualdo Montes	
FIC - UNI		



Leyenda	
	Tubería de hierro fundido
	Tubería de PVC
	Tuberías consideradas en análisis probabilístico
	Nodos con presión mayor o igual a 50 m H ₂ O
	Nodos con presión entre 10 y 50 m H ₂ O
	Nodos con presión menor o igual a 10 m H ₂ O
	Nodos considerados en análisis probabilístico
	Cámara reductora de presión (CRP)
	Cámara de válvulas
	Sentido de flujo
	Reservorio RAP-02

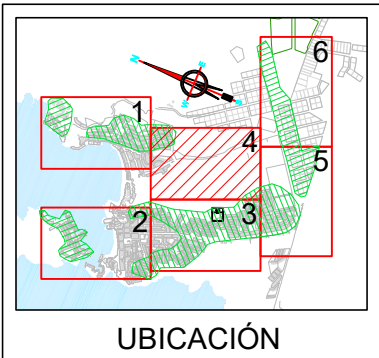


Tesis: Modelamiento probabilístico de redes de distribución de agua potable utilizando la simulación difusa de Monte Carlo		
	Proyecto: "Ampliación y Mejoramiento de los Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado del Esquema Pucusana"	Escala: 1/2500
	Plano: Nodos y tuberías de la sub red de distribución RAP-02	Fecha: 25/07/19
	Tesista: Bach. Noé Gomer Zelaya Moya	Lámina: 3/6
FIC - UNI	Asesor: Ing. Sabino Pompeyo Basualdo Montes	

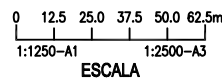
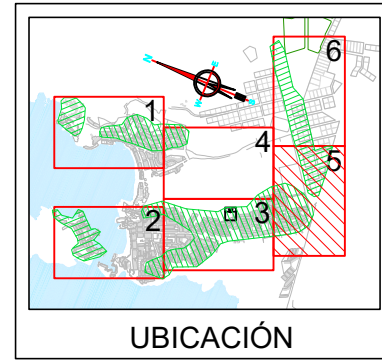
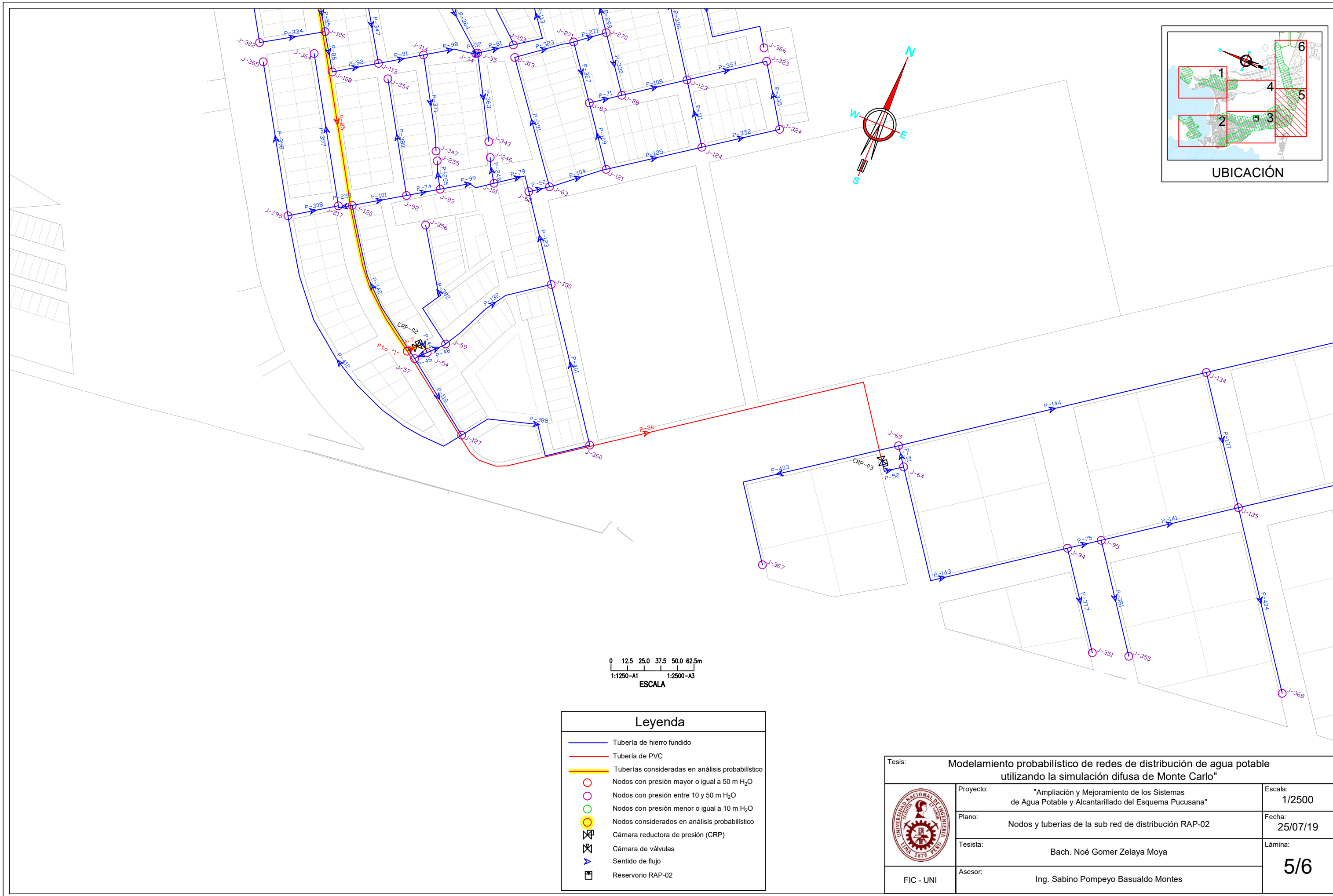


0 12.5 25.0 37.5 50.0 62.5m
 1:1250-A1 1:2500-A3
 ESCALA

Leyenda	
	Tubería de hierro fundido
	Tubería de PVC
	Tuberías consideradas en análisis probabilístico
	Nodos con presión mayor o igual a 50 m H ₂ O
	Nodos con presión entre 10 y 50 m H ₂ O
	Nodos con presión menor o igual a 10 m H ₂ O
	Nodos considerados en análisis probabilístico
	Cámara reductora de presión (CRP)
	Cámara de válvulas
	Sentido de flujo
	Reservorio RAP-02

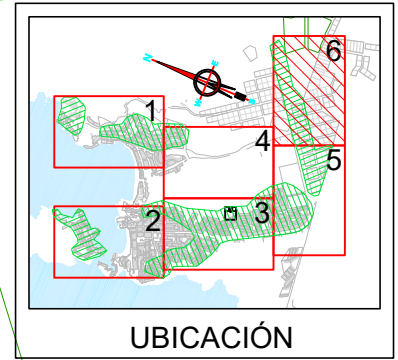
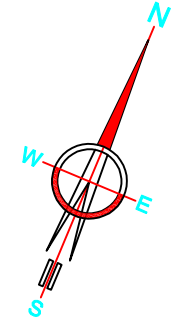
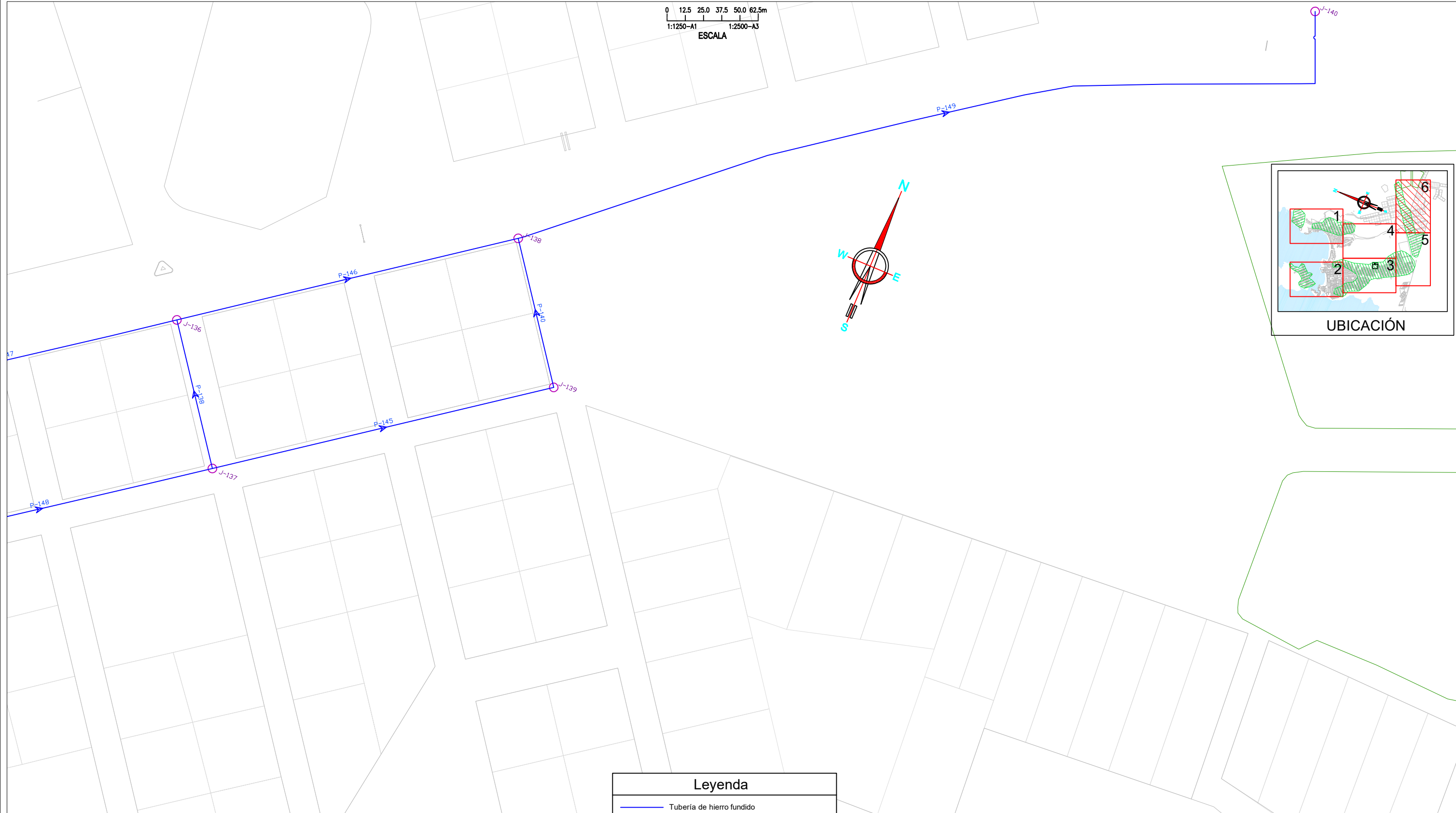
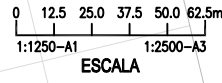


Tesis:	Modelamiento probabilístico de redes de distribución de agua potable utilizando la simulación difusa de Monte Carlo"	
	Proyecto: "Ampliación y Mejoramiento de los Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado del Esquema Pucusana"	Escala: 1/2500
	Plano: Nodos y tuberías de la sub red de distribución RAP-02	Fecha: 25/07/19
	Tesista: Bach. Noé Gomer Zelaya Moya	Lámina: 4/6
FIC - UNI	Asesor: Ing. Sabino Pompeyo Basualdo Montes	



Leyenda	
	Tubería de hierro fundido
	Tubería de PVC
	Tuberías consideradas en análisis probabilístico
	Nodos con presión mayor o igual a 50 m H ₂ O
	Nodos con presión entre 10 y 50 m H ₂ O
	Nodos con presión menor o igual a 10 m H ₂ O
	Nodos considerados en análisis probabilístico
	Cámara reductora de presión (CRP)
	Cámara de válvulas
	Sentido de flujo
	Reservorio RAP-02

Tesis: Modelamiento probabilístico de redes de distribución de agua potable utilizando la simulación difusa de Monte Carlo		
	Proyecto: "Ampliación y Mejoramiento de los Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado del Esquema Pucusana"	Escala: 1/2500
	Plano: Nodos y tuberías de la sub red de distribución RAP-02	Fecha: 25/07/19
	Tesista: Bach. Noé Gomer Zelaya Moya	Lámina: 5/6
	Asesor: Ing. Sabino Pompeyo Basualdo Montes	
FIC - UNI		



Leyenda	
	Tubería de hierro fundido
	Tubería de PVC
	Tuberías consideradas en análisis probabilístico
	Nodos con presión mayor o igual a 50 m H ₂ O
	Nodos con presión entre 10 y 50 m H ₂ O
	Nodos con presión menor o igual a 10 m H ₂ O
	Nodos considerados en análisis probabilístico
	Cámara reductora de presión (CRP)
	Cámara de válvulas
	Sentido de flujo
	Reservorio RAP-02

	Tesis: Modelamiento probabilístico de redes de distribución de agua potable utilizando la simulación difusa de Monte Carlo	
	Proyecto: "Ampliación y Mejoramiento de los Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado del Esquema Pucusana"	Escala: 1/2500
	Plano: Nodos y tuberías de la sub red de distribución RAP-02	Fecha: 25/07/19
	Tesista: Bach. Noé Gomer Zelaya Moya	Lámina: 6/6
FIC - UNI	Asesor: Ing. Sabino Pompeyo Basualdo Montes	