



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**Evaluación de las demandas en los nudos de consumo conocido,
en redes de riego.**

TRABAJO DE TITULACIÓN.

AUTOR: Jiménez Iñiguez, Franco Jefferson.

DIRECTORA: Lapo Pauta, Carmen Mireya, MSc.

CODIRECTOR: Rojas Asuero, Henry Vicente MSc.

LOJA- ECUADOR

2018



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NC-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2018

APROBACIÓN DE LA DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Máster.

Carmen Mireya Lapo Pauta

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: **“Evaluación de las demandas en los nudos de consumo conocido, en redes de riego”** realizado por **Jiménez Iñiguez Franco Jefferson**, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, octubre de 2018.

f)

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **Jiménez Iñiguez Franco Jefferson**, declaro ser autor del presente trabajo de titulación: **“Evaluación de las demandas en los nudos de consumo conocido, en redes de riego”**, de la Titulación de **Ingeniería Civil**, siendo MSc. **Carmen Mireya Lapo Pauta** directora del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f)

Autor: Jiménez Iñiguez Franco Jefferson.

Cedula: 1103959126.

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación está dedicado a los seres que han enriquecido mi vida el cual es fuente de inspiración.

A Dios, porque me ha dado la vida, salud y fortaleza para mantenerme en pie cada instante de mi vida.

A mi familia, por ser parte de mi vida, a mis padres, Franco y Patricia, por todo el esfuerzo y sacrificio. Así mismo, por darme lo mejor para verme surgir y por transmitirme su amor y reflejar en mí las ganas de salir adelante.

A mis hermanas Angie, Anita e Inés por ser el pilar fundamental y mis pasos a seguir.

A mis abuelitos Samuel y Ursulina, por sus bendiciones.

A mi primo Iván Iñiguez que con su ejemplo logré cumplir mis metas y desde el cielo será mi colega y compañero.

A mí persona, por mis deseos de superación, de crecimiento personal, por motivarme a alcanzar metas, ya que con la ayuda de mi amigo incondicional que es Dios, el amor de mi familia y firmeza propia puedo decir pude llegar hasta donde estoy ahora y lograré alcanzar mucho más, puesto que vivo el sueño más hermoso que Dios ya soñó para mí.

El autor

AGRADECIMIENTO

Mi eterno agradecimiento a la Universidad Técnica Particular de Loja, en especial a los docentes de la titulación de Ingeniería Civil, por transmitir con dedicación y vocación los conocimientos obtenidos hasta el momento.

A Mireya Lapo, directora de tesis, por su paciencia, entrega y dirección acertada en el desarrollo del presente trabajo.

A Henry Rojas, co-director de tesis, por su guía y asesoría en la investigación.

A mis compañeros, por los momentos gratos que pasamos dentro de la formación de la carrera.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	i
APROBACIÓN DE LA DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN EJECUTIVO	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO I	5
MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Redes de riego.....	6
2.1.1 Sistemas de riego a presión.....	6
2.2 Riego presurizado con aspersores.....	7
2.3 Elementos para el diseño redes de riego presurizado.	9
2.3.1 Diseño agronómico (CROPWAT 8.0).	10
2.3.2 Parámetros para el cálculo del caudal por línea.....	11
2.3.3 Diseño hidráulico.	14
2.4 Ecuación del hidrante (emisor final).	20
2.5 Modelización de curvas de la Demanda Dependientes de la Presión (DDP) .	22
2.6 Demanda dependiente de la presión (<i>Pressure Driven Analysis</i> , PDA).	25
2.7 Modelación hidráulica.	27
2.7.1 WaterNetGen.....	28
2.7.2 Gestar.	28

CAPÍTULO II	30
MATERIALES Y MÉTODOS	30
3.1 Área de estudio.....	31
3.1.1 Ubicación.....	31
3.1.2 Clima.....	32
3.1.3 Área de riego.....	32
3.1.4 Distribución de parcelas.....	33
3.1.5 Plano de la red.....	33
3.1.6 Caracterización del sistema actual.....	34
3.2 Metodología.....	34
3.2.1 Consideraciones generales durante la simulación hidráulica.....	35
3.2.2 Criterios de asignación de la demanda dependiente de la presión mediante software de aplicación WaterNetGen.....	37
3.2.3 Asignación de la demanda en período extendido (Cuasiestático).....	44
CAPÍTULO III	46
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	46
4.1 Asignación de la demanda por la ecuación del emisor K_i inicial.....	47
4.2 Asignación de la demanda dependiente de la presión (PDA).....	49
4.3 Resultados de la asignación en período extendido (Cuasiestático).....	54
CONCLUSIONES.....	57
TRABAJOS FUTUROS	59
BIBLIOGRAFÍA.....	60
ANEXOS	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de garantía de suministro en función del grado de seguridad.	13
Tabla 2. Coeficientes de pérdidas menores para accesorios típicos.	18
Tabla 3. Valores de exponentes de la ecuación del emisor.	22
Tabla 4. Revisión de los estados de los emisores.	24
Tabla 5. Características físicas del caso de estudio, San Rafael.	32
Tabla 6. Cultivos de la red San Rafael.	32
Tabla 7. Distribución de parcelas, San Rafael.	33
Tabla 8. Descripción técnica del aspersor comercial (MegaNet naranja 650 L/h).	38
Tabla 9. Desviación estándar del coeficiente K_i en los hidrantes	48
Tabla 10. Velocidad excedida en las tuberías de la red de los criterios de asignación.	51
Tabla 11. Variación de los criterios de asignación de la demanda en la red San Rafael	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Aspersores típicos de baja presión.....	8
Figura 2. Aspersor de presión dinámica alta.	8
Figura 3. Aspersor de impacto con dos boquillas.	9
Figura 4. Flujograma de un sistema de riego presurizado.	9
Figura 5. Flujograma de módulos en software CropWat.	10
Figura 6. Flujograma de diseño hidráulico	14
Figura 7. Diagrama de la ecuación de energía aplicada a una tubería.	15
Figura 8. Exponentes de la ecuación del hidrante.....	22
Figura 9. Curva de consumo dependiente de presión propuesta por Bhave.....	23
Figura 10. Curva de consumo dependiente de presión propuesta por Reddy.	23
Figura 11. Curva de consumo dependiente de presión propuesta por Wagner.	24
Figura 12. Curva de consumo dependiente de presión propuesta por Fujiwara.	25
Figura 13. Comportamiento de la demanda independiente de la presión (DDA).	26
Figura 14. Comportamiento de la demanda dependiente de la presión (PDA).	27
Figura 15. Modelación de cálculo hidráulico a presión.....	27
Figura 16. Software gratuito WaterNetGen.....	28
Figura 17. Arquitectura de Gestar.....	29
Figura 18. Ubicación del proyecto San Rafael.....	31
Figura 19. Planimetría de la red San Rafael.....	33
Figura 20. Proceso general de metodología del proyecto de investigación.....	35
Figura 21. Ingreso de la diferencia de caudales (negativa) en el nudo 119, red San Rafael.	36
Figura 22. Escenarios en criterios de asignación en la red San Rafael.....	37
Figura 23. Ajuste de potencia de la ecuación del emisor por mínimos cuadrados.....	39
Figura 24. Ingreso de los criterios de asignación – Nudo 111 (H-59) de la red San Rafael.	41
Figura 25. Ingreso en rango de presión mínima de trabajo (PDA) - Red San Rafael.	42
Figura 26. Configuración de unidades de la presión de consigna (PDA) – Red de estudio San Rafael.	43
Figura 27. Ingreso de la presión de consigna en el nudo (PDA) - Red de estudio San Rafael.....	43

Figura 28. Ingreso de los diferentes criterios de asignación – Nudo 7 de la red Tipo.....	44
Figura 29. Patrón del período extendido en la red San Rafael.	45
Figura 30. Opciones del tiempo durante el período extendido en la red San Rafael.	45
Figura 31. Criterios de asignación de la demanda por coeficiente K_i (ecuación inicial del emisor).	47
Figura 32. Variación entre el consumo del nudo como Demanda neta y emisor K_i	48
Figura 33. Variación del criterio de asignación de la demanda en relación al coeficiente K_i	49
Figura 34. Demanda frente a los distintos escenarios simulados en la red.....	49
Figura 35. Presión frente a los distintos escenarios de la red.....	50
Figura 36. Velocidades de los escenarios en los nudos de red.	51
Figura 37. Criterios de modelación del hidrante en el nudo 100 de la red San Rafael.	52
Figura 38. Demanda y Presión frente al incremento de la demanda en los nudos bajo el criterio del Emisor K_i	53
Figura 39. Demanda y Presión frente a un incremento de la demanda en los nudos con criterio PDA.....	53
Figura 40. Demanda en el criterio PDA en la red San Rafael bajo período extendido.....	55
Figura 41. Demanda en el criterio del emisor K_i en la red San Rafael bajo período extendido.	56

RESUMEN EJECUTIVO

Las condiciones iniciales asumidas en el diseño de redes de riego a presión, durante la operación de la red no siempre se cumplen. Debido a situaciones emergentes que producen una disminución significativa de presión o demanda en los nudos. Se asume que esto se debe a un mal criterio en la asignación de la demanda, donde no se considera su presión durante la simulación. Actualmente se modela este tipo de redes, al considerar la presión en el nudo de consumo conocido, por medio de la ecuación del emisor K. Sin embargo, existe la posibilidad de evaluar la demanda según otros criterios, como el criterio de la curva de Wagner. En el presente trabajo de investigación se evaluarán diferentes criterios de asignación de la demanda dependientes de la presión (PDA) durante la simulación. Estos criterios se implementaron en la comunidad de regantes "San Rafael" en la provincia de Chimborazo. Los resultados muestran que en condiciones emergentes se logró obtener un ahorro del 20 % del caudal en la red, bajo el criterio de Wagner en la asignación PDA durante la simulación.

Palabras clave: Simulación, coeficiente de emisor, dotación, hidrantes, PDA.

ABSTRACT

The initial conditions assumed in the design of pressure irrigation networks during the network's operation are not always met, due to emergent situations that produce a significant decline of pressure or demand in the knots. It is assumed that this is due to poor criteria in the assignation of demand where pressure is not considered when simulating the behavior of networks. Currently this type of network is modeled by considering the pressure in the known consumption node, through the use of the K emitter's equation. However, there's a possibility to evaluate the demand according to other criteria, such as the Wagner curve criterion. In the present research work different criteria for the allocation of demand dependent on pressure (PDA) during the simulation will be evaluated. Those criteria were implemented in the community of irrigators "San Rafael" of Chimborazo province. The results show that in emerging conditions it was possible to obtain a saving of 20 % of the flow of the network under the Wagner criterion in the PDA assignment during the simulation.

Keywords: Simulation, emitter coefficient, endowment, hydrants, PDA.

INTRODUCCIÓN

Los modelos de redes hidráulicas son ampliamente usados como herramientas para simular los sistemas de distribución de agua (*Water Distribution Systems*, WDS) (Jun & Guoping, 2012). Un sistema de asignación de la demanda independiente de la presión (DDA) no es capaz de simular los sistemas WDS bajo condiciones emergentes como colapso de: tuberías y bombas hidráulicas (Brave & Gupta, 2006). Así pues, muchos investigadores se enfocaron en cómo formular la demanda dependiente de la presión en el nudo mediante varios criterios de curvas dependientes de la presión (DDP). En 1981 Bhawe, fue el primer autor en aplicar curvas dependientes de la presión bajo ciertos criterios. Para considerar la presión en los nudos de consumo en redes de abastecimiento es común emplear el criterio de Wagner, Shamir, & Marks (1988). Dicho criterio se adapta mejor a las condiciones ejecutadas con un exponente de 0.51, el cual se determinó mediante pruebas y mediciones de laboratorio en una red de estudio por Shirzad, Tabesh, Framani, & Mohammadi (2012).

En el año 1993 Lewis Rossman realizó la mejora del modelo hidráulico con el lanzamiento de EPANET por (*United States Environmental Protection Agency*, USEPA). Este modelo simula el comportamiento hidráulico y la calidad del agua en sistemas de abastecimiento (Rossman, 2000). Los autores Jun & Guoping (2012), argumentan el desarrollo de un orificio en los nudos de consumo dependientes de la presión. El cual se aplica en hidrantes contra incendios en redes urbanas, hidrantes en riego a presión o para representar alguna fuga existente en la red (Rossman, 2000). Por otro lado, EPANET supone que la salida del flujo en los nudos de consumo son independientes de la demanda (DDA)(Rossman, 2000). Dicho enfoque es bastante preciso cuando el sistema opera bajo presiones adecuadas, pero no si las presiones son insuficientes. De modo que Cheung, Van Zyl, & L.F.R. (2005) modificaron el código abierto de EPANET por medio de la herramienta OOTEN y utilizaron la aplicación de la ecuación del emisor. Posterior Giustolisi, Savic, & Kapelan (2008) presentaron un modelo de simulación más realista que permita considerar la presión en el nudo, donde sea posible el análisis de fugas en la red.

En el año 2010 para asignar la demanda en función de la presión fue empleada la ecuación del emisor por Pathirana mediante la (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura, UNESCO-IHE) (Pathirana, 2010). Posteriormente, con el uso de la herramienta de Toolkit en el año 2012 se desarrolló una extensión en EPANET llamada WaterNetGen de acceso libre creada por Muranho, Ferreira, Sousa, Gomes, & Sá Marques (2012). WaterNetGen se empleó en la investigación para la simulación hidráulica, donde se considera la presión en el nudo mediante curvas (DDA), bajo el criterio de Wagner et al.(1988). El programa ofrece una herramienta para el análisis de los consumos en base a la demanda dependiente de la presión en el nudo (*Pressure Driven Analysis*, PDA).

En la simulación hidráulica de redes presurizadas usualmente se realiza un análisis convencional basado en la demanda (*Demand Driven Analysis*, DDA), y supone que las demandas son satisfechas por el sistema independiente de la presión (Siew & Tanyimboh, 2012). Dichos sistemas causan bajos rendimiento por la variación de la presión y caudal en la red de riego (Lamaddalena & Pereira, 2007). El dimensionamiento de estos sistemas solicita una sistemática selección de la demanda y control de presión (Alandí, Álvarez, & Martín-Benito, 2007). Por lo tanto, cuando se produce una falla por la rotura de la tubería o avería de una bomba, la red continúa su funcionamiento sin considerar que en el nudo se asignará una demanda con presión negativa (Rossman, 2000). Frente a este inconveniente se han implementado dos criterios de asignación que consideran la presión en el nudo:

- Curva característica del Emisor K (hidrantes), a través del uso del coeficiente de emisor que se traduce en una ecuación exponencial. Dicha ecuación es la que se emplea actualmente en sistemas de riego, en base al tipo de emisor comercial empleado.
- Curvas dependientes de presión (*Pressure Dependent Demands Formulation*, DDP), usadas en redes de abastecimiento para asegurar las presiones de consigna en grandes edificaciones (Conejos, 2015). El criterio de la curva que se ha implementado en el proyecto es el criterio de Wagner, en el análisis de la demanda PDA.

El estudio ha sido aplicado en el sistema de riego presurizado de la comunidad “San Rafael” de Chuquipogyo en la provincia de Chimborazo. La red se conecta aguas abajo con nudos de consumo conocidos tales como aspersores, micro aspersores y goteros que distribuyen el flujo hacia las parcelas del cultivo, donde se toman en consideración criterios (DDA, PDA, Emisor K). Con ello se define un criterio de asignación de las demandas a los hidrantes en redes de riego en base a la presión de trabajo del aspersor comercial. Se simulan diferentes escenarios de asignación tanto en condiciones normales de la red como en condiciones emergentes. Las condiciones emergentes se presentan cuando existe ruptura de una tubería o si se modifica el sistema de riego en la parcela. De esta manera se proporciona una solución al problema en la gestión de la demanda. Así mismo se determina la influencia de los criterios de presiones en la asignación de la demanda durante la simulación hidráulica.

El proyecto de investigación consta de cinco capítulos. En el capítulo I se presenta el marco teórico, capítulo II metodología y caso de estudio empleado, en el capítulo III análisis de resultados obtenidos, finalmente se mostrará conclusiones y recomendaciones del proyecto.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

2.1 Redes de riego.

Según Losada (1997) el riego es considerado como la operación y resultado de distribuir el caudal hacia los cultivos. A diferencia de los sistemas de abastecimiento en redes de riego suministran mayores caudales a largas distancias, a través de redes ramificadas para reducir costos (Aliod, García, Peña y Seral, 2010). Leonce (1970) citado por Lamaddalena & Sagaradoy (2000) menciona que un sistema de riego será provechoso mediante optimización de su caudal según su función. Además, señala que no se pueden alterar las medidas ambientales como: medios climáticos, recurso hídrico y estructura agrícola (Leonce, 1970). Por lo que se trata de plantear las variables de la red de riego de forma óptima, de tal manera que pueda suministrar un consumo útil (Catalán y Villa, 2009).

La elección del sistema de riego a ejecutar varía de acuerdo a las características del sector como: requerimiento del cultivo, aspectos económicos y mano de obra calificada (García & Briones, 2009).

2.1.1 Sistemas de riego a presión.

En la actualidad, el riego a superficie no cumple por completo las leyes agronómicas establecidas por cada región. Dichas leyes son cada día más exigentes en cuanto a la contaminación del agua. Dicho sistema está directamente relacionada a la cantidad de polvo, aumento de temperatura y estiércol proveniente del ganado (García & Briones, 2009). Es por ello que se ha visto un crecimiento en sistemas de riego a presión con el fin de mitigar los problemas existentes. A nivel mundial el riego por aspersión tiene una gran aceptación por la disminución de costos que implicaba regar (Tarjuelo, 2005).

El riego presurizado se define como sistemas que requieren presiones para la distribución del flujo, cuyas presiones se obtienen a partir de la diferencia de cotas o por impulsión (Hurtado, 2010). En redes de riego se diseña para un limitado número de usuarios por lo que es necesario realizar ajustes que ahorren el consumo, tales como emplear redes ramificadas (Aliod et al., 2010). Dentro de los componentes básicos que tiene un sistema de riego a presión según Santos, Valero, Picornell & Tarjuelo (2010) mencionan los siguientes:

- **Bomba:** Es utilizada cuando la presión piezométrica del lugar no satisface las presiones mínimas en los nudos. Su función principal es aumentar la potencia de presión proporcionada por el motor de la bomba (Tarjuelo, 2005). Así pues, para medir su rendimiento Losada (1997) utiliza la relación entre la potencia de energía transmitida frente a la absorbida por la bomba. Con el fin de aliviar costos en una red de riego se configura la red de tal manera que no exista la necesidad de incrementar dispositivos de impulsión (Huesca, 1993).
- **Tuberías:** En redes de riego los componentes más empleados son el policloruro de vinilo (PVC) y polietileno (PE). Por lo general la tubería PVC se usa en su mayoría por

ser más liviana, económica y cómoda para conectar elementos (Fuentes, 2003). El problema con dichas tuberías es que son plásticas y la vida útil disminuye por la exposición a la radiación solar (Tolentino, 2015). Es por tal razón que las tuberías principales se encuentran dentro del suelo, mientras que las secundarias pertenecen a ramales móviles ubicadas sobre la superficie de la parcela (Santos et al., 2010). En Ecuador para seleccionar el diámetro comercial en el diseño hidráulico se toma en cuenta la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1369 y 1373.

- **Los ramales:** Se definen como las tuberías conectadas a una tubería principal. De estos ramales depende el abastecimiento de toda la parcela (Losada, 2005). Por lo general, según Losada (1997) considera que las tuberías de alimentación disponen de emisores finales como aspersores o goteros, con cierta separación entre ellos.
- **Aspersores:** Según Fuentes (2003) el dispositivo tiene como función pulverizar el caudal en gotas finas y distribuidas de manera uniforme. Por su eficacia es el más usado en riegos presurizados. Es importante mencionar que alrededor del 10% de las áreas previstas para regar de todo el mundo emplean dichos elementos (Santos et al., 2010).

2.2 Riego presurizado con aspersores.

Se lo define como el mecanismo de conversión entre la energía de presión y velocidad por medio de la salida del flujo mediante boquillas (García & Briones, 2009). Además, tiene la función de expulsar un chorro de modo circular y distribuirlo como lluvia artificial (Peña, 2012). A diferencia del emisor que se lo utiliza en casos de riego localizado, el aspersor humedece una determinada superficie en la parcela (Losada, 1997). Cada aspersor está definido por una curva característica de fábrica que se encuentra dentro de ciertos valores. La curva tiene que ser calibrada de manera que no altere el caudal al variar la presión en dicho nudo (Fuentes, 2003). Según Royuela & Turégano (2012) el uso de la fórmula del hidrante es permitida para emisores no compensados, puesto que cuando se aumenta la presión se incrementará el caudal de descarga. En el proyecto se tomará a criterio del diseñador, el emisor más conveniente según las necesidades y condiciones de la parcela. En cuanto a los tipos de aspersores según su presión de trabajo Peña (2012) y Tarjuelo (2005) los agrupan bajo el siguiente criterio:

- Aspersor pequeño: Se lo considera un aspersor de baja presión comúnmente inferior a 2.5 mca. Éste produce caudales desde 0.090 a 0.5 (L/s), con un radio de 7 a 14 (m). Se emplea por lo general en huertos e invernaderos. Este tipo de aspersor se muestra en la **Figura 1.**



Figura 1. Aspersores típicos de baja presión.

Fuente: Peña, 2012.

Elaboración: Peña, 2012.

- Aspersor estándar: Es considerado un emisor de mediana presión, entre un rango de 25 a 40 (mca). Produce caudales de 0.4 a 1.10 (L/s) con radio de riego de 12 a 19 (m). Por lo general posee dos boquillas con diámetros entre 4 a 7 (mm). En la **Figura 2** se muestra un aspersor de dinámica alta.



Figura 2. Aspersor de presión dinámica alta.

Fuente: Peña, 2012.

Elaboración: Peña, 2012.

- Aspersor gigante: Se considera como mecanismo de alta presión que sobrepasa los 40 mca. Este sistema considera emisores a manera de cañones de gran alcance, que suministran caudales entre 2.16 y 14.4 (L/s) de hasta 3 boquillas. El dispositivo posee un radio efectivo de riego entre 25 a 70 (m). En la **Figura 3** se muestra un aspersor de impacto con dos boquillas.



Figura 3. Aspersor de impacto con dos boquillas.
Fuente: Peña, 2012.
Elaboración: Peña, 2012.

2.3 Elementos para el diseño redes de riego presurizado.

Para realizar el diseño del riego es necesario realizar tres procesos, agronómico, hidráulico y modelación. Estos procesos son presentados en la **Figura 4**.

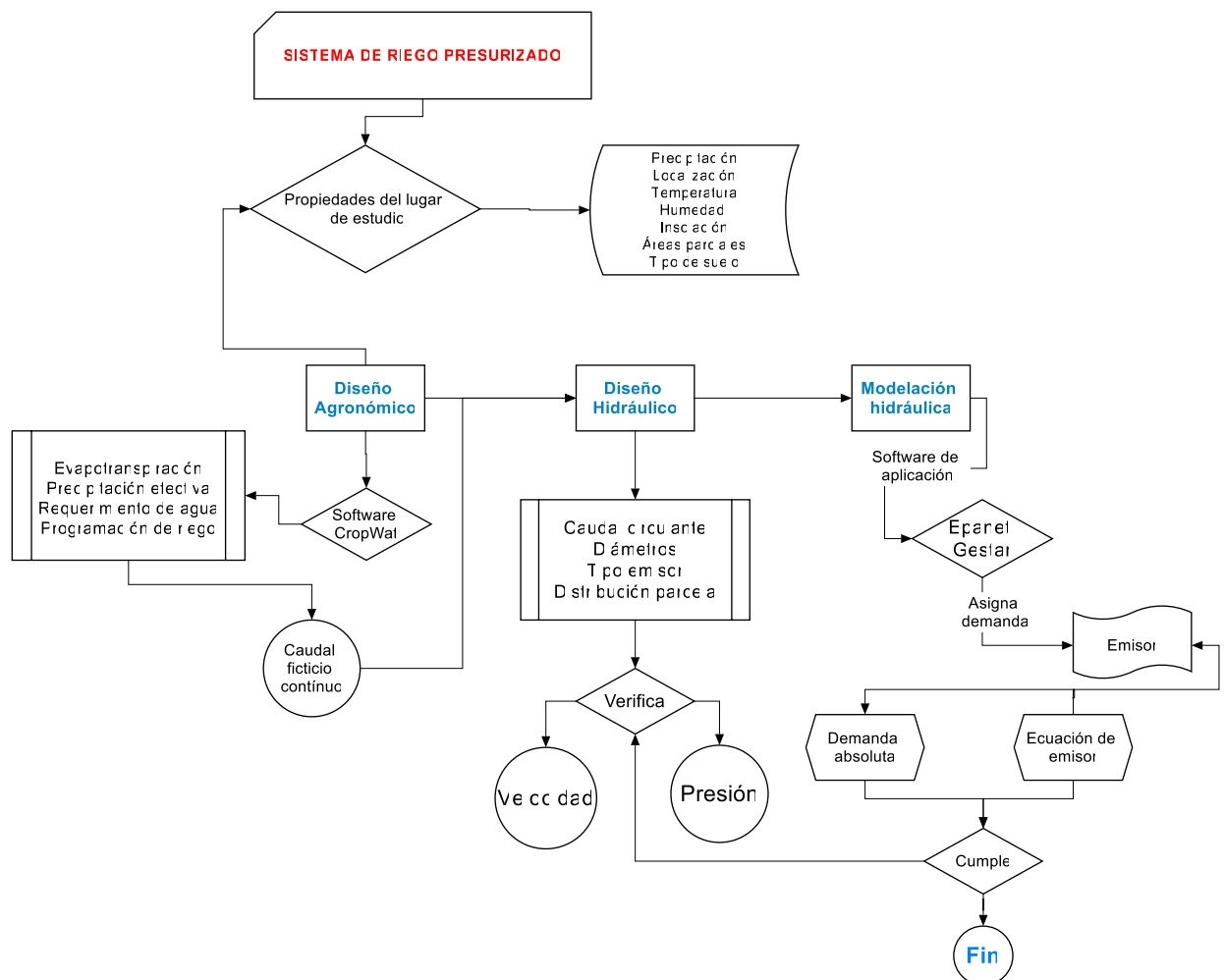


Figura 4. Flujograma de un sistema de riego presurizado.
Fuente: Saldarriaga, 2007 .
Elaboración: Autor.

2.3.1 Diseño agronómico (CROPWAT 8.0).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) tiene en su página oficial (www.fao.org) la posibilidad de descargar completamente gratis el software CropWat 8.0. Es posible determinar las necesidades hídricas de la zona, las cuales dependen tanto de las características del cultivo como de factores externos: clima, suelo y tipo de cultivo (Savva & Frenken, 2002). El estudio agronómico será útil para determinar el caudal ficticio de la red, el cual dependerá del diseño hidráulico. En el caso que la red cuente con varios cultivos en parcela el diseño se realizará para el cultivo que requiera una mayor dotación (Palomino, 2012).

En la **Figura 5** se muestra el proceso empleado en el diseño agronómico:

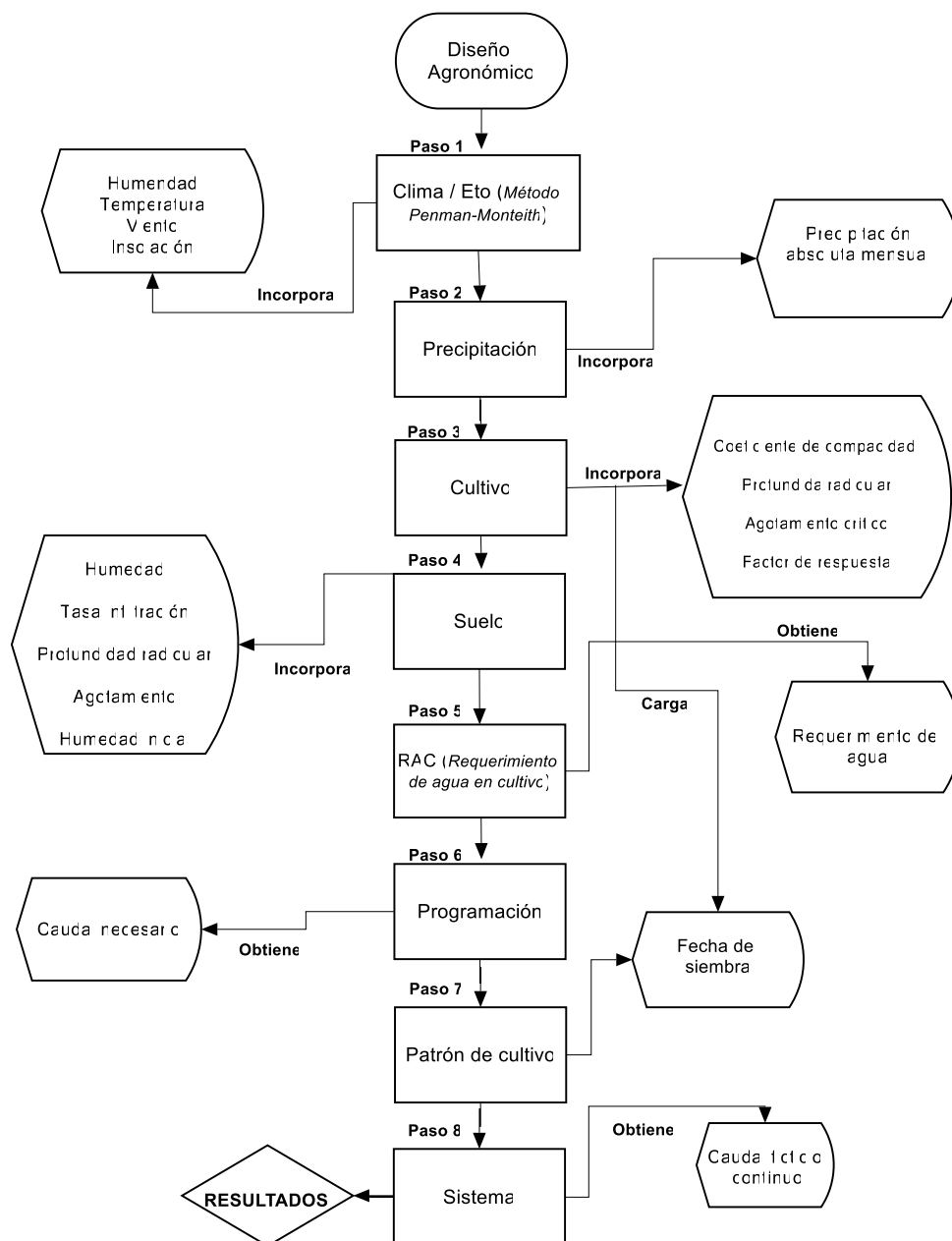


Figura 5. Flujograma de módulos en software CropWat.

Fuente: FAO.

Elaboración: Autor.

El procedimiento general para realizar el diseño agronómico del sector está presentado en el **Anexo A**. Para realizar el diseño según las necesidades del sector se consideró diferentes factores como:

- Datos climáticos del sector de estudios extraídos del INAMHI como la precipitación, velocidad del viento, humedad en la zona, tipo de suelo y temperatura del lugar.
- Las características del suelo se las extrae del sector de estudio, mientras que las necesidades del cultivo a instalar se toman de la FAO: (1) coeficiente Kc; (2) factor de respuesta y (3) profundidad radicular; (4) fracción de agotamiento crítico.

2.3.2 Parámetros para el cálculo del caudal por línea.

Con el estudio agronómico se obtiene el caudal ficticio continuo para establecer el flujo que trasiega por la tubería. El cual se determinará según las especificaciones de los usuarios tales como número de hidrantes, área de las parcelas y horas efectivas de riego (Lamaddalena & Sagaradoy, 2000). El caudal de diseño en las líneas de la red estará en función de su operación, que puede ser determinado según las siguientes modalidades:

a) Modalidad de riego por turnos.

La modalidad de riego a turnos limita el horario de riego a los usuarios durante un período de tiempo determinado. El caudal se considera constante durante el período efectivo de riego, con el fin de aprovechar al máximo la demanda (Lapo, 2012). Esta modalidad beneficia el ahorro de agua en la red. Por tanto, este método según Tarjuelo (2000) es recomendable cuando la parcela no cuente con suficiente caudal o exista poca presión en horas frecuentes de riego.

b) Modalidad de riego a la demanda (Modelos Clément).

Esta modalidad ha sido adoptada en la presente investigación para facilitar a los usuarios labores agrícolas con un alto grado de flexibilidad de uso. Sin embargo, resulta más costoso en relación al diseño por turnos (Lara, 2007). En el campo el agricultor está expuesto a riesgos, por lo que es necesario que decida cuando extraer agua de la red sin necesidad de avisar al administrador del sistema (Lamaddalena & Sagaradoy, 2000).

En su obra Clément (1966) citado por (Lamaddalena & Sagaradoy, 2000) propusieron dos métodos para el riego a la demanda:

- El primer modelo de Clément que posee un enfoque probabilístico y mediante una distribución binomial selecciona el número de hidrante (Lamaddalena & Sagaradoy, 2000).
- El segundo modelo de Clément se basa en la sucesión de apertura en un proceso de inicio y final del hidrante de irrigación (Granados, 2013).

A continuación, se explicará el proceso de cálculo del primer modelo probabilístico de Clément, debido a que es el más empleado actualmente en redes de riego. Para definir algunos conceptos y definiciones se tomó como referencia a autores tales como Lapo, (2012); Aliod, García, & Seral (2010); Pizarro, (1996) quienes definen los siguientes parámetros:

- **Grado de libertad.**

Según la disponibilidad del recurso en el sector de estudio, se determina el Grado de libertad con la **Ec. 1**.

$$GL = \frac{t}{t'} \quad \text{Ec.1}$$

Dónde:

t Cantidad de horas en el día.

t' Cantidad de horas efectivas que se regará.

GL Grado de libertad.

- **Rendimiento de la red.**

Seguidamente de determina el Rendimiento de la red con la **Ec. 2**, equivalente al el inverso de la **Ec.1**.

$$r = \frac{t'}{t} \quad \text{Ec. 2}$$

Dónde:

t Cantidad de horas en el día.

t' Cantidad de horas efectivas que se regará.

- **Caudal ficticio de diseño.**

Una vez obtenido el estudio agronómico. Se procede a calcular el caudal ficticio de diseño con la **Ec. 3**.

$$qfc = \frac{qs}{r} \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde:

qs Caudal determinado por el diseño agronómico (L/s/ha).

r rendimiento de la red.

- **Dotación de riego.**

Se determinará la dotación de riego por cada hidrante, con la expresión que se muestra en la **Ec. 4**.

$$d_i = qfc \times GL \times S_i \quad \text{Ec. 4}$$

Dónde:

qfc Caudal ficticio de diseño (L/s/ha).

GL Grado de libertad.

S_i Superficie de riego acumulada (ha).

▪ **Probabilidad elemental.**

La probabilidad elemental por línea se determina con la **Ec. 5**.

$$p_i = \frac{qfc \times S_i}{r \times d_i} \quad \text{Ec. 5}$$

Dónde:

qfc Caudal ficticio de diseño (L/s/ha).

r Rendimiento de la red.

S_i Superficie regada (ha).

d_i Dotación de riego (L/s).

▪ **Garantía de suministro.**

Se define como el porcentaje de probabilidad que garantiza al usuario la demanda requerida durante el período pico de consumo (Torre, 2015). En la **Tabla 1** se muestran algunos valores de garantía de suministro:

Tabla 1. Valores de garantía de suministro en función del grado de seguridad.

GS (%)	U(GS)
90	1.285
91	1.345
92	1.405
93	1.475
94	1.555
95	1.645
96	1.755
97	1.885
98	2.055
99	2.324

Fuente: Lamaddalena & Sagardoy, 2000.
Elaboración: Autor.

▪ **Varianza.**

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n p_i \times (1 - p_i) \times d_i^2 \quad \text{Ec. 6}$$

- **Media de distribución binomial.**

$$\mu = \sum_{i=1}^n p_i \times d_i \quad \text{Ec. 7}$$

- **Caudal de diseño.**

Para determinar el caudal de Clément en la **Ec. 8** es necesario incorporar los resultados de la **Ec.6** y **Ec.7**.

Se escoge el caudal de diseño según el criterio de menor valor.

- Caudal Clément.

$$Q_{Clément} = \mu + U(GS) \times \sigma \quad \text{Ec. 8}$$

- Caudal de diseño.

Caudal acumulado hasta la línea de estudio (2da ley de Kirchhoff).

2.3.3 Diseño hidráulico.

El diseño hidráulico tiene que ser adecuado para transportar la demanda durante el período pico. Asimismo debe garantizar la presión mínima en las bocas de riego de tal manera que facilite el riego de manera correcta (Lamaddalena & Sagaradoy, 2000). Se adoptaron conceptos según los autores Rossman, (2000) y Saldarriaga, (2007) para definir las ecuaciones en el proceso de diseño. En la **Figura 6** se muestra el flujograma del diseño hidráulico.

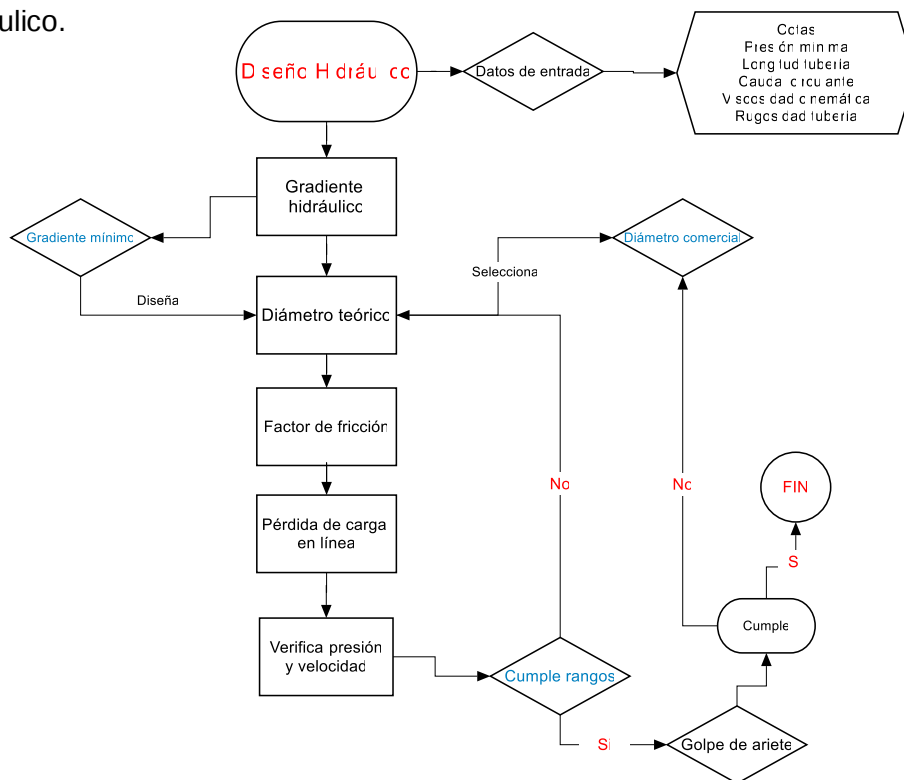


Figura 6. Flujograma de diseño hidráulico

Fuente: Saldarriaga, 2007.

Elaboración: Autor.

Con el caudal circulante por cada línea de tubería se realiza el diseño hidráulico de la red por el método de la gradiente uniforme. Dónde se considera el cumplimiento de la presión mínima (consigna) requerida por el hidrante de cabecera en cada nudo (Fuentes, 2003). El diseño culmina una vez seleccionados los diámetros comerciales del catálogo de las tuberías mostradas en el **Anexo C**. Para realizar un correcto diseño es importante verificar las siguientes condiciones:

- La presión de trabajo en cada nudo dependerá del tipo de emisor a instalar. La presión en el aspersor está condicionada por las condiciones de viento del sector por lo que se recomienda que el aspersor trabaje en un rango de 25 a 35 mca (Tarjuelo, 2005).
- La velocidad del flujo en los tramos sin derivaciones se encuentran en un rango desde 0.5 m/s para impedir la sedimentación de partículas en suspensión, hasta un valor no superior a 3 m/s para evitar que en la tubería se produzca golpe de ariete (Fuentes, 2003).

El diseño está basado en el principio del menor gradiente hidráulico, el cual parte de la igualación de energías de Bernoulli según la **Ec. 9**. A continuación, en la **Figura 7** se presenta el principio del comportamiento de las energías sobre un eje de tubería.

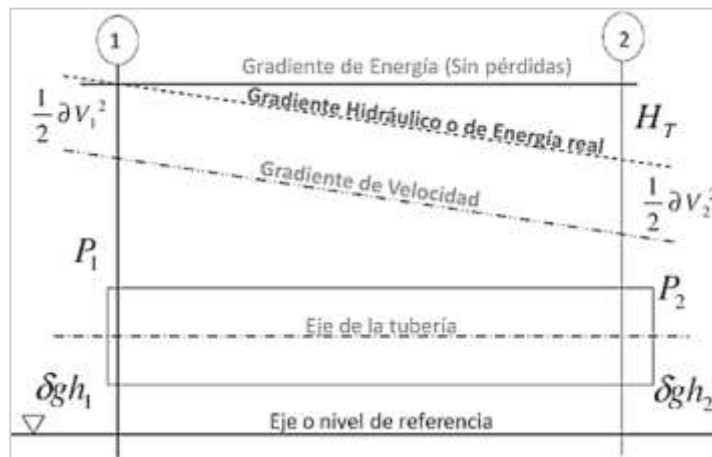


Figura 7. Diagrama de la ecuación de energía aplicada a una tubería.

Fuente: Saldarriaga, 2007.

Elaboración: Autor.

$$P_1 + g \delta h_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + g \delta h_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 + H_T$$

Ec. 9

Donde:

H_T Pérdida de energía (mca).

$g \delta h_n$ Altura geométrica (mca).

P_n Altura de presión (mca).

$\frac{1}{2} \rho V_n^2$ Altura de velocidad (mca).

$g \delta h_n + P_n$ Altura piezométrica (mca).

Mediante esta metodología de diseño se considera el nudo crítico de la red, que corresponde al punto donde la presión por la configuración de la red presenta mayores inconvenientes. Es posible determinar el nudo crítico bajo el concepto de gradiente hidráulica uniforme mediante la **Ec. 10**, que asegura la presión mínima requerida en los nudos de consumo conocido (Mora, 2012). Esta expresión establece que la pendiente sea constante cuando la pérdida de carga se reparta en la tuberías de la red (Ruiz, 2014).

Los pasos a seguir en el diseño hidráulico se detallan a continuación:

1. Acumular las longitudes de tubería desde el nudo de estudio hasta el depósito que abastece a la red.
2. Establecer para cada nudo de la red el valor del gradiente hidráulico mediante la **Ec. 10**.

$$J_{disponible} = \frac{H_c - \left(Z_i + \frac{P_{min}}{\gamma} \right)}{\sum L} \quad \text{Ec. 10}$$

Dónde:

- H_c Altura de cabecera (m).
 $\frac{P_{min}}{\gamma}$ Altura de presión mínima en el nudo (m).
 Z_i Altura topográfica en el nudo (m).
 $\sum L$ Longitud acumulada hasta el nudo (m).

3. Tomar el menor valor de las gradientes hidráulicas calculadas.

$$< J_{disponible} = J^*$$

4. Calcular el diámetro teórico para cada una de las líneas de la red con la **Ec. 11** de Darcy Weisbach ilustrada.

$$D_i = \sqrt[5]{\frac{8 \times \lambda \times Q^2}{\pi^2 \times g \times J^*}} \quad \text{Ec. 11}$$

Dónde:

- D_i Diámetro teórico (m).
 λ Factor de fricción (0.002).
 Q Caudal circulante (m^3/s).
 J^* Gradiente crítica (m/m).

5. En base al diámetro teórico seleccionar el diámetro comercial que mejor se ajuste a las condiciones de cada línea.

6. Mediante el principio de continuidad calcular la velocidad en cada línea con la **Ec. 12**.

$$V_i = \frac{4 \times Q}{\pi \times D_i^2} \quad \text{Ec. 12}$$

Dónde:

D_i Diámetro teórico (m).

Q Caudal circulante (m^3/s).

Fuentes (2003) recomienda que las velocidades para el transporte del caudal en tramos sin derivaciones sean las siguientes:

- Para diámetros desde 150 mm, la velocidad recomendable de 1 m/s.
- Para diámetros entre 150 a 350 (mm), una velocidad recomendable de 1 a 1.5 (m/s).
- Para diámetros mayores a 350 mm, una velocidad recomendable de 2 hasta 3 (m/s).

7. Determinar el factor de fricción con la **Ec. 13** y **Ec. 14** mediante la siguiente metodología de cálculo.

- Número de Reynolds.

$$Re = \frac{V \times D_i}{\nu} \quad \text{Ec. 13}$$

Dónde:

D_i Diámetro teórico (m).

V Velocidad (m/s)

ν Viscosidad cinemática (m^2/s).

- Coeficiente de fricción por medio de la ecuación de Barr.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \times \left(\frac{e}{3.7 \times D_i} + \frac{2.51}{Re \times \sqrt{f}} \right) \quad \text{Ec. 14}$$

Dónde:

e Rugosidad relativa.

f Factor de fricción.

Re Número de Reynolds.

8. Calcular las pérdidas de carga por línea mediante la metodología de Darcy Weisbach ilustrada en la **Ec. 15**.

$$hf = \frac{8 \times f \times L \times Q^2}{\pi^2 \times g \times D_i^5} \quad \text{Ec. 15}$$

Dónde:

- D_i Diámetro teórico (m).
- f Coeficiente de fricción.
- Q Caudal circulante (m^3/s).
- L Longitud parcial de tubería (m).

- Pérdidas menores por línea

De la **Tabla 2** se determina los coeficientes de pérdidas menores según los accesorios en los tramos de tubería.

Tabla 2. Coeficientes de pérdidas menores para accesorios típicos.

ACCESORIO	COEF. PÉRDIDAS k
Válvula de Globo, todo abierta	10
Válvula de Ángulo, todo abierta	5
Válvula de Retención Clapeta, todo abierta	2.5
Válvula compuerta, todo abierta	0.2
Codo de radio pequeño	0.9
Codo de radio mediano	0.8
Codo de radio grande	0.6
Cono a 45°	0.4
Codo de retorno (180°)	2.2
Té Estándar - flujo recto	0.6
Té Estándar - flujo desviado	1.8
Entrada brusca	0.5
Salida Brusca	1

Fuente: Rossman, 2000.
Elaboración: Autor.

Determinados los coeficientes en el tramo de la tubería se emplea la **Ec. 16** y **Ec. 17** para obtener las pérdidas menores por línea.

$$K = \sum_{i=1}^n k \quad \text{Ec. 16}$$

$$hf_m = K \times \frac{v^2}{2 \times g} \quad \text{Ec. 17}$$

Dónde:

- K** Coeficiente pérdidas menores.
- v** Velocidad del caudal circulante (m/s)
- g** Gravedad (m^2/s).

- Pérdidas menores totales por línea mediante la **Ec. 18**.

$$hf_t = hf_m + hf \quad \text{Ec. 18}$$

9. Establecer la diferencia de cotas por línea, a partir de la **Ec. 19**.

$$Z = Z_i - Z_f \quad \text{Ec.19}$$

10. Determinar la presión dinámica en cada nudo en base a la **Ec. 20** y **Ec.21** según corresponda.

- Sin válvula rompe presión por línea.

$$\frac{p}{\gamma} final = Z + \frac{p}{\gamma} inicial - hf_t \quad \text{Ec. 20}$$

Dónde:

- $\frac{p}{\gamma} inicial$ Presión aguas arriba.

- Con válvula rompe presión por línea (VRP).

$$\frac{p}{\gamma} final = Z + \frac{p}{\gamma} consg - hf_t \quad \text{Ec. 21}$$

Dónde:

- $\frac{p}{\gamma} consg$ Presión de salida de la VRP.

11. Verificar que las presiones y velocidades se encuentren dentro de los rangos establecidos para el diseño.

12. Calcular el golpe de ariete en cada línea de la red y comparar con la presión de trabajo en las tuberías seleccionadas. En caso de no cumplir cambiar el diámetro de la tubería o material.

- Celeridad:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{k}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{k \times D}{E \times e}}} \quad \text{Ec. 22}$$

Dónde:

- a*** Celeridad (m/s).
- k*** Módulo de compresibilidad volumétrico (N/m^2).
- ρ*** Densidad del agua (kg/m^3).
- E*** Módulo de Young (N/m^2).
- D*** Diámetro de la tubería (mm).
- e*** Espesor tubería (mm).

- Pulso de Joukowski:

$$\Delta H = \frac{a}{g} \times V_0 \quad \text{Ec. 23}$$

Dónde:

- ΔH** Pulso de Joukowski.
- V_0** Velocidad inicial (m/s).

13. Comprobar que cumpla con la presión de trabajo (Golpe de ariete).

$$\Delta H + \frac{p}{\gamma} final > 102.0408 \times \frac{p}{\gamma} trabajo \quad \text{Si cumple}$$

Dónde:

- $\frac{p}{\gamma} consg$ Presión de trabajo de la tubería.

2.4 Ecuación del hidrante (emisor final).

La ecuación se basa en el principio de la ley de Bernoulli aplicada por Torricelli en 1641. El autor comprobó que las formas de salida del chorro dependen de la carga y el tamaño del orificio que pueda trasegar (González, Medel, & Martinez, 2007). Además, Royuela & Turégano (2012) mencionan que dicha ecuación es la más empleada, pero no la mejor respecto a la descarga parabólica la cual tiene una mayor exactitud respecto a un coeficiente de correlación cercano a uno.

Un hidrante se define como el accesorio que permite la salida del caudal en función de una altura piezométrica en el punto de descarga (Keller & Karmeli, 1974). Se puede emplear como: hidrantes de incendio, aspersores, para calibrar redes y simular fugas en el sistema (Saldarriaga, 2007). El principio del emisor se representa con la **Ec. 24**.

$$Q = k \times h^x \quad \text{Ec.24}$$

Dónde:

- Q** Caudal demandado (L/s).
- h** Altura de presión en el punto (mca).
- k** Coeficiente adimensional.
- x** Factor adimensional que generalmente posee un valor de 0.5

Por lo general la curva característica de cada emisor viene establecida de fábrica. En el caso que no se proporcione, es posible su cálculo al someter el emisor a dos presiones diferentes con sus mediciones del caudal (Fuentes, 2003). Este procedimiento se muestra a continuación:

Se divide la ecuación **Ec.24** para el caudal y la presión secundaria donde se obtiene:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{k h_1^x}{k h_2^x} = \frac{h_1^x}{h_2^x}$$

Al despejar (x) se tiene:

$$x = \frac{\ln(Q_1^x)}{\ln(Q_2^x)} \quad \text{Ec.25}$$

Al despejar (k) de la **Ec.24** se obtiene:

$$k = \frac{Q_1}{h_1^x} \quad \text{Ec.26}$$

Para obtener estos coeficiente Arias (2015), utilizó varios emisores comerciales a diferentes presiones. Comprobó la variación entre caudales teóricos y medidos en campo para ajustar la fórmula final en la **Ec.24**. El coeficiente de descarga (x) es una medida de sensibilidad de los emisores frente a la variación de presión. Según Keller & Karmeli (1974) es el valor de mayor importancia y se determina mediante el trazo de un gráfico (h) versus (Q) en papel log-log con la pendiente de la curva. Si el valor se aproxima a 0.5 el emisor trabajará bajo el régimen turbulento, mientras que si es cercano a 1 gobernará el régimen laminar (Keller & Karmeli, 1974). De esta manera la ecuación característica del emisor sería potencial en régimen turbulento, más no lineal como es el caso del régimen laminar. Es posible observar los estados de la curva del emisor en la **Figura 8**. Es recomendable que el emisor trabaje bajo el régimen turbulento, en vista de que la pérdida de carga depende de las variaciones de temperatura según las condiciones climáticas del sector (Pizarro, 1996; Salas y Perez, 2007).

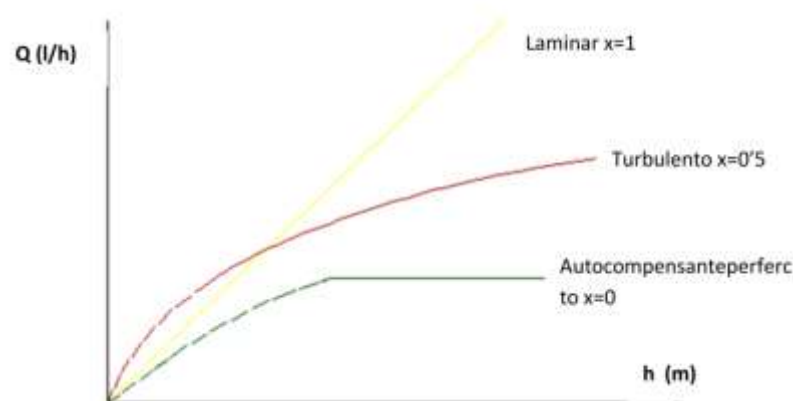


Figura 8. Exponentes de la ecuación del hidrante.

Fuente: Salas y Pérez, 2007.

Elaboración: Salas y Pérez, 2007.

En experimentos realizados por Cullen (2004), Bamezai & Lessick (2003) referenciado por Conejos (2015) recomiendan un exponente óptimo (x) de 0.50 para caudales de riego. La **Tabla 3**, representa algunos emisores en medida de su sensibilidad.

Tabla 3. Valores de exponentes de la ecuación del emisor.

Emisor	x
Flujo laminar	1-1
Microtubos	0.75 – 0.75
Helicoidal	0.65
Régimen turbulento (orificio, laberinto)	0.5
Vórtice	0.4
Autocompensante	0 – 0.4
Teórico autocompensante	0

Fuente: Pizarro, 1996.

Elaboración: Autor.

2.5 Modelización de curvas de la Demanda Dependientes de la Presión (DDP)

Según la ecuación del hidrante la evaluación en la asignación de la demanda se puede ajustar únicamente de forma potencial. Al considerar las curvas dependientes de presión (DDP), distintos autores establecen modelos con el fin de ajustar la demanda a la realidad en redes de abastecimiento (Conejos, 2015). Dichos criterios se muestran a continuación:

- Bhawe (1981) propuso una curva DDP bajo las condiciones de la **Ec. 27**, donde el punto de quiebre determinaría el límite inferior del consumo (Conejos, 2015). Tal como se puede observar en la **Figura 9**.

$$\begin{aligned}
 q_i &= q_{req} = cte & \text{si } P_i \geq p_{min} \\
 q_i &= 0 & \text{si } P_i < p_{min}
 \end{aligned}
 \quad \text{Ec. 27}$$

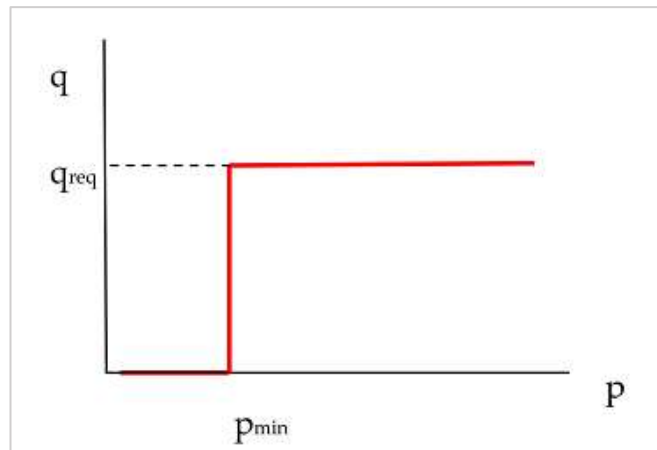
Dónde:

P_i Presión disponible en el nudo (mca).

P_{min} Presión requerida por el hidrante para un óptimo funcionamiento (mca).

q_{req} El caudal requerido en el nudo para abastecer demandas del cultivo (L/s).

q_i El caudal requerido en función de la presión (L/s).



En el gráfico se observa que cuando la presión en el nudo P_i fuese mayor que la necesaria, la demanda requerida q_{req} se considera constante y si es menor que la presión mínima P_{min} requerida se supondrá un consumo igual a 0.

Figura 9. Curva de consumo dependiente de presión propuesta por Bhawe.

Fuente: Conejos, 2015.

Elaboración: Conejos, 2015.

- Reddy & Elango (1989) incorporaron un ajuste más real mediante una correlación parabólica por medio de la **Ec.24**, que considera la fuga de un orificio bajo el principio de Torricelli (Conejos, 2015). La curva posee la característica de aumentar el caudal ilimitadamente a medida que aumente la presión como se observa en la **Figura 10**.

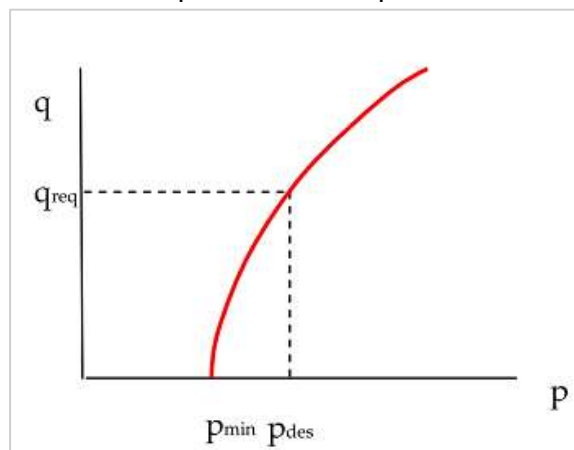


Figura 10. Curva de consumo dependiente de presión propuesta por Reddy.

Fuente: Conejos, 2015.

Elaboración: Conejos, 2015.

- Wagner et al., (1988) & Chandapillai(1991) establecieron que la cantidad de caudal suministrado en cada nudo dependa de los límites de presión impuestos. El sistema es ideal cuando todas las demandas pueden cumplirse con una altura mayor que el límite de trabajo en el nudo (Wagner et al., 1988) tal como se observa en la **Figura 11**. El principio establece una demanda fija en el caso que exceda la presión en el nudo, y variable cuando sea inferior a la presión disponible (Conejos, 2015). Esto permite mejorar la caracterización del problema de una red hidráulica mediante estados del emisor representados en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Revisión de los estados de los emisores.

Condición	Estado del emisor	Demanda
$P_{dis} < P_{cosg}$	CERRADO	$Q_{dem} = 0$
$P_{cosg} \leq P_{dis} < P_{crít}$	ACTIVO	$Q_{dem} = Q_{req} \times \left(\frac{P_{dis} - P_{min}}{P_{crítico} - P_{min}} \right)^{exp}$ Ec. 28
$P_{dis} \geq P_{crít}$	ABIERTO	$Q_{dem} = Q_{req}$

En la tabla se muestran diferentes estados para los emisores. Se considera (ABIERTO) cuando la presión disponible sobrepase a la requerida y (ACTIVO) en el caso que el emisor se comporte bajo el principio de Wagner. Un estado adicional (CERRADO) se produce si la elevación en el nudo es mayor a la altura de cabecera.

Fuente: Muranho et al., 2012.

Elaboración: Autor.

Dónde:

P_{dis} Presión disponible en el nudo (mca).

$P_{crít}$ Presión máxima requerida por hidrante para correcto funcionamiento (mca).

P_{min} Presión mínima requerida por el hidrante para un correcto funcionamiento.

Q_{dem} Caudal demandado en función de la presión (L/s).

Q_{req} El caudal requerido en el nudo para abastecer demandas del cultivo (L/s).

exp Exponente del emisor por lo general adopta un valor de 0.5.

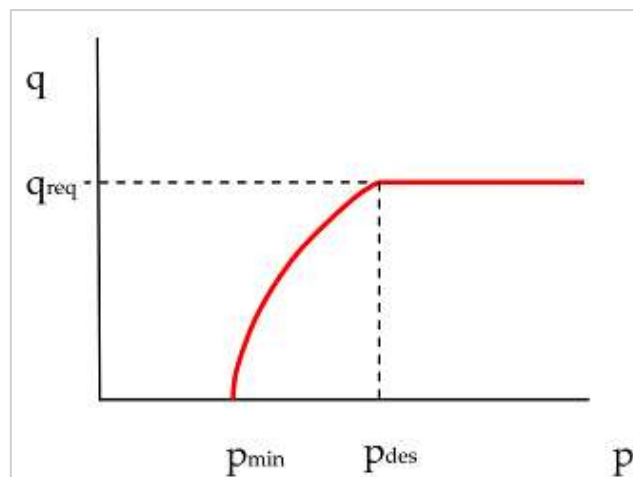


Figura 11. Curva de consumo dependiente de presión propuesta por Wagner.

Fuente: Conejos, 2015.

Elaboración: Conejos, 2015.

- Fujiwara & Ganesharajah (1993) introducen una serie de ecuaciones y condiciones que permiten eliminar el punto de inflexión de la curva de Bhave (Conejos, 2015), tal como se observa en la **Figura 12**.

$$\begin{aligned}
 Q_{dem} &= Q_{req} & \text{si } P_{crit} &\geq P_{dis} & \text{Ec. 29} \\
 Q_{dem} &= Q_{req} \times \frac{(P_{dis} - P_{min})^2 - (3P_{crit} - 2P_{dis} - P_{min})}{(P_{crit} - P_{min})^3} & \text{si } P_{min} &\leq P_{dis} < P_{crit} \\
 Q_{dem} &= 0 & \text{si } P_{dis} &< P_{min}
 \end{aligned}$$

Dónde:

- P_{dis} Presión disponible en el nudo (mca).
 P_{crit} Presión máxima requerida por hidrante para correcto funcionamiento (mca).
 P_{min} Presión mínima requerida por hidrante para correcto funcionamiento (mca).
 Q_{dem} Caudal demandado en función de la presión (L/s).
 Q_{req} El caudal requerido en el nudo para abastecer demandas del cultivo (L/s).

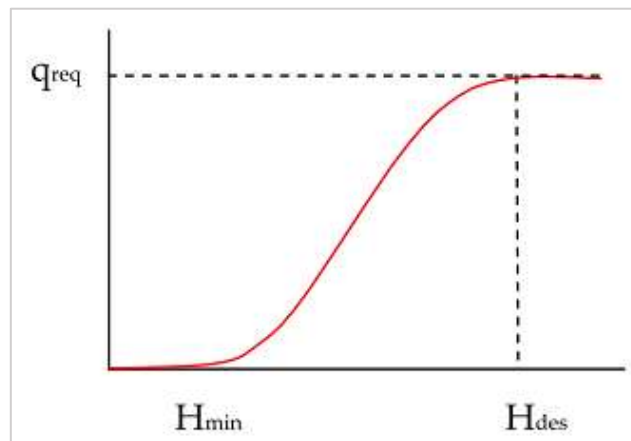


Figura 12. Curva de consumo dependiente de presión propuesta por Fujiwara.
Fuente: Conejos, 2015.
Elaboración: Conejos, 2015.

La teoría de las curvas (DDP) propuestas por los métodos anteriores fueron evaluadas con ensayos realizados por los autores Shirzad et al.(2012). En donde se midió la presión y el caudal, para así verificar que la curva de Wagner se adapta mejor a las mediciones realizadas en campo con un exponente (x) de 0.51 (Conejos, 2015).

2.6 Demanda dependiente de la presión (*Pressure Driven Analysis, PDA*).

Todo flujo que trasiego por un orificio cumple los principios de Bernoulli bajo la **Ec.30** (Trifunović, 2006). Esta ecuación se emplea cuando el emisor funciona en calidad de orificio, como es el caso de las tuberías porosas en riego localizado, aspersores, entre otras (Fuentes, 2003).

$$Q = CA\sqrt{2gh}$$

Ec.30

Dónde:

C Coeficiente que depende de las características del agujero.

A Área del orificio (m²).

h Altura de agua sobre el agujero (m).

Para realizar un proyecto de abastecimiento se consideran los siguientes aspectos:

El primer aspecto consiste en diseñar la red bajo el criterio de asignación del consumo como una demanda neta. Lo que significa que trabajará con caudales constantes bajo cualquier situación presente en la red. El criterio de asignación se lo identifica como la demanda en el nudo independiente de la presión (DDA) (Conejos, 2015; Trifunović, 2006).

El segundo aspecto se basa en situaciones emergentes donde se suscite un cambio inesperado de presión en el nudo de consumo, como una falla de tubería o bomba hidráulica. No es factible continuar con la asignación de la demanda ya que contará con presiones negativas en dicho nudo lo que producirá demandas irreales (Conejos, 2015; Trifunović, 2006).

Para representar los problemas que existen en redes a presión, se establece en la **Figura 13** un embalse con una carga hidráulica conectado a una tubería y posterior a un orificio dependiente de la presión que representa al hidrante. La línea piezométrica disminuye rápidamente en condiciones de baja presión, que resulta de abrir la boquilla del orificio (Trifunović, 2006). Es por ello que será necesario establecer modelos de asignación de la demanda dependiente de presión (PDA). En la **Figura 14** es posible ver el comportamiento del segundo aspecto bajo el criterio PDA. Donde conserva una caída más lenta de la línea piezométrica con respecto al comportamiento de **Figura 13** en razón del nivel de cabecera.

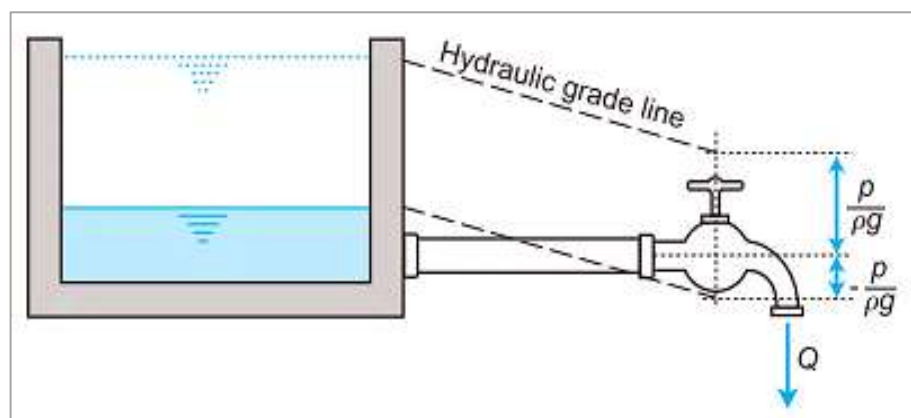


Figura 13. Comportamiento de la demanda independiente de la presión (DDA).

Fuente: Trifunović, 2006.

Elaboración: Trifunović, 2006.

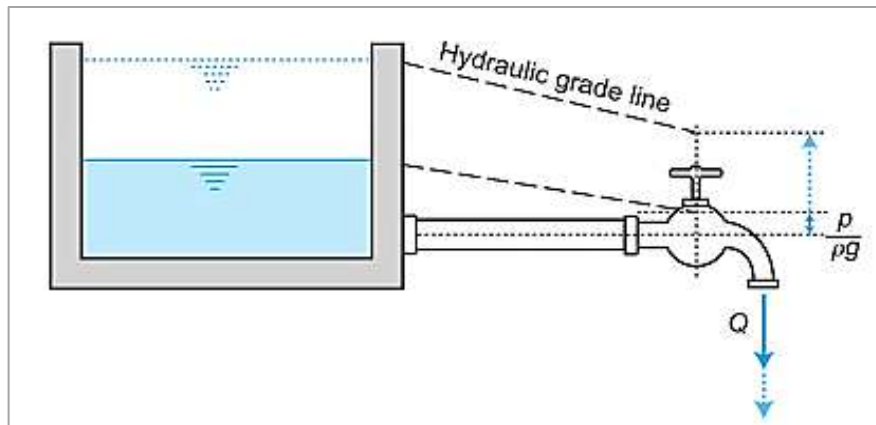


Figura 14. Comportamiento de la demanda dependiente de la presión (PDA).
Fuente: Trifunović, 2006.
Elaboración: Trifunović, 2006.

2.7 Modelación hidráulica.

Según Lamaddalena & Sagaradoy (2000) antes de la construcción del sistema es necesario realizar modelos con diferentes escenarios, para reducir costos de mantenimiento en la vida útil de la red. Estos escenarios permiten simular cualquier problema en la tubería para así mejorarlos de manera técnica (Saldarriaga, 2007). En la **Figura 15** se muestra el proceso de modelación de una red de distribución de agua potable.

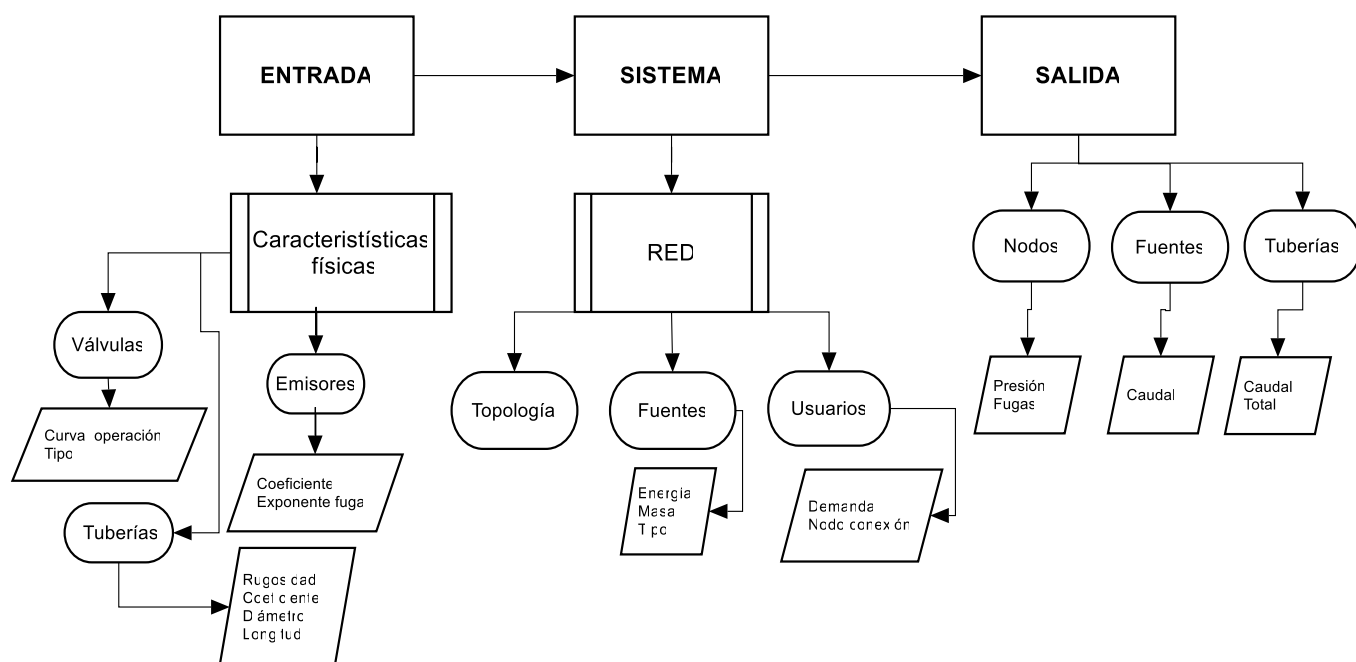


Figura 15. Modelación de cálculo hidráulico a presión.
Fuente: Saldarriaga, 2007.
Elaboración: Autor.

2.7.1 WaterNetGen.

El software WaterNetGen es una extensión de Epanet 2 realizado por los autores que se muestran en la **Figura 16**. Es un software de acceso libre y está disponible en el siguiente enlace: <http://www.dec.uc.pt/~WaterNetGen/>. En la presente investigación se lo emplea en vista que posee el complemento (PDA), mediante el uso de una relación presión-demanda propuesta por Wagner et al.(1988). Este software (WaterNetGen) presenta las características que se muestran a continuación (Muranho et al., 2012; Ruiz, 2014):

- Es posible establecer un límite de presión mínima y máxima de trabajo en el nudo.
- En la ecuación característica del emisor permite modificar el coeficiente (K) y el exponente (x) en cada nudo.
- Se puede incorporar una base de datos de tuberías comerciales y especificar en cada tramo de la red.
- Dimensiona automáticamente la red según especificaciones de velocidad y presión asignadas mediante la función (*Simulated Annealing*).

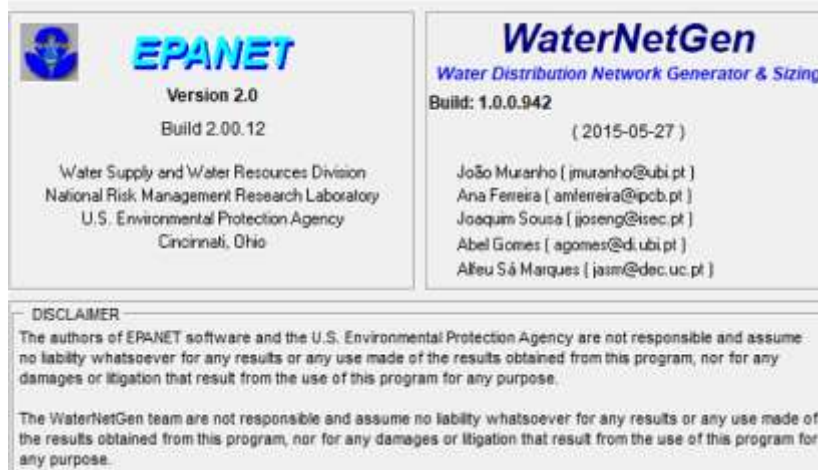


Figura 16. Software gratuito WaterNetGen.
Fuente: Epanet-WaterNetGen.
Elaboración: Autor.

Es importante considerar que dicho software posee inconvenientes para la generación automática de patrones de consumo. Para lo cual se ha integrado el programa Gestar 2016.

2.7.2 Gestar.

Es un software de pago desarrollado en 1993 por la Universidad de Zaragoza en la Escuela Politécnica Superior de Huesca. El programa ofrece el cálculo completo de redes de riego presurizadas aplicados a grandes y pequeños sistemas de riego (Escuela Politécnica Superior de Huesca, 2016). En la **Figura 17** se puede observar la arquitectura del interfaz de Gestar

2016. El software se emplea en la presente investigación para generar escenarios aleatorios en el tiempo, por medio de patrones de la demanda en los nudos conjuntamente con el software WaterNetGen.



Figura 17. Arquitectura de Gestar.

Fuente: Escuela Politécnica Superior de Huesca, 2016.

Elaboración: Autor.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio.

3.1.1 Ubicación.

El proyecto de riego “San Rafael de Chuquipogoyo”, está ubicado en la provincia de Chimborazo entre la cabecera parroquial San Andrés y la ciudad de Riobamba. Se toma como referencia el estudio de factibilidad y diseño realizado por el Consejo Provincial de Chimborazo (CPCH). La zona prevista para el sistema de riego está ubicada a las faldas del nevado Chimborazo a una altura media de 3800 msnm. Las coordenadas geográficas (UTM) del proyecto son 751.640E y 9833.260N. La ubicación del área de estudio se presenta en la

Figura 18.

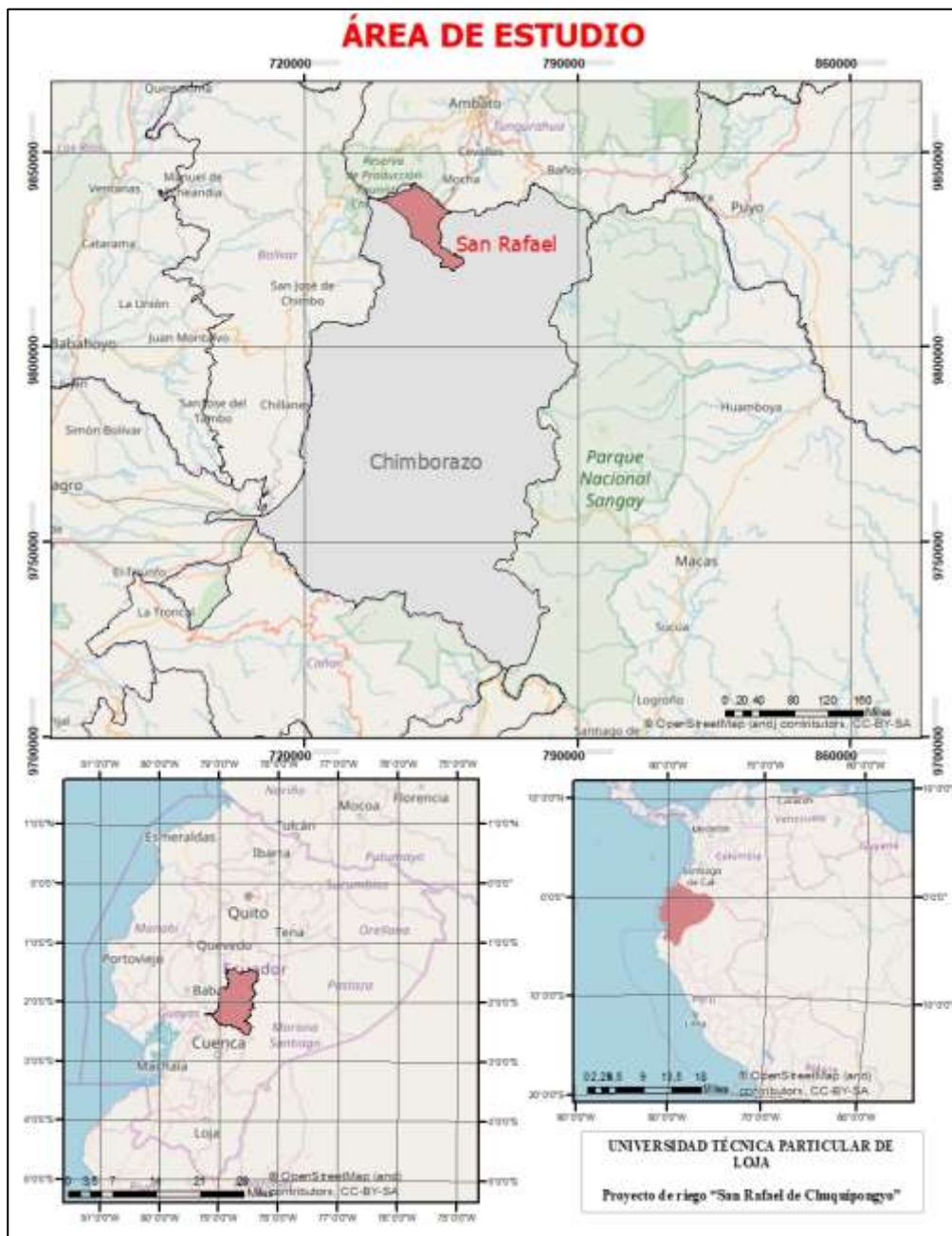


Figura 18. Ubicación del proyecto San Rafael.

Fuente: Instituto Geográfico Militar (IGM).

Elaborado: Autor.

3.1.2 Clima.

Las temperaturas en el sector varían entre 8 y 10 (°C) con una precipitación promedio anual de 696mm. El clima en general corresponde al páramo andino característico de la región interandina o sierra.

3.1.3 Área de riego.

En el sector Quillumachay está conformada por 123 usuarios. En la zona de estudio el caudal disponible para riego es de 21.64 L/s y se distribuye a la parcela mediante el método de aspersión.

Suelos

En el proyecto predomina un relieve ondulado con una textura promedio franco-arenosa. Las principales características se presentan en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Características físicas del caso de estudio, San Rafael.

Características físicas	Interpretación
Textura	Franco Arenoso
Bien drenado	Bien drenado
Estructura	Suelta
Infiltración	32 mm/h
Topografía	Ondulado
Densidad aparente (da)	1.29 gr/cc
Capacidad de campo (CC)	30.15 %
Punto de marchitez (Pm)	16.77 %

Fuente: Diseño definitivo para la comunidad de "San Rafael de Chuquipogyo", Consejo Provincial de Chimborazo, 2009.

Elaboración: Autor.

Cultivos

La configuración de la superficie en la parcela según el tipo de cultivo se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 6. Cultivos de la red San Rafael.

CULTIVO	ÁREA (ha)	PORCENTAJE (%)
Pastos	239	70
Papa	34	10
Haba	17	5
Cebolla	17	5
Zanahoria	17	5
Alfalfa	17	5
Total superficie de riego	341	100

Fuente: Diseño definitivo para la comunidad de "San Rafael de Chuquipogyo", Consejo Provincial de Chimborazo, 2009.

Elaboración: Autor.

3.1.4 Distribución de parcelas.

Se realiza la distribución de tierras según el número de parcelas. El área total del proyecto es de 273.72 ha, donde a cada usuario le corresponde un área promedio de 2.18 ha y varían desde 0.24 a 18.02 (ha). La distribución se muestra en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Distribución de parcelas, San Rafael.

ÁREA (ha)	No. PARCELAS	%
Hasta 1	44	36
De 1 a 5	66	54
Más de 5	13	10
TOTAL	125	100

Fuente: Diseño definitivo para la comunidad de “San Rafael de Chuquipogyo”, Consejo Provincial de Chimborazo, 2009.
Elaboración: Autor.

3.1.5 Plano de la red.

En la **Figura 19** se evidencia la planimetría de la zona en estudio.

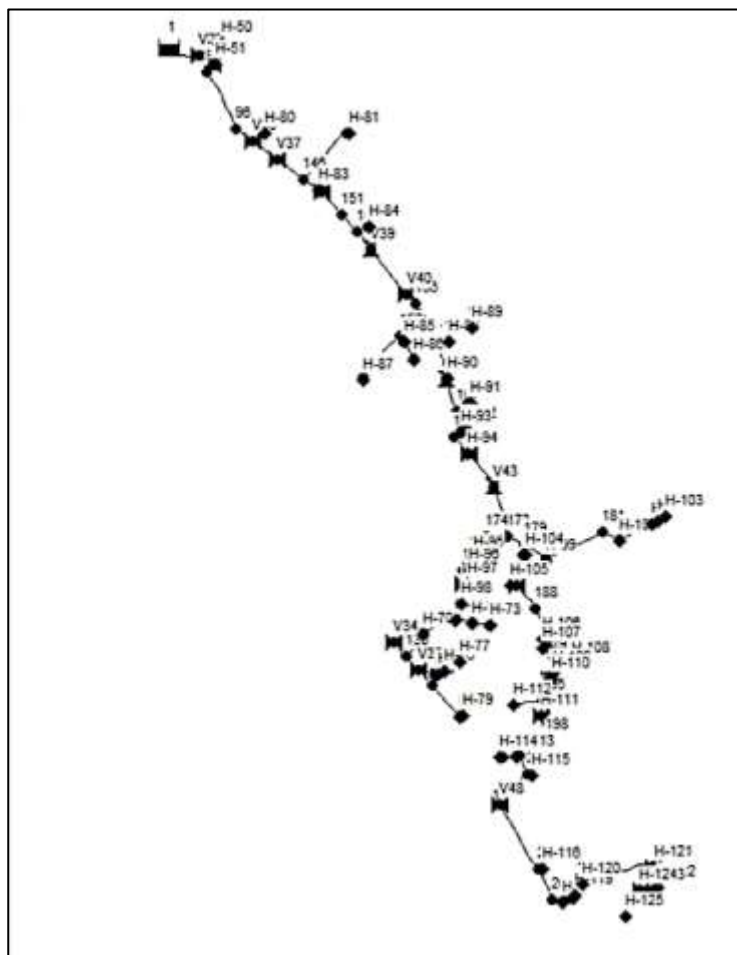


Figura 19. Planimetría de la red San Rafael.

Fuente: Diseño definitivo para la comunidad de “San Rafael de Chuquipogoyo”, Consejo Provincial de Chimborazo, 2009.
Elaboración: Autor.

3.1.6 Caracterización del sistema actual.

Captación

Se dispone de las siguientes fuentes de agua superficial:

- Quillumachay Grande: Problemas con sedimentos en canal.
Coordenadas: (9'839 449m N; 747 732m E; 4 343.96m)
Caudal: 15.50 L/s que representa al 72 %.
- Quillumachay Chico: Características físicas buenas.
Coordenadas: (9'839 193m N; 749 212m E; 4 175.91m)
Caudal: 6.14 L/s que representa al 28 %.

Demanda

La utilización de la fuente de agua se tiene concesionado a la junta por más de 28 años, con un caudal entre 21.19 y 0.45 (L/s) en el abrevadero.

Reservorio

Permite regular el caudal en la red de riego, contempla un volumen útil de 779 m^3 . Aguas arriba de la captación no existe un registro histórico del recurso de la demanda.

Hidrante de riego

Posee accesorios róscas y una válvula de cierre de 2.54 cm. Además, se considera la implementación de aspersores de mediana presión dinámica dentro de un rango de trabajo de 15 a 35 (mca).

Conducción

Se coloca tuberías PVC en la red de conducción a lo largo de 2789 m.

3.2 Metodología.

Se realizó dos tipos de investigaciones (1) cuantitativa con el fin de resolver la hipótesis en base a la recolección y análisis de datos; y (2) pre-experimental puesto que se analizó las variables frente a un estímulo (Suarez, 2012).

El proyecto estuvo enfocado en la operación de la red, por lo que la metodología se sitúa principalmente en la simulación hidráulica. En la **Figura 20** se visualiza la metodología general del proyecto de investigación.

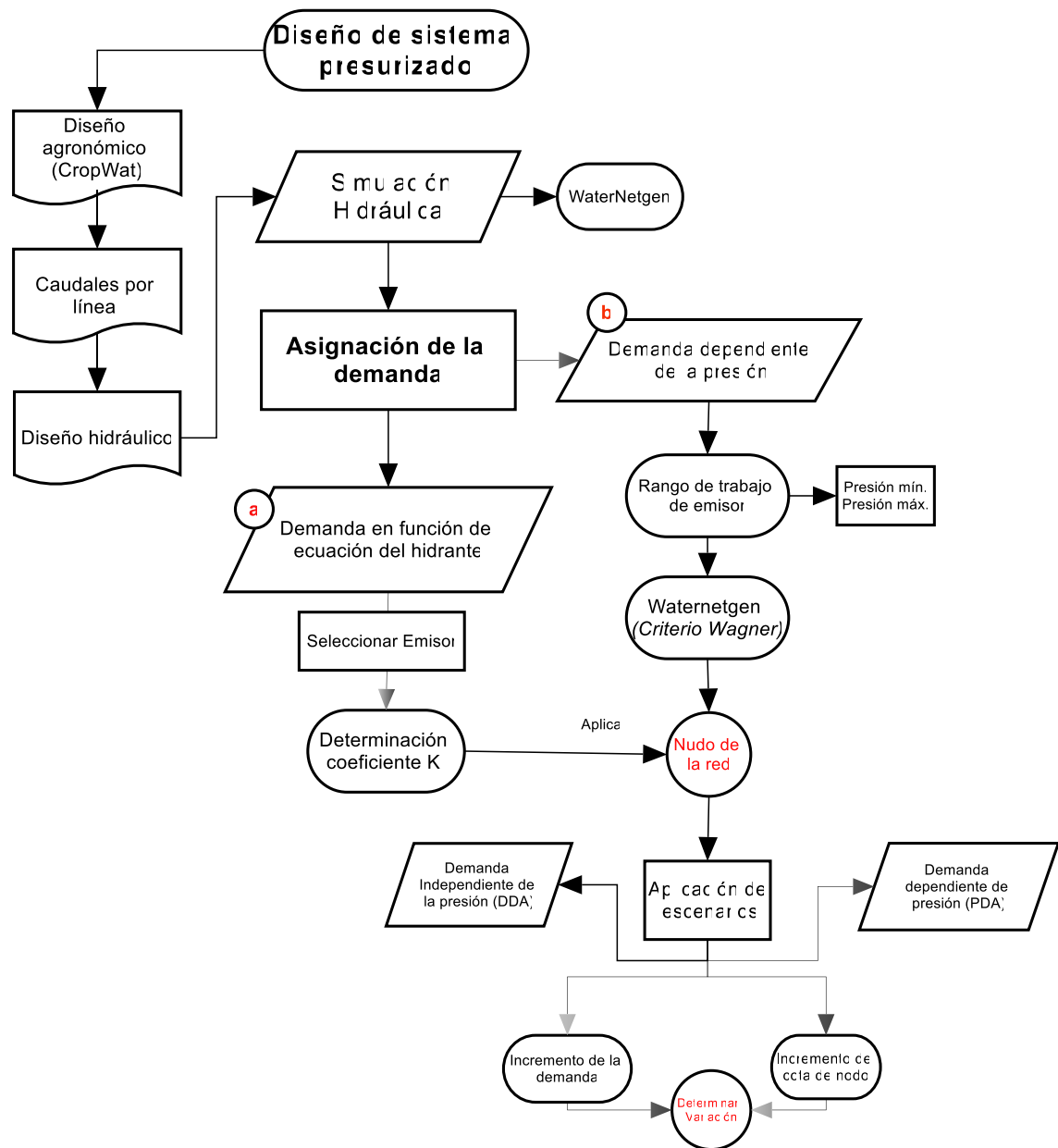


Figura 20. Proceso general de metodología del proyecto de investigación.

Fuente: Lamaddalena y Sagardoy, 2000.

Elaboración: Autor.

3.2.1 Consideraciones generales durante la simulación hidráulica.

Ingreso de las demandas

El caudal de diseño se calcula acumulando las demandas aguas abajo o por medio del modelo de Clément, se seleccionó el menor valor de entre ellos. El software que se empleó WaterNetGen a diferencia de Gestar 2016, no permite el ingreso de los caudales de diseño en forma directa. Es por ello que se realizó un ajuste del caudal circulante a través de asignar a cada nudo la diferencia entre el caudal de entrada y salida del tramo de la tubería.

La **Figura 21** evidencia el ingreso del balance de los caudales en el nudo 119 de la red San Rafael.

$$\begin{aligned}\text{Caudal acumulado aguas abajo} &= \text{Tramo (119 a 121)} + \text{Tramo (119 a 120)} \\ &= 17.50 + 0.38 \text{ (L/s)} \\ &= 17.88 \text{ L/s}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Diferencia del caudal de diseño} &= \text{Caudal de Clément} - \text{Caudal acumulado aguas abajo} \\ &= 17.663 - 17.88 \text{ (L/s)} \\ &= -0.207 \text{ L/s}\end{aligned}$$

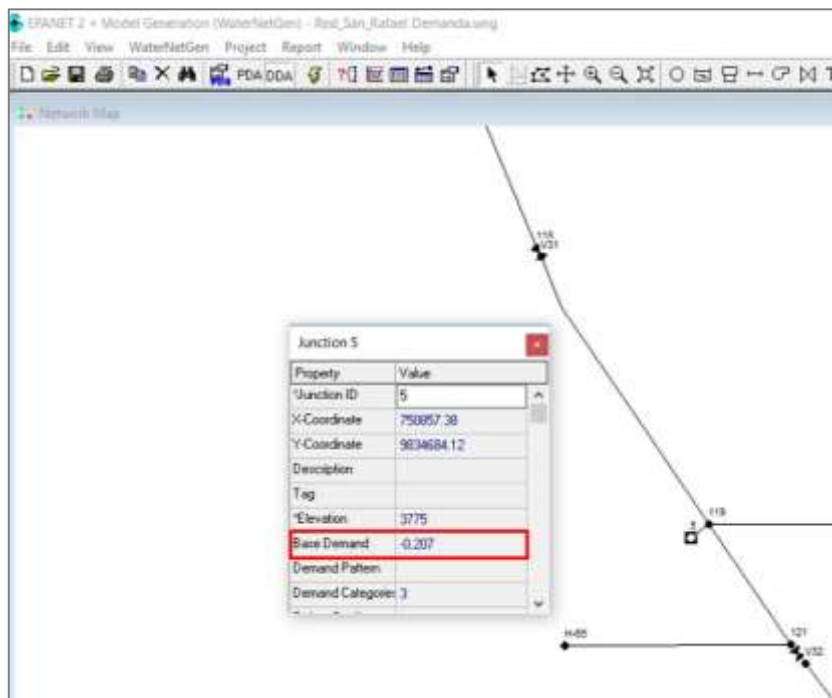


Figura 21. Ingreso de la diferencia de caudales (negativa) en el nudo 119, red San Rafael.
Fuente: Software Epanet 2+WaterNetGen.
Elaboración: Autor.

Escenarios de modelación

Durante la modelación se definieron criterios de asignación de la demanda aplicados a diferentes escenarios. De modo que se representaron los problemas emergentes que afectan a la distribución del flujo en la red. El comportamiento de los criterios de asignación que se consideraron durante el análisis en los nudos críticos fueron: Cota máxima, demanda mayor, nudo gradiente mínima, nudo más alejado de la cabecera, mínima presión, que pertenecen a los hidrantes 53,54,79,80 y 125 del caso de estudio de la red San Rafael.

Las condiciones emergentes en los nudos críticos que se tomaron en consideración fueron:

- Incremento de la demanda: representa las rupturas de cualquier tubería de la red en operación y el colapso en la impulsión de bombas hidráulicas.

- Aumento de la cota piezométrica al nudo: representa un cambio de geometría en la parcela de riego o en los emisores finales provocado por la rotación de cultivos.

Se realizó la modelación a partir de diferentes metodologías de asignación de la demanda. En la **Figura 22** se observa el resumen de los escenarios definidos para el sistema de riego. Se tomó en consideración la operación de la red en condiciones normales, así como emergentes se dará en situaciones imprevistas.

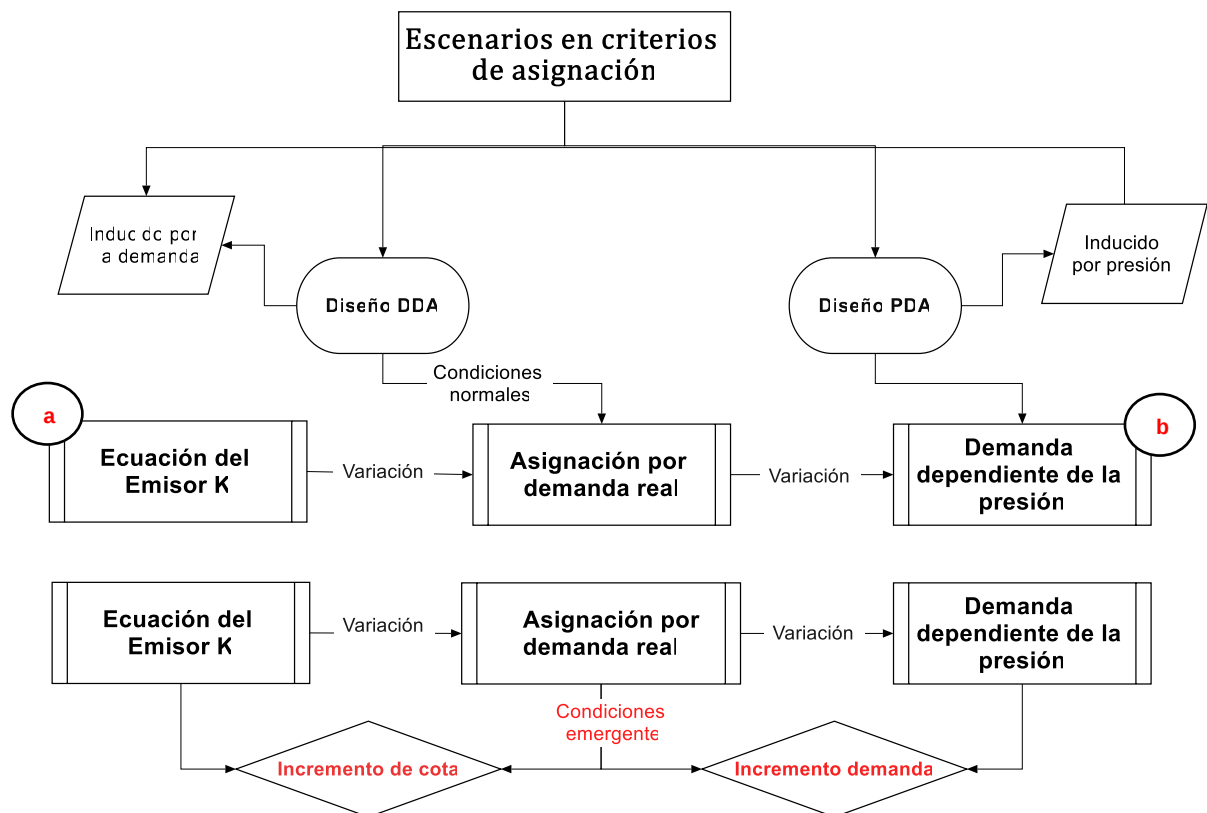


Figura 22. Escenarios en criterios de asignación en la red San Rafael.

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

3.2.2 Criterios de asignación de la demanda dependiente de la presión mediante software de aplicación WaterNetGen.

Para realizar la simulación de los nudos en función de la presión se consideraron los siguientes criterios:

- Demanda dependiente de la presión en base a la ecuación del Emisor K.***
 - ***Selección emisor***

Se tomó como referencia un rango de caudales y presiones con las que opere el emisor. Se identificaron diferentes tipos de emisores (gotero, microaspersor y aspersor). El proyecto se evaluó con aspersores de mediana presión dinámica con un rango de 15 a 35 (mca). Las características técnicas del aspersor comercial se

muestran en el **Anexo C**. Una vez seleccionado el aspersor en función al rango de presiones del proyecto. Se realizó el cálculo del coeficiente (K) y del exponente (x) mediante la **Ec.31** para cada caudal y presión de la curva del aspersor. A continuación se muestra el cálculo del coeficiente (K), para el valor mayor de presión de la **Tabla 8**.

$$Q_{dem} = K \times (P)^{exp} \quad \text{Ec.31}$$

$$0.21 \text{ L/s} = K \times (30.6 \text{ mca})^{0.5}$$

$$K = \frac{0.21 \text{ L/s}}{(30.6 \text{ mca})^{0.5}}$$

$$K = 0.0373$$

Dónde:

P Presión disponible del catálogo del aspersor (mca).

K Coeficiente de emisor de fábrica.

Q_{dem} Caudal disponible del catálogo del aspersor (L/s).

exp Exponente por lo general valor 0.5.

Tabla 8. Descripción técnica del aspersor comercial (MegaNet naranja 650 L/h).

PRESIÓN BOQUILLA (mca)	5.1	10.2	15.3	20.4	25.4	30.6 ¹
CAUDAL (L/s)	0.084	0.119	0.146	0.168	0.188	0.21
COEFICIENTE K EMISOR	0.0373	0.0373	0.0373	0.0373	0.0374	0.0373

¹ Representa la presión máxima del catálogo del aspersor comercial MegaNet.
Fuente: Catálogo agrícola de plastigama, 2015.
Elaboración: Autor.

En la **Tabla 8** se observan los coeficientes (K) para los valores de presión y caudal. Posterior fue necesario la selección del coeficiente de diseño ($K_{Ec/u}$), donde se plantearon diferentes metodologías presentadas a continuación:

- i. Promedio de todos los valores de (K) del rango de presiones de la **Tabla 8**.

$$K_{Ec/u} = \frac{0.0373 + 0.0373 + 0.0373 + 0.0374}{4} = 0.0372$$

$$x = 0.51$$

- ii. Ajuste del valor mínimo de (K) en la **Tabla 8**.

$$K_{Ec/u} = 0.0373$$

$$x = 0.51$$

- iii. Ajuste con valor de ($K_{Ec/u}$) extraído de los estudios de (Arias, 2015).

El autor consideró en diferentes emisores comerciales la medición teórica entre los parámetros hidráulicos (presión, velocidad) y los resultados obtenidos en campo. Para así ajustar el coeficiente de diseño ($K_{Ec/u}$).

$$K_{Ec/u} = 0.0433$$

$$x = 0.456$$

- iv. Ajuste de potencia de mínimos cuadrados.

Se realizó el ajuste de los datos de la **Tabla 8**, donde se ordenaron las variables del caudal en el eje de las ordenadas y de la presión en el eje de las abscisas. En la **Figura 23** se observa el ajuste del conjunto de datos.

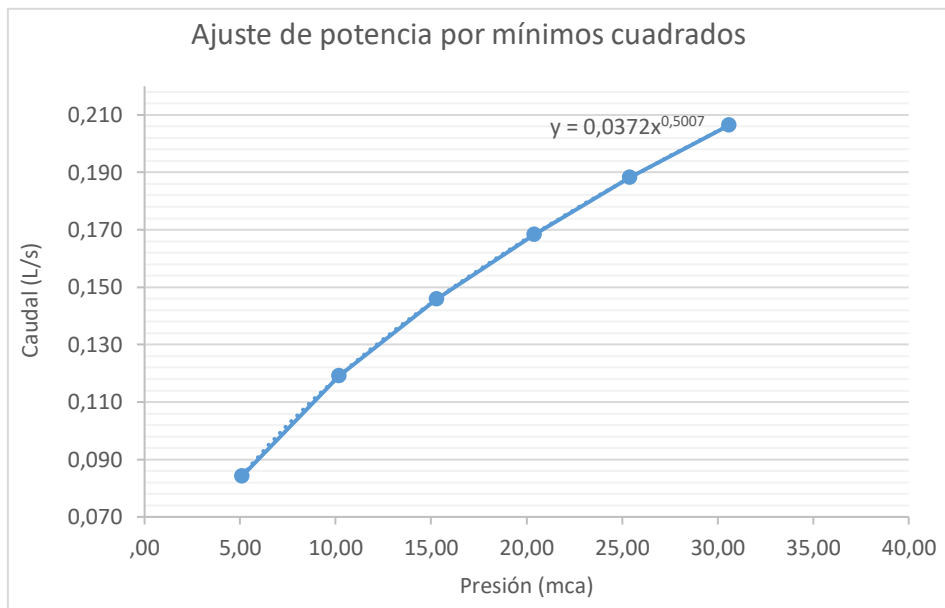


Figura 23. Ajuste de potencia de la ecuación del emisor por mínimos cuadrados.

Fuente: Autor

Elaboración: Autor.

$$K_{Ec/u} = 0.0372$$

$$x = 0.5007$$

- Coeficiente inicial (K_i) con dotación variable para todas las parcelas.

Obtenido el coeficiente de diseño ($K_{Ec/u}$) se calculó el coeficiente inicial (K_i) por cada nudo. Se determinó el número de emisores con la demanda de consumo (d) en el nudo y el caudal (Q_{emisor}) del promedio de los caudales de fábrica en la **Tabla 8**.

$$Q_{emisor} = \frac{0.084 + 0.119 + 0.146 + 0.188 + 0.21}{5} = 0.15 \text{ L/s}$$

Una vez definido el (Q_{emisor}) se determinó el número de emisores por nudo:

$$\# Emisores = \frac{d}{Q_{emisor}} \quad \text{Ec. 32}$$

Posteriormente se escogió el coeficiente del emisor ($K_{Ec/u}$) que mejor se ajuste a la dotación real. Este coeficiente fue multiplicado por el número de emisores de la parcela en estudio, para determinar el coeficiente inicial (K_i) por medio de la siguiente ecuación:

$$K_i = K_{c/u} \times \# Emisores \quad \text{Ec. 33}$$

El proceso de asignación del criterio así como sus resultados se puede ver en detalle en el **Anexo B**.

- **Coeficiente final (K_f) de los emisores en la red.**

Para establecer el criterio del emisor inicial (K_i) que mayor se ajusta a la dotación real, se estableció la presión y dotación requerida en cada nudo. Para luego aplicar la **Ec.34** donde se obtuvo el coeficiente final (K_f), que representa la demanda requerida por el emisor. La siguiente expresión se utilizó en el hidrante 49 de la red San Rafael.

$$\begin{aligned} Q_{req} &= K_f \times (P)^{exp} \\ 16.8 \text{ L/s} &= K_f \times (24.11 \text{ mca})^{0.5} \\ K_f &= \frac{16.8 \text{ L/s}}{(24.11 \text{ mca})^{0.5}} \\ K_f &= 3.421 \end{aligned} \quad \text{Ec.34}$$

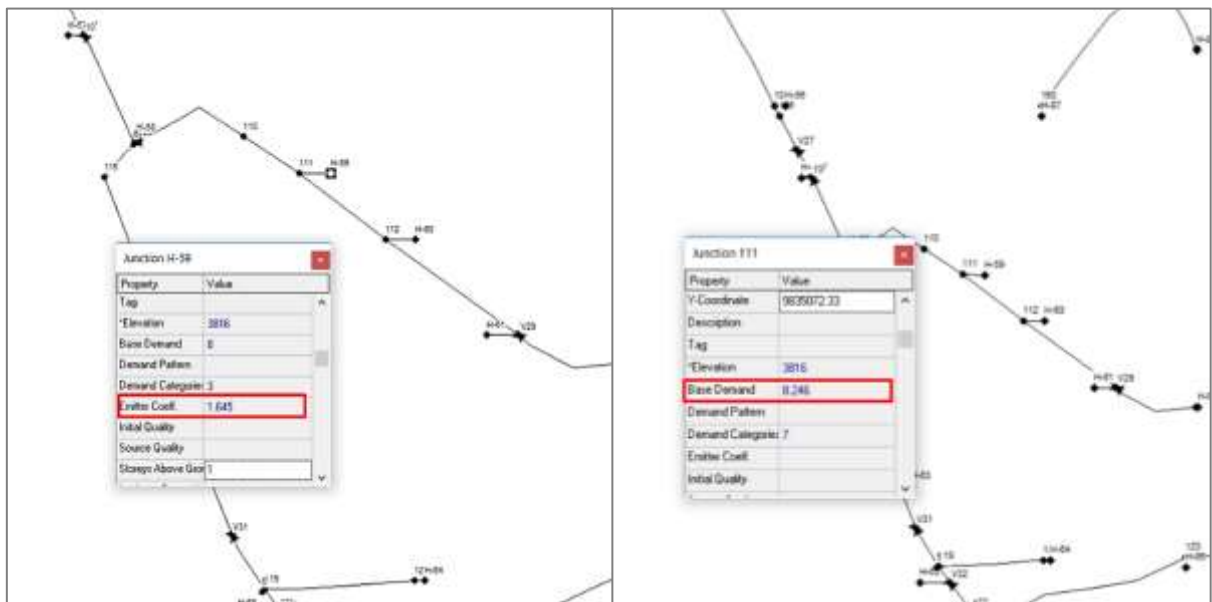
Dónde:

- P** Presión disponible en el nudo de la red (mca).
- K_f** Coeficiente final del emisor.
- Q_{req}** Caudal requerido por la parcela (L/s).
- exp** Exponente por lo general valor 0.5.

Una vez determinado el coeficiente final (K_f) se realizó la comparativa con el criterio del coeficiente inicial (K_i) que mejor se ajuste. Los resultados se visualizan en el apartado **4.1**.

- **Simulación hidráulica del criterio de asignación por medio del coeficiente del Emisor K_i .**

En la red es posible asignar el consumo como una demanda real de la parcela o mediante un coeficiente inicial (K_i) de la ecuación del emisor. Por ello se realizó el análisis de los parámetros hidráulicos de los criterios de asignación, así como se observa en la **Figura 24**. Para el criterio de asignación por el coeficiente (K_i) se consideró un incremento de un tramo corto de tubería junto a un nudo imaginario. Se lo añadió con el objetivo de realizar la asignación de la demanda en calidad de hidrante y no como nudo de consumo.



En la figura se muestra a la izquierda el criterio de asignación por medio del coeficiente inicial del emisor (K_i), mientras que en la parte derecha se encuentra el criterio de asignación de la demanda real.

Figura 24. Ingreso de los criterios de asignación – Nudo 111 (H-59) de la red San Rafael.

Fuente: Software Epanet 2 + WaterNetGen.

Elaboración: Autor.

b) Demanda en los nudos dependientes de la presión por el criterio (PDA) en software (WaterNetGen).

En la asignación de la demanda se pretende redistribuir de mejor manera el flujo que trasiega a lo largo de la red. Esto es posible mediante el software WaterNetGen con la función de la demanda dependiente de la presión (PDA) e independiente de la misma (DDA). Para efectuar la asignación en el software de aplicación se definieron algunos parámetros:

- **Ingreso de la presión mínima (Pressure Lower Bound).**

Se ingresó el valor del límite inferior de presión que depende del rango mínimo de trabajo del hidrante. En el caso del proyecto es de 15 mca, donde se multiplicó por una constante de 9.81 para ingresar el valor en Kilopascales (KPa). Posterior se ingresó el

valor al programa mediante la ventana (*Set Pressure-Dependent Demand Categories*) como se indica en la **Figura 25**. Adicional se introdujo el porcentaje de nudos de la red en donde se quiere aplicar el criterio (PDA), mediante la casilla (*Ref. Pressure Threshold*). Para el caso de estudio se aplicó a todos los nudos la condición del criterio PDA, por lo que corresponderá un valor de 100 % como se muestra en la **Figura 25**.

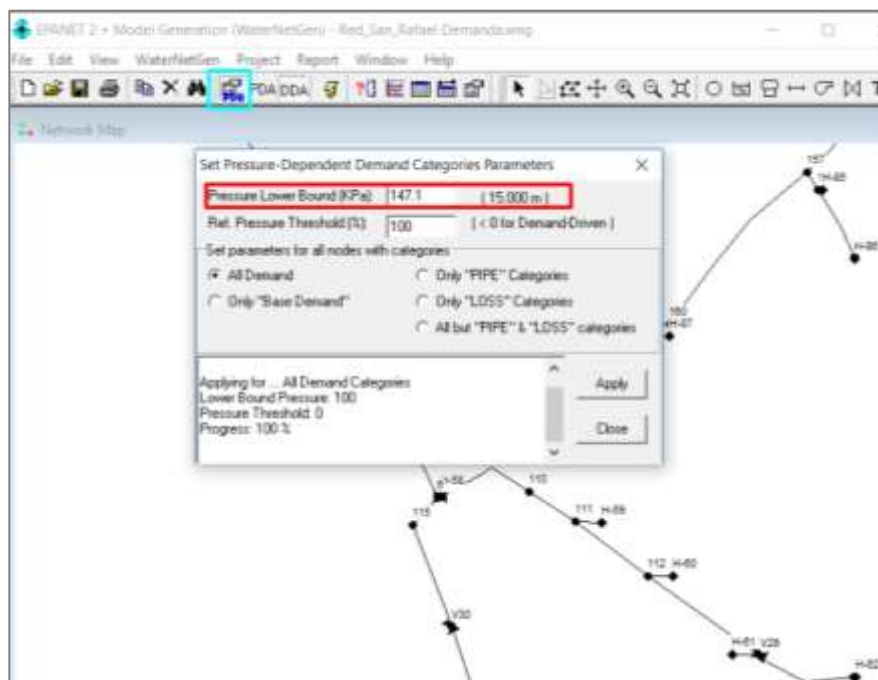


Figura 25. Ingreso en rango de presión mínima de trabajo (PDA) - Red San Rafael.
Fuente: Software Epanet 2+WaterNetGen.
Elaboración: Autor.

- **Ingreso de la presión de consigna (Storeys above ground)**

Se interpreta como la presión mínima que necesita el emisor (hidrante) para distribuir el caudal hasta el punto de mayor distancia (Ruiz, 2014).

Una vez fijada la presión mínima, se ingresó la presión máxima de trabajo del emisor mediante la pestaña (*Defaults*) en la opción (*Max. Pressure Formula*) especificado en la **Figura 26**. En redes de abastecimiento *Storeys above ground* representa el número de pisos que debe cumplir la presión en una edificación. En cambio, en redes de riego constituyen los tipos de emisores a emplear. Por lo que las unidades en la presión de consigna (N) fueron modificadas para ser ingresadas en metros de columna de agua (mca) mediante la **Ec.35** en la casilla (*New Formula*) de la **Figura 26**.

$$\text{New Formula (N)} = 4.90119 \times N$$

Ec.35

Dónde:

N Presión máxima de trabajo del emisor (mca).

Es necesario el ingreso de la presión de consigna en cada nudo de la red que represente un emisor, mediante la casilla (*Storeys Above Ground*) detallado en la **Figura 27**.

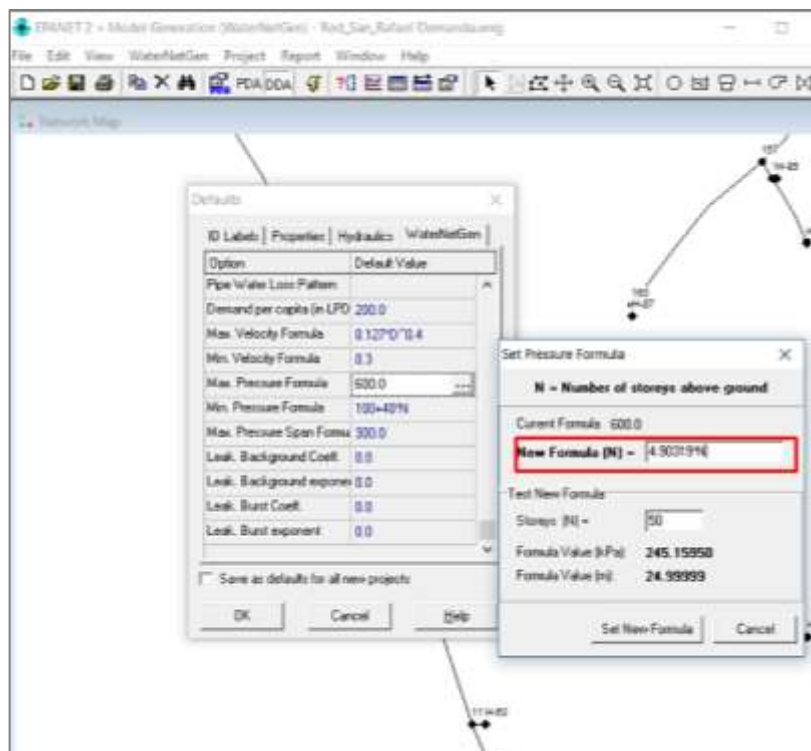


Figura 26. Configuración de unidades de la presión de consigna (PDA) – Red de estudio San Rafael.

Fuente: Software Epanet 2+WaterNetGen.
Elaboración: Autor.

Junction 111	
Property	Value
Base Demand	8.246
Demand Pattern	
Demand Categories	7
Emitter Coeff.	
Initial Quality	
Source Quality	
Storeys Above Ground	50
Leakage Categories	...
Actual Demand	8.25

Figura 27. Ingreso de la presión de consigna en el nudo (PDA) - Red de estudio San Rafael.

Fuente: Software Epanet 2+WaterNetGen.
Elaboración: Autor.

3.2.3 Asignación de la demanda en período extendido (Cuasiestático).

En EPANET existen problemas al configurar los patrones de la demanda en redes de riego, debido a la presencia de diferentes patrones de modulación en los emisores de la red (Rossman, 2000). Así pues, se emplea la metodología de GESTAR 2016 para generar automáticamente escenarios de la demanda en los hidrantes para un determinado período de estudio (Escuela Politécnica Superior de Huesca, 2016). La programación de patrones tipo aleatorio fueron planteados por Moreno et al.(2007) para generar en forma automática escenarios (Equipo I+D+i GESTAR, 2012), tal como se puede apreciar en la **Figura 28**.

El patrón de cultivo de la demanda en cada hidrante se multiplicó por un factor de 0 cuando no exista riego y de 1 en el caso que se genere un consumo. Esto es debido a que el hidrante tiene un comportamiento discontinuo (Granados, 2013). Se asignó toda la dotación de forma constante si el emisor se encuentra abierto, caso contrario si está cerrado el caudal será estrangulado totalmente (Escuela Politécnica Superior de Huesca, 2016).

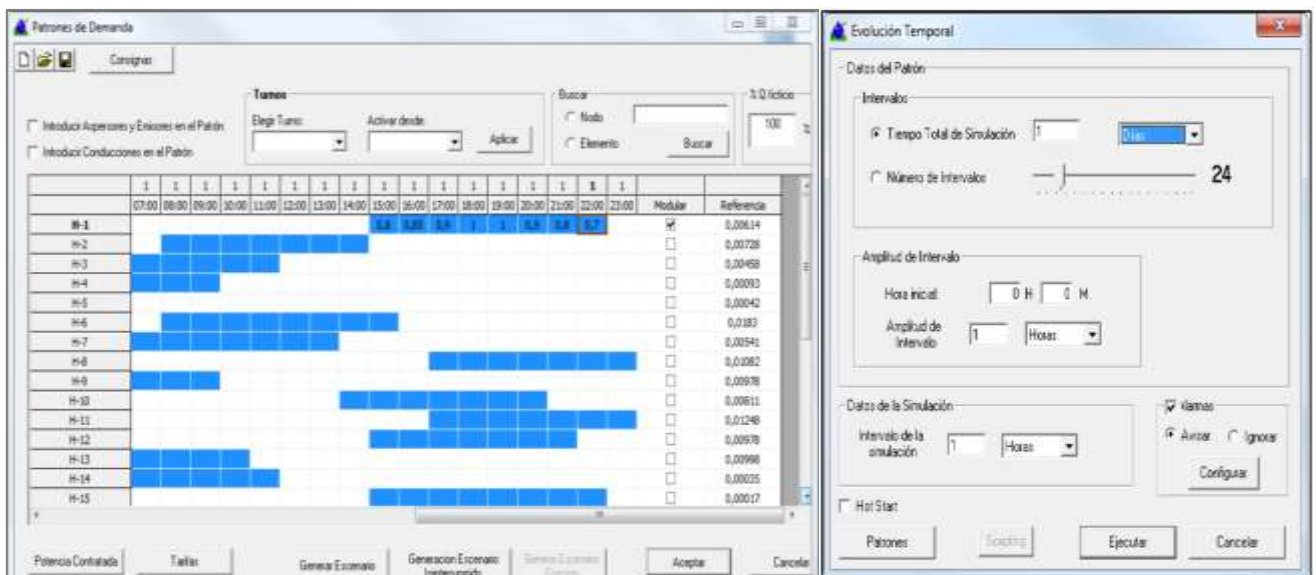


Figura 28. Ingreso de los diferentes criterios de asignación – Nudo 7 de la red Tipo.

Fuente: Escuela Politécnica Superior de Huesca, 2016.

Elaboración: Granda, 2015.

En el presente trabajo se modeló la red con la aplicación del período extendido de WaterNetGen. Los patrones de consumo se tomaron del estudio realizado por Granda (2015) expuesto en la **Figura 29**. La modelación se realizó con la ayuda de la generación automática de escenarios de GESTAR 2016. El período de simulación hidráulica fue durante 120 horas o lo que equivaldría a 5 días, que define su trabajo efectivo en una semana.

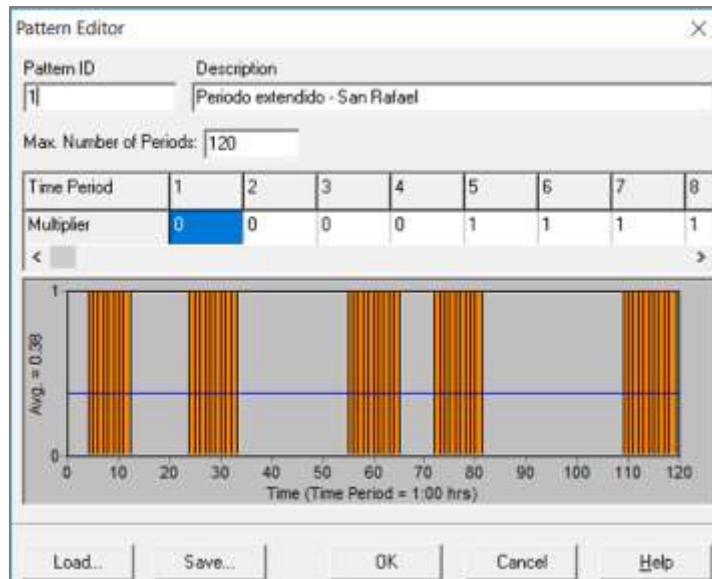


Figura 29. Patrón del período extendido en la red San Rafael.
Fuente: Granda, 2015.
Elaboración: Autor.

Para ingresar los patrones de riego es necesario integrar las propiedades del tiempo por medio de la ventana (*Time Options*), tal como se observa en la **Figura 30**. Los resultados del período extendido de la red de estudio se presentan en el capítulo de análisis de resultados en el apartado **4.3**.

Times Options	
Property	Hrs:Min
Total Duration	120:00
Hydraulic Time Step	1:00
Quality Time Step	0:00
Pattern Time Step	1:00
Pattern Start Time	0:00
Reporting Time Step	1:00
Report Start Time	0:00
Clock Start Time	12 am
Statistic	None

Figura 30. Opciones del tiempo durante el período extendido en la red San Rafael.
Fuente: Granda, 2015.
Elaboración: Autor.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se analizan los resultados obtenidos en el caso de estudio de la red San Rafael. El apartado se estructura de la siguiente manera:

- Asignación de la demanda por la ecuación del emisor K_i inicial.
- Asignación de la demanda dependiente de la presión (PDA).
- Resultados de la asignación en período extendido (Cuasiestático).

4.1 Asignación de la demanda por la ecuación del emisor K_i inicial.

La **Figura 31**, muestra en el eje de las abscisas las demandas en los hidrantes de la red. En el eje de las ordenadas la variación en porcentaje entre los criterios del coeficiente del emisor inicial (K_i) y la demanda real representada por el coeficiente del emisor final (K_f). Este coeficiente constituye el consumo requerido por el hidrante y se determina mediante la **Ec.34**.

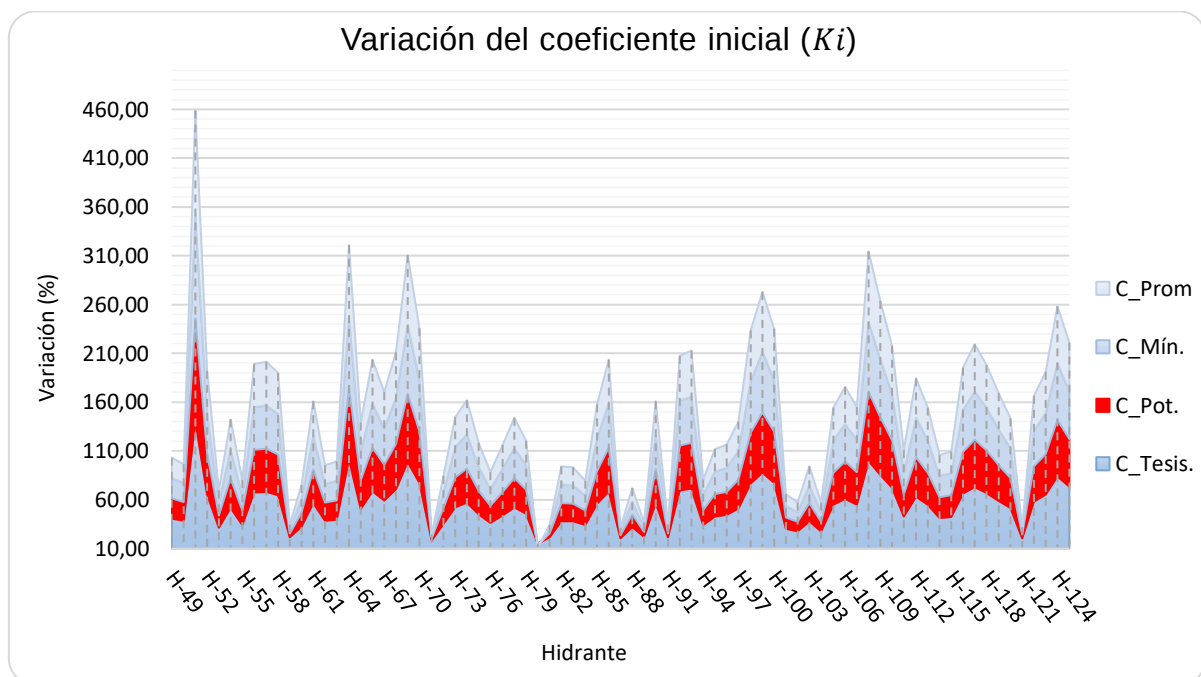


Figura 31. Criterios de asignación de la demanda por coeficiente K_i (ecuación inicial del emisor).

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

El hidrante que tiene una mayor variación en los diferentes criterios es el H-51, debido a que considera la menor dotación entre los demás nudos. Lo que significa que será más susceptible a variación, en vista de que la **Ec. 33** determina el número de hidrantes para calcular el coeficiente (K_i), el cual posee un mejor ajuste en valores superiores.

Además, se evidencia que el criterio que mejor se acopla con el coeficiente final (K_f) es el ajuste por medio de la ecuación de potencia de mínimos cuadrados. Resultado que se comprueba cuando se calcula el valor de la desviación estándar entre los coeficientes del emisor inicial (K_i) de los hidrantes de la red que se muestran en el **Anexo B**. El valor obtenido para esta la desviación estándar mínima es de 0.942 representada en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Desviación estándar del coeficiente K_i en los hidrantes

Desviación estándar (Adimensional)	
qprom.	
K_Prom.	0.944
K_Mín.	0.943
K_Pot.	0.942
K_Tesis.	1.096

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

La **Figura 32**, presenta la relación del coeficiente final (K_f) en el eje de las abscisas, mientras que el coeficiente inicial del emisor (K_i) en el eje de las ordenadas. Se representan un ajuste de potencia de mínimos cuadrados entre estas variables mencionadas.

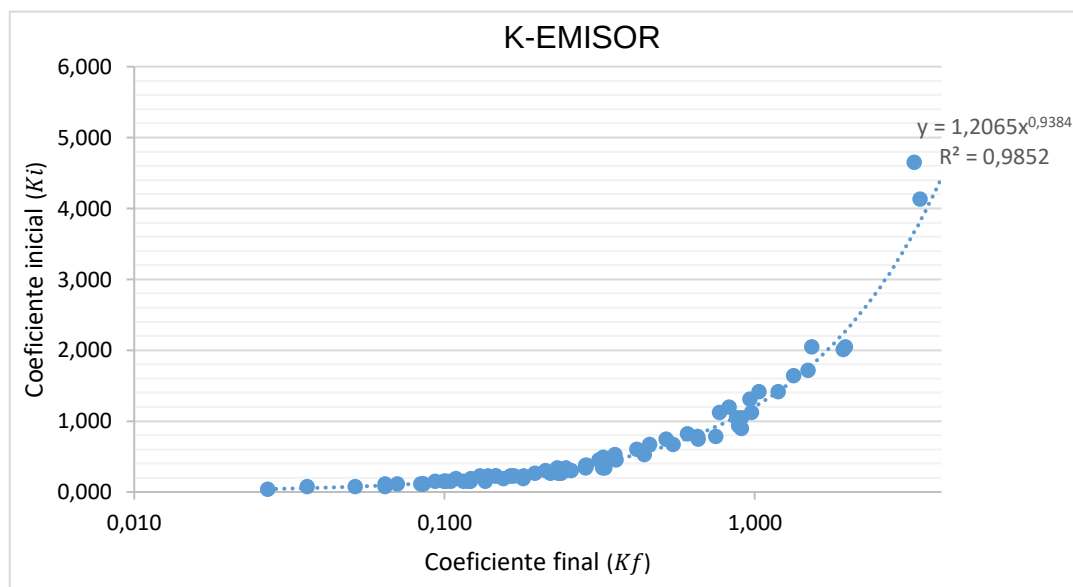


Figura 32. Variación entre el consumo del nudo como Demanda neta y emisor K_i .

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

Se observa que los resultados se ajustan a una función potencial según **Ec.24**, en donde se obtiene un coeficiente de correlación de 0.985, que representa una dispersión de puntos muy cerca o igual a 1.

La **Figura 33**, muestra los parámetros hidráulicos (caudal, velocidad y presión). La variable en el eje de las ordenadas es la variación en porcentaje, entre la asignación de la demanda real frente a la de un coeficiente inicial (K_i). En el eje de las abscisas se encuentran representados los tramos de tubería de la red en estudio, con su identificador.

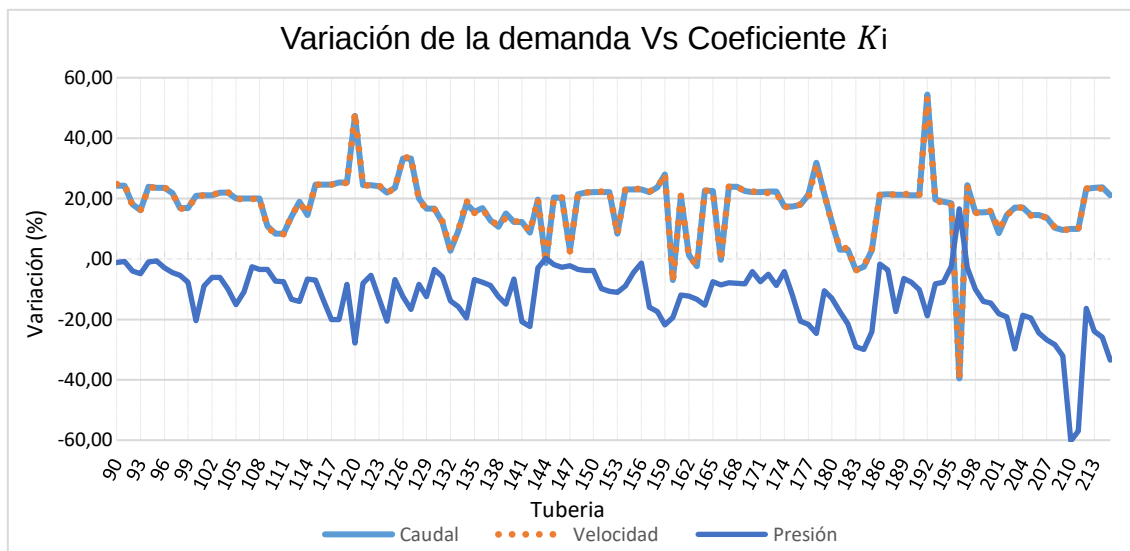


Figura 33. Variación del criterio de asignación de la demanda en relación al coeficiente K_i .

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

Los valores de caudales y velocidades adoptan un mismo comportamiento dado que son proporcionales. En cambio, el valor de la presión actúa según la carga hidráulica en el nudo. Ahora bien, mientras menor sea la demanda en el nudo, la variación entre los criterios de asignación será inferior.

4.2. Asignación de la demanda dependiente de la presión (PDA).

Se muestran en las **Figuras 34 y 35** el resumen de los principales parámetros hidráulicos (demanda y presión) de los criterios de asignación de la demanda dependientes de la presión. En el eje de las abscisas se representan los hidrantes de la red, en el eje de las ordenadas los valores de la demanda frente a un incremento en un 300 % y de la cota piezométrica en 20 m en los nudos críticos.

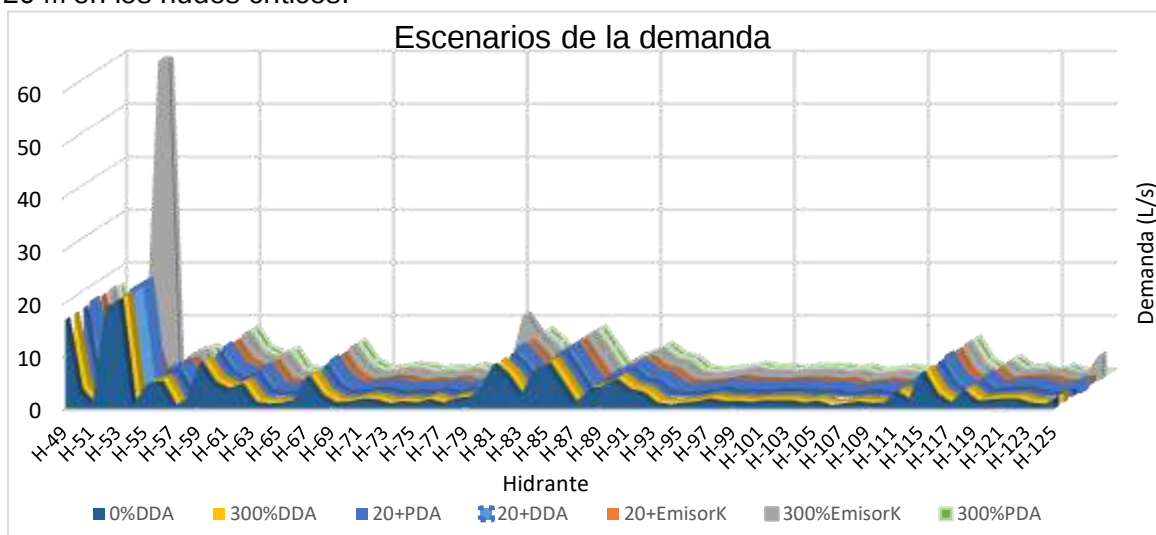


Figura 34. Demanda frente a los distintos escenarios simulados en la red.

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

Se visualiza un incremento notable del valor de la demanda en los nudos donde aumenta el caudal, así como de su cota. La demanda pico ocurre cuando ésta se incrementa en el hidrante 53, puesto que tiene una mayor demanda inicial. No obstante, el conocer la demanda real en función de la presión en cada hidrante, permite comprender que la red opera en condiciones de déficit durante la solicitud total de la demanda.

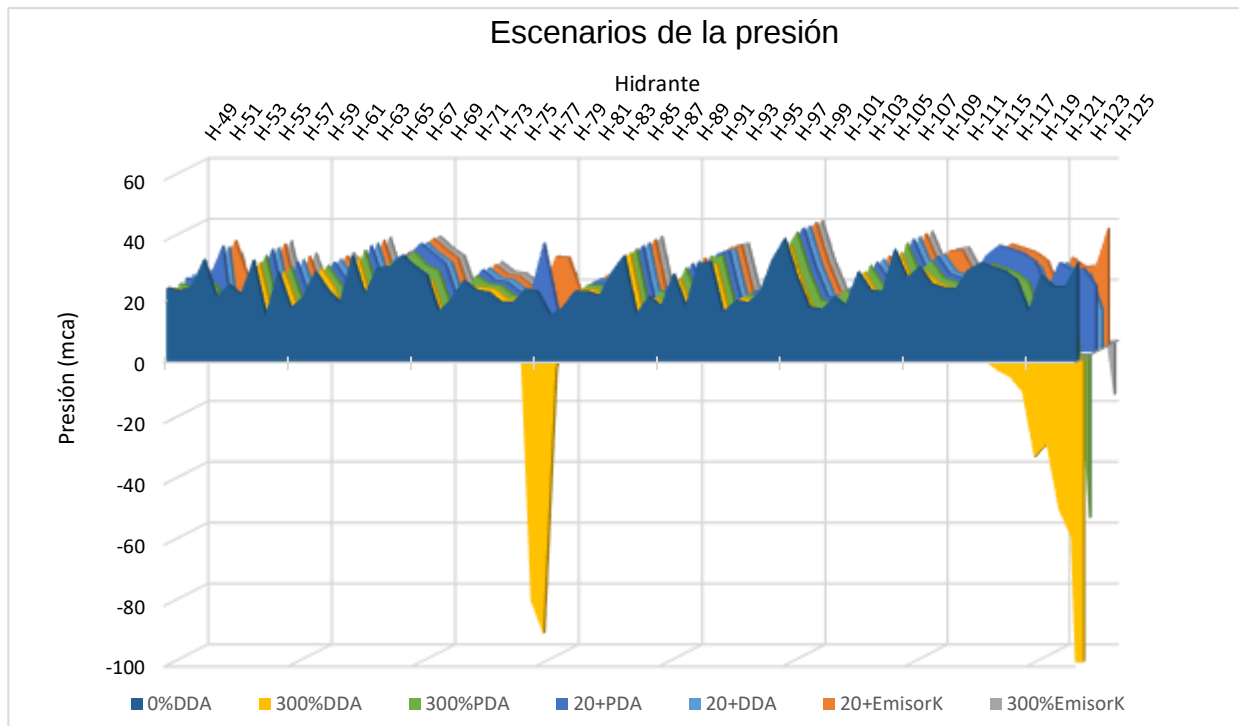


Figura 35. Presión frente a los distintos escenarios de la red.

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

La presión decrece notablemente en los hidrantes (79 y 125), debido a que representan las presiones más bajas de toda la red. De los escenarios asignados a la red, el incremento de la demanda influye en gran medida en la disminución de su presión con respecto al incremento de la cota piezométrica en los nudos de la red.

En la **Figura 36**, se observa en el eje de las ordenadas los valores de velocidad del flujo en las conducciones frente al aumento de la demanda en un 300 % en los nudos de cabecera. En el eje de las abscisas se encuentran representadas las tuberías de la red con su identificador.

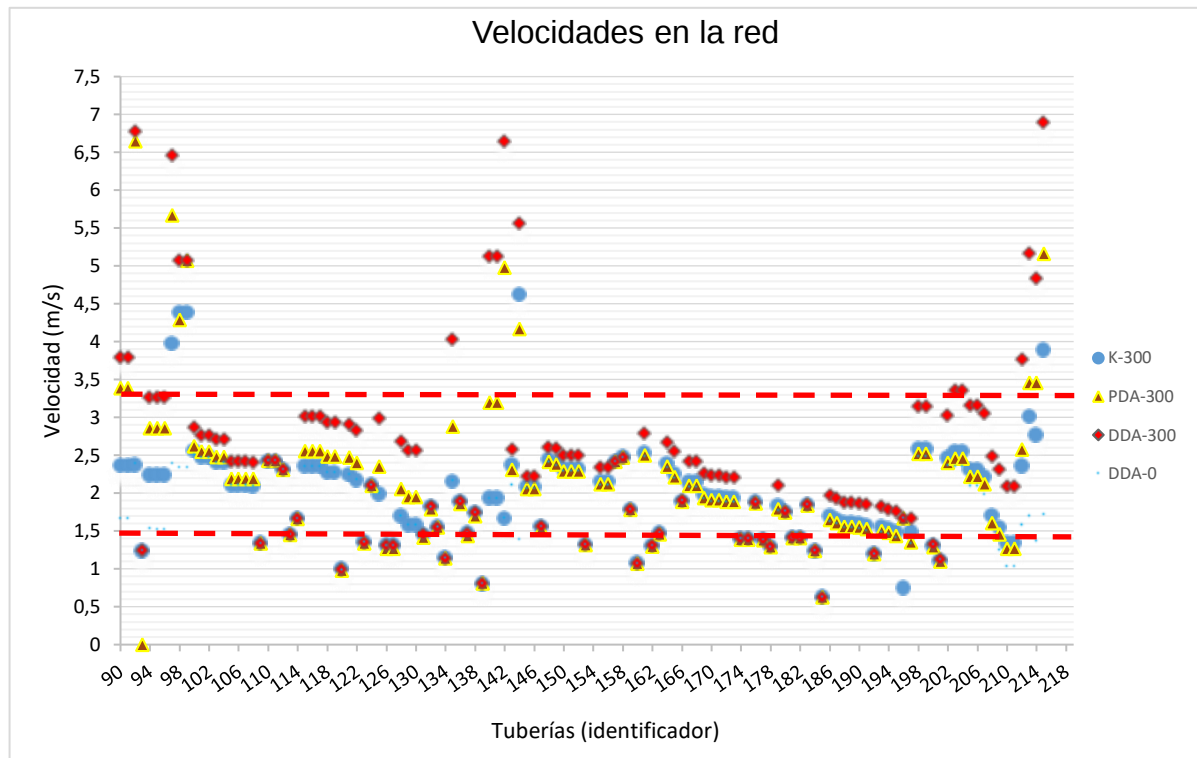


Figura 36. Velocidades de los escenarios en los nudos de red.

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

Existe un incremento de la velocidad en algunos tramos de tubería donde se realiza el aumento de la demanda, los resultados se muestran a continuación en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Velocidad excedida en las tuberías de la red de los criterios de asignación.

Criterios	Velocidad excedida		
	DDA (m/s)	PDA (m/s)	Coefficiente inicial (K_i) (m/s)
V. mín.	3.02	3.39	3.01
V. máx.	6.89	6.65	4.62
V. promedio	4.37	4.52	4.04
Tuberías (%)	20	9	5

Elaborado: Autor.

Bajo el criterio PDA existe un mayor porcentaje de velocidades excedidas con un valor de 9 % frente al criterio del coeficiente inicial (K_i) con un valor de 5 %. De modo que al aumentar la demanda en el criterio PDA, el caudal en el nudo se incrementará directamente mediante la **Ec. 28**. Sin embargo, el criterio del coeficiente inicial (K_i) en la **Ec.24** está relacionado con el valor de la presión no con el valor de la demanda.

Se modela en la **Figura 37** el comportamiento de los criterios de asignación de la demanda en función de la presión (Emisor K_i , Wagner) para el nudo 100 que equivale al hidrante 54 de la red en estudio. Considera como nudo crítico y corresponde al nudo de menor gradiente.

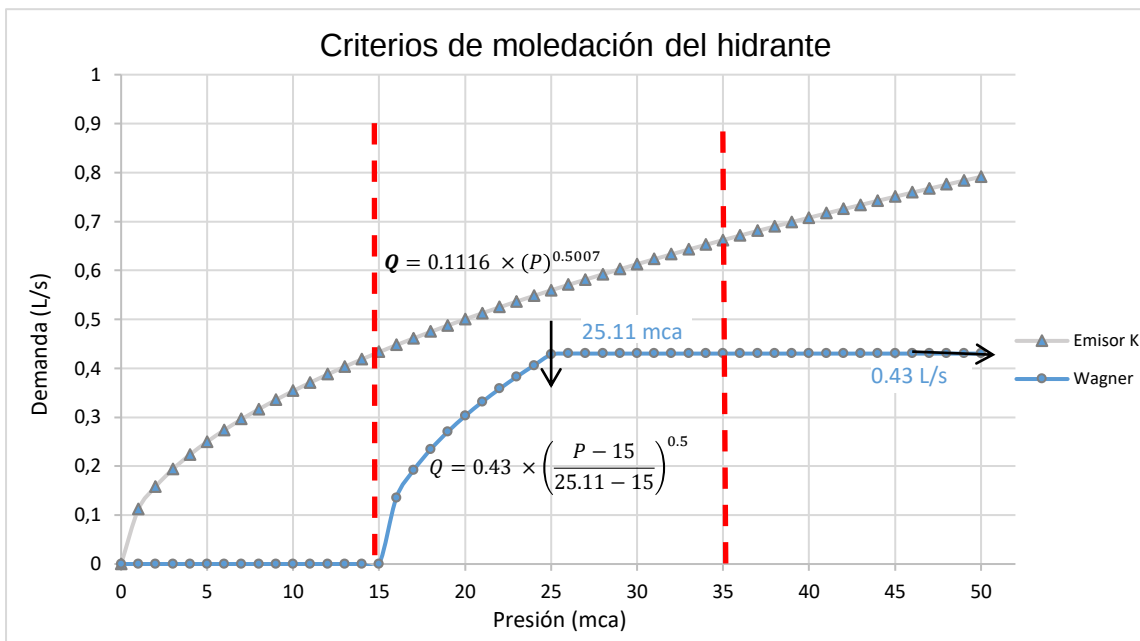


Figura 37. Criterios de modelación del hidrante en el nudo 100 de la red San Rafael.

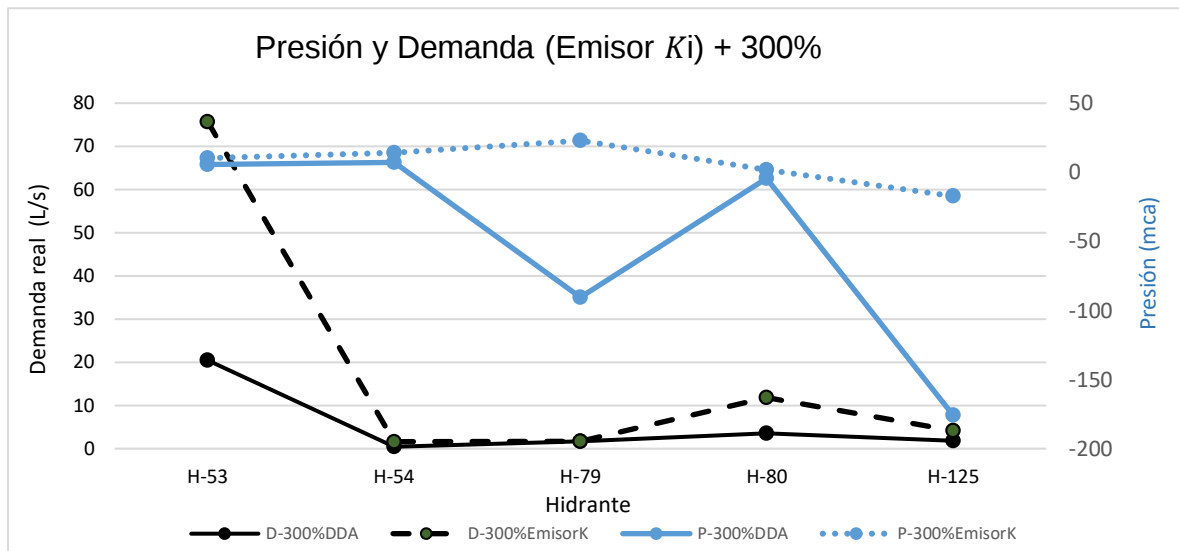
Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

En la curva del emisor K_i y la curva dependiente de la presión bajo el principio de Wagner, se observó:

- El criterio de la curva del emisor K_i suministra al hidrante una dotación aún si la presión es inferior al rango de trabajo del emisor. Además, si el nudo de consumo sobrepasa la presión de trabajo, la demanda se incrementa ilimitadamente de forma potencial. Esto permite simular roturas en tuberías, pero tiene limitación para representar la totalidad de problemas del consumo en la parcela.
- La curva dependiente de presión bajo el principio de Wagner suministra una demanda al hidrante si la presión en el nudo se encuentra dentro del rango de trabajo del aspersor en este caso de 15 – 35 (mca). En caso de que el valor de la presión sea inferior al valor de la presión mínima de 15 mca daría como resultado una dotación de 0 L/s. En cambio, si el valor de la presión es mayor o igual a 25.11 mca, el valor de la dotación adoptará un valor constante de la demanda real requerida en el nudo que será de 0.43 L/s.

La **Figura 38**, representa en el eje de las ordenadas los parámetros (demanda real y presión) según el criterio de asignación por la ecuación del emisor K_i . En el eje de las abscisas constan los hidrantes críticos de la red frente al incremento de la demanda en un 300 %.



En la gráfica las líneas continuas representan las demandas independientes de la presión (DDA), mientras que las entrecortadas reflejan las demandas dependientes de la presión (Emisor K_i).

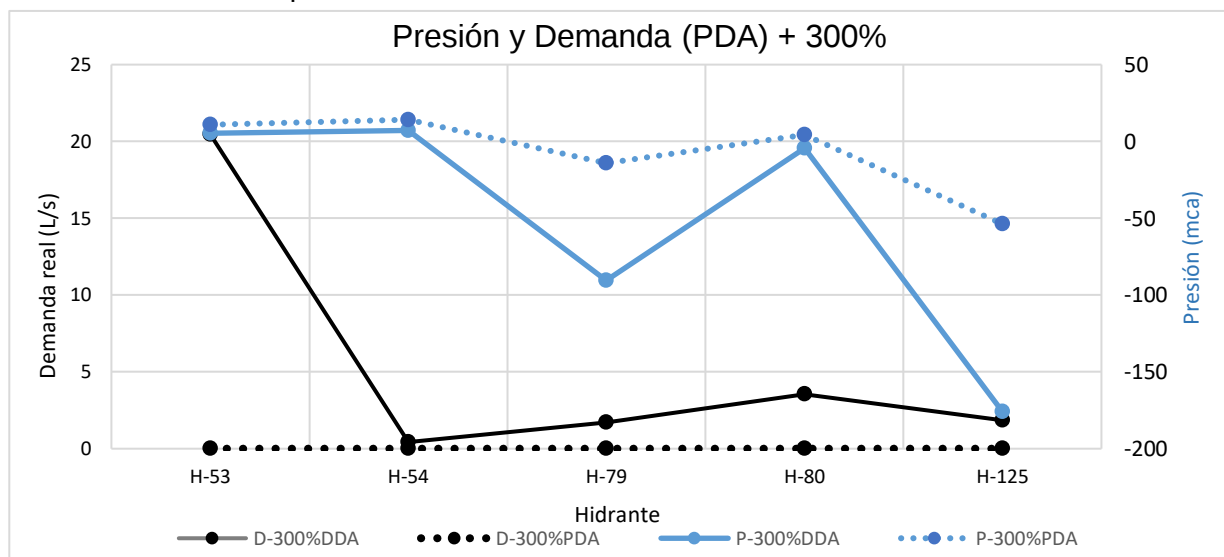
Figura 38. Demanda y Presión frente al incremento de la demanda en los nudos bajo el criterio del Emisor K_i .

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

Se destaca que con los criterios (DDA) y la ecuación del emisor K_i , la red asigna demandas bajo presiones negativas. Esto simula consumos irreales en la red.

La **Figura 39**, muestra en el eje de las ordenadas la relación entre la demanda real y el criterio de asignación de la demanda dependiente de la presión (PDA) en condiciones emergentes. En este caso se ha simulado un incremento del valor de la demanda en un 300 %. En el eje de las abscisas se representan los hidrantes críticos de la red.



En la gráfica las líneas continuas representan las demandas independientes de la presión (DDA), mientras que las entrecortadas reflejan las demandas dependientes de la presión (PDA).

Figura 39. Demanda y Presión frente a un incremento de la demanda en los nudos con criterio PDA.

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

Cuando existe un incremento de la demanda en los hidrantes críticos se genera un estrangulamiento total de la demanda mediante la metodología (PDA). Lo que significa que las presiones no se encuentran dentro del rango de trabajo del hidrante comercial. El resultado será un diseño erróneo debido a que el mismo no dispone de la presión suficiente para su óptima operación. Por otra parte, se observa el dominio del criterio (PDA) en el comportamiento de la presión con el fin de evitar un cambio brusco y mantener una proyección constante de presión con relación al criterio (DDA).

La **Tabla 11**, contiene los resultados de los criterios de asignación de la demanda dependientes de la presión (PDA y Emisor K_i). Muestra los valores de caudal y presión frente a un incremento de la demanda en un 300 % y de la cota piezométrica de 20 m en los nudos críticos de la red.

Tabla 11. Variación de los criterios de asignación de la demanda en la red San Rafael

Incremento		Criterios de asignación					
		DDA - PDA		DDA - Emisor K_i		Emisor K_i - PDA	
300%	Presión	86.5 %	763.2 mca	99.6 %	879.4 mca	7.1 %	116.2 mca
	Caudal	-19.7 %	-40.6 L/s	31.3 %	64.41 L/s	63.4 %	105.0 L/s
+ 20m	Presión	4.6 %	82.9 mca	8.0 %	144.75 mca	4.7 %	61.9 mca
	Caudal	-12.9 %	-26.5 L/s	-8.8 %	-18.12 L/s	3.3 %	8.4 L/s

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

Se deduce de la tabla las siguientes consideraciones:

- La demanda en los nudos de cabecera con el criterio de asignación dependiente de la presión (PDA) disminuyó en 19.7 % que equivale a 40.6 L/s con respecto al criterio (DDA).
- La demanda en los nudos de cabecera con el criterio de la ecuación del emisor K_i , excedió en 63.4 % que equivale a 105 L/s con respecto al criterio (PDA).
- Existe un incremento del 63.4 % que equivale a 105L/s entre el criterio de asignación del emisor K_i con respecto al criterio (PDA).

4.3 Resultados de la asignación en período extendido (Cuasiestático).

El tiempo analizado en el período extendido fue durante una semana de operación de la red equivalente a 120 horas. El sistema de riego operó en condiciones normales, donde no existieron situaciones emergentes en la red. Dichas situaciones no se consideraron debido a que el software WaterNetGen durante el período extendido no permite resolver el sistema bajo presiones y demandas negativas.

La **Figura 40**, muestra la demanda dependiente de presión (PDA) en los hidrantes de la red bajo condiciones normales. En el eje de las abscisas representa el tiempo del análisis en horas, mientras que en el eje de las ordenadas muestra el valor de la demanda en litros por segundo (L/s).

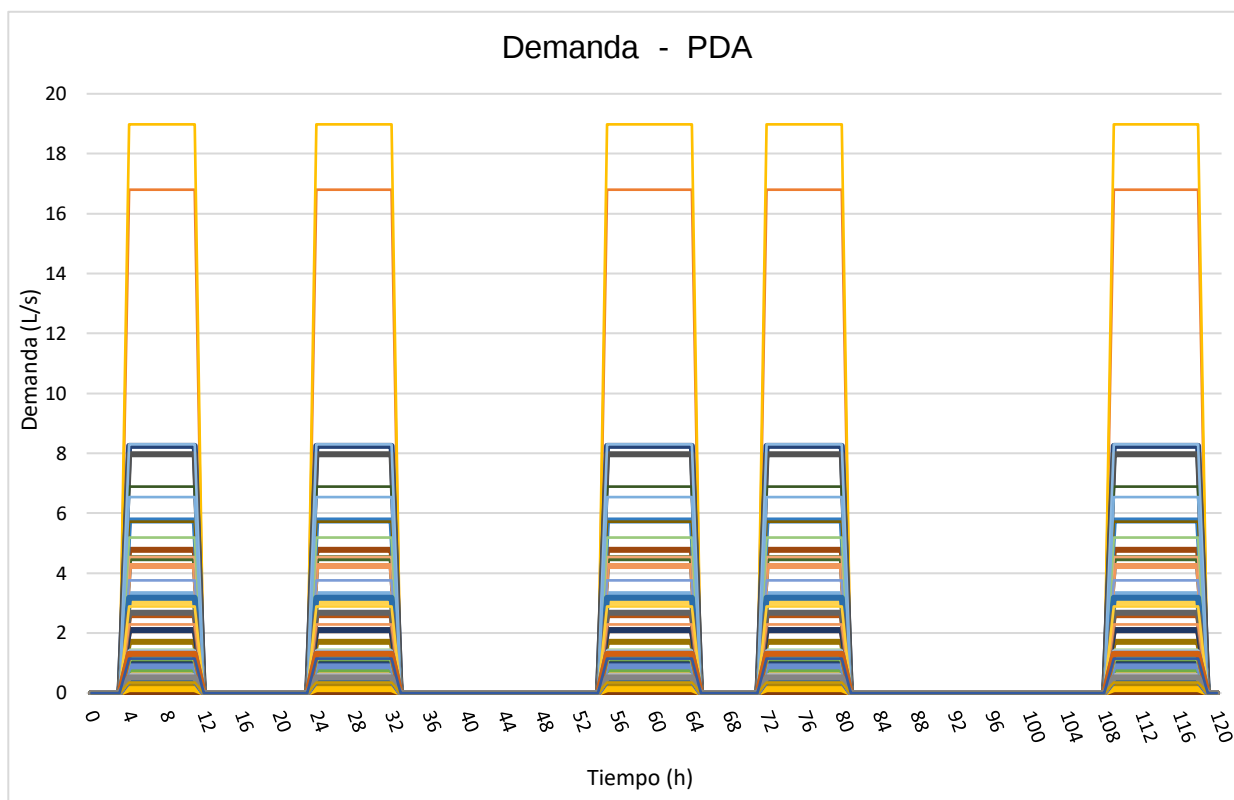


Figura 40. Demanda en el criterio PDA en la red San Rafael bajo período extendido.

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

Es posible observar que las demandas en los nudos durante los períodos (00:00 a 04:00, 12:00 a 24:00, 32:00 a 56:00 y 80:00 a 108:00) horas son estranguladas totalmente. En cambio, cuando hay que suministrar un caudal según el patrón de consumo impuesto durante las horas programadas (04:00 a 12:00, 24:00 a 32:00, 56:00 a 64:00 y 72:00 a 80:00) el criterio simula el patrón perfectamente en horas donde los hidrantes no requieren asignación alguna. Esto permite un ahorro del caudal en la red de estudio, ya que durante la simulación hidráulica los hidrantes de la red no suministran una demanda en horarios no programados.

En la **Figura 41**, se observa el comportamiento del criterio de la ecuación del emisor K_i en condiciones normales. Se establece la demanda en litros por segundo (L/s) en el eje de las ordenadas durante 120 horas a lo largo del eje de las abscisas.

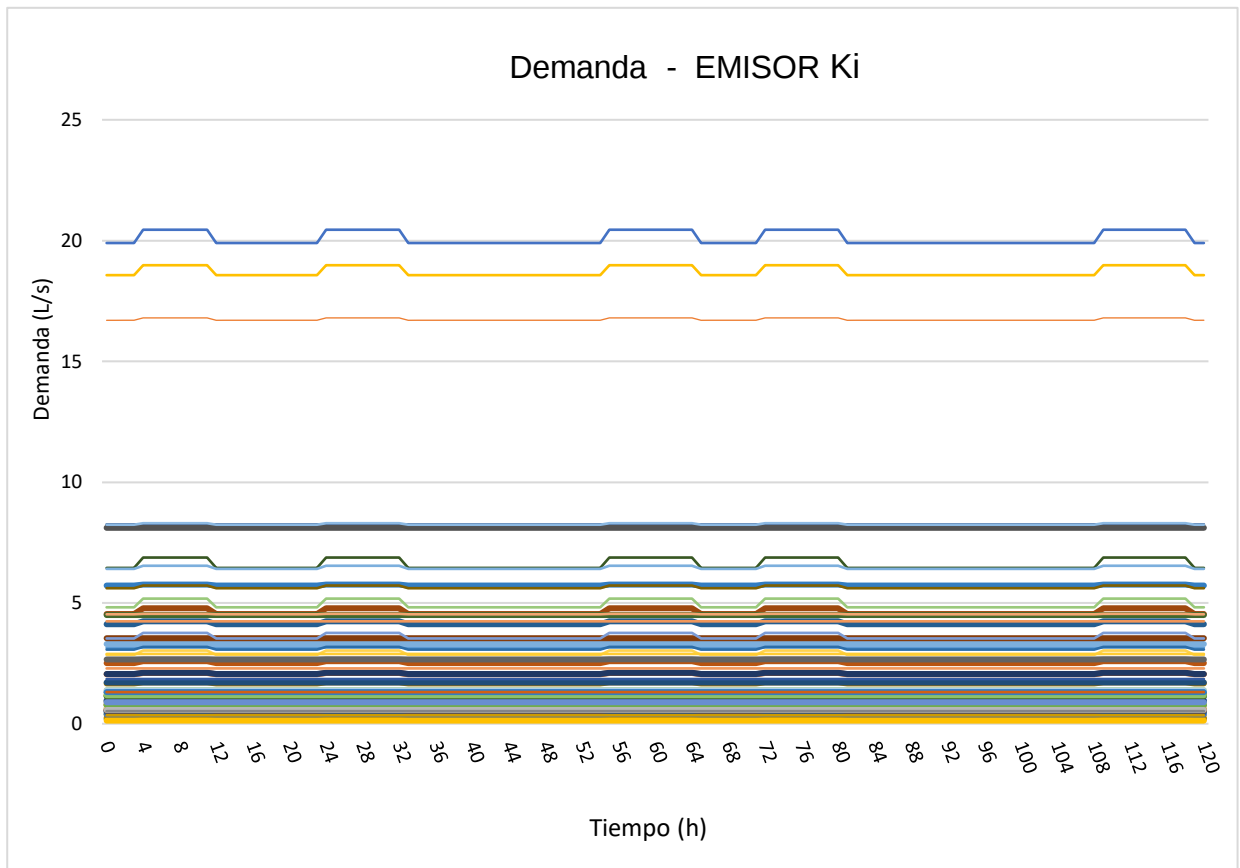


Figura 41. Demanda en el criterio del emisor K_i en la red San Rafael bajo período extendido.
Fuente: Autor.
Elaboración: Autor

Se identifica que en las horas (00:00 a 04:00, 12:00 a 24:00, 32:00 a 56:00 y 80:00 a 108:00) donde el patrón de consumo supone las demandas como nulas, el criterio de asignación del emisor K_i provee una demanda en los hidrantes de la red. De modo que provoca una carencia en la simulación hidráulica durante el período extendido. Por tanto, no se adopta el patrón de consumo establecido en un inicio.

CONCLUSIONES

- En condiciones normales de la red, los criterios de la demanda independiente de la presión (DDA) y la ecuación del emisor K_i permiten realizar sin problemas la simulación hidráulica de sistemas de riego a presión. Dado que en este caso no existe cambios significativos en la presión del emisor que comprometa la asignación de la demanda.
- Bajo escenarios emergentes, es decir cuando se producen incrementos súbitos de presión o demanda, el criterio de la demanda dependiente de la presión (PDA) es más conveniente debido que suministra dotación en el nudo si la presión se encuentra dentro del rango de trabajo del hidrante.
- En el caso de la red de estudio de esta investigación (Red San Rafael) bajo escenarios emergentes, se logró un ahorro del 20 % del caudal equivalente a 40,6 L/s con la asignación de demanda bajo el criterio (PDA) durante la simulación hidráulica.
- Durante el período extendido en la red San Rafael bajo condiciones normales, el criterio de asignación de la demanda (PDA) se acopló de mejor manera al comportamiento del consumo durante 120 horas de operación de la red de riego.
- Se implementó un modelo realista de la demanda dependiente de la presión (PDA) en redes de riego a presión, bajo las principales situaciones emergentes como parada de una bomba, cambio de cultivo o ruptura de una tubería.
- Durante la simulación hidráulica y con el uso del método de la ecuación del emisor K_i , el criterio que más se ajustó a la dotación real de la red San Rafael fue el de potencia de mínimos cuadrados que se verifica en el valor de la desviación estándar mínima obtenida de 0,942.
- La velocidad excedida en los tramos de tubería del sistema de riego de estudio, varían entre 1.5 a 3.5 (m/s). Bajo el criterio de la demanda dependiente de la presión (PDA) existe un aumento del 4 % de la velocidad excedida en relación a la ecuación del emisor K_i . Por lo que el criterio (PDA) fue más seguro en condiciones emergentes en vista que consideró el aumento efectivo de la demanda en condiciones críticas.
- El método de la ecuación del emisor K_i durante la simulación hidráulica de la red de estudio consideró las características del emisor comercial. En cambio, el criterio de la demanda dependiente de la presión (PDA) considera la demanda y presión requerida por el cultivo en el nudo más no las características del emisor. Por lo que durante la asignación PDA es recomendable que se incorpore a la ecuación de Wagner coeficientes característicos del emisor comercial.
- La metodología PDA del programa WaterNetGen posee inconvenientes en la optimización de redes de riego que consideren bombas hidráulicas o depósitos de nivel múltiple en el

diseño. Es necesario realizar un ajuste en la metodología, con el fin de realizar una modelación con la incorporación de estos elementos.

TRABAJOS FUTUROS

- El criterio de asignación de la demanda se puede vincular con un sistema de control, mediante la automatización de riego (SCADA y TELEMEDIDA). Es posible programar estos sistemas con electroválvulas en la cabecera de cada parcela con el fin de regular mejor el suministro del agua en la red en tiempo real.
- Otro trabajo que es posible realizar será analizar el impacto que puede llevar consigo la política de gestión de la presión sobre la demanda, con el fin de evaluar si la red opera en un rango de déficit o superávit.
- Proponer una función matemática, con el objetivo de simular el comportamiento de las demandas dependientes de la presión. De modo que según las características de la red y del emisor comercial sea posible implementar un modelo de simulación de redes acorde a las condiciones del proyecto en estudio.
- Es necesario tomar en cuenta la configuración de la parcela según el tipo de emisor a emplear. De modo que sea posible analizar todos los elementos que intervienen en la red de riego.

BIBLIOGRAFÍA

- Alandí, P. P., Álvarez, J. F. O., & Martín-Benito, J. M. T. (2007). Optimization of irrigation water distribution networks, layout included. *Agricultural Water Management*, 88(1–3), 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.10.004>
- Aliod, R., García, S., Peña, J., Seral, P. (2010). Curso: *Aplicación práctica del software Gestar 2010, para el diseño, gestión hidráulica y energética de redes de riego a presión*. Criterios generales de diseño de redes a presión - Universidad de Zaragoza. Grupo Gestar. Huesca.
- Arias, J. J. (2015). *Determinación del coeficiente Ke para emisores de riego*. (Tesis de Pregrado). Universidad Técnica Particular de Loja. Loja, Ecuador.
- Ayala, H. B. (2013). *Confección de modelos de redes de distribución de agua desde un Sig y desarrollo de herramientas de apoyo a la toma de decisiones*. (Tesis de Doctorado). Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Bamezai, & Lessick. (2003). Water Conservation through System Pressure Optimization in Irvine Ranch Water District. *West Policy Research*, California. Recuperado de www.irwd.com.
- Bhave, P. R. (1981). Node flow analysis distribution systems. *Transportation engineering journal of ASCE*, 107(4), 457-467.
- Bhave, R. & Gupta, R (2006). *Analysis of Water Distribution Networks*. Alpha Science International, Oxford, UK.
- Calejo, M. J., Lamaddalena, N., Teixeira, J. L., & Pereira, L. S. (2008). Performance analysis of pressurized irrigation systems operating on-demand using flow-driven simulation models. *Agricultural Water Management*, 95(2), 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.09.011>
- Catalán, V. A., & Villa, M. M. (2009). Sistema experto para el manejo eficiente del riego parcelario. *Red Temática de Agua del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*. Recuperado de <http://red-tematica-conacyt.blogspot.com/2009/05/sistemaexperto-para-el-manejo.html>.
- Cheung, P. B., Van Zyl, J. E., & Reis, L. F. (2005). Extension of EPANET for pressure driven demand modeling in water distribution system. *Computing and Control for the Water Industry*, 1, 311-316.
- Conejos, P. M. (2015). *Desarrollo e implementación de un modelo realista de demandas y fugas dependientes de la presión para redes de distribución de agua urbana*. (Tesis de Doctorado). Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

- Conejos, P., Martínez, A., Gamón, A., Urbán, P. y Campos, J. (2017). La simulación hidráulica como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en Global Omnium. *Tecnoaqua. Infoedita*, 26, 46-53.
- Cisty, M., Bajtek, Z., & Celar, L. (2014). Comparision of demand driven and pressure driven hydraulic analysis of the irrigation network. *14th SGEM GeoConference on Water Resources. Forest, Marine And Ocean Ecosystems*, 1, 159-166.
- Cullen, R. (2004). Pressure vs Consumption relationships in domestic irrigation systems. Research Thesis, Department of Civil Engineering, University of Queensland in conjunction with Wide Bay Water Corporation. SN40114079.
- EPANET2 (2010). Desktop Application for Pressure Driven Demand Modeling Assela Pathirana, *ASCE Conf. Proc.* 425, 8. doi:10.1061/41203(425)8.
- Escuela Politécnica Superior de Huesca. (2016). Gestar 2016. Manuales y guía de usuario. Aplicación para la ingeniería hidráulica y enérgica de redes de riego a presión. Grupo de Investigación Desarrollo e Innovación.
- EQUIPO I+D+I GESTAR (2012). *¿Es EPANET2 una aplicación suficiente para el análisis hidráulico-energético de sistemas de riego? Comparativa con GESTAR 2010*. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza.
- Fujiwara, O., & Ganesharajah, T. (1993). Reliability assessment of water supply systems with storage and distribution networks. *Water Resources Research*, 29(8), 2917-2924.
- García, I., & Briones, G. (2009). *Sistemas de riego: por aspersión y goteo*. México: Trillas, S. A. (3a ed.).
- Giustolisi, O., Savic, D., & Kapelan, Z. (2008). Pressure-Driven Demand and Leakage Simulation for Water Distribution Networks. *Journal of Hydraulic Engineering. American Society of Civil Engineers*, 134(5), 626–635. doi:10.1061/(ASCE)07339429(2008)134:5(626).
- González, E. P., Medel, J. O., & González, F. M. (2007). Historia del teorema de Bernoulli. *Acta Universitaria*, 17(1), 39-45.
- Granados, A. G. (2013). *Criterios para el dimensionamiento de redes de riego robustas frente a cambios en la alternativa de cultivos*. (Tesis de Doctorado). Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- Granda, I. V. (2015). *Análisis de la sensibilidad de la calidad operacional en sistemas de riego colectivo*. (Tesis de Pregrado). Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador.
- Hurtado L. (2010). Fundamentos del riego. *Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Agronomía*. 5-12. Recuperado de http://grupos.emagister.com/documento/fundamentos_del_riego/23016-480140.
- Keller, J., & Karmeli, D. (1974). Trickle Irrigation Design Parameters. *Transactions of the ASAE*, 17(4), 678–684. doi:10.13031/2013.36936.

- Lamaddalena N., Sagardoy J.A. (2000). Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems. *FAO Irrigation and Drainage*, 59. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Lamaddalena, N., & Pereira, L. S. (2007). Pressure-driven modeling for performance analysis of irrigation systems operating on demand. *Agricultural Water Management*, 90(1–2), 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.02.004>
- Lapo, C. M. (2012). *Diseño óptimo de sistemas de riego a presión y su eficiencia Hidro-energetica. Aplicación en el caso de Loja (Ecuador)*. (Tesis de Maestría). Universidad Politécnica de Valencia.
- Lara, B. (2007). *Diseño de redes colectivas de riego: Estudio de la asignación óptima de caudales mediante algoritmos genéticos*. (Tesis de Doctorado). Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Jun, L., & Guoping, Y. (2012). Iterative methodology of pressure-dependent demand based on EPANET for pressure-deficient water distribution analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(1), 34-44.
- Losada, A. (1997). Glosario Sobre Sistemas De Riego. *Ingeniería Del Agua.*, 4(4), 55–68. doi:10.4995/ia.1997.2736.
- Losada, A. (2005). El riego. II. Fundamentos de su hidrología y de su práctica, Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Muranho, J., Ferreira, A., Sousa, J., Gomes, A., & Sá Marques, A. (2012). WaterNetGen: An EPANET extension for automatic water distribution network models generation and pipe sizing. *Water Science and Technology: Water Supply*, 12(1), 117–123. doi:10.2166/ws.2011.121.
- Muranho, J., Ferreira, A., Sousa, J., Gomes, A., & Sá Marques, A. (2014). Pressure-dependent demand and leakage modelling with an EPANET extension - WaterNetGen. *Procedia Engineering*, 89, 632–639. doi:10.1016/j.proeng.2014.11.488.
- Mora, D. M. (2012). *Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. análisis de eficiencia*. (Tesis de Doctorado). Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Moreno, M. A., Planells, P., Ortega, J. F., Tarjuelo, J. (2007). New Methodology to Evaluate Flow Rates in On-Demand Irrigation Networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 298-306.
- Moya, T., J.A. (1994). *Riego localizado y fertirrigación*. Madrid, España: Mundi-Prensa. 268 p.
- Osorio, F. J., Rodríguez, J. F. (2004). *Propuesta de infraestructura hidráulica para la Universidad de las Américas de acuerdo al Plan Ordenador de Espacios*. (Tesis de Maestría). Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla.
- Palomino, K. (2012). *Riego por aspersión*. Madrid, España: StarBook.
- Pathirana, A. (2010). EPANET2 Desktop Application for Pressure Driven Demand Modeling. *Water Distribution Systems Analysis 2010*, 65-74. doi:10.1061/41203(425)8.

- Peña, E. (2012). *El riego por aspersión: enfoques agronómico, estadístico, hidráulico y económico*. Mexico: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Pizarro, F. (1996). *Riegos localizados de alta frecuencia*. Madrid: Mundi-Prensa. (3a. ed).
- Reddy, L. S., & Elango, K. (1989). Analysis of water distribution networks with head-dependent outlets. *Civil Engineering Systems*, 6(3), 102-110.
- Rocha, A. F. (2003). Los Modelos como Herramienta valiosa para el Diseño Hidráulico. *Investigación en Modelos Físicos y Matemáticos de Obras Hidráulicas*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rossmann, Lewis A.(2000). Epanet 2, Users Manual. Water Supply and Water Resources Division. National Risk Management Research Laboratory. Cinicinnati, USA.
- Royuela, Á., & Turégano, J. V. (2012). Assessment of hydraulic behaviour of regulated emitters in laboratory. In *Soil and Water Engineering. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012: agriculture and engineering for a healthier life*, 8-12.
- Ruiz, D. B. (2014). *Dimensionado óptimo con EPANET de redes de riego a presión*. (Tesis de Pregrado). Universidad de Zaragoza, España.
- Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de Tuberías: Abastecimiento de Agua, Redes y Riegos*. Colombia, Bogotá: Alfaomega. ISBN 9789586826808.
- Salas, A., Perez, L., (2007). *Open Course Ware*. Universidad de Sevilla. Curso on line: Hidráulica y Riegos. Recuperado de http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/Course_listing.
- Santos, L., De Juan, J., Picornell, M., & Tarjuelo, J. (2010). El riego y sus tecnologías. *Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), Albacete, España*, 87-224.
- Savva, A. P. & Frenken, K. (2002). *Crop Water Requirements and Irrigation Scheduling*. Irrigation Manual Module 4. Harare: FAO.
- Siew, C., & Tanyimboh, T. T. (2012). PRESSURE-DEPENDENT EPANET EXTENSION. *Water Resources Management*, 26(6), 1477–1498. <https://doi.org/10.1007/s11269>.
- Shirzad, A., Tabesh, M., Farmani, R., & Mohammadi, M. (2012). Pressure-discharge relations with application to head-driven simulation of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(6), 660-670.
- Suarez, M. B. (2012). *Metodología de la investigación Científica para ingenieros*. Chiclayo, Perú.
- Tarjuelo, M. B., (2005). *El Riego por aspersión y su tecnología*. Madrid, España: Mundi-Prensa. (3a. ed).

- Tarjuelo, J. M., Rodríguez-Díaz, J. A., Abadía, R., Camacho, E., Rocamora, C., & Moreno, M. A. (2015). Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies. *Agricultural Water Management*, 162, 67–77.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.009>
- Tolentino, K., I. (2015). *Propagación rápida de fallas en tuberías plásticas*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, México.
- Torre, W. (2015). *Simulación en redes de riego por los modelos de Clément en la comunidad Challhuapuquio del distrito de San Miguel, provincia de Mar-Ayacucho-2013*. (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Perú.
- Traxco. (2010). Historia ancestral del riego agrícola. Recuperado de <https://www.traxco.es/blog/noticias-agricolas/historia-ancestral-del-riego>
- Trifunovic, N. (2006). *Introduction to urban water distribution*. UNESCO–IHE Lecture note series. London: Taylor and Francis.
- Trifunovic, N. (2012). *Pattern Recognition for Reliability Assessment of Water Distribution Networks: UNESCO-IHE PhD Thesis*. CRC Press.
- Wagner, J., Shamir, U., Marks, D. (1988). Water Distribution Reliability: Simulation Methods. *Water Resource Planning & Management*, 114(3), 276- 294.

ANEXOS

Anexo A. Estudio agronómico (Software CropWat 8.0).

Evapotranspiración Potencial (ET_o).

Precipitación efectiva.

Características del cultivo.

Tipo de suelo.

Patrón de cultivo.

Requerimiento de riego real.

Datos utilizados para el diseño agronómico.

Anexo B: Desarrollo de la metodología en red de estudio (San Rafael).

Cálculo del caudal por línea (Demanda-Primer modelo de Clément).

Cálculo del diseño hidráulico.

Desarrollo de los criterios de asignación de la demanda (Simulación).

Anexo C: Catálogos.

Catálogos de tubería para riego (PVC).

Catálogo aspersor comercial.

Anexo A: Estudio agronómico (Software CropWat 8.0).

En búsqueda de la identificación del sector, se lo realizó en base al “Anuario meteorológico del 2010” (INAMHI,2010). La estación más cercana al proyecto que se consideró influyente fue la estación de Baños (M029), cuyas coordenadas que presenta son 00°1’39’’S y 78°42’00’’W se encuentra ubicada a una altitud de 1695 msnm.

El proceso general para el desarrollo del diseño agronómico se adjunta a continuación:

Evapotranspiración Potencial (ET_o).

Del anuario del INAMHI se obtuvo temperaturas de 13 a 24 C° de un sector con características de páramo Andino. En la ventana del software se ingresan los datos de temperatura, humedad, viento, insolación. Se obtiene el resultado de (ET_o) en la siguiente **Figura 1**.

País Ecuador		Estación M029					
Altitud 1695 m.	Latitud 1.39 °S	Longitud 78.42 °W					
Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación horas	Rad MJ/m²/día	ET _o mm/día
Enero	15.0	24.4	83	805	6.6	19.2	3.82
Febrero	15.4	25.8	84	0	7.2	20.7	3.86
Marzo	15.3	26.0	82	346	7.4	21.1	4.22
Abril	15.6	25.3	83	329	6.7	19.3	3.84
Mayo	15.6	24.4	84	691	6.1	17.3	3.57
Junio	14.6	22.9	86	346	5.7	16.1	3.00
Julio	13.9	24.2	83	0	7.0	18.2	3.20
Agosto	13.4	22.9	83	458	6.5	18.5	3.48
Septiembre	13.7	24.8	78	458	7.6	21.0	4.31
Octubre	14.8	25.3	78	346	7.2	20.6	4.25
Noviembre	15.2	25.4	77	605	7.1	20.0	4.52
Diciembre	14.9	25.2	81	588	7.1	19.7	4.13
Promedio	14.8	24.7	82	397	6.8	19.3	3.85

Figura 1. Datos de Clima en software Cropwat.

Elaboración: Autor - Fuente: INAMHI, 2010

Precipitación efectiva

Se ingresa el registro obtenido del INAMHI durante el año 2010 de la sumatoria de precipitación mensual, tal como se muestra en la **Figura 2**. Se realiza el cálculo de la precipitación efectiva por el método de USADA S.C.

Estación Baños		Método Prec. Ef Método USDA S.C.	
	Precipit. mm	Prec. efec mm	
Enero	51.0	47.5	
Febrero	76.1	66.8	
Marzo	129.3	102.6	
Abril	163.7	120.8	
Mayo	167.5	122.6	
Junio	159.0	118.6	
Julio	105.0	87.4	
Agosto	113.1	92.6	
Septiembre	90.0	77.0	
Octubre	57.5	52.2	
Noviembre	93.1	79.2	
Diciembre	98.5	83.0	
Total	1304.6	1050.3	

Figura 2. Datos de precipitación mensual en software Cropwat.

Elaboración: Autor - Fuente: INAMHI, 2010

Características del cultivo

La FAO en el manual número cincuenta y seis, muestra diferentes cultivos con sus Kc correspondientes. En el proyecto se tomó en consideración los coeficientes de los cultivos más influyentes en la zona de estudio, así como se observa en las **Figuras 3,4,5,6 y 7** pertenecientes a cultivos como: alfalfa, cebolla, cereales, hortalizas, maíz, pasto.

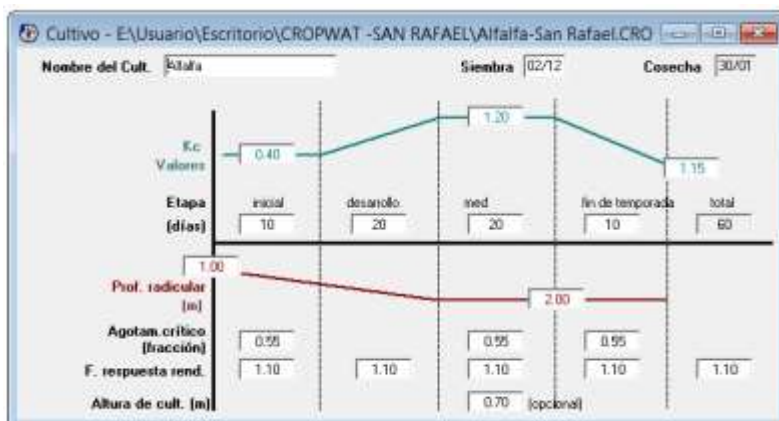


Figura 3. Valores cultivo alfalfa.
Elaboración: Autor - Fuente: CropWat

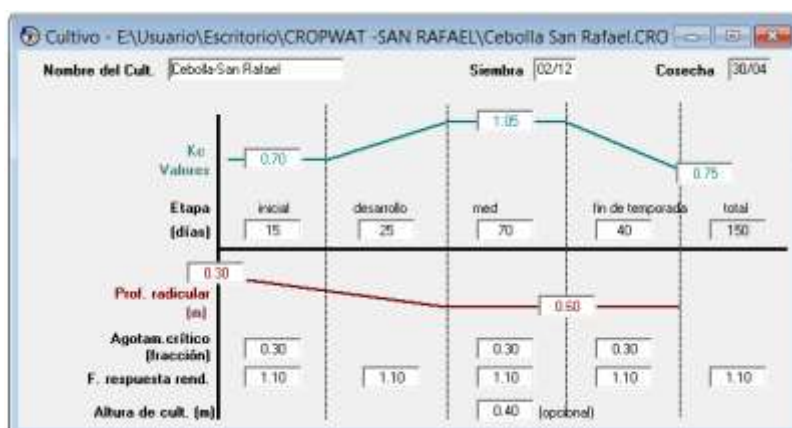


Figura 4. Valores cultivo cebolla.
Elaboración: Autor - Fuente: CropWat

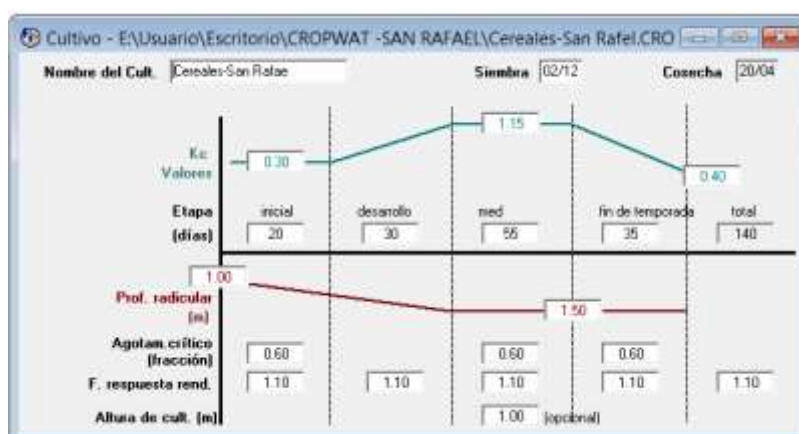


Figura 5. Valores cultivo cereales.
Elaboración: Autor - Fuente: CropWat

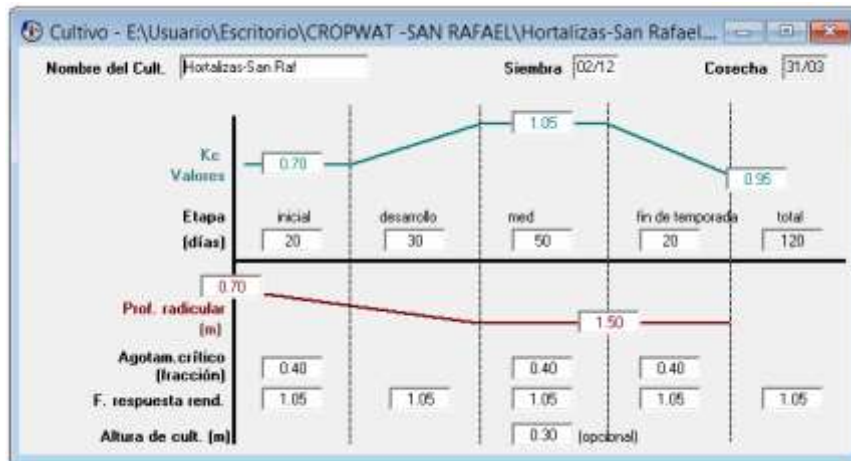


Figura 6. Valores cultivo hortalizas.
Elaboración: Autor - Fuente: CropWat

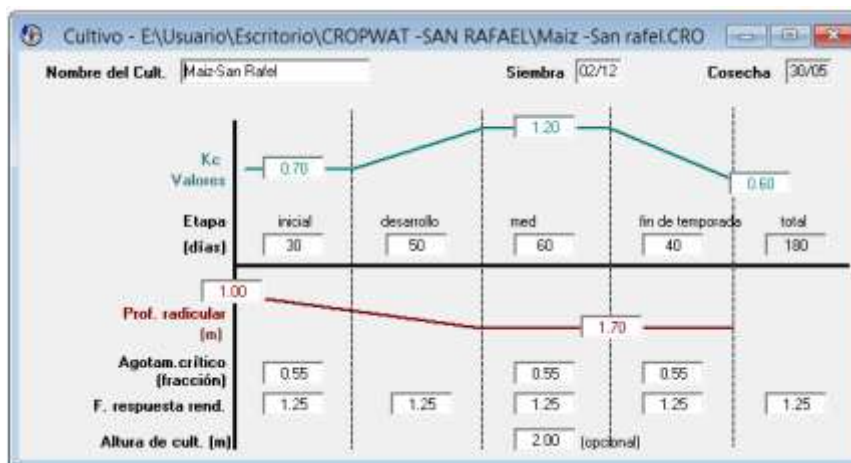


Figura 7. Valores cultivo maíz.
Elaboración: Autor - Fuente: CropWat

Tipo de suelo

- **Humedad de suelo disponible:** Indica la cantidad de humedad utilizada por las plantas y cantidad de agua que el suelo puede almacenar. Se calcula a través de la fórmula de la FAO manual 56.

$$La = \frac{CC - PMP}{100} \times Da \times 1000$$

$$La = \frac{30.15\% - 16.77\%}{100\%} \times 1.29 \text{ gr/cm}^3 \times 1000$$

$$La = 172.6 \text{ mm/m}$$

CC: Capacidad de campo (%).

PMP: Punto de marchitez (%).

Da: Densidad aparente (gr/cm^3).

- **Humedad del suelo disponible inicialmente:** Representa la humedad al inicio de temporada y se ingresa mediante el cuadro de la **Figura 8**.

Nombre del suelo		Franco arenoso	
Datos generales de suelo			
Humedad de suelo disponible total (CC-PMP)	173.0	mm/metro	
Tasa maxima de infiltración de la precipitación	35	mm/día	
Profundidad radicular máxima	100	centímetros	
Agotamiento inicial de hum. de suelo (como % de ADT)	17	%	
Humedad de suelo inicialmente disponible	143.6	mm/metro	

Figura 8. Datos generales del suelo en software Cropwat.

Elaboración: Autor - Fuente: Entrada de los patrones de cultivos al software Cropwat 8.0.

Patrón de cultivo

Se integra los patrones de los cultivos programados, tal como se muestra en la **Figura 9**.

Nombre de patrón de cultivo		Patron				
No.	Archivo de cultivo	Nombre del cult.	Siembra fecha	Cosecha fecha	Área %	
1.	...Suko\Desktop\cropwat\Alfalfa-San Rafael.CRO	Alfalfa	05/09	03/11	35	
2.	...uko\Desktop\cropwat\Cebolla-San Rafael.CRO	Cebolla-San Rafael	05/09	01/02	5	
3.	...uko\Desktop\cropwat\Cereales-San Rafael.CRO	Cereales-San Rafael	03/09	20/01	5	
4.	...Desktop\cropwat\Hortalizas-San Rafael.CRO	Hortalizas-San Raf	05/08	02/12	10	
5.	...s\Suko\Desktop\cropwat\Maiz-San rafael.CRO	Maiz-San Rafael	05/09	03/03	5	
6.	...uko\Desktop\cropwat\Pasto-San Rafael.CRO	Pasto San Rafael	05/09	03/11	40	

Figura 9. Patrones de cultivos.

Elaboración: Autor. - Fuente: Entrada de los patrones de cultivos al software Cropwat 8.0.

Requerimiento de riego real

En la siguiente ventana del software, **Figura 10** se obtiene el caudal ficticio continuo a lo largo de todo el año, de los cuales se diseñará con el mayor que es de 0.31 L/s por seguridad con el objetivo de cumplir con la necesidades netas del cultivo.

Este estudio: [002]		Patrón de cultivo: [Franco]											
Est. de Riego: [Franco]													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Deficit de Precipitación													
1. Alfalfa	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.2	119.0	4.6	0.0	
2. Cebolla-San Rafael	99.6	7.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.1	83.2	62.4	10.1	
3. Cereales-San Rafael	15.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	72.3	73.6	13.6	
4. Hortalizas-San Raf	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	4.0	96.5	57.5	6.3	
5. Maiz-San Rafael	95.6	14.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.0	57.5	71.2	12.7	
6. Pasto-San Rafael	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	54.3	0.0	0.0	
Req. Netos anuales													
en mm/día	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	2.7	0.0	0.3	
en mm/año	9.5	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.5	82.7	17.7	9.9	
en L/s/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.07	0.04	
Área irrigada	19.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	95.0	100.0	60.0	25.0	
Req. de riego anual real	0.25	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.25	0.11	0.15	

Figura 10. Aprovechamiento del sistema.

Elaboración: Autor. - Fuente: Entrada de los patrones de cultivos al software Cropwat 8.0.

Datos utilizados para el diseño agronómico

Para realizar el diseño agronómico se tomó las características de la zona mediante la estación de “Baños”, cuyas referencias se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Estación Baños M029.

Cantón	Baños
Elevación	1820
Latitud	01°23'29"
Longitud	78°25'5"W
Altitud	1695msnm
Código	M029
Nombre	Baños
Provincia	Tungurahua

Fuente: INAMHI 2010.

Elaboración: Autor.

Una vez definida la estación a emplear se extrae los datos de precipitación mensual, así como la temperatura, humedad, viento. Las características extraídas del sector se muestran en las **Tablas 2 y 3**.

Tabla 2. Viento Baños M029

Mes	Nubosidad Media (octas)	Velocidad		
		Media		Velocidad media (km/h)
		(m/s)	DIR	
Enero	6.6	7	S-W	16.4
Febrero	7.2	0	S-W	20
Marzo	7.4	4	S-W	18
Abril	6.7	3.8	S-W	20
Mayo	6.1	10	S-W	20
Junio	5.7	4	S-W	18
Julio	7	0	S-W	20
Agosto	6.5	5.3	S-W	20
Septiembre	7.6	5.3	S-W	20
Octubre	7.2	4	S-W	18
Noviembre	7.1	7	S-W	20
Diciembre	7.1	6.8	S-W	20
Valor anual	6.85	4.8		20

Fuente: INAMHI 2010.

Elaboración: Autor.

Tabla 3. Precipitación Baños M029.

Valores pluviométricos mensuales (mm) San Rafael													
Código	Ene.	Feb.	Mar.	Abr	May	Jun	Jul.	Ago.	Sep.	Oct	Nov	Dic.	Total anual
M029	51.8	76	129	164	167.5	159	105	113.1	90	57.5	93.1	98.5	1304.6

Fuente: INAMHI 2010.

Elaboración: Autor.

A continuación, se extrajo las características como Kc de cultivos, profundidad radicular, agotamiento crítico, factor de respuesta (Ky) y duración de las etapas del cultivo empleado en el sector San Rafael.

A continuación, en las **Tablas 5, 6, 7 y 8** se representan dichas características.

Tabla 5. Valores kc

Cultivo	kc inicial	Kc media	Kc final	Altura máx. Cultivo (m)
Alfalfa	0.4	1.2	1.17	0.7
Cereales	0.3	1.15	0.4	1
Cebolla	0.7	1	1	0.3
Hortalizas	0.7	1.05	0.95	0.3
Maíz	0.7	1.2	0.6- 0.35	2
Pastos	0.3	0.75	0.75	0.1

Fuente: FAO, 2006

Elaboración: Autor.

Tabla 6. Duración en días, etapas de cultivo

Cultivo	Inicio	Después	Medio	Final	Total
Alfalfa	10	20	20	10	60
Cereales	20	30	55	35	140
Cebolla	30	55	55	40	180
Hortalizas	20	30	50	20	120
Maíz	30	50	60	40	180
Pastos	10	20	20	10	60

Fuente: FAO, 2006

Elaboración: Autor.

Tabla 7. Profundidad radicular y agotamiento crítico.

Cultivo

	Profundidad radicular máxima	Fracción agotamiento (para ET=5mm día) p
Alfalfa	1.0-2.0	0.55
Cereales	1.0-1.5	0.6
Cebolla	0.3-0.6	0.3
Hortalizas	0.7-1.5	0.4
Maíz	1.0-1.7	0.55
Pastos	0.5-1.5	0.66

Fuente: FAO, 2006
Elaboración: Autor.

Tabla 8. Valores k_y

Cultivo	k_y
Alfalfa	1
Cereales	1.1
Cebolla	1.1
Hortalizas	1.05
Maíz	1.25
Pastos	1

Fuente: FAO, 2006
Elaboración: Autor.

Anexo B: Desarrollo de la metodología en red de estudio (San Rafael).

- Cálculo del caudal por línea (Demanda-Primer modelo de Clément).

Datos:

Jornada efectiva de riego $\rightarrow JER = 14 \text{ h}$

Garantía de suministro $\rightarrow GS = 99\%$

Caudal ficticio continuo $\rightarrow qfc = 0.31 \text{ L/s/Ha}$

Para efectos de demostración del procedimiento, se calculará solamente la línea 108-115 de la red de riego.

Grado de libertad

$$GL = \frac{24 \text{ h}}{14 \text{ h}}$$

$$GL = 1.714$$

Rendimiento de la red

$$r = \frac{14 \text{ h}}{24 \text{ h}} \quad \text{Ec. 2}$$

$$r = 0.58$$

Dotación de riego por parcela

$$d_i = 4.241 \text{ L/s} \quad \text{Ec. 4}$$

La demanda es acumulada aguas debajo de la línea.

Probabilidad elemental

$$P = \frac{0.31 \text{ L/s/ha} \times 24 \text{ h} \times 3.24 \text{ ha}}{14 \text{ h} \times 0.58 \times 4.241 \text{ L/s}} \quad \text{Ec. 5}$$

$$P = 0.4303$$

Varianza

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n 0.4303 \times (1 - 0.4303) \times 4.241^2 \quad \text{Ec. 6}$$

$$\sigma^2 = 4.4092$$

Media de distribución binomial.

$$\mu = \sum_{i=1}^n 0.4303 \times 4.241 \quad \text{Ec. 7}$$

$$\mu = 1.825$$

Garantía de suministro.

Valor de función Estándar Normal de Distribución Acumulativa

Garantía de suministro = 99%

$$U=2.324$$

Caudal de diseño (Caudal Clément)

$$Q_{Clément} = 1.825 + 2.324 \times 4.409 \quad \text{Ec. 8}$$

$$Q_{Clément} = 6.705 \text{ L/s}$$

Caudal Acumulado.

Caudal acumulado hasta la línea de estudio (2da ley de Kirchhoff).

$$Q_{acum} = 4.24 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

Se selecciona el caudal de diseño según el criterio de menor valor.

$$Q_{diseño} = 4.24 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

- Cálculo del diseño hidráulico.

Gradiente hidráulico mediante:

$$J_{disponible} = \frac{4086.7 - (3772. + 1)}{2478} \quad \text{Ec. 10}$$
$$J_{disponible} = 0.1266$$

Gradiente calculado

$$< J_{min} = J^*$$
$$0.08698 = J^*$$

Diámetro teórico

$$D_i = \sqrt[5]{\frac{8 \times 0.02 \times 4.241^2}{\pi^2 \times 9.81 \times 0.08698}} \times 1000 \quad \text{Ec. 11}$$
$$D_i = 51 \text{ mm}$$

Diámetro comercial

$$D = 57 \text{ mm}$$

Velocidad en cada línea

$$V_i = \frac{8 \times 4.241}{\pi \times 0.057^2} \quad \text{Ec. 12}$$
$$V_i = 1.66 \text{ m/s}$$

Factor de fricción

Número de Reynolds.

$$Re = \frac{1.66 \times 0.057}{0.000001} \quad \text{Ec. 13}$$
$$Re = 94620$$

Coeficiente de fricción por Colebrook - White.

$$f = 0.0183 \quad \text{Ec. 14}$$

Pérdidas de carga por línea 113-114

$$hf = \frac{8 \times 0.0183 \times 116.33 \times 4.241^2}{\pi^2 \times g \times 0.057^5} \quad \text{Ec. 15}$$
$$hf = 5.27 \text{ m}$$

Pérdidas de menores

$$\Sigma km = 2.19$$

$$hf_m = 2.19 \times \frac{1.66^2}{2 \times 9.81}$$

Ec. 16

$$hf_m = 0.308 \text{ m}$$

Pérdidas de menores línea

$$hf_t = hf_m + hf = 5.58 \text{ m}$$

Diferencia de cotas

$$Z = 3795 \text{ m} - 3772 \text{ m}$$

$$Z = 23 \text{ m}$$

Presión de dinámica en cada nudo

Con válvula rompe presión por línea (VRP)

$$\frac{p}{\gamma} \cdot \text{consigna} : 6 \text{ mca.}$$

$$\frac{p}{\gamma} = 23 + 6 - 5.58$$

$$\frac{p}{\gamma} = 23.42 \text{ mca}$$

Golpe de ariete

Celeridad:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{2074000000 \text{ Pa}}{9810 \text{ kg/m}^3}}}{\sqrt{1 + \frac{2074000000 \text{ Pa} \times 0.057 \text{ m}}{2750000000 \text{ Pa} \times 0.003 \text{ m}}}}$$

$$a = 117.437 \text{ m/s}$$

Ec. 22

Pulso de Joukowski:

$$\Delta H = \frac{117.437 \text{ m/s}}{9.81 \text{ m/s}^2} \times 1.66 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ec. 23

$$\Delta H = 19.90 \text{ m}$$

Verificación de Golpe de ariete

$$\Delta H + \frac{p}{\gamma} \cdot \text{final} < 102.0408 \times \frac{p}{\gamma} \cdot \text{trabajo_tuberia}$$

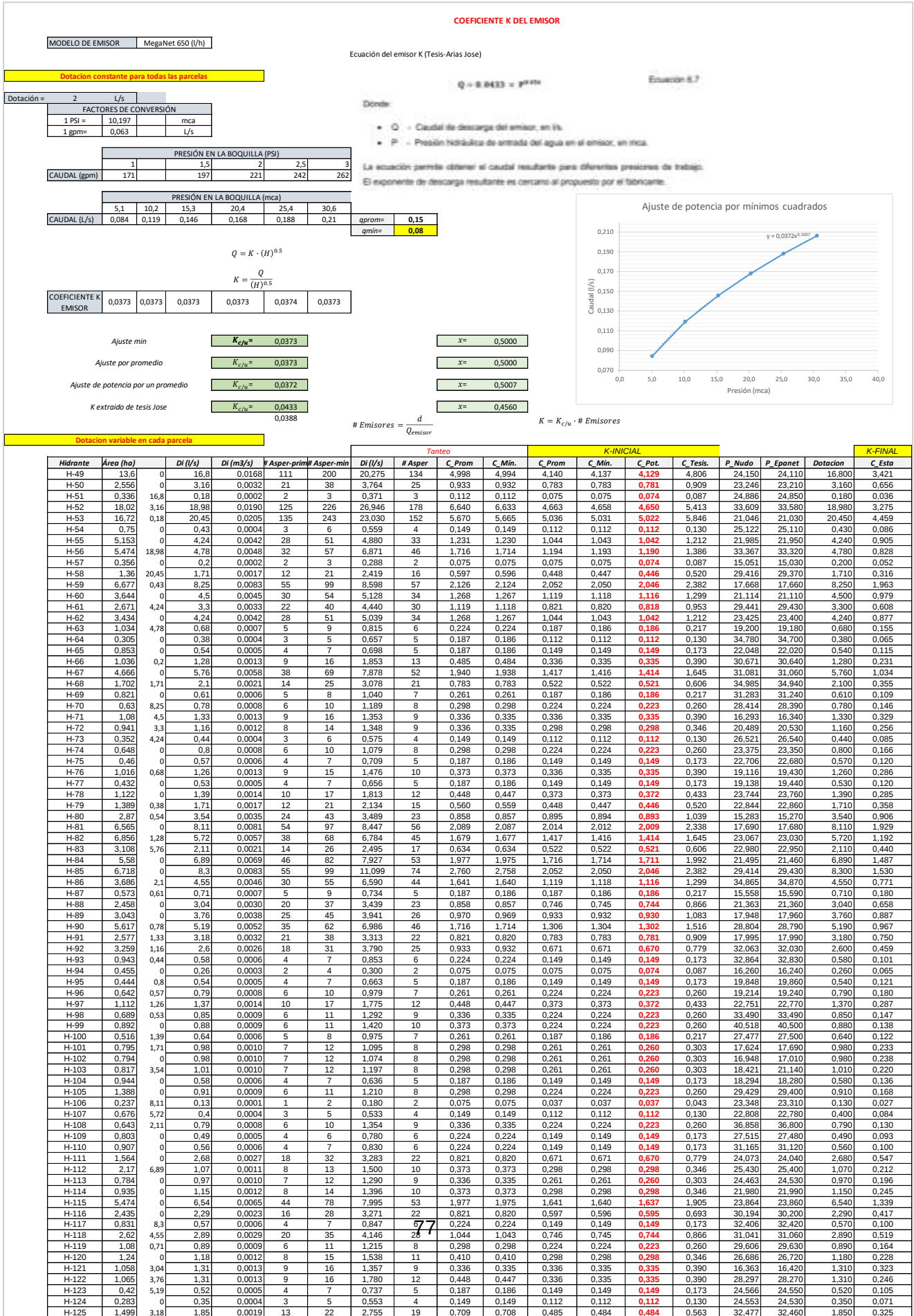
$$19.90 \text{ m} + 23.42 \text{ m} < 102.0408 \frac{\text{m}}{\text{Mpa}} \times 1.25 \text{ Mpa}$$

$$43.32 \text{ m} < 127.55 \text{ m}$$

Cumple

- Desarrollo de los criterios de asignación de la demanda (Simulación).

Criterios en la determinación del coeficiente K (ecuación de emisor).



Escenario de la asignación del consumo frente a un incremento de la demanda en un +300% y cota +20m en los hidrantes (53, 54, 79, 80 y 125) de la red San Rafael.

Línea			Asinacion de la demanda - Criterio de Wagner (WaterNetGen)												Coeficiente K			
			Incremento de demanda								Incremento de Cota				Incremento Demanda		Incremento Cota	
			DDA				PDA				DDA		PDA		PDA			
			Presión	Demanda	Presión	Demanda	Presión	Demanda	Presión	Demanda	Presión	Demanda	Presión	Demanda	Presión	Demanda	Presión	Demanda
			0% Nudo		300% Nudo		0% Nudo		300% Nudo		(+20 m Nudo)		(+20 m Nudo)		300% Nudo		(+20 m Nudo)	
91	92	H-49	24,11	16,8	23,03	16,8	24,12	16,8	23,46	16,29	24,11	16,8	24,23	16,8	23,78	16,68	24,19	16,83
92	93	H-50	23,21	3,16	22,13	3,16	23,21	3,16	22,58	3,07	23,21	3,16	23,33	3,16	22,88	3,14	23,29	3,17
91	94	H-51	24,85	0,18	23,36	0,18	24,85	0,18	23,79	0,18	24,85	0,18	25	0,18	24,35	0,18	24,96	0,18
96	97	H-52	33,58	18,98	19,34	18,98	33,59	18,98	23,15	12,76	33,58	18,98	34,86	18,98	29,23	17,71	34,43	19,22
98	99	H-53	21,03	20,45	5,44	20,45	21,04	20,45	10,86	0	1,07	20,45	3,71	0	10,31	75,67	22,77	7,47
99	100	H-54	25,11	0,43	7,15	0,43	25,15	0,43	14,15	0	5,15	0,43	8,35	0	13,98	1,61	27,07	0,23
101	102	H-55	21,95	4,24	21,23	4,24	21,96	4,23	21,77	4,17	21,95	4,24	22,11	4,24	21,95	4,24	22,01	4,24
103	104	H-56	33,32	4,78	31,41	4,78	33,34	4,78	32,81	4,76	33,32	4,78	33,74	4,78	33,32	4,78	33,47	4,79
106	107	H-57	15,03	0,2	14,76	0,2	15,03	0,2	14,96	0	15,03	0,2	15,09	0,2	15,03	0,2	15,05	0,2
108	109	H-58	29,37	1,71	28,63	1,71	29,38	1,71	29,14	1,71	29,37	1,71	29,53	1,71	29,37	1,71	29,43	1,71
110	111	H-59	17,66	8,25	17,66	8,25	17,66	8,25	17,66	8,25	17,66	8,25	17,66	8,25	17,67	8,25	17,67	8,25
111	112	H-60	21,11	4,5	21,11	4,5	21,11	4,5	21,11	4,5	21,11	4,5	21,11	4,5	21,13	4,5	21,13	4,5
112	113	H-61	29,43	3,3	29,43	3,3	29,43	3,3	29,43	3,3	29,43	3,3	29,43	3,3	29,45	3,3	29,45	3,3
113	114	H-62	23,4	4,24	23,4	4,24	23,4	4,24	23,4	4,24	23,4	4,24	23,4	4,24	23,41	4,24	23,41	4,24
116	117	H-63	19,18	0,68	14,76	0,68	19,23	0,68	17,87	0,57	19,18	0,68	20,09	0,68	19,18	0,68	19,52	0,68
119	120	H-64	34,7	0,38	33,23	0,38	34,79	0,38	34,45	0,37	34,7	0,38	35	0,38	34,52	0,38	34,62	0,38
119	121	H-65	22,02	0,54	19,91	0,54	22,04	0,54	21,35	0,51	22,02	0,54	22,45	0,54	22,02	0,54	22,18	0,54
122	123	H-66	30,64	1,28	29,4	1,28	30,68	1,27	30,34	1,25	30,64	1,28	30,9	1,27	30,65	1,28	30,73	1,28
123	124	H-67	31,06	5,76	29,82	5,76	31,1	5,76	30,82	5,73	31,06	5,76	31,32	5,76	31,07	5,76	31,14	5,77
126	127	H-68	34,94	2,1	30,88	2,1	34,99	2,1	33,91	2,04	34,94	2,1	35,73	2,1	34,97	2,1	35,24	2,1
125	128	H-69	31,24	0,61	25,79	0,61	31,29	0,61	29,5	0,58	31,24	0,61	32,28	0,61	31,25	0,61	31,65	0,61
130	131	H-70	28,39	0,78	25,31	0,78	28,42	0,78	27,55	0,76	28,39	0,78	28,94	0,78	28,4	0,78	28,59	0,78
131	132	H-71	16,34	1,33	13,26	1,33	16,37	1,33	15,91	1,27	16,34	1,33	16,89	1,33	16,36	1,33	16,49	1,33
132	133	H-72	20,53	1,16	17,45	1,16	20,56	1,16	20,1	1,16	20,53	1,16	21,08	1,16	20,55	1,16	20,66	1,16
133	134	H-73	26,54	0,44	23,46	0,44	26,57	0,44	26,11	0,44	26,54	0,44	27,09	0,44	26,51	0,44	26,6	0,44
135	136	H-74	23,35	0,8	23,35	0,8	23,49	0,8	23,49	0,8	23,35	0,8	23,49	0,8	23,35	0,8	23,35	0,8
136	137	H-75	22,68	0,57	22,68	0,57	22,85	0,56	22,85	0,56	22,68	0,57	22,85	0,56	22,68	0,57	22,68	0,57
137	138	H-76	19,43	1,26	19,43	1,26	19,68	1,22	19,68	1,22	19,43	1,26	19,68	1,22	19,44	1,26	19,44	1,26
138	139	H-77	19,44	0,53	19,44	0,53	19,7	0,53	19,7	0,53	19,44	0,53	19,7	0,53	19,49	0,53	19,49	0,53
140	141	H-78	23,76	1,39	-79,62	1,39	23,88	1,38	-7,69	0	23,76	1,39	35,89	1,39	23,79	1,39	29,35	1,54
141	142	H-79	22,86	1,71	-90,62	1,71	22,99	1,71	-14,18	0	2,9	1,71	15,81	0,54	22,9	1,71	28,97	1,07
143	144	H-80	15,27	3,54	-4,29	3,54	15,27	3,54	4,43	0	-4,7	3,54	-2,98	0	1,78	11,8	17,33	-1,47
146	147	H-81	17,68	8,11	17,68	8,11	17,9	7,97	17,9	7,97	17,68	8,11	17,9	7,97	17,68	8,11	17,68	8,11
146	148	H-82	23,03	5,72	22,73	5,72	23,04	5,72	23,03	5,72	23,03	5,72	23,07	5,72	22,99	5,71	23,04	5,72
148	149	H-83	22,95	2,11	22,63	2,11	22,96	2,1	22,94	2,1	22,95	2,11	22,99	2,1	22,91	2,1	22,95	2,11
152	153	H-84	21,46	6,89	20,57	6,89	21,49	6,89	21,44	6,89	21,46	6,89	21,58	6,89	21,35	6,86	21,48	6,88
157	158	H-85	29,43	8,3	29,23	8,3	29,44	8,3	29,44	8,3	29,43	8,3	29,46	8,3	29,41	8,29	29,43	8,3
158	159	H-86	34,87	4,55	34,68	4,55	34,91	4,54	34,9	4,54	34,87	4,55	34,93	4,54	34,86	4,55	34,88	4,55
157	160	H-87	15,59	0,71	15,39	0,71	15,6	0,71	15,59	0,71	15,59	0,71	15,62	0,71	15,6	0,71	15,61	0,71
161	162	H-88	21,36	3,04	19,89	3,04	21,39	3,04	21,32	3,04	21,36	3,04	21,54	3,04	21,16	3,02	21,38	3,04
162	163	H-89	17,96	3,76	16,49	3,76	18	3,76	17,97	3,74	17,96	3,76	18,14	3,76	17,8	3,74	17,98	3,76
161	164	H-90	28,79	5,19	26,3	5,19	28,85	5,16	28,72	5,14	28,79	5,19	29,1	5,19	28,44	5,15	28,83	5,19
165	166	H-91	17,99	3,18	16,93	3,18	18,01	3,18	17,98	3,17	17,99	3,18	18,12	3,18	17,88	3,16	18,02	3,18
167	168	H-92	32,03	2,6	30,31	2,6	32,06	2,6	31,96	2,59	32,03	2,6	32,24	2,6	31,77	2,59	32,06	2,6
168	169	H-93	32,83	0,58	31,05	0,58	32,86	0,57	32,76	0,57	32,83	0,58	33,05	0,58	32,56	0,58	32,86	0,58
170	171	H-94	16,24	0,26	15,29	0,26	16,26	0,26	16,2	0,26	16,24	0,26	16,36	0,26	16,1	0,26	16,26	0,26
174	175	H-95	19,86	0,54	19,86	0,54	19,92	0,54	19,92	0,54	19,86	0,54	19,92	0,54	19,91	0,54	19,91	0,54
175	176	H-96	19,24	0,79	19,24	0,79	19,32	0,79	19,32	0,79	19,24	0,79	19,32	0,79	19,3	0,79	19,3	0,79
176	177	H-97	22,77	1,37	22,77	1,37	22,88	1,36	22,88	1,36	22,77	1,37	22,88	1,36	22,84	1,37	22,84	1,37
177	178	H-98	33,49	0,85	33,49	0,85	33,59	0,85	33,59	0,85	33,49	0,85	33,59	0,85	33,56	0,85	33,56	0,85
179	180	H-99	40,5	0,88	37,27	0,88	40,58	0,88	40,4	0,88	40,5	0,88	40,88	0,88	40,05	0,87	40,54	0,88
181	182	H-100	27,5	0,64	24,28	0,64	27,66	0,64	27,54	0,64	27,5	0,64	27,89	0,64	27,18	0,63	27,53	0,64
182	183	H-101	17,69	0,98	14,46	0,98	17,92	0,97	17,87	0,96	17,69	0,98	18,07	0,98	17,47	0,97	17,71	0,98
183	184	H-102	17,01	0,98	13,79	0,98	17,25	0,98	17,19	0,98	17,01	0,98	17,4	0,98	16,81	0,98	17,03	0,98
184	185	H-103	21,14	1,01	17,92	1,01	21,38	1,01	21,32	1,01	21,14	1,01	21,53	1,01	20,94	1,01	21,16	1,01
179	186	H-104	18,28	0,58	17,99	0,58	18,28	0,58	18,27	0,58	18,28	0,58	18,31	0,58	18,24	0,58	18,28	0,58
186	187	H-105	29,4	0,91	28,33	0,91	29,41	0,91	29,35	0,91	29,4	0,91	29,52	0,91	29,23	0,		

Variación de los parámetros hidráulicos en la ecuación del Emisor K en relación a los parámetros reales de la red San Rafael.

Asignacion demanda						Asignacion coeficiente K			Variación (%)			
Nudo	Línea	Diámetro	Caudal	Velocidad	Presión	Caudal	Velocidad	Presión	Caudal	Velocidad	Presión	
		mm	L/s	m/s	mca	L/s	m/s	mca	L/s	m/s	mca	
abezera	90	341	151,86	1,66	30,86	188,79	2,07	30,48	24,3	24,7	-1,2	
	90	91	341	151,86	1,66	22,98	188,74	2,07	22,78	24,3	24,7	-0,9
	91	92	103,2	19,95	2,39	24,11	23,54	2,81	23,16	18,0	17,6	-3,9
	92	93	57	3,16	1,24	23,21	3,67	1,44	22,07	16,1	16,1	-4,9
	91	94	341	139,35	1,53	24,85	172,65	1,89	24,59	23,9	23,5	-1,0
	94	95	341	139,17	1,52	15,78	171,98	1,88	15,68	23,6	23,7	-0,6
	95	96	341	139,17	1,52	26,34	171,98	1,88	25,55	23,6	23,7	-3,0
	96	97	211	83,57	2,39	33,58	101,82	2,91	32,03	21,8	21,8	-4,6
	97	98	187,6	64,59	2,34	32,87	75,51	2,73	31,09	16,9	16,7	-5,4
	98	99	187,6	64,59	2,34	21,03	75,51	2,73	19,39	16,9	16,7	-7,8
	99	100	150	44,14	2,5	25,11	53,4	3,02	19,97	21,0	20,8	-20,5
	100	101	150	43,71	2,47	7,56	52,9	2,99	6,88	21,0	21,1	-9,0
	101	102	150	43,71	2,47	21,95	52,9	2,99	20,61	21,0	21,1	-6,1
	102	103	144,8	39,47	2,4	30,62	48,17	2,93	28,73	22,0	22,1	-6,2
	103	104	144,8	39,47	2,4	33,32	48,17	2,93	29,97	22,0	22,1	-10,1
	104	105	144,8	34,69	2,11	22,96	41,66	2,53	19,47	20,1	19,9	-15,2
	105	106	144,8	34,69	2,11	36,73	41,66	2,53	32,75	20,1	19,9	-10,8
	106	107	144,8	34,69	2,11	15,03	41,66	2,53	14,65	20,1	19,9	-2,5
	107	108	144,8	34,49	2,09	29,39	41,38	2,51	28,39	20,0	20,1	-3,4
	108	109	144,8	22	1,34	29,37	24,37	1,48	28,36	10,8	10,4	-3,4
	109	110	103,2	20,29	2,43	11,56	22	2,63	10,7	8,4	8,2	-7,4
	110	111	103,2	20,29	2,43	17,66	22	2,63	16,34	8,4	8,2	-7,5
	111	112	81,4	12,04	2,31	21,11	13,73	2,64	18,29	14,0	14,3	-13,4
	112	113	81,4	7,54	1,45	29,43	8,97	1,72	25,27	19,0	18,6	-14,1
	113	114	57	4,24	1,66	23,4	4,86	1,91	21,84	14,6	15,1	-6,7
	108	115	99,6	18,34	2,35	27,55	22,86	2,93	25,64	24,6	24,7	-6,9
	115	116	99,6	18,34	2,35	33,2	22,86	2,93	28,66	24,6	24,7	-13,7
	116	117	99,6	18,34	2,35	19,18	22,86	2,93	15,33	24,6	24,7	-20,1
	117	118	99,6	17,67	2,27	25,63	22,14	2,84	20,49	25,3	25,1	-20,1
	118	119	99,6	17,67	2,27	15,11	22,14	2,84	13,85	25,3	25,1	-8,3
	119	120	22	0,38	0,99	34,7	0,56	1,47	25,04	47,4	48,5	-27,8
	119	121	99,6	17,5	2,25	22,02	21,78	2,8	20,23	24,5	24,4	-8,1
	121	122	99,6	16,96	2,18	17,97	21,11	2,71	16,99	24,5	24,3	-5,5
	122	123	81,4	7,04	1,35	30,64	8,74	1,68	26,64	24,1	24,4	-13,1
	123	124	59	5,76	2,11	31,06	7,02	2,57	24,67	21,9	21,8	-20,6
	122	125	81,4	10,39	2	32,31	12,84	2,47	30,09	23,6	23,5	-6,9
	125	126	45,2	2,1	1,31	30,07	2,8	1,75	26,33	33,3	33,6	-12,4
	126	127	45,2	2,1	1,31	34,94	2,8	1,75	29,08	33,3	33,6	-16,8
	125	128	81,4	8,82	1,7	31,24	10,58	2,03	28,61	20,0	19,4	-8,4
	128	129	81,4	8,22	1,58	29,48	9,59	1,84	25,8	16,7	16,5	-12,5
	129	130	81,4	8,22	1,58	19,79	9,59	1,84	19,09	16,7	16,5	-3,5
	130	131	57	3,71	1,45	28,39	4,16	1,63	26,68	12,1	12,4	-6,0
	131	132	45,2	2,93	1,82	16,34	3,01	1,88	14,06	2,7	3,3	-14,0
	132	133	36,2	1,6	1,55	20,53	1,75	1,7	17,29	9,4	9,7	-15,8
	133	134	22	0,44	1,14	26,54	0,52	1,36	21,34	18,2	19,3	-19,6
	130	135	59	5,89	2,16	34,18	6,81	2,49	31,82	15,6	15,3	-6,9
	135	136	46,2	3,16	1,89	23,35	3,69	2,2	21,53	16,8	16,4	-7,8
	136	137	45,2	2,36	1,47	22,68	2,66	1,66	20,7	12,7	12,9	-8,7
	137	138	36,2	1,79	1,74	19,43	1,98	1,93	17	10,6	10,9	-12,5
	138	139	29	0,53	0,81	19,44	0,61	0,92	16,53	15,1	13,6	-15,0
	135	140	45,2	3,1	1,93	24,8	3,48	2,17	23,13	12,3	12,4	-6,7
	140	141	45,2	3,1	1,93	23,76	3,48	2,17	18,81	12,3	12,4	-20,8
	141	142	36,2	1,72	1,67	22,86	1,87	1,82	17,75	8,7	9,0	-22,4
	96	143	211	73,81	2,11	45,02	88,37	2,53	43,73	19,7	19,9	-2,9
	143	144	57	3,54	1,39	15,27	3,49	1,37	15,31	-1,4	-1,4	0,3
	143	145	211	71,97	2,06	38,08	86,57	2,48	37,33	20,3	20,4	-2,0
	145	146	211	71,97	2,06	28,97	86,55	2,48	28,17	20,3	20,4	-2,8
	146	147	81,4	8,11	1,56	17,68	8,35	1,6	17,29	3,0	2,6	-2,2
	146	148	187,6	66,72	2,41	23,03	81,06	2,93	22,21	21,5	21,6	-3,6
	148	149	181	61	2,37	22,95	74,4	2,89	22,08	22,0	21,9	-3,8
	149	150	181	58,89	2,29	23,36	71,95	2,8	22,46	22,2	22,3	-3,9
	150	151	181	58,89	2,29	12,68	71,95	2,8	11,44	22,2	22,3	-9,8

151	152	181		58,89	2,29	20,51	71,95	2,8	18,3	22,2	22,3	-10,8
152	153	81,4		6,89	1,32	21,46	7,47	1,43	19,1	8,4	8,3	-11,0
152	154	181		54,4	2,11	33,74	66,88	2,6	30,74	22,9	23,2	-8,9
154	155	181		54,4	2,11	46,31	66,88	2,6	44,18	22,9	23,2	-4,6
155	156	181		54,4	2,11	32,99	66,88	2,6	32,53	22,9	23,2	-1,4
156	157	84,4		13,56	2,42	27,85	16,55	2,96	23,39	22,1	22,3	-16,0
157	158	81,4		12,85	2,47	29,43	15,89	3,05	24,3	23,7	23,5	-17,4
158	159	57		4,55	1,78	34,87	5,82	2,28	27,23	27,9	28,1	-21,9
157	160	29		0,71	1,07	15,59	0,66	0,99	12,57	-7,0	-7,5	-19,4
156	161	152,2		45,28	2,49	21,75	54,77	3,01	19,16	21,0	20,9	-11,9
161	162	81,4		6,79	1,31	21,36	6,88	1,32	18,75	1,3	0,8	-12,2
162	163	57		3,76	1,47	17,96	3,67	1,44	15,55	-2,4	-2,0	-13,4
161	164	150		41,4	2,34	28,79	50,8	2,87	24,4	22,7	22,6	-15,2
164	165	144,8		36,21	2,2	21,12	44,38	2,69	19,52	22,6	22,3	-7,6
165	166	46,2		3,18	1,9	17,99	3,17	1,89	16,43	-0,3	-0,5	-8,7
165	167	144,8		34,33	2,08	21,02	42,51	2,58	19,36	23,8	24,0	-7,9
167	168	144,8		34,33	2,08	32,03	42,51	2,58	29,43	23,8	24,0	-8,1
168	169	144,8		31,74	1,93	32,83	38,89	2,36	30,14	22,5	22,3	-8,2
169	170	144,8		31,16	1,89	8,2	38,07	2,31	7,85	22,2	22,2	-4,3
170	171	144,8		31,16	1,89	16,24	38,07	2,31	15,03	22,2	22,2	-7,5
171	172	144,8		30,9	1,88	30,55	37,78	2,29	29,02	22,3	21,8	-5,0
172	173	144,8		30,9	1,88	39,26	37,78	2,29	35,84	22,3	21,8	-8,7
173	174	57		3,56	1,4	25,72	4,18	1,64	24,63	17,4	17,1	-4,2
174	175	57		3,56	1,4	19,86	4,18	1,64	17,49	17,4	17,1	-11,9
175	176	45,2		3,02	1,88	19,24	3,56	2,22	15,28	17,9	18,1	-20,6
176	177	45,2		2,22	1,39	22,77	2,69	1,67	17,82	21,2	20,1	-21,7
177	178	29		0,85	1,29	33,49	1,12	1,69	25,25	31,8	31,0	-24,6
173	179	144,8		29,16	1,77	37,89	35,43	2,15	33,89	21,5	21,5	-10,6
179	180	57		4,49	1,76	40,5	5,04	1,97	35,24	12,2	11,9	-13,0
180	181	57		3,61	1,41	33,2	3,72	1,46	27,44	3,0	3,5	-17,3
181	182	57		3,61	1,41	27,5	3,72	1,46	21,6	3,0	3,5	-21,5
182	183	45,2		2,97	1,85	17,69	2,86	1,78	12,53	-3,7	-3,8	-29,2
183	184	45,2		1,99	1,24	17,01	1,94	1,21	11,91	-2,5	-2,4	-30,0
184	185	29		1,01	0,63	21,14	1,04	0,65	16,02	3,0	3,2	-24,2
179	186	144,8		26,87	1,63	18,28	32,58	1,98	17,98	21,3	21,5	-1,6
186	187	144,8		26,3	1,6	29,4	31,95	1,94	28,31	21,5	21,3	-3,7
187	188	144,8		25,38	1,54	4,23	30,76	1,87	3,49	21,2	21,4	-17,5
188	189	144,8		25,38	1,54	23,31	30,76	1,87	21,79	21,2	21,4	-6,5
189	190	144,8		25,25	1,53	22,78	30,59	1,86	21,03	21,1	21,6	-7,7
190	191	144,8		24,85	1,51	20,1	30,08	1,83	18,06	21,0	21,2	-10,1
191	192	29		0,79	1,2	36,8	1,22	1,84	29,89	54,4	53,3	-18,8
191	193	144,8		24,47	1,49	27,48	29,27	1,78	25,21	19,6	19,5	-8,3
193	194	144,8		23,99	1,46	31,12	28,53	1,73	28,72	18,9	18,5	-7,7
194	195	144,8		23,43	1,42	16,19	27,73	1,68	15,8	18,4	18,3	-2,4
195	196	45,2		2,68	1,67	25,4	1,62	1,01	29,61	-39,6	-39,5	16,6
195	197	144,8		21,84	1,33	24,04	27,19	1,65	23,33	24,5	24,1	-3,0
197	198	103,2		20,77	2,48	15,32	23,96	2,86	13,78	15,4	15,3	-10,1
198	199	103,2		20,77	2,48	24,81	23,96	2,86	21,33	15,4	15,3	-14,0
199	200	45,2		2,12	1,32	24,53	2,45	1,53	20,97	15,6	15,9	-14,5
200	201	36,2		1,16	1,12	21,99	1,26	1,23	18	8,6	9,8	-18,1
199	202	103,2		19,71	2,36	23,86	22,57	2,7	19,27	14,5	14,4	-19,2
202	203	84,4		13,16	2,35	28,24	15,39	2,75	19,84	16,9	17,0	-29,7
203	204	84,4		13,16	2,35	30,2	15,39	2,75	24,59	16,9	17,0	-18,6
204	205	81,4		10,87	2,09	37,58	12,45	2,39	30,22	14,5	14,4	-19,6
205	206	81,4		10,87	2,09	32,42	12,45	2,39	24,46	14,5	14,4	-24,6
206	207	81,4		10,3	1,98	31,06	11,71	2,25	22,75	13,7	13,6	-26,8
207	208	81,4		7,41	1,42	29,63	8,17	1,57	21,23	10,3	10,6	-28,3
208	209	81,4		6,52	1,25	26,72	7,14	1,37	18,16	9,5	9,6	-32,0
209	210	81,4		5,34	1,03	15,52	5,87	1,13	6,17	9,9	9,7	-60,2
210	211	81,4		5,34	1,03	16,42	5,87	1,13	7,06	9,9	9,7	-57,0
211	212	57		4,04	1,58	28,27	4,98	1,95	23,62	23,3	23,4	-16,4
212	213	45,2		2,72	1,7	24,55	3,36	2,09	18,65	23,5	22,9	-24,0
213	214	45,2		2,2	1,37	24,53	2,72	1,69	18,17	23,6	23,4	-25,9
214	215	37		1,85	1,72	32,46	2,24	2,08	21,57	21,1	20,9	-33,5

Anexo C: Catálogos.

Catálogo de tuberías PVC.

TIPO	UNIÓN	DIÁMETRO NOMINAL (mm)	DIÁMETRO INTERNO (mm)	ESPESOR (mm)	LONGITUD (m)	PRESIÓN DE TRABAJO (Mpa)	PRECIO UNITARIO (\$)
Tubería a presión PVC	E/C	20	17	1.5	6	2.00	3.8
Tubería a presión PVC	E/C	25	22	1.5	6	1.6	4.3
Tubería a presión PVC	E/C	32	29	1.5	6	1.25	6.7
Tubería a presión PVC	E/C	40	36.2	1.9	6	1.25	8.1
Tubería a presión PVC	E/C	40	37	1.5	6	1.00	8.1
Tubería a presión PVC	E/C	50	45.2	2.4	6	1.25	14.2
Tubería a presión PVC	E/C	50	46.2	1.9	6	1.00	11.9
Tubería a presión PVC	E/C	63	57	3.00	6	1.25	20.8
Tubería a presión PVC	E/C	63	59	2.00	6	0.8	14.00
Tubería a presión PVC	E/C	90	81.4	4.3	6	1.25	37.8
Tubería a presión PVC	E/C	90	84.4	2.8	6	0.8	29.00
Tubería a presión PVC	E/C	90	85.6	2.2	6	0.63	23.00
Tubería a presión PVC	E/C	110	99.6	5.2	6	1.25	57.00
Tubería a presión PVC	E/C	110	103.2	3.4	6	0.8	39.2
Tubería a presión PVC	E/C	110	104.6	2.7	6	0.63	31.00
Tubería a presión PVC	E/C	160	144.8	7.6	6	1.25	135.00
Tubería a presión PVC	E/C	160	150	5.0	6	0.8	83.5
Tubería a presión PVC	E/C	160	152.2	3.9	6	0.63	68.5
Tubería a presión PVC	E/C	200	181	9.5	6	1.25	205.00
Tubería a presión PVC	E/C	200	187.6	6.2	6	0.8	121.00
Tubería a presión PVC	E/C	200	190.2	4.9	6	0.63	102.00
Tubería a presión PVC	E/C	225	211	7.0	6	0.8	179.8
Tubería a presión PVC	E/C	225	214	5.5	6	0.63	145.5
Tubería a presión PVC	E/C	355	341	7.0	6	0.5	200.00
Tubería a presión PVC	E/C	400	384.2	7.9	6	0.5	215.00
Tubería a presión PVC	E/C	500	474	13.0	6	0.63	300.00
Tubería a presión PVC	Unión Z	63	59	2.0	6	0.8	15.8
Tubería a presión PVC	Unión Z	90	84.4	2.8	6	0.8	29.1
Tubería a presión PVC	Unión Z	90	85.6	2.2	6	0.63	24.00
Tubería a presión PVC	Unión Z	90	86.4	1.8	6	0.5	18.26
Tubería a presión PVC	Unión Z	110	103.2	3.4	6	0.8	41.7
Tubería a presión PVC	Unión Z	110	104.6	2.7	6	0.63	34.2
Tubería a presión PVC	Unión Z	110	105.6	2.2	6	0.5	27.07
Tubería a presión PVC	Unión Z	160	150	5.0	6	0.8	91.4
Tubería a presión PVC	Unión Z	160	152.2	3.9	6	0.63	70.5
Tubería a presión PVC	Unión Z	160	153.6	3.2	6	0.5	55.96
Tubería a presión PVC	Unión Z	200	187.6	6.2	6	0.8	133.00
Tubería a presión PVC	Unión Z	200	190.2	4.9	6	0.63	109.4
Tubería a presión PVC	Unión Z	200	192.2	3.9	6	0.5	75.33
Tubería a presión PVC	Unión Z	250	234.4	7.8	6	0.8	227.86
Tubería a presión PVC	Unión Z	250	237.8	6.1	6	0.63	176.63
Tubería a presión PVC	Unión Z	250	240.2	4.9	6	0.5	127.44
Tubería a presión PVC	Unión Z	315	295.4	9.8	6	0.8	372.55
Tubería a presión PVC	Unión Z	315	299.6	7.7	6	0.63	286.86
Tubería a presión PVC	Unión Z	315	302.6	6.2	6	0.5	207.81

En la **Tabla 9**, se ilustra la caracterización del aspersor comercial (Aspersor MegaNet naranja 650 l/h).

Tabla 9. Especificaciones técnicas del aspersor MegaNet 650 L/s.

Modelo	Caudal	Coefficiente descarga	Exponente descarga	Presión en (Bar)					
Colores	L/h	K (L/h)	x	0.5	1	1.5	2	2.5	3
Verde	350	72.3	0.5	162	229	280	323	362	396
Azul	450	92.2	0.5	206	292	357	412	461	505
Café	550	110.5	0.5	247	349	428	494	553	605
Naranja	650	135.6	0.5	303	429	525	606	678	743

Fuente: Catálogo de equipo de riego. El RIEGO. *Ecology Farm*. 2014.

Elaboración: Catálogo de equipo de riego. El RIEGO. *Ecology Farm*. 2014.

La **Figura 10**, representa los coeficientes de la ecuación del emisor ajustados por parte del autor Arias, 2015 del aspersor comercial MegaNet (650 L/h).

Tabla 10. Coeficientes de descarga K del aspersor MegaNet (650 L/h)

ASPERSOR MEGANET (NARANJA 650 L/H)						
Presión fábrica (bar)	0.5	1	1.5	2	2.5	3
Presión fábrica (mca)	5.099	10.197	15.296	20.395	25.494	30.592
Caudal teórico fábrica (l/s)	0.08417	0.11917	0.14583	0.16833	0.18833	0.20639
Coefficiente Ke teórico (l/s*mca)	0.0373	0.0373	0.0373	0.0373	0.0373	0.0373
Coefficiente Ke teórico (l/h*mca)	134.188	134.342	134.236	134.187	134.281	134.333
Exponente de descarga (x)	0.500					
Presión en campo (mca)	27.758	29.832	30.999	31.273	33.347	34.515
Caudal en campo (l/s)	0.1985	0.2034	0.2050	0.2105	0.2120	0.2207
Coefficiente Ke de campo (l/s*mca)	0.0377	0.0372	0.0368	0.0376	0.0367	0.0376
Coefficiente Ke de fábrica (l/s*mca)	0.0373	0.0373	0.0373	0.0373	0.0373	0.0373
Coefficiente Ke de campo (l/h*mca)	135.637	134.037	132.553	135.511	132.186	135.222
Coefficiente Ke de fábrica (l/h*mca)	134.304	134.325	134.337	134.340	134.361	134.373
Porcentaje de variación (%)	0.98	0.21	1.35	0.86	1.65	0.63

Fuente: Arias, 2015.

Elaboración: Arias, 2015.

A continuación, se muestra la ecuación del emisor final ajustada del autor Arias, 2015:

$$Q = 0.0433 \times P^{0.456}$$

Dónde:

- Q - Caudal de descarga del emisor, en l/s.
- P - Presión hidráulica de entrada del agua en el emisor, en mca.