



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Valoración del desempeño de una red colectiva de riego a presión

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTOR: Cabrera Arias, Roberto Alejandro

DIRECTORA: Lapo Pauta, Carmen Mireya, MSc.

LOJA- ECUADOR

2017



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-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>

Septiembre, 2017

APROBACIÓN DE LA DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Master.

Carmen Mireya Lapo Pauta

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: “Valoración del desempeño de una red colectiva de riego a presión” realizado por: Cabrera Arias Roberto Alejandro ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, marzo de 2017

f).....

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo Cabrera Arias Roberto Alejandro declaro ser autor del presente trabajo de titulación: “Valoración del desempeño de una red colectiva de riego a presión”, de la Titulación de Ingeniería Civil, siendo Carmen Mireya Lapo Pauta MSc. 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: Cabrera Arias Roberto Alejandro

Cédula: 1900622455

DEDICATORIA

Dedico este trabajo:

A Joel Alejandro, mi hijo, quien ha sido para mí mi fuente de motivación e inspiración para poder superarme cada día más.

A mi futura esposa Cindy Camila, por la paciencia que me ha tenido en el trayecto de estos años de estudio, ya que en consecuencia ha tolerado el poco tiempo que he dedicado a mi familia.

A mis padres Manuel y Narcisa, por su apoyo incondicional y el aposento que hasta en la actualidad me brindan, a sus deseos y oraciones que han permitido forjar mi camino

A mis hermanas Flor, Mariela, Miriam, Verónica, y Thalia, por su apoyo y contribución, por su ayuda para que se hiciera realidad este logro.

A mis sobrinos Jhair, Jenny, Josue y David, a quienes quiero mucho.

A mis difuntos abuelos quienes deseaban este logro, al igual que yo.

A mis amigos y compañeros que me brindaron su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por haberme permitido culminar mis estudios universitarios.

A mis padres y hermanas, por su apoyo económico.

A mi Directora de Tesis, Ms.C. Carmen Mireya Lapo Pauta, por toda la paciencia, esfuerzo y tiempo que ha dedicado a la realización de la presente investigación.

A los docentes de la titulación de Ingeniería Civil por los conocimientos impartidos durante mi formación profesional

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARATULA.....	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.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPITULO I. GENERALIDADES.....	6
1.1. OBJETIVOS	7
1.1.1. General.....	7
1.1.2. Específicos	7
1.2. JUSTIFICACIÓN	7
CAPITULO II. FUNDAMENTACION TEÓRICA	8
2.1. EL RIEGO DE CULTIVOS.....	9
2.1.1. Métodos de riego.....	9
2.1.2. Sistemas de riego colectivo	11
2.1.3. Modalidad de riego	17
2.2. DISEÑO DE REDES DE RIEGO PRESURIZADA.....	18
2.2.1. Diseño agronómico.....	20
2.2.2. Determinación de los caudales circulantes por la línea de riego a la demanda....	21
2.2.3. Ubicación de los hidrantes.....	23
2.2.4. Trazado de la red	23
2.2.5. Diseño hidráulico	23
2.3. FIABILIDAD DE REDES DE RIEGO A PRESIÓN	26

2.3.1.	Fiabilidad hidráulica	26
2.3.2.	Fiabilidad mecánica	31
CAPITULO III.	CASOS DE ESTUDIO	32
3.1.	RED SINISTRA OFANTO	33
3.1.1.	Ubicación	33
3.1.2.	Área del Proyecto	33
3.1.3.	Clima	33
3.1.4.	Topología de la red	34
3.2.	RED SAN PEDRO	34
3.2.1.	Ubicación	34
3.2.2.	Área del Proyecto	35
3.2.3.	Clima	35
3.2.1.	Topología de la red	35
CAPITULO IV.	METODOLOGIA	37
CAPITULO V.	CALCULO, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
5.1.	RED SINISTRA OFANTO	44
5.1.1.	Emplazamiento geométrico de los nudos	44
5.1.2.	Determinación del caudal máximo circulante	45
5.1.3.	Generación de configuraciones	46
5.1.4.	Evaluación del desempeño hidráulico a nivel de hidrante y sistema.	48
5.2.	RED SAN PEDRO	53
5.2.1.	Emplazamiento geométrico de los nudos	53
5.2.2.	Determinación del caudal máximo circulante	54
5.2.1.	Generación de configuraciones	55
5.2.2.	Evaluación del desempeño hidráulico a nivel de hidrante y sistema	59
CONCLUSIONES		83
RECOMENDACIONES		85
BIBLIOGRAFIA		86
LINKOGRAFIA		88
ANEXOS		89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Métodos de riego	9
Tabla 2. Factores que favorecen la elección del método de riego.....	11
Tabla 3. Clasificación de tuberías en función del sector al que abastece.....	16
Tabla 4. Garantía de suministro	22
Tabla 5. Calidad de operación UPq	22
Tabla 6. Valores de coeficiente K para diferentes elementos.....	26
Tabla 7. Índices de fiabilidad a nivel de hidrante y sistema, de una red de 7 nudos de consumo	30
Tabla 8. Ejemplo de la determinación de estado a nivel de hidrante en una red tipo.	41
Tabla 9. Resumen de la red en estudio	44
Tabla 10. Parámetros de diseño para la determinación de caudal máximo.....	45
Tabla 11. Configuraciones generadas automáticamente-Red Sinistra Ofanto.....	47
Tabla 12. Presión de los nudos en la configuración 1, exportados a Microsoft Excel.....	49
Tabla 13. Determinación del índice de fiabilidad del hidrante 18 en la red Sinistra Ofanto.....	50
Tabla 14. Índice de fiabilidad hidráulica a nivel de hidrante y sistema – red Sinistra Ofanto.	51
Tabla 15. Resumen de la red en estudio.....	53
Tabla 16. Parámetros para la determinación de caudal máximo, empleando el método de Clement	54
Tabla 17. Configuraciones generadas automáticamente-Red San Pedro	55
Tabla 18. Índice de fiabilidad hidráulica a nivel de hidrante con índice 407- red San Pedro, con la generación de 500 configuraciones y presión de consigna 32 mca.....	60
Tabla 19. Índice de fiabilidad hidráulica a nivel de hidrante y del sistema.	74
Tabla 20 rugosidad absoluta en tuberías de diferentes materiales.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sectores de un sistema de riego presurizado	12
Figura 2. Conformación de un sistema de riego.....	12
Figura 3. Componentes de un sistema de riego presurizado	13
Figura 4. a) Hidrociclón. b) Filtro de gravas. c) Filtro de anillas.	14
Figura 5. a) Inyección de fertilizante utilizando la bomba de sistema de goteo. b) Fertilizador tipo Venturi. c) Inyector hidráulico. d) Tanque fertilizante en paralelo	14
Figura 6. a) Reservorio elevado. b) Reservorio con membrana. c) Reservorio de tierra sin membrana.	15
Figura 7. Estación de bombeo “La pradera” GAD Loja.....	15
Figura 8. a) Gotero de laberinto. b) Gotero tipo vortex. c) Tubería con gotero auto-compensante. d) Microaspersor e) Aspersor.....	16
Figura 9. Válvula de control de nivel	17
Figura 10. a) Manómetro. b) Caudalímetro	17
Figura 11. Principales etapas de un proyecto de riego.....	19
Figura 12. Conservación de masa	23
Figura 13. Movimiento uniforme en una tubería	24
Figura 14. Proceso de evaluación de la fiabilidad hidráulica	27
Figura 15. Localización y esquema de la red de riego Sinistra Ofanto	33
Figura 16. Topología de la red de riego Sinistra Ofanto	34
Figura 17. Localización de la red San Pedro de la Bendita.	35
Figura 18. Topología de la red de riego San Pedro.....	36
Figura 19. Diagrama de flujo para la determinación de configuraciones	39
Figura 20. Diagrama de flujo para Determinación del estado del hidrante	39
Figura 21. Configuraciones generadas para una red tipo con un caudal máximo de 7.5 L/s	40
Figura 22. Determinación del estado de cada nudo en 24 configuraciones.....	42
Figura 23. Mapa de elevaciones de la red Sinistra Ofanto.	44
Figura 24. Simulación de la red Sinistra Ofanto en Epanet 2.0, para un determinado escenario.	45
Figura 25. Configuración 194, ingresada manualmente en Epanet 2.0	47
Figura 26. Probabilidad de apertura de cada hidrante.....	48
Figura 27. Presión de los nudos en la configuración 1,-Epanet 2.0.....	49
Figura 28. Fiabilidad hidráulica a nivel de hidrante	52
Figura 29. Mapa de elevaciones de la red San Pedro.....	53

Figura 30. Configuración 60, generada manualmente en Epanet 2.0.....	58
Figura 31. Probabilidad de apertura de cada hidrante.....	59
Figura 32. Fiabilidad hidráulica nivel de hidrante con la generación aleatoria de 500 configuraciones y caudal máximo en la línea en cuestión de 178.56 L/s.....	78
Figura 33. Conformación de las redes localizadas-red San Pedro.....	79
Figura 34. Fiabilidad hidráulica a nivel de hidrante con la generación aleatoria de 500 configuraciones, con un caudal máximo en la línea en cuestión de 178.56 L/s, implantando redes localizadas.....	79
Figura 35. Índice de fiabilidad para distintas rugosidades	80
Figura 36. Índice de fiabilidad para distintas rugosidades	81
Figura 37. Índice de fiabilidad hidráulica del sistema en función del número de hidrantes funcionado simultáneamente.	82

RESUMEN

El futuro déficit del recurso hídrico nos conduce a la suplantación de las predominantes metodologías de riego a gravedad (canales de riego), con métodos presurizados (redes presurizadas) para optimizar el recurso hídrico y garantizar la sustentabilidad de los cultivos y medio ambiente.

Con objeto de valorar el desempeño de una red colectiva presurizada, en el presente trabajo se crea un módulo en Visual Basic que permite utilizar la librería de enlace dinámico (Toolkit) de EPANET 2.0 para automatizar y generalizar la metodología propuesta por Ait Kadi y Lamaddalena (Lamaddalena y Sagardoy, 2000)

El estudio se basa en dos redes de riego presurizadas funcionando con la modalidad a la demanda. Donde se generan diversos escenarios de consumo aleatorio y luego se simulan mediante el motor de cálculo hidráulico de EPANET 2.0 con la finalidad de obtener la carga de presión en cada hidrante.

Los resultados son empleados para establecer el valor de los índices de fiabilidad a nivel de hidrante y del sistema, lo que permite valorar el desempeño de las redes en función del déficit de presiones.

PALABRAS CLAVES: Fiabilidad, redes presurizadas, riego.

ABSTRACT

The future deficit of the hydric resource leads us to supplant the predominant methodologies of irrigation on gravity (irrigation channels), using pressurized methods (pressurized networks) to optimize water resources and ensure the sustainability of crops and the environment.

In order to evaluate the performance of a collective pressurized network, in this paper a Visual Basic module is created that allows us to use the link dynamic library or toolkit from EPANET 2.0 to automate and generalize the methodology proposed by Ait Kadi and Lamaddalena (Lamaddalena and Sagardoy, 2000)

The study is based on two pressurized irrigation networks running on the modality of demand. Where different random consumption scenarios are generated and then simulated by the hydraulic calculation engine of EPANET 2.0 in order to obtain the pressure load in each hydrant.

The results are used to establish the value of the reliability indexes at the hydrant at system level, which allows to evaluate the performance of the networks depending on the pressure deficit.

KEYWORDS: Reliability, pressurized networks, irrigation.

INTRODUCCIÓN

En Ecuador, del total de la superficie con infraestructura de riego, el 78% utiliza riego por gravedad y el 22% presurizado (MAGAP, 2011). Por la alta disponibilidad actual de recursos hídricos existentes en nuestra localidad, ha sido innecesario la competencia entre los sectores productivos, lo que ha conducido al predominio del riego convencional (a gravedad)(FAO, 2016)

No obstante varios factores como los índices de crecimiento poblacional, el calentamiento global y el cambio de matriz productiva, podrían modificar esta situación, por lo que resultaría necesaria la expansión de las áreas productivas, que pueda llegar a la limitación de los recursos hídricos.

Por los antecedentes expuestos será necesario implementar redes de riego presurizadas que permitan cubrir la demanda futura del sector productivo y cambiar la predominante metodología de riego. Sin duda, por el gran costo que requiere la inclusión de este tipo de redes, se prevé usar métodos de optimización para disminuir la inversión económica al reducir las secciones de las tuberías. Como consecuencia el aumento de las pérdidas de energía condicionará la fiabilidad del sistema de riego, la misma que constituye la garantía de suministro de los cultivos a los que abastece durante una producción.

La presente investigación tiene por objeto evaluar el desempeño de un sistema de riego colectivo a presión, al implementar y automatizar una metodología que permita la comprobación y valoración del funcionamiento en los sistemas de riego funcionando a la demanda. Con lo cual se garantizara el desarrollo efectivo de las actividades del sector de producción agrícola de la región.

Según (Reca, Martínez, Roldán, y Callejón, 2002) una interrupción del suministro puede causar graves perjuicios económicos a los agricultores, incidiendo al estrés hídrico que causa la baja producción de los cultivos. Por ello resulta importante diseñar redes de riego que sean capaces de suministrar el recurso hídrico a los consumidores en la cantidad y calidad requerida bajo una carga de presión satisfactoria durante un tiempo determinado, para garantizar así la fiabilidad del sistema (Al-Zahrani y Syed, 2005; Kaufmann, Grouchko, Croun, 1977) citado por (Yannopoulos y Spiliotis, 2013).

Martines (2010) manifiesta que el rendimiento de un sistema de riego está directamente influenciada por varios factores como la disposición topológica de la red, variabilidad de la demanda, crecimiento de la demanda futura, envejecimiento y fallo de las tuberías. .

En contraste a lo antepuesto (Lamaddalena, Khadra, y Tlili, 2012) afirman que existen dos diferentes tipos de fallo; i) insuficiencia de la demanda (Bao y Mays, 1990; Mays, 1996) y ii) fallo mecánico (Goulter, 1995).

Martines (2010) clasifica a los métodos para la determinación de la fiabilidad como topológicos y analíticos basados en la simulación. En el presente trabajo, la determinación de fiabilidad se define al emplear el segundo de estos métodos, que se fundamenta en el modelo desarrollado por Ait Kadi y Lamaddalena (Lamaddalena y Sagardoy, 2000)

La simulación y obtención de parámetros hidráulicos para el posterior análisis se consigue con la herramienta Toolkit que contiene el paquete de simulación hidráulica EPANET 2.0 de acceso libre. La herramienta Toolkit proporciona una serie de funciones para personalizar el uso del motor de solución hidráulica del software (Rossman, 2000) y pueden ser incorporada a programas realizados sobre entorno Windows independientemente del lenguaje de programación que se utilice (C/C++, Delphi, Visual Basic, etc.) (Reca et al., 2002)

Varios autores (Lamaddalena, Khadra, y Fouial, 2015; Martínez, Montalvo, Izquierdo y Pérez, 2011; Martines, 2010) concuerdan que la determinación del caudal en cada una de las secciones de la red es una de las incertidumbres más importantes en el diseño y determinación de la fiabilidad hidráulica. No obstante en la presente investigación este parámetro es definido por el método probabilístico propuesto por Clément (1966), donde considera tanto la probabilidad de apertura que tiene cada hidrante como el régimen de flujo uniforme dentro del sistema de riego.

Al determinar el caudal y conocer la topología de las redes colectivas propuestas, se establece el índice de la fiabilidad del sistema mediante la generación de configuraciones de consumo, formadas por la apertura aleatoria y simultánea de los hidrantes que conforman la red que se realiza empleando la función RANDOM (generación de números aleatorios) de Visual Basic. Se debe recalcar que el caudal que trasiega la tubería principal será siempre el mismo, independientemente de la configuración. Cada nudo se considera fiable cuando la presión obtenida luego de la simulación cumple con la presión de consigna.

Evaluadas todas las configuraciones se define la probabilidad de apertura de cada hidrante, con la finalidad de garantizar una asignación equitativa. Luego se determina el valor de fiabilidad a nivel de hidrante y del sistema que fluctúa entre 0 y 1, donde 1 define que la red o hidrante es 100% fiable.

También se determina el índice de fiabilidad del sistema modificando rugosidad de las tuberías, implementado mallas localizadas en los nudos críticos. Esto último con la finalidad de constatar que el enfoque innovador propuesto por Lamaddalena et al. (2015) es efectivo para mejorar el funcionamiento hidráulico de las redes ramificadas.

El trabajo está estructurado en cuatro capítulos, en primera instancia en el capítulo de generalidades se estipula los objetivos y la justificación de la presente investigación. En el capítulo II denominado como fundamentación teórica, se el estado de arte referente a sistemas de riego presurizado, diseño hidráulico de redes de riego y determinación de la fiabilidad. El capítulo III y IV especifica los casos de estudio y la metodología empleada en la investigación. El último capítulo aborda la simulación, obtención y análisis de resultados mostrando tablas, gráficos que faciliten su interpretación. Finalmente se expone las conclusiones y recomendaciones de la presente investigación.

CAPITULO I. GENERALIDADES

1.1. Objetivos

1.1.1. General

- Evaluar el desempeño de un sistema de riego colectivo a presión

1.1.2. Específicos

- Implementar una metodología para valorar el desempeño de la red de riego.
- Automatizar la metodología usando una extensión del paquete de simulación de EPANET, Toolkit.
- Simular redes de riego con varias casuísticas.

1.2. Justificación

Dentro de la gestión de riego de cultivos, cada vez es más importante garantizar el suministro de agua necesario para su desarrollo. La falta del recurso hídrico impide el normal desarrollo de los cultivos llegando incluso a la baja producción de los mismos.

¿Qué tan confiable es el sistema de riego? Es una interrogante que en la actualidad se encuentra en discrepancia por diversos autores, los mismos que se han planteado diversas metodologías enmarcadas en datos de campo e hipótesis para la determinación del buen desempeño de sistemas de riego.

Para abordar este tema se plantea este proyecto de investigación en donde se pretende implementar una metodología para la comprobación y valoración de la eficiencia en el funcionamiento de sistemas de riego funcionando a la demanda; con lo cual se garantizará el desarrollo efectivo de las actividades del sector de producción agrícola en la región.

CAPITULO II. FUNDAMENTACION TEÓRICA

2.1. El riego de cultivos

Cuando hablamos del riego de cultivos nos referimos a la aportación de agua al suelo, compensando el déficit de precipitaciones («EcuRed», s. f.). Es común referirse al riego en la parcela utilizando dos términos como sinónimos; los métodos de riego y sistemas de riego (Pereira, Juan Valero, Picornell, y Tarjuelo, 2010). Por lo tanto es importante hacer hincapié a la definición de cada uno de ellos para poder ser tratados de forma diferente en el presente tema de investigación.

Méndez, Inostroza, y Carillanca (2004) definen a los métodos de riego como las formas de aplicar el agua al suelo para suplir los requerimientos hídricos del cultivo, por otra parte Pereira et al., (2010) se refiere al sistema de riego como el conjunto de equipamientos y técnicas que proporcionan esa aplicación siguiendo un método dado.

2.1.1. Métodos de riego

Miliarium Aureum (2004) hace una clasificación de los métodos de riego como se muestra en tabla 1, posterior a ésta, una breve descripción de los mismos.

Tabla 1. Métodos de riego

MÉTODOS DE RIEGO		
Métodos superficiales o de gravedad		Métodos presurizados
Superficiales tradicionales	Con pendiente	Riego por aspersión
	Sin pendiente	Riego por microaspersión
	Surcos	Riego por goteo
	Melgas	
Superficiales tecnificados	Conducción por tuberías	
	Dosificadores a los surcos	
	Riego discontinuo o con dos caudales	

Fuente: (Miliarium Aureum, 2004)

a) *Métodos superficiales o de gravedad tradicionales*

El agua se desplaza sobre la superficie del área a regar, cubriéndola total o parcialmente, conducida solamente por la diferencia de cota entre un punto y otro por la acción de la fuerza de la gravedad.

No requieren inversiones en equipos de bombeo, tuberías, válvulas, etc., pero en cambio precisan de un alto grado de sistematización previa de los parcelas a regar, esto es, nivelaciones y sistematización para poder conducir el agua adecuadamente.

Según la topografía y el tipo de sistematización que se haya realizado en la finca se pueden dividir en dos grupos principales: con pendiente o sin pendiente.

Dependiendo de la forma de conducción del agua se pueden dividir en dos tipos: surcos y melgas. Cuando se riega sin pendiente, es decir, cuando la superficie a regar es “llana”, el método consiste en “llenar” el surco o la melga con el volumen deseado de agua y luego cerrar este “recipiente” y pasar a regar otros. El surco o la melga permanecen con agua hasta que el volumen se infiltra. Las pérdidas se producen por percolación excesiva en cabecera.

Cuando se riega con pendiente, el riego consiste en hacer escurrir el agua durante un tiempo suficiente para que se infiltre el volumen que deseamos aplicar. Las pérdidas además de producirse por infiltración diferencial en cada punto se producen por escurrimiento al pie de la parcela.

b) Métodos superficiales o de gravedad tecnificados

Para evitar alguna de las pérdidas que se producen en los métodos gravitacionales tradicionales con el objeto de mejorar el control y la homogeneidad en que el agua es aplicada, entre ellos destacan:

Conducción por tuberías.- Reducen las pérdidas por conducción fuera de los límites de los cuadros de cultivos.

Dosificadores a los surcos.- Son métodos que logran que el caudal que recibe cada surco sea el mismo, esto se logra mediante el uso de “sifones” para tomar de canales a cielo abierto o de orificios uniformes y regulables si los surcos son abastecidos desde mangas o tuberías.

Riego discontinuo o con dos caudales.- Especialmente diseñado para riego con pendiente, buscan mejorar la uniformidad de infiltración a lo largo de los surcos y reducir a un mínimo las pérdidas por escurrimiento al pie. Mediante la interrupción del caudal o el uso de caudales variables ya que con caudal grande logran un mojado más rápido de la totalidad del surco y luego aportan un caudal mínimo que se infiltra casi en su totalidad.

c) Métodos presurizados

Requieren de una determinada presión para operar, la misma que se define por la diferencia de cota entre la fuente de agua y el sector a regar, o mediante un equipo de bombeo.

El agua se conduce a la zona de riego mediante conductos cerrados denominados como tuberías, hasta los respectivos emisores de riego.

Pereira et al. (2010) describe a continuación los métodos presurizados:

Riego por aspersión.- asperja el agua sobre la superficie del suelo, abarcando una gran cobertura de riego. Cabe recalcar que cerca del 10% de las áreas de riego en todo el mundo

son por aspersión, siendo este porcentaje más elevado en países desarrollados, en donde el recurso hídrico es altamente demandado.

Riego por microaspersión.- el agua se pulveriza sobre la superficie del suelo, como en aspersión, pero irriga áreas pequeñas y localizadas, de 1 a 5 m de diámetro.

Riego por goteo o localizado.- el agua se aplica lentamente a la superficie del suelo a través de pequeños orificios emisores, llamados goteros.

Factores influyentes en la elección del método de riego

Los diversos métodos mencionados por los que se pueden optar en un cultivo están ligados a un sin número de factores, los mismos que influyen en los costos de implantación del sistema, eficiencia de riego y producción de los cultivos. Pereira et al., (2010) pone en manifiesto varios de estos factores, a su vez realiza una categorización dentro de los respectivos métodos en la tabla 2.

Tabla 2. Factores que favorecen la elección del método de riego

Factores	Riego de superficie	Aspersión	Riego localizado
Precio del agua	Bajo	Medio	Alto
Suministro del agua	Irregular	Regular	Continuo
Disponibilidad del agua	Abundante	Media	Limitada
Pureza del agua	No limitante	Sin sólidos	Elevada
Capacidad de infiltración del suelo	Baja a media	Media a alta	Cualquiera
Capacidad de almacenamiento del suelo	Alta	Media a baja	No limitante
Topografía	Plana y uniforme	Relieve suave	Irregular
Sensibilidad de déficit hídrico	Baja	Moderada	Alta
Valor de la producción	Bajo	Medio	Alto
Coste de la mano de obra	Bajo	Medio	Alto
Coste de la energía	Alto	Bajo	Moderado
Disponibilidad de capital	Baja	Media a alta	Alta
Exigencia en tecnología	Limitada	Media a alta	Elevada

Fuente: (Pereira et al., 2010)

2.1.2. Sistemas de riego colectivo

El término sistemas de riego es también utilizado para referir el conjunto de equipamientos y técnicas de gestión que aseguran la captación del agua, su almacenamiento, transporte y distribución a los regantes implantados en los diversos sectores (Pereira et al., 2010).

Un sistema consta de diferentes sectores a los que se denominan como: subunidad de riego al área regada con un cabezal de campo (válvula), unidad de riego al área que se riega simultáneamente tomando en consideración a un conjunto de subunidades y finalmente operación de riego a la superficie regante formada por un conjunto de unidades de riego funcionando simultáneamente. (Liotta, Carrión, Ciancaglini y Olguín, 2015).



Figura 1. Sectores de un sistema de riego presurizado
Fuente: (Liotta et al., 2015)
Elaboración: Autor

De manera general, independientemente de su metodología y modalidad, la figura 2 sintetiza la composición global de un sistema de riego. Por otra parte la figura 3 muestra la conformación de cada uno de éstos componentes en forma global.

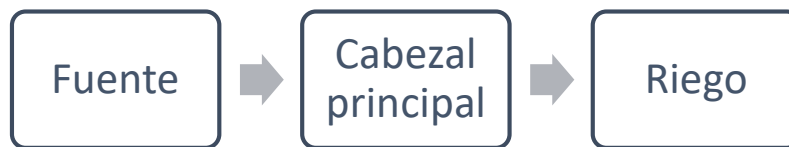


Figura 2. Conformación de un sistema de riego
Fuente: (Pereira et al., 2010)
Elaboración: Autor

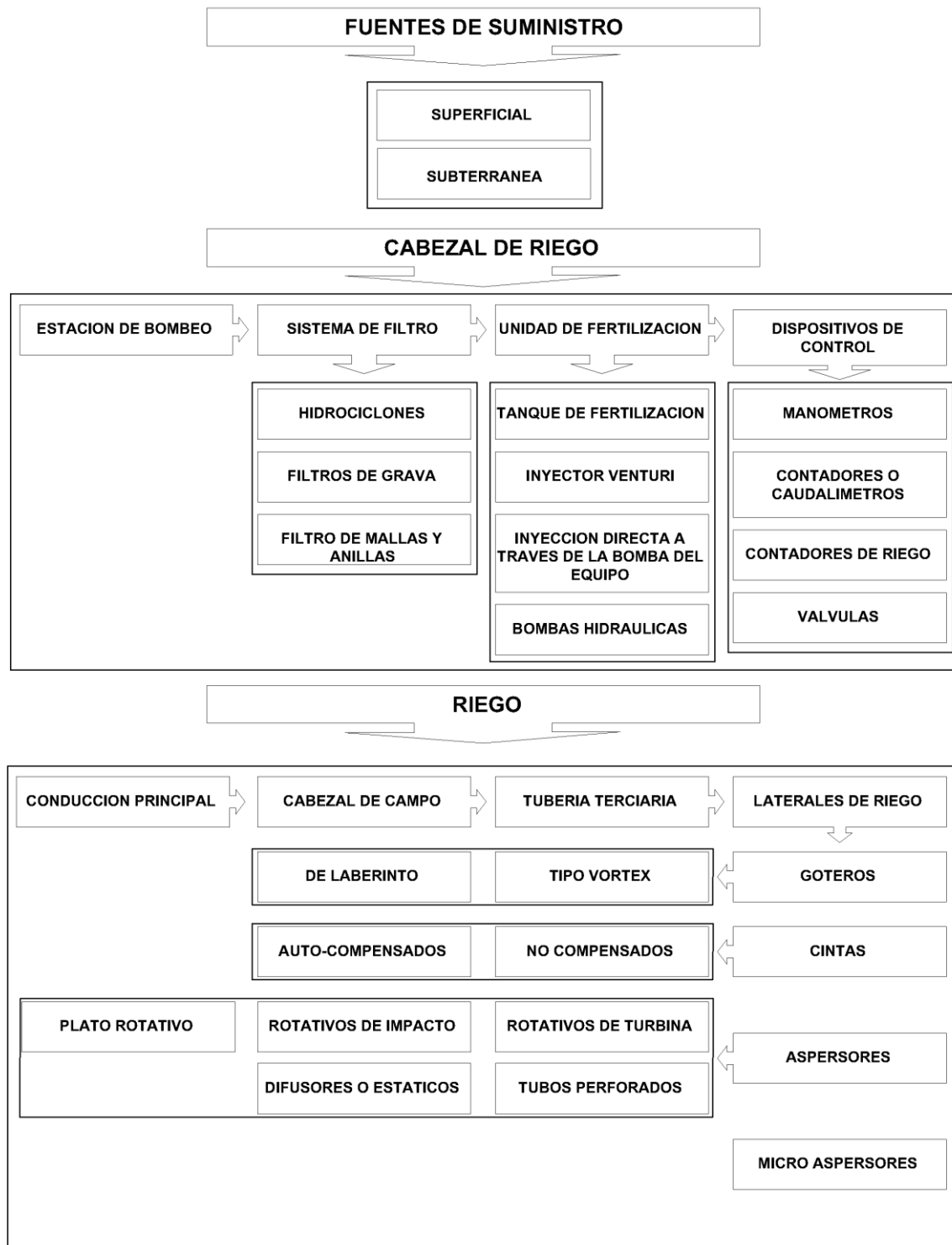


Figura 3. Componentes de un sistema de riego presurizado
Fuente:(Liotta et al., 2015); (Ernesto Helfgott, 2010); (Pereira et al., 2010)
Elaboración: Autor

No obstante a la conformación esquematizada en la figura anterior, se realiza una breve descripción de estos componentes.

Filtros

Liotta et al. (2015) define a los filtros como una parte clave del sistema ya que considera que uno de los problemas más graves que suele presentarse en los equipos de riego es la obstrucción de los emisores en redes presurizadas, que se puede producir por arcilla, limo, arena, materia orgánica o precipitados.

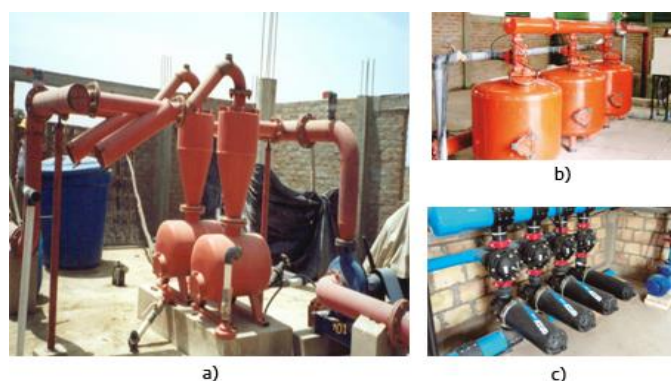


Figura 4. a) Hidrociclón. b) Filtro de gravas. c) Filtro de anillas.
Fuente: (Ernesto Helfgott, 2010); (Liotta et al., 2015)

Unidad de fertilización

Según Liotta et al. (2015) la unidad de fertilización se emplea para inyectar al sistema fertilizantes y ácidos. Esta consiste de dos partes denominadas como i) depósitos de almacenamiento e ii) inyección o también denominado como fertilización.

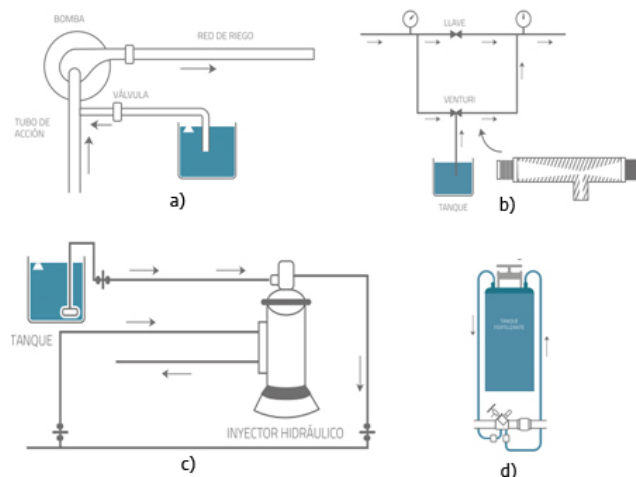


Figura 5. a) Inyección de fertilizante utilizando la bomba de sistema de goteo. b) Fertilizador tipo Venturi. c) Inyector hidráulico. d) Tanque fertilizante en paralelo
Fuente: (Liotta et al., 2015)

Depósitos o tanques de reserva

Según Heimann (s. f.) Estos pueden ser elevados, a nivel del terreno o subterráneos; metálicos, plásticos, de mampostería o de suelo natural. Si bien su principal función es el almacenamiento de agua, para lo cual se requiere una entrada de agua para su suministro y por supuesto una salida de agua afluente a la red de riego.

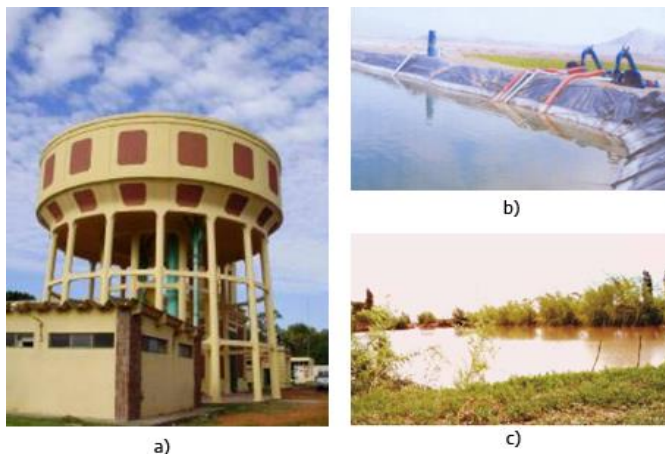


Figura 6. a) Reservorio elevado. b) Reservorio con membrana. c) Reservorio de tierra sin membrana.

Fuente: (Ernesto Helfgott, 2010); (Liotta et al., 2015); (Heimann, s. f.)

Estación de bombeo

Según Liotta et al. (2015) una estación de bombeo está constituido por una o más bombas cuyo tamaño y potencia de cada una de ellas depende de la superficie a regar. La selección de la bomba debe ser tal que la presión requerida sea suficiente para vencer la diferencia de cota geométrica más las pérdidas de carga de todo el sistema.



Figura 7. Estación de bombeo “La pradera” GAD Loja

Fuente: Autor

Tubería

Es el principal elemento de una red de riego presurizada, su función es la de transportar el agua desde su fuente hasta la zona de riego. La elección de su diámetro está en función del caudal que debe trasegar.

Según al sector que abastece se puede clasificar como:

Tabla 3. Clasificación de tuberías en función del sector al que abastece

TUBERÍA	SECTOR
Primaria	Operación de Riego
Secundaria	Unidad
Terciaria	Subunidad

Fuente: (Liotta et al., 2015)

Elaboración: Autor

Emisores

Lapo (2012) define a los emisores como dispositivos que controlan la salida de agua desde las tuberías laterales y los clasifica según el caudal que emiten en emisores de alto (16-200 L/h) y bajo (< 16L/h) caudal.

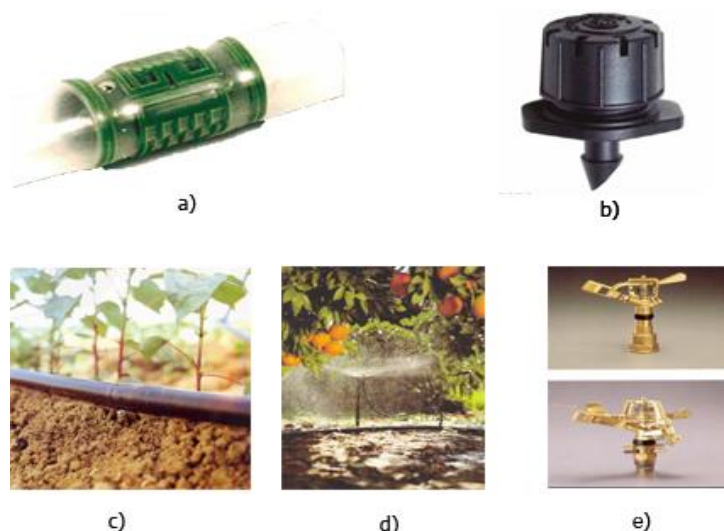


Figura 8. a) Gotero de laberinto. b) Gotero tipo vortex. c) Tubería con gotero auto-compensante. d) Microaspersor e) Aspersor.

Fuente:(Ernesto Helfgott, 2010); (Liotta et al., 2015)

Elaboración: Autor

Válvulas

Protegen y facilitan el buen funcionamiento de la red, son incrustadas a las tuberías por medio de juntas y pueden ser clasificadas según su accionamiento y función (Anónimo, 2016).



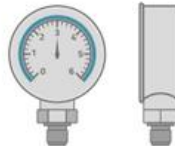
Figura 9. Válvula de control de nivel
Fuente: (Heimann, s. f.)

Control y medición

Liotta et al., (2015) define los siguientes componentes de control y medición:

Manómetro.- permite determinar la presión en los puntos que se desee, tanto en el cabezal principal como en el campo.

Contadores o caudalímetros.- Miden el caudal instantáneo y el volumen escurrido



a)

b)

Figura 10. a) Manómetro. b) Caudalímetro
Fuente: (Liotta et al., 2015); (Ernesto Helfgott, 2010)

2.1.3. Modalidad de riego

La forma de regar los cultivos se puede ejecutar en diferentes alternativas, dependiendo de disponibilidad del recurso hídrico, patrón del cultivo, tipo de suelo, y demás parámetros ambientales y de decisión.

Riego por turno

Monserat, Alduán, Cots, y Barragán (2012) citado por (Aguirre, 2015a) mencionan que el sistema de riego por turnos supone una disminución de los caudales en la red y por consiguiente un ahorro económico, debido a que el riego está organizado de manera que no se produzcan “picos” de demanda. Esta modalidad garantiza un régimen laminar que conlleva a la disminución de pérdidas.

El riego por turnos se diseña para que cualquier regante (parcela, o toma) pueda regar en el turno y tiempo que le corresponda, con garantías plenas (Garantía de suministro = 100% dentro del turno asignado) (Pérez, 2011).

Riego a la demanda

Aguirre (2015) y Khadra, Lamaddalena, y Inoubli (2013) ponen en manifiesto que el sistema de riego a la demanda le permite al agricultor decidir el momento y la dosis de riego sin informar al administrador del sistema. Esto conlleva a que el número de hidrantes funcionando simultáneamente sea imposible de definir con certeza, incurriendo a la determinación del máximo caudal probable.

Varios inconvenientes surgen como consecuencia de la flexibilidad que esta modalidad otorga al usuario, entre éstos tenemos: El incremento de la inversión económica al emplearse mayores diámetros de tuberías, la vulnerabilidad de fallo como consecuencia del régimen turbulento que incrementa las pérdidas de energía y la probabilidad del estado de fallo de sistema.

Pérez (como cito en Aguirre, 2015) manifiesta que el riego a la demanda se diseña para que cualquier regante (subunidad) pueda regar en cualquier instante con una garantía lo suficientemente grande (Garantía de suministro $<100\%$)

Riego mixto

Es una combinación del riego a la demanda y por turnos

2.2. Diseño de redes de riego presurizada

Según (Tola, s. f.) y (Lapo, 2012) una red de riego presurizada está compuesta por dos partes: diseño agronómico y diseño hidráulico. Lamaddalena y Sagardoy (2000) presenta un esquema (figura 11) donde definen las principales etapas de un proyecto de riego, relacionando los parámetros de decisión y ambientales.

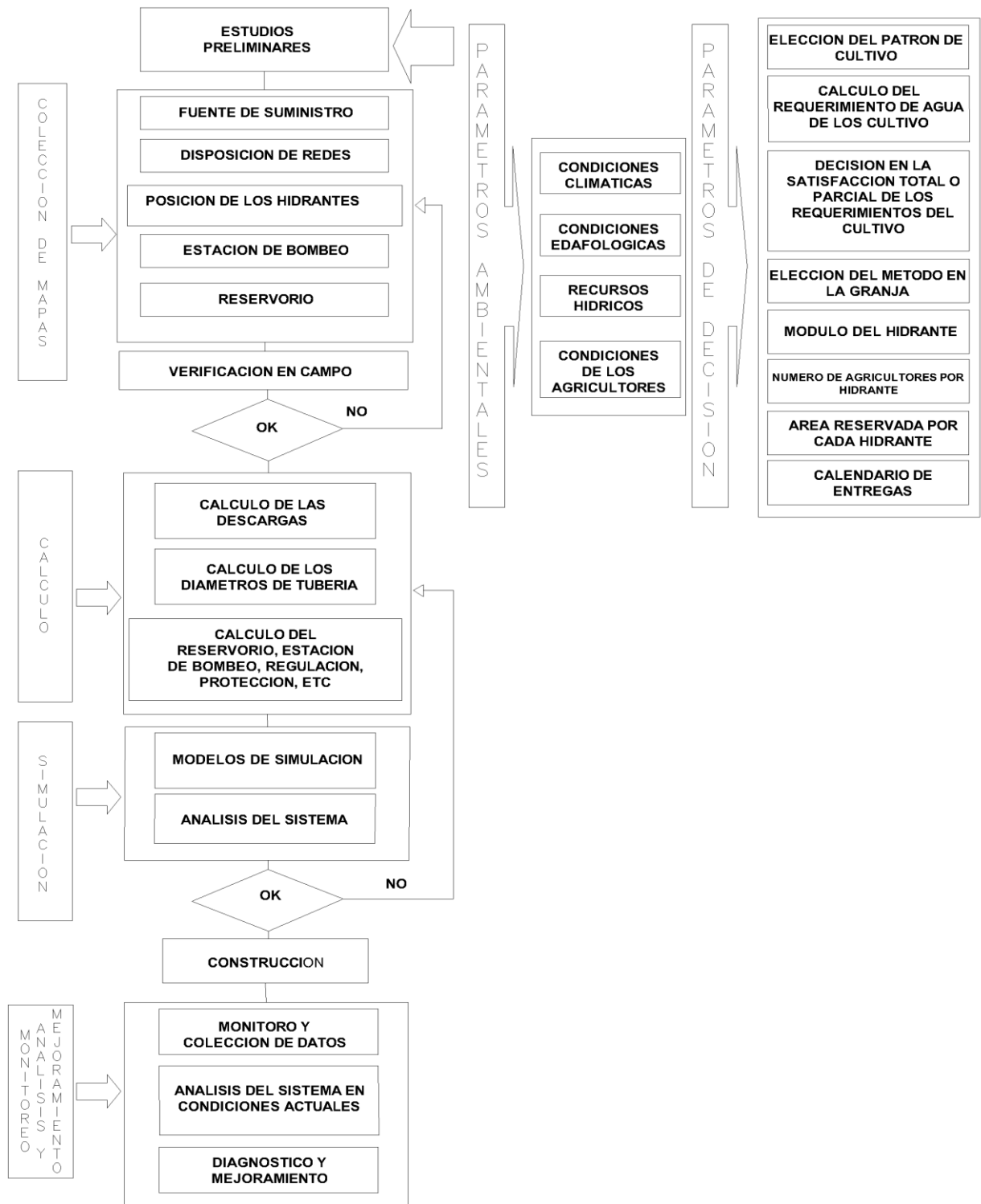


Figura 11. Principales etapas de un proyecto de riego
Fuente: (Lamaddalena & Sagardoy, 2000)

2.2.1. Diseño agronómico

Dentro del diseño agronómico el conocimiento de la evapotranspiración o uso consuntivo es un factor determinante en el diseño de sistemas de riego, ya que determina la cantidad de agua necesaria para el cultivo, así como su frecuencia y tiempo de riego (Mijares, 1989; Tola, s. f.; Méndez et al., 2004)

Mijares (1989) reporta el uso de dos métodos para el cálculo del uso consuntivo (evapotranspiración): Thornthwaite que es utilizado en estudios preliminares y el de Blaney-Criddle aplicable a casos específicos que considera el coeficiente global de cultivo.

Según Lapo (2012) la finalidad de un diseño agronómico es lograr que la instalación de riego sea capaz de suministrar la cantidad suficiente de agua, con un control efectivo de las sales y una buena eficiencia en la aplicación del agua. Para esto se considera:

Determinación de los parámetros de riego

Luego de conocer las necesidades hídricas de los cultivos se determinará los distintos parámetros de riego como son: dosis e intervalos entre riegos, caudal necesario, duración del riego, número de aspersores y disposición de los mismos.

La dosis de riego es la cantidad de agua que se aplica por cada unidad de superficie. Aquí se distinguen la dosis neta (D_n) y bruta o total (D_t), la primera corresponde a la reserva disponible, y viene dada por la ecuación:

$$D_n = 100 \times P_r \times D_a \times (C_c - P_m) \times f \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde: D_n .- dosis neta, reserva disponible fácilmente ($\frac{m^3}{ha}$); P_r .- profundidad de raíces (m); D_a .- densidad aparente del suelo; C_c .- capacidad de campo, expresado en porcentaje en peso de suelo seco; P_m punto de marchitamiento, expresado en porcentaje en peso de suelo seco; f fracción de agotamiento del agua disponible, expresada en tanto por uno.

La dosis total es igual:

$$D_t = \frac{D_n}{E_a} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde: E_a es la eficiencia de aplicación

Se debe regar cuando las extracciones de las plantas agoten la reserva fácilmente disponible. Por consiguiente, el intervalo (I) en días será:

$$I = \frac{D_n}{N_n \text{ diarias}} = \frac{D_n}{E_t \text{ cultivo} - P_e} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde: E_t es la evapotranspiración y P_e la profundidad radicular efectiva.

2.2.2. Determinación de los caudales circulantes por la línea de riego a la demanda.

Según (Tarjuelo, Moreno, Planells, y Ortega, s. f.) la dificultad de cálculo del caudal circulante por línea ha provocado el desarrollo de numerosas metodologías que utilizan métodos estadísticos (Clément, 1966) y basados en la apertura aleatoria de tomas con la ayuda de ordenadores personales (Reca et al., 2002).

Método de Clement

(Tarjuelo, Moreno, Planells, y Ortega, s. f.-b) menciona las dos hipótesis iniciales en la que se basa la solución probabilística para la determinación del máximo caudal, propuesto por Clément

- i. La apertura de hidrantes se ajusta a una distribución binomial, y si el número de hidrantes aguas debajo de la línea principal es suficientemente grande, sigue una distribución normal.
- ii. Todos los hidrantes de la red tienen la misma probabilidad de apertura a cada hora del día y cada día de la semana en período punta.

El tiempo de operación promedio (t') de cada hidrante durante el periodo de diseño está dado por

$$t' = \frac{q_f \times A_T}{R_T \times d} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde q_f es el caudal ficticio continuo, A_T es el área total irrigada, R_t es el número de hidrantes aguas abajo de la línea en cuestión y d es la dotación promedio de cada hidrante. Según Aguirre (2015) la probabilidad elemental (p) de operación de cada hidrante se define como:

$$p = \frac{t'}{r} \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde: r coeficiente de uso o también denominado por Planells, Ortega, Valiente, Montero, y Tarjuelo (1999) como el rendimiento de la red, lo cual relaciona el tiempo de operación promedio de la red con la duración del periodo pico(T).

$$r = \frac{t'}{T} \quad \text{Ec. (6)}$$

Tarjuelo et al., (s. f.-a) manifiesta que la garantía de suministro (GS) o calidad de funcionamiento (CF) debe ser seleccionada por el diseñador, de acuerdo al nivel de garantía que se desee proporcionar a la red.

Tabla 4. Garantía de suministro

NUMERO DE HIDRANTES	GARANTIA DE SUMINISTRO (%)
1-5	100
6-20	99
21-50	95
>50	90

Fuente: (Tarjuelo et al., s. f.-a)

La ecuación de Clément (1966) generalizada para (N) hidrantes operando simultáneamente es:

$$N = R \times p + U(p_q) \times \sqrt{R \times p \times (1 - p)} \quad \text{Ec. (7)}$$

Dónde: R es el número de hidrantes aguas abajo de la sección considerada, p es la probabilidad elemental de operación de cada hidrante y $U(p_q)$ es el percentil correspondiente a la garantía de suministro, los valores generales están dados en la tabla 5.

Tabla 5. Calidad de operación U_{p_q}

GARANTIA DE SUMINISTRO (%)	$U(P_q)$
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 y Sagardoy, 2000)

2.2.3. Ubicación de los hidrantes

La ubicación de los hidrantes depende de la sectorización de la superficie a regar y el sistema a emplearse. Según Lamaddalena y Sagardoy (2000) la ubicación de las bocas de riego es un compromiso entre los deseos de los agricultores buscando su beneficio propio y el deseo de la autoridad de gestión de agua que se enfoca en mantener el número de bocas de riego a lo estrictamente necesario para mantener un bajo coste de la red de distribución colectiva.

2.2.4. Trazado de la red

Lapo (2012) creó conveniente realizar el trazado, por los lugares donde sea posible el acceso de maquinaria, acopio y almacenamiento de materiales, disponibilidad para reparaciones y mantenimiento; considerando como oportunos caminos y vías públicas, buscando la afección mínima a la parcela.

2.2.5. Diseño hidráulico

Dado el consumo en cada uno de los nudos demandantes, el diseño hidráulico de una red presurizada consiste en determinar el diámetro de cada una de las tuberías que conforman la red. Los diámetros elegidos deben hacer cumplir los rangos de velocidades y presiones de consigna establecidas. Para esto, varios criterios generales como: velocidad de diseño; pendiente hidráulica y economía son considerados para el dimensionamiento de la red.

El diseño de una red depende de su configuración básica ya sea una red abierta o mallada. No obstante, ambos casos de diseño está gobernado por la conservación de masa y de energía.

Conservación de masa

Considerando dos secciones S_1 y S_2 en una tubería por la que circula un líquido a velocidades v_1 y v_2 respectivamente. Salas y Pérez (s. f.) Establecen que al no existir aportes ni consumos dentro del límite de estas secciones, la cantidad de líquido que atraviesa la sección S_1 en la unidad de tiempo (caudal másico) está dada por la Ec. (8) y es igual a la que atraviesa la sección S_2 .

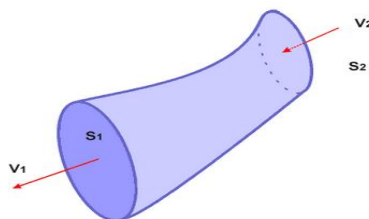


Figura 12. Conservación de masa
Fuente: (Rocha, 2007)

$$m = \rho \times V = \rho \times S \times L = \rho \times S \times v \times t \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde: ρ es la densidad del fluido, V es el volumen comprendido entre las secciones S_1 y S_2 , y t es la unidad de tiempo.

Conservación de energía

La ecuación de energía propuesta por Daniel Bernoulli en su obra Hidrodinámica en (1738) está definida por tres términos que establecen la igualdad a una energía constante.

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = cte = E \quad \text{Ec. (9)}$$

Dónde: z es la altura geométrica; p y γ es la densidad y peso específico del fluido respectivamente; v es la velocidad con la que se traslada el fluido y g es la constante de la gravedad.

Los dos primeros términos de la Ec. (9) corresponden a la altura geométrica y presión, a su vez la suma de estos términos representa la energía potencial y constituye la cota piezométrica. El tercer término es la denominada energía de velocidad o cinética y representa la altura desde la que debe caer libremente un cuerpo, que parte del reposo, para adquirir la velocidad v (Rocha, 2007).

El teorema de Bernoulli establece que para una línea de corriente la suma de la energía cinética y la potencial es constante.

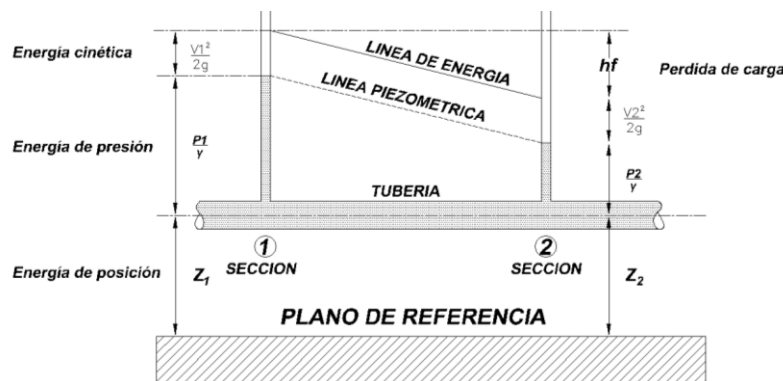


Figura 13. Movimiento uniforme en una tubería
Fuente: (Rocha, 2007)
Elaboración: Autor

En un fluido ideal, es decir sin viscosidad, la energía E en la sección 1 es igual a la energía en la sección 2. Para un fluido real habría una pérdida de energía entre estas dos secciones, en la realidad no es energía pérdida si no transformada en calor debido a la fricción. Así lo afirma (Rocha, 2007).

Conforme a lo precedente las pérdidas de energía surgen debido al movimiento del fluido, es decir, cuando $v \neq 0$.

$$E_1 = E_2 + h_f \quad \text{Ec. (10)}$$

Esta ecuación establece la conservación de energía de un fluido en movimiento en dos secciones diferentes (E_1 y E_2), h_f representa la pérdida de energía entre dichas secciones a las que (Saldarriaga, 1998) las sintetiza como principales (h_{fl}) y localizadas (h_{fm}).

$$h_f = h_{fl} + h_{fm} \quad \text{Ec. (11)}$$

Pérdidas de energía principales

Salas y Pérez (s. f.) se refieren exclusivamente a las pérdidas de carga por rozamiento en tuberías de diámetro constante, flujo permanente y trayectorias rectas o de pequeñas curvaturas. El rozamiento por unidad de sección del tubo, según determinaciones experimentales crece proporcionalmente con la energía cinética por unidad de masa y con la densidad del fluido.

Las pérdidas por longitud son definidas por la expresión propuesta por Julius Weisbach (1845)

$$h_{fl} = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ec. (12)}$$

Como se muestra en la Ec. (12), las pérdidas principales o por longitud son directamente proporcional a la longitud del conducto (L), energía cinética $\left(\frac{v^2}{2g}\right)$ y factor de fricción (f) e inversamente proporcional a su diámetro interior (D).

Pérdidas de energía localizadas

Se las denomina también como pérdidas menores o por accesorio.

Según Salas y Pérez (s. f.) este tipo de pérdidas son producidas por la perturbación de la corriente líquida causada en los puntos singulares de la tubería. Estos pueden ser determinadas únicamente de forma experimental y calculada en función del factor de accesorio (K) o su longitud equivalente (Le), mediante las siguientes expresiones:

$$h_{fm} = K \times \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ec. (13)}$$

$$h_{fm} = f \times \frac{Le}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ec. (14)}$$

Tabla 6. Valores de coeficiente K para diferentes elementos

Elementos o Accesorios	K
Válvula de globo	10
Válvula de ángulo	5
Válvula de retención de clapeta	2.5
Válvula de compuerta	0.2
Codo de radio pequeño	0.9
Codo de radio mediano	0.8
Codo de radio grande	0.6
Codo a 45°	0.4
Codo cerrado inversor de flujo	2.2
Te estándar-dirección de paso	0.6
Te estándar-dirección de desvío	1.8
Entrada recta	0.5
Salida Brusca	1

Fuente: (Lapo, 2012)

2.3. Fiabilidad de redes de riego a presión

Varias definiciones basadas en diversos criterios han sido expuestas por diversos autores. Al-zahrani y Syed (2005) manifiestan que el análisis de la fiabilidad de un sistema de distribución de agua está relacionado con su capacidad para entregar agua a los consumidores individuales en la cantidad y calidad requerida y bajo una presión de carga satisfactoria. En un enfoque a la definición de la fiabilidad de un sistema de riego Kaufmann, Grouchko, y Cruon (1977) la representa como la probabilidad de que el sistema llevará acabo sus tareas específicas bajo condiciones específicas y durante un tiempo determinado. No obstante Martines (2010) manifiesta que tal vez la probabilidad no es la mejor manera de definir la fiabilidad de un sistema de riego, al menos no sola, ya que atribuye a la probabilidad como una metodología para determinar solo la fiabilidad hidráulica, dejando de lado a la que considera fiabilidad mecánica concerniente a la integridad física de la infraestructura del sistema.

2.3.1. Fiabilidad hidráulica

Autores como Lamaddalena y Sagardoy (2000); Reza et al., (2002) ha desarrollado metodologías basadas en la simulación y análisis de los resultados. Estos han definido diversos índices cuantitativos que permiten definir la fiabilidad de una red dentro un estado estacionario, es decir con un caudal constante en la línea principal.

La metodología “AKLA” propuesta por Ait Kadi y Lamaddalena (Lamaddalena y Sagardoy, 2000) está limitada para redes ramificadas. Posteriormente basada en una metodología

similar (Reca et al., 2002) consigue generalizar un análisis tanto para de redes ramificadas como malladas.

Ambos autores han desarrollo aplicativos informáticos que automatizan el proceso, no obstante no son de acceso libre.

Estas metodologías se sintetizan en el siguiente proceso:



Figura 14. Proceso de evaluación de la fiabilidad hidráulica
Fuente: (Lamaddalena y Sagardoy, 2000); (Reca et al., 2002)
Elaboración: Autor

Seguidamente se aborda cada uno de estos métodos, indicando la metodología para la determinación de la demanda máxima, la asignación aleatoria de tomas funcionando simultáneamente, la simulación y análisis de resultados y finalmente los índices con los que se mide la fiabilidad.

2.3.1.1. El método propuesto por Lamaddalena y Sagardouy

Determinación de la demanda máxima

Para la determinación de la demanda máxima se emplea el primer modelo propuesto por (Clément, 1966) basado en un enfoque probabilístico donde dentro de un conjunto de hidrantes pertenecientes a la red valorada, el número de hidrantes que están abiertos al mismo tiempo se considera que siguen una distribución binomial y que suman un caudal constante.

Asignación aleatoria de hidrantes funcionando simultáneamente

Emplea un algoritmo denominado como RGM (Modelo de Generación Aleatoria) desarrollado en el lenguaje de programación de TURBO PASCAL, el mismo que es incluido en el software comercial COPAM de su autoría.

Simulación y análisis de resultados

El modelo se basa en la múltiple generación de un número prefijado de hidrantes funcionando simultáneamente (configuración). Dentro de cada configuración generada (r), un hidrante (j) es considerado satisfactorio cuando la siguiente relación es verificada:

$$H_{j,r} \geq H_{\min} \quad \text{Ec. (15)}$$

Donde $H_{j,r}$ Representa la carga del hidrante (j), dentro de la configuración (r) y $H_{\min}$ la mínima carga requerida para una operación adecuada del sistema.

El déficit de presión relativa de cada hidrante es definida como:

$$\Delta H_{j,r} = \frac{H_{j,r} - H_{\min}}{H_{\min}} \quad \text{Ec. (16)}$$

La pérdida de carga expresada en metros (m), es calculada usando la ecuación de Darcy (1857).

$$y = \frac{0.000857 \times Q^2 \times L}{D^5} = u \times Q^2 \times L \quad \text{Ec. (17)}$$

Donde:

γ .- es el parámetro de rugosidad de Bazin, expresado en $m^{0.5}$, $Q \left(\frac{m^3}{s}\right)$ es la flujo de descarga en el tubo y $u \left(\frac{s^2}{m}\right)$ es el coeficiente de resistencia dimensional.

Una consideración relevante es el asumir que cada hidrante emite la descarga nominal, incluso cuando su carga es más baja que la mínima requerida ($H_{\min}$). Si la descarga es fijada en la tubería principal, el número de hidrantes operando simultáneamente (K_r) es:

$$K_r = \frac{Q_r}{d} \quad \text{Ec. (18)}$$

Donde: Q_r es la descarga aguas arriba y d la dotación común de los hidrantes.

Una vez determinado los hidrantes que funcionan simultáneamente, mediante la generación de números aleatorios se realiza las diversas configuraciones.

Según Lamaddalena y Sagardoy (2000) el número de configuraciones (C) a ser evaluados debe ser más alto que el número de hidrantes en la red, ($C > R$) cuando ($R > 200$) y ($C < 600$) cuando ($R > 600$).

Tanto la simulación y la obtención de resultados para su posterior análisis se la realiza internamente en el software COPAM (Lamaddalena y Sagardoy, 2000). Los resultados de la evaluación se muestran en gráficas y en el indicador resultante del índice de fiabilidad del sistema, descrita por la probabilidad α en el que el sistema está en un estado satisfactorio.

$$\alpha = Prob(X_t \in S) \quad \text{Ec. (19)}$$

Donde: X_t Representa la variable aleatoria en función del tiempo, en donde sus posibles valores son, S (cumple) y F (falla)

En el caso de sistemas de riego presurizado, la fiabilidad de cada hidrante es determinada y calculada desde los resultados obtenidos por el modelo AKLA, basado en la definición de la fiabilidad en la ecuación anterior, se obtiene la siguiente relación.

$$\alpha_j = \frac{\sum_{r=1}^c I h_{j,r} \times I p_{j,r}}{\sum_{r=1}^c I h_{j,r}} \quad \text{Ec. (20)}$$

Donde: α_j es la fiabilidad del hidrante j; $I h_{j,r}=1$ si el hidrante (j) está abierto en la configuración (r); $I h_{j,r}=0$ si el hidrante (j) está cerrado en la configuración r; $I p_{j,r}=1$ si la presión en el hidrante abierto (j) en la configuración r, es mayor que la mínima presión requerida en el hidrante; $I p_{j,r}=0$, si la presión en el hidrante abierto (j) en la configuración r, es menor que la mínima presión requerida en el hidrante.

Esta ecuación es interpretada mediante el siguiente ejemplo, donde se considera 4 configuraciones (C), en un solo nudo (j) denominado como A. El vector “Caudal” nos indica si el hidrante está abierto (1) o cerrado (0) y el vector “Presión” si la carga es mayor que la requerida (1) o no (0).

Finalmente con el producto “Q*P” se define el vector que permite determinar la relación final entre la sumatoria de los elementos del vector “Q*P” y la sumatoria de los elementos del vector “Caudal”, descrita en la ecuación 20

C	Caudal (Q) Nudo A	Presión (P) Nudo A	Q*P
1	1	1	1
2	0	1	0
3	1	0	0
4	0	0	0

$$\sum_{r=1}^c I h_{j,r} = 2 \quad \sum_{r=1}^c I h_{j,r} \times I p_{j,r} = 1$$

$$\alpha_j = \frac{\sum_{r=1}^c I h_{j,r} \times I p_{j,r}}{\sum_{r=1}^c I h_{j,r}} = 0.5$$

Finalmente se obtiene la fiabilidad del sistema al aplicar la siguiente ecuación.

$$\alpha_{sys} = \frac{\sum \alpha_j}{N} \quad \text{Ec. (21)}$$

Donde:

α_{sys} Fiabilidad del sistema

α_j Fiabilidad del hidrante

N Número total de hidrantes

Para interpretar ésta ecuación se plantea el siguiente ejemplo, donde se considera 7 hidrantes (N) con diferente índice de fiabilidad. Como se muestra la Ec. (21) el índice del sistema se define como el promedio de los índices de fiabilidad a nivel de hidrante.

Tabla 7. Índices de fiabilidad a nivel de hidrante y sistema, de una red de 7 nudos de consumo

NUDO	Nudo A	Nudo B	Nudo C	Nudo D	Nudo E	Nudo F	Nudo G
INDICE DEL HIDRANTE	0.5	0.25	1	0.75	0.25	1	0.75
INDICE DEL SISTEMA	0.64						

Elaborado: Autor, 2017

2.3.1.2. El método propuesto por Juan Reca

Determinación de demanda máxima

Este método suma las demandas predestinadas a las diversas tomas, incrementando iterativamente la proporción de usuarios que un determinado momento se encuentran regando simultáneamente desde un porcentaje pequeño hasta la proporción total, en incrementos fijos de 5%.

Asignación aleatoria se tomas funcionando simultáneamente

Hace uso de un generador de números aleatorios que se encarga de modificar el estado de la toma en abierta y cerrada. Aún que no se contextualiza se prevé que este generador aleatorio es el incluido en el lenguaje de programación de Visual Basic.

Simulación y análisis de resultados

La metodología emplea las herramientas de desarrollo del modelo EPANET, las mismas que están constituidas por una librería externa de enlace dinámico (DLL) conformado por un conjunto de funciones que han sido incorporadas a Visual Basic.

Para el análisis de resultados, se gestiona una base de datos en formato Excel mediante la tecnología de automatización OLE (Object Linking and Embedding), de la que se alista la información necesaria para describir las características de las bocas de riego e indicar los índices correspondientes propuestos por el Autor.

Estos índices son:

Probabilidad de fallo de la red.- definido por el número de veces que se produce el fallo en relación al número de iteraciones realizadas. Donde se considera por fallo de la red, cuando al menos una boca se ha quedado con presión inferior a la requerida.

Promedio de fallos de la red.- es el porcentaje medio de las bocas que han fallado. Este índice da idea de la importancia de los fallos.

Desviación típica por fallos en la red.- es el valor de la desviación típica del porcentaje de tomas que fallan.

Probabilidad de fallo por toma.- es el número de veces que se produce un fallo en una toma concreta en relación al número de iteraciones realizado.

2.3.2. Fiabilidad mecánica

La fiabilidad mecánica está relacionada con la topología de la red, fenómenos hidráulicos y sus configuraciones básicas. Resulta incoherente comparar la fiabilidad mecánica de una red ramificada con la de una mallada, esta última tiene como objetivo tener un sistema redundante de tuberías, aumentando así la fiabilidad de abastecimiento (Saldarriaga, 1998).

Por otra parte la ruptura de una determina tubería en una red ramificada limita del recurso hídrico al sector al que abastece dicha tubería. No obstante para una red ramificada (Lamaddalena et al., 2015) propone mejorar tanto la fiabilidad mecánica como hidráulica al introducir mallas locales que permitan disminuir pérdidas de energía y crear un sistema redundante de menor escala a las de redes malladas.

CAPITULO III. CASOS DE ESTUDIO

3.1.4. Topología de la red

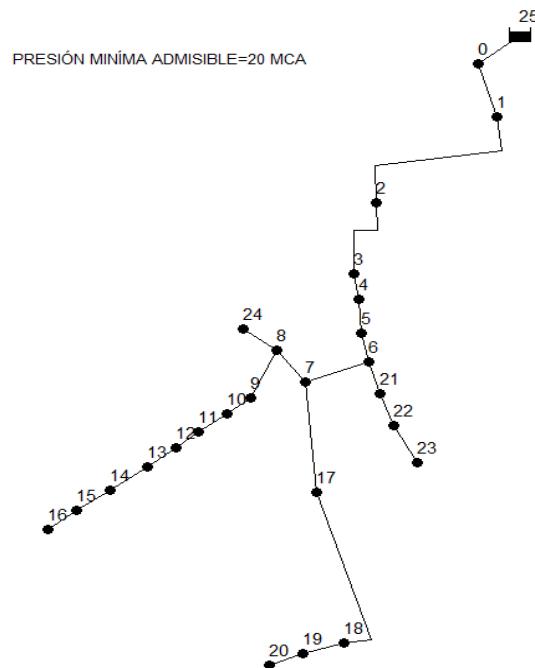


Figura 16. Topología de la red de riego Sinistra Ofanto
Fuente: (Lamaddalena & Sagardoy, 2000)

La red cuenta con 3 ramales interconectada por 24 nudos, de los cuales 19 son de consumo con una presión mínima de trabajo de 20 mca y una descarga nominal 10 L/s.

Esta red cuenta con un reservorio de 28000 m^3 de capacidad, donde el máximo y mínimo nivel de agua son respectivamente 143 y 139 msnm

3.2. Red San Pedro

3.2.1. Ubicación

Esta red está ubicada en América del sur, al sur de Ecuador en la provincia de Loja y Occidente del Cantón Catamayo.

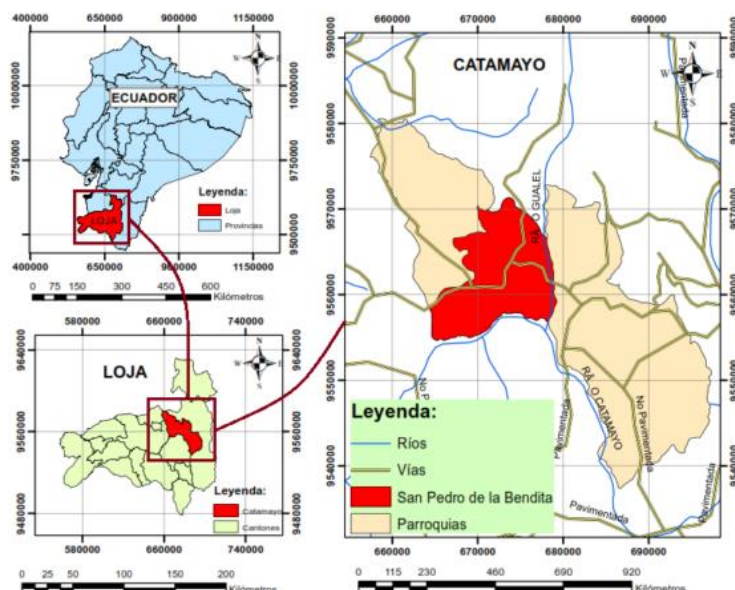


Figura 17. Localización de la red San Pedro de la Bendita.
Fuente: (Briceño, 2016)

3.2.2. Área del Proyecto

La cobertura de riego es de 94 Ha

3.2.3. Clima

El clima de San Pedro de la Bendita es cálido seco con temperaturas que fluctúan entre 24 - 26°C, muy suave por las tardes debido a la brisa, por encontrarse en las faldas del cerro constantemente existe agua de riego aunque las lluvias sean escasas

3.2.1. Topología de la red

Se trata de una red ramificada e interconectada por 546 nudos, de los cuales 143 son de consumo, con una presión mínima de trabajo para una parcela tipo de 32 mca y la descarga nominal 11.16 L/s.

Esta red cuenta con un reservorio de 32000 m³ de capacidad aproximadamente.

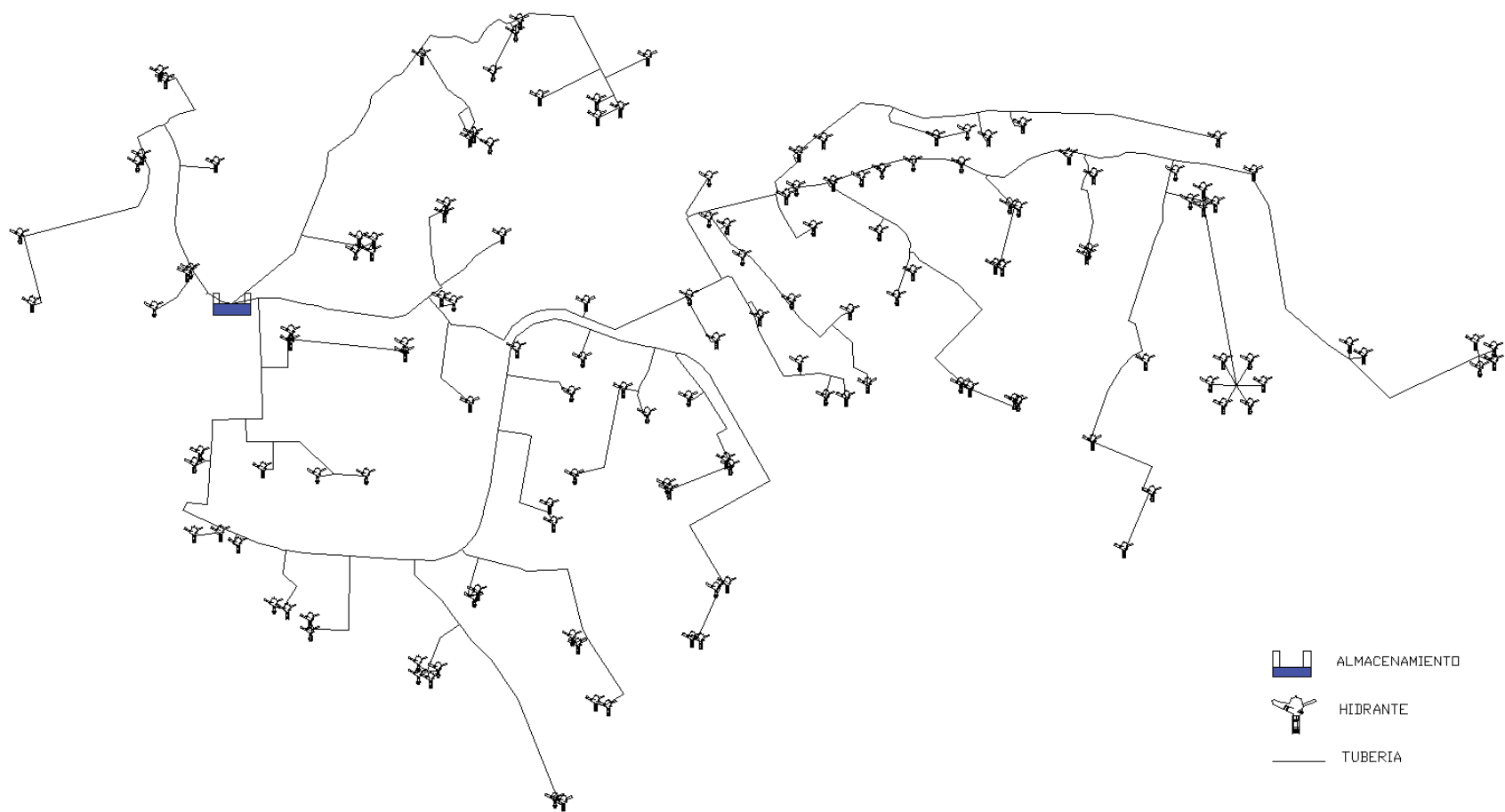


Figura 18. Topología de la red de riego San Pedro
Fuente: (Briceño, 2016)
Elaborado: Autor, 2017

CAPITULO IV. METODOLOGIA

La metodología empleada en la presente investigación se conduce análogamente, a las propuestas por (Reca, Martínez, Roldán, y Callejón, 2002) y (Lamaddalena y Sagardoy, 2000), las mismas que siguen el esquema mostrado en la figura 14, capítulo 2, inciso 2.3.1. La metodología propuesta tiene por objeto determinar la fiabilidad hidráulica de un sistema de riego colectivo presurizado en función del déficit de presiones y varias casuísticas. A continuación se detalla el proceso a ser considerado.

a) Determinación del caudal máximo de demanda.

El caudal máximo circulante por la tubería principal está dado por el método probabilístico propuesto por Clément (1966). Este método garantiza el caudal máximo probable para una determinada superficie de riego y un número de hidrantes conocido, pero se limita siempre a un caudal constante dentro de la tubería principal.

b) Generación de configuraciones.

Para la generación de configuraciones de la red es necesario realizar una determinación previa del número de escenarios a generar, la dotación del hidrante y caudal máximo de demanda (Lamaddalena y Sagardoy, 2000). Las configuraciones se las determina conforme se indica en el diagrama de flujo presentado en la figura 15, el mismo que recorre todos los nudos existentes, identificando los hidrantes y nudos de enlace. A su vez mediante la generación de números aleatorios se determina los hidrantes abiertos en cada configuración (figura 16.)

El código dentro del lenguaje de Visual Basic citado en («Aprender a programar», 2016) para la generación de un número aleatorio es:

$$N = INT((b - a + 1) \times RND + a) \quad \text{Ec. (22)}$$

Dónde: b y a son el límite superior e inferior respectivamente (valores positivos); N el número aleatorio generado; INT es el tipo de variable; RND es un comando de Visual Basic que permite generar un numero aleatorio.

El primer sumando puede adquirir el valor comprendido entre cero y el intervalo diferencia, excluido éste, el segundo sumando determina que el valor debe estar necesariamente comprendido entre el límite inferior y el límite superior.

Ejemplo:

$N=0.25$, en un intervalo cerrado $[0,1]$

Al redondear el valor de N a cero, se determina al hidrante como cerrado.

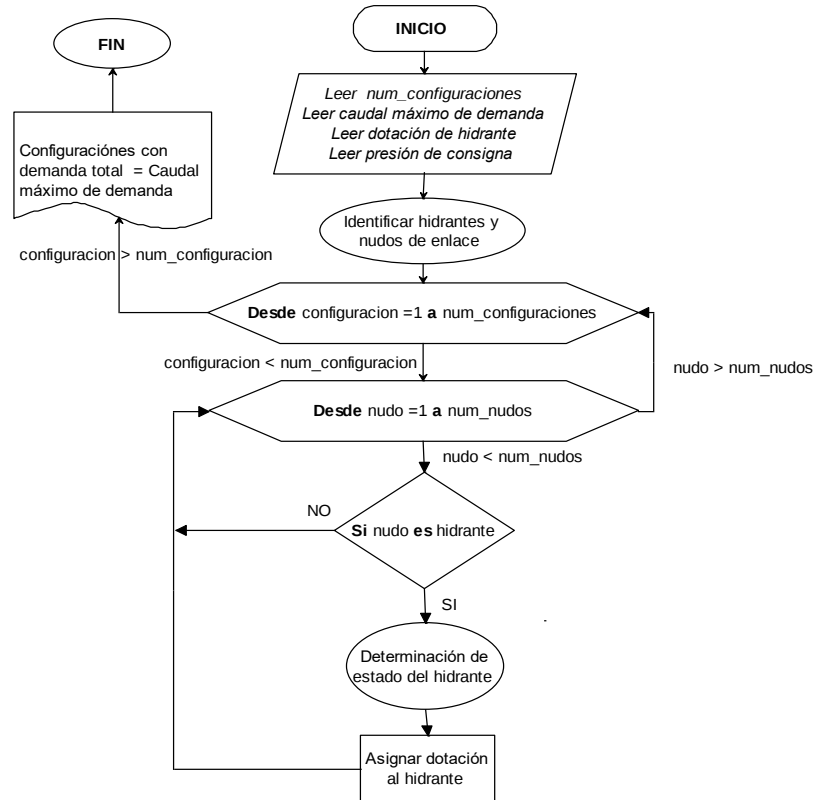


Figura 19. Diagrama de flujo para la determinación de configuraciones
Elaboración: Autor 2017

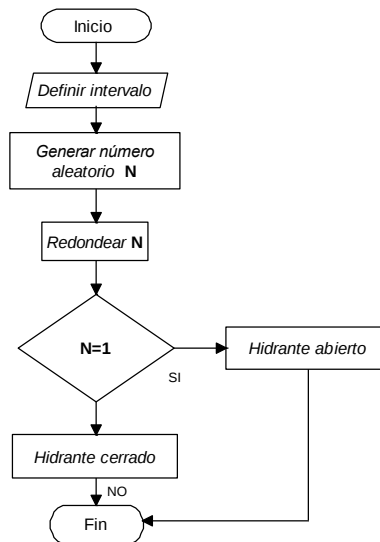


Figura 20. Diagrama de flujo para Determinación del estado del hidrante
Elaboración: Autor, 2017

Para garantizar una distribución heterogénea de los hidrantes funcionando simultáneamente, se establece como 25% a la probabilidad de apertura de cada hidrante durante el recorrido, para ello se ha considerado un intervalo abierto de (0,5).

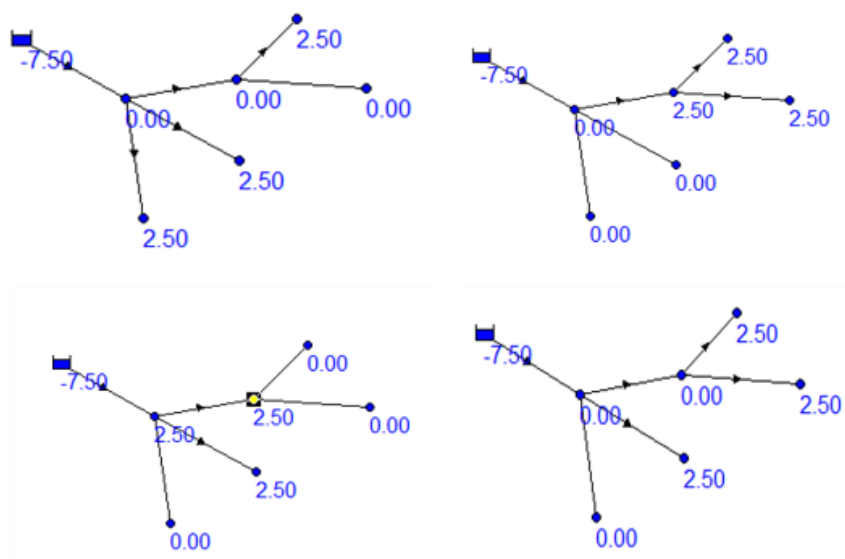


Figura 21. Configuraciones generadas para una red tipo con un caudal máximo de 7.5 L/s
Elaboración: Autor, 2017

c) Simulación hidráulica y obtención de datos de la red.

Sin duda Epanet 2.0 es una herramienta hidráulica muy potente, no obstante, realizar el análisis de una red de 500 hidrantes de forma manual conllevaría un tiempo considerado, por esta razón Rossman (2000) pensó en la necesidad de sintetizar y automatizar el motor de cálculo de Epanet 2.0 para necesidades propias, creando así, la denominada librería de enlace dinámico (Toolkit), la misma que al ser incluida dentro de las librerías de enlace dinámico (dll) del sistema operativo de Windows, permiten el dominio del motor de cálculo de Epanet 2.0 mediante el uso de algún lenguaje de programación.

Al emplear las funciones incluidas en la librería de enlace dinámico "Toolkit" conjuntamente con el lenguaje de programación en "Visual Basic", se determina el código fuente (pseudocódigo) para simular y almacenar el comportamiento hidráulico en cada una de las configuraciones generadas.

Evaluados y almacenados los parámetros hidráulicos de interés (caudal y presión) en todas las configuraciones, se exportan los datos a Microsoft Excel para el posterior análisis.

d) Determinación del índice de fiabilidad a nivel de hidrante y sistema.

Dentro de la determinación del estado de red como satisfactoria o no (falla), una consideración relevante es que cada hidrante (nudo de consumo) emite su descarga nominal, incluso cuando su carga está por debajo de la mínima requerida (Lamaddalena y Sagardoy, 2000)

Un hidrante permanece en estado satisfactorio siempre y cuando su presión sea igual o mayor a la mínima requerida, de no ser el caso, el hidrante permanecerá en estado de falla.

En la tabla 7 se ilustra los resultados de una red tipo de 6 nudos de consumo en 24 configuraciones, con una descarga máxima en la tubería principal de 7.5 L/s, proporcionada por 3 hidrantes funcionando simultáneamente con una dotación de 2.5 L/s. La presión consigna de la red es de 10 mca. En la tabla se resaltan los nudos que no cumplen con este valor, considerándolos dentro del estado de fallo.

Tabla 8. Ejemplo de la determinación de estado a nivel de hidrante en una red tipo.

Configuración	NUDO(mca)					
	Junc B	Junc C	Junc D	JunE	Junc F	Junc G
1	39.93	39.85	49.66	29.79	44.67	44.60
2	39.93	39.85	49.66	29.79	44.67	44.60
3	39.98	39.96	49.90	29.94	44.90	44.88
4	39.52	38.92	47.50	28.45	42.58	42.02
5	38.24	36.05	40.92	24.37	36.15	34.00
6	36.96	33.19	34.35	20.30	29.72	25.95
7	33.91	26.36	18.71	10.64	14.35	6.68
8	32.85	23.99	13.27	7.27	9.01	0.02
9	33.99	26.55	19.15	10.91	14.76	7.17
10	35.34	29.57	26.06	15.18	21.57	15.75
11	36.96	33.19	34.35	20.30	29.72	25.95
12	35.34	29.57	26.06	15.18	21.57	15.75
13	35.34	29.57	26.06	15.18	21.57	15.75
14	34.41	27.48	21.27	12.21	16.89	9.90
15	34.41	27.48	21.27	12.21	16.86	9.84
16	36.96	33.19	34.35	20.30	29.72	25.95
17	37.64	34.71	37.85	22.47	33.15	30.25
18	36.19	31.47	30.42	17.87	25.86	21.12
19	35.35	29.58	26.07	15.18	21.60	15.81
20	35.34	29.57	26.06	15.18	21.57	15.75
21	36.96	33.19	34.35	20.30	29.72	25.95
22	38.24	36.05	40.92	24.37	36.15	34.00
23	39.18	38.15	45.75	27.36	40.87	39.89
24	39.86	39.69	49.29	29.56	44.32	44.16

Elaboración: Autor, 2017

En síntesis se puede decir por simple inspección que el hidrante crítico es “Junc G”, ya que falla 5 ocasiones dentro de las 24 configuraciones.

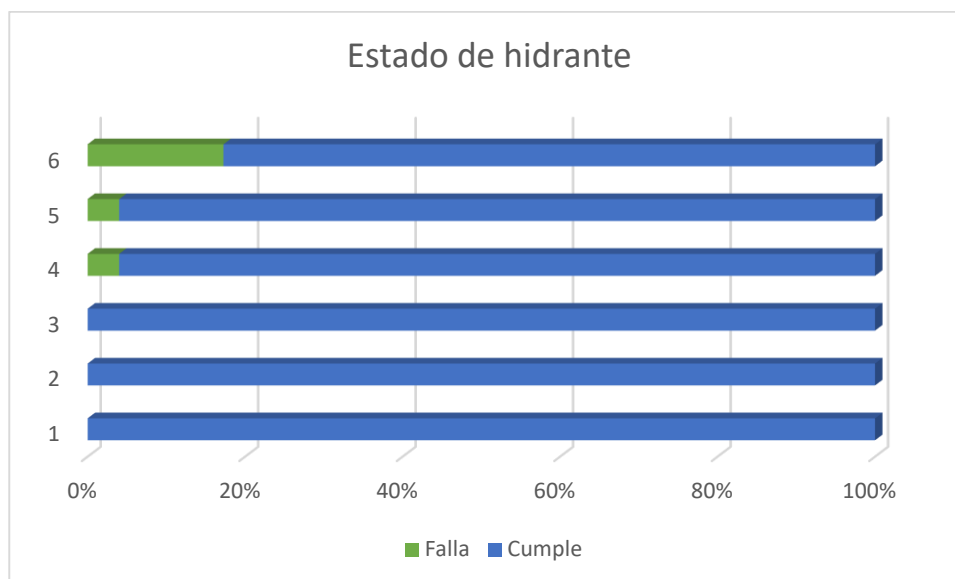


Figura 22. Determinación del estado de cada nudo en 24 configuraciones
Elaboración: Autor, 2017

e) Análisis de resultados.

Resulta interesante analizar la fiabilidad según como lo proponen Ait Kadi y Lamaddalena al encontrar el valor de los índices de fiabilidad del sistema y del hidrante aplicando las ecuaciones (20) y (19) respectivamente. Pero, ¿Cómo varían estos índices en función de la rugosidad? es un valor agregado que se pretende definir en la presente investigación considerando en el diseño diferentes materiales para tuberías y el incremento de la rugosidad causada por la corrosión a través del tiempo. Por otra parte se implementa un enfoque innovador propuesto por Lamaddalena et al. (2015) con el fin de mejorar el funcionamiento del sistema, al agregar redes malladas localizadas a los nudos críticos, garantizando una solución efectiva. Este análisis se realiza exclusivamente en la red San Vicente, de la parroquia San Pedro de la Bendita.

CAPITULO V. CALCULO, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Red Sinistra Ofanto

Tabla 9. Resumen de la red en estudio

Nombre		Sinistra Ofanto
Ubicación		Provincia de Foggia en el sur de Italia
Área de cobertura de riego		50 ha
Descarga nominal en la conducción principal		50 L/s
Configuraciones generadas		200
Nudos		24
	Hidrantes	19
	<i>Descarga nominal</i>	10 L/s
	<i>Presión mínima de trabajo</i>	20 mca

Fuente: (Khadra et al., 2013)

5.1.1. Emplazamiento geométrico de los nudos

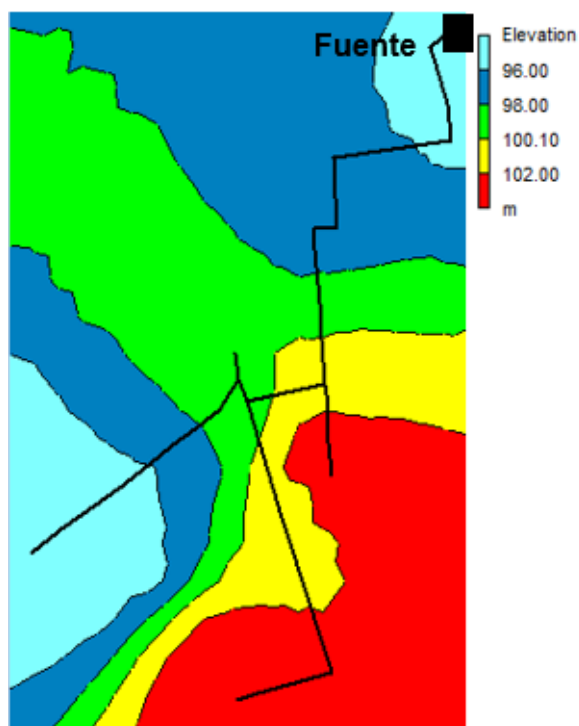


Figura 23. Mapa de elevaciones de la red Sinistra Ofanto.

Fuente: (Khadra et al., 2013)

En muchas redes de riego presurizado el cumplimiento de la presión consigna se encuentra en función de la carga geométrica (msnm), esté no es el caso. Según el mapa de elevaciones mostrado en la figura 23 la cota de la fuente hídrica (depósito) se encuentra por debajo de la los nudos, no obstante la carga potencial (32 mca) proporciona parte de la

energía necesaria para el funcionamiento de la red, aun así ésta no es la suficiente para cumplir la presión de consigna en todos los hidrantes, como se muestra en la figura 24.

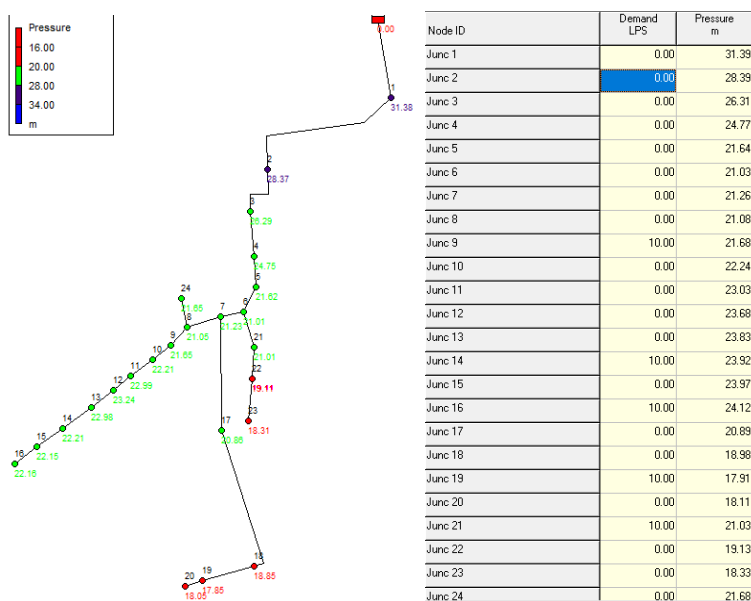


Figura 24. Simulación de la red Sinistra Ofanto en Epanet 2.0, para un determinado escenario.
Elaboración: Autor, 2017

5.1.2. Determinación del caudal máximo circulante

En la tabla 10 se detalla los parámetros necesarios para la determinación del caudal máximo probabilístico propuesto por Clément (1966).

Tabla 10. Parámetros de diseño para la determinación de caudal máximo

DATOS Y PARAMETROS DE DISEÑO			
IDEM	DESCRIPCIÓN	MAGNITUD	UNIDAD
q_s	Descarga continua específica	0.327	L/s/ha
A_p	Área de la parcela a ser irrigada	3	ha
A	Área de riego total	57	ha
d	Descarga nominal del hidrante	10	L/s
u_{pa}	Calidad de operación	1.645	-
r	coeficiente de uso	0.667	-
R	Número total de hidrantes de consumo	19	u
n_{ba}	Número mínimo de hidrantes en operación simultanea	5	u

Fuente: (Lamaddalena & Sagardoy, 2000)

Tiempo de operación promedio de cada hidrante durante el periodo de diseño

$$t' = \frac{0.327 \times 57}{19 \times 10} = 0.098h$$

Probabilidad de encontrar un hidrante abierto

$$p = \frac{0.098}{0.667} = 0.147$$

Probabilidad de encontrar un hidrante cerrado

$$p_{\text{cerrado}} = (1 - 0.147) = 0.853$$

Número de hidrantes operando simultáneamente considerando una garantía de suministro del 95%

$$N = 19 \times 0.147 + 1.645 \times \sqrt{19 \times 0.147 \times (1 - 0.147)} = 5.333 \approx 5$$

Por lo tanto el caudal máximo circulante ($Q_{\text{diseño}}$) aguas abajo de la conducción principal será:

$$Q_{\text{diseño}} = N \times d = 5 \times \frac{10L}{s} = \frac{50L}{s}$$

5.1.3. Generación de configuraciones

Según el criterio (Lamaddalena & Sagardoy, 2000) el número de configuraciones a ser evaluados deber ser mayor al de hidrantes que tiene la red, por esto se considera evaluar 200 configuraciones, con una dotación por hidrante de 10L/s y una máxima demanda 50 L/s. En la tabla 11 se muestra 4 de las configuraciones generadas, elegidas al azar.

Todas las configuraciones son anexadas en la hoja denominada como "A1", la figura 25 concierne a la configuración 194 ingresada manualmente en Epanet 2.0.

Tabla 11. Configuraciones generadas automáticamente-Red Sinistra Ofanto

HIDRANTE	CONFIGURACIÓN			
	67	131	171	194
	CAUDAL (L/s)			
1	0	10	0	0
2	0	10	10	10
3	0	10	0	0
4	0	0	10	10
5	0	10	0	0
9	0	0	0	0
10	10	0	0	0
12	10	0	0	0
13	10	0	10	0
14	0	10	0	10
15	0	0	0	0
16	10	0	0	0
18	10	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	10	10
21	0	0	0	10
22	0	0	0	0
23	0	0	10	0
24	0	0	0	0
CAUDAL TOTAL	50	50	50	50

Elaboración: Autor, 2017

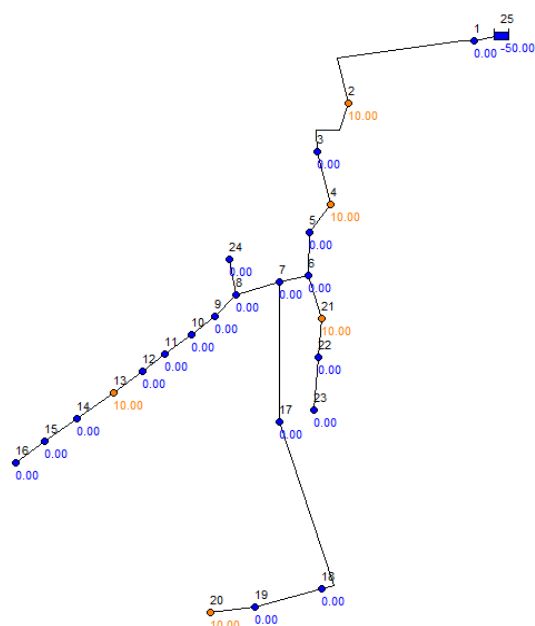


Figura 25. Configuración 194, ingresada manualmente en Epanet 2.0
Elaboración: Autor, 2017

Una vez generadas todas las configuraciones es necesario demostrar que la probabilidad de apertura en cada hidrante tiende a ser la misma, independientemente de la ubicación de los nudos. La figura 26 representa la probabilidad de apertura de cada hidrante, resultando como promedio el 25%. Esto equivale a la apertura de 50 veces del hidrante dentro de las 200 configuraciones generadas.

Los datos de esta figura son anexados en la hoja de cálculo A6.

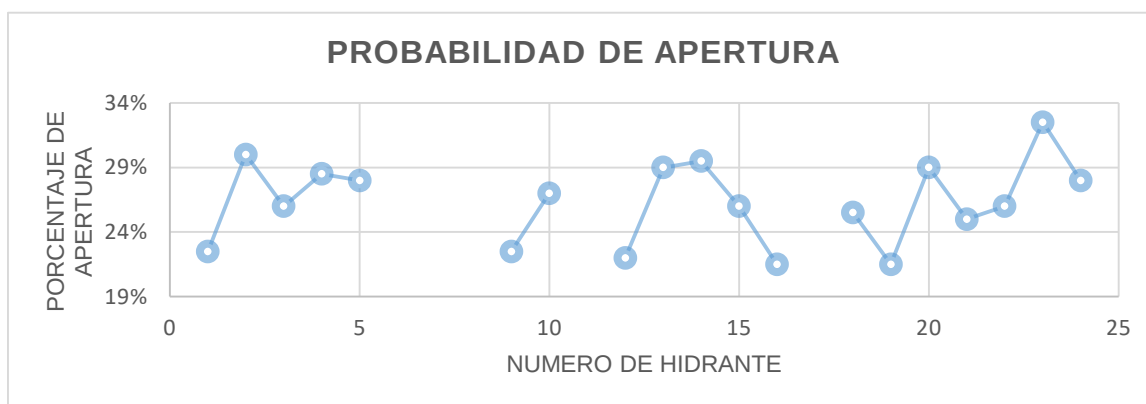


Figura 26. Probabilidad de apertura de cada hidrante
Elaboración: Autor, 2017

5.1.4. Evaluación del desempeño hidráulico a nivel de hidrante y sistema.

Para evaluar el desempeño hidráulico es necesario simular las 200 configuraciones generadas. Ingresar a cada una de éstas en Epanet 2.0 conllevaría un tiempo considerado. No obstante al emplear la librería de enlace dinámico (Toolkit) conjuntamente con Visual Basic este proceso se automatiza y genera los mismos resultados, esto se puede constatar en la figura 27 y tabla 12 donde se muestra la presión en los nudos de la configuración 1.

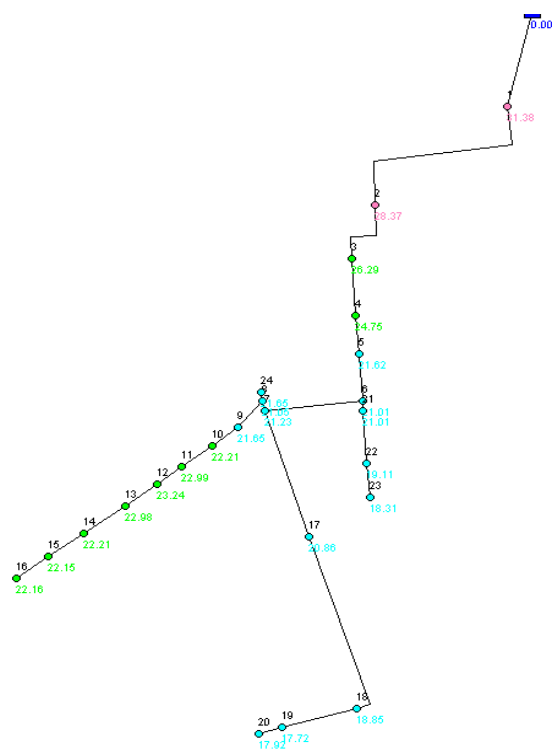


Figura 27. Presión de los nudos en la configuración 1,-Epanet 2.0
Elaboración: Autor, 2017

Tabla 12. Presión de los nudos en la configuración 1, exportados a Microsoft Excel.

HIDRANTE	PRESIÓN (m)
1	31.38
2	28.37
3	26.29
4	24.75
5	21.62
9	21.65
10	22.21
12	23.24
13	22.98
14	22.21
15	22.15
16	22.16
18	18.85
19	17.72
20	17.92
21	21.01
22	19.11
23	18.31
24	21.65

Elaboración: Autor, 2017

Resulta demasiado tedioso y a su vez extenso anexar al presente, el cálculo de la fiabilidad de todo los hidrantes, aun cuando la red está compuesta de tan solo 19. Por ésta razón se presenta exclusivamente el cálculo de la fiabilidad del hidrante 18.

En la tabla 13, se ha realizado un filtro a las configuraciones (R) en las que el hidrante (j=18) se encuentra abierto emitiendo 10 L/s (columna 2), por ende el coeficiente en la columna 4 es 1 dentro de la respectiva configuración, si la presión del nudo es mayor que la de presión de consigna (columna 3) el coeficiente indicado en la (columna 5) también es 1, finalmente la (columna 6) muestra el producto de estos coeficientes. Conforme se indica en el inciso 2.3.1.1, presentándose al final de la tabla el índice de fiabilidad del hidrante.

Tabla 13. Determinación del índice de fiabilidad del hidrante 18 en la red Sinistra Ofanto.

Configuración R	Caudal (L/s)	Presión (mca)	Abierto=1 Cerrado=0 $Ih_{4,r}=10$	Cumple=1 No cumple=0 $Ip_{4,r}>20$	INDICE DE FIABILIDAD DEL HIDRANTE $\sum_{r=1}^c Ih_{j,r}, Ip_{j,r}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
3	10	20.9	1	1	1
5	10	19.6	1	0	0
12	10	18.4	1	0	0
15	10	19.5	1	0	0
23	10	18.0	1	0	0
29	10	19.4	1	0	0
44	10	19.9	1	0	0
48	10	18.7	1	0	0
49	10	20.1	1	1	1
50	10	19.9	1	0	0
52	10	19.2	1	0	0
53	10	17.8	1	0	0
56	10	18.7	1	0	0
57	10	19.8	1	0	0
58	10	20.2	1	1	1
65	10	17.8	1	0	0
67	10	18.4	1	0	0
68	10	20.1	1	1	1
77	10	20.7	1	1	1
81	10	21.0	1	1	1
82	10	19.1	1	0	0
90	10	18.5	1	0	0
91	10	20.4	1	1	1
94	10	21.8	1	1	1
96	10	20.9	1	1	1
97	10	19.5	1	0	0
100	10	18.9	1	0	0
105	10	19.2	1	0	0
114	10	19.8	1	0	0
119	10	17.8	1	0	0
120	10	19.2	1	0	0
125	10	19.8	1	0	0
126	10	18.7	1	0	0
129	10	18.7	1	0	0
134	10	18.9	1	0	0
138	10	19.5	1	0	0
142	10	19.6	1	0	0
148	10	20.4	1	1	1
150	10	16.0	1	0	0
154	10	20.0	1	1	1
155	10	20.7	1	1	1
159	10	19.5	1	0	0
166	10	19.1	1	0	0
167	10	19.8	1	0	0
168	10	18.7	1	0	0

Tabla 13 Continuación...

170	10	20.7	1	1	1
182	10	19.1	1	0	0
187	10	18.4	1	0	0
193	10	21.5	1	1	1
199	10	19.2	1	0	0
200	10	0.0	1	0	0
			$\sum_{r=1}^c I h_{j,r} = 51$	$\sum_{r=1}^c I h_{j,r}, I p_{j,r} = 14$	
INDICE DE FIABILIDAD DEL HIDRANTE			$\alpha_j = \frac{\sum_{r=1}^c I h_{j,r}, I p_{j,r}}{\sum_{r=1}^c I h_{j,r}} = \frac{51}{14} = 0.27$		

Elaboración: Autor, 2017

En la tabla 14 y figura 28 se muestra el valor del índice de fiabilidad de todos los hidrantes pertinentes de la red. Al final de la tabla se determina el índice del sistema como al promedio de la fiabilidad de todos los hidrantes.

Tabla 14. Índice de fiabilidad hidráulica a nivel de hidrante y sistema – red Sinistra Ofanto.

HIDRANTE (j)	INDICE DE FIABILIDAD α_j
1	1.00
2	1.00
3	1.00
4	1.00
5	1.00
9	0.98
10	1.00
12	1.00
13	0.98
14	0.95
15	0.94
16	0.93
18	0.27
19	0.07
20	0.19
21	1.00
22	0.15
23	0.00
24	0.98
$\alpha_{sys} = \frac{\sum \alpha_j}{N}$	0.76

Elaboración: Autor, 2017

El índice de fiabilidad del sistema indica que existe la probabilidad de que alrededor del 76% del caudal de diseño es posible extraer sin ningún problema, esto equivale a 4 hidrantes funcionando simultáneamente emitiendo 40 L/s

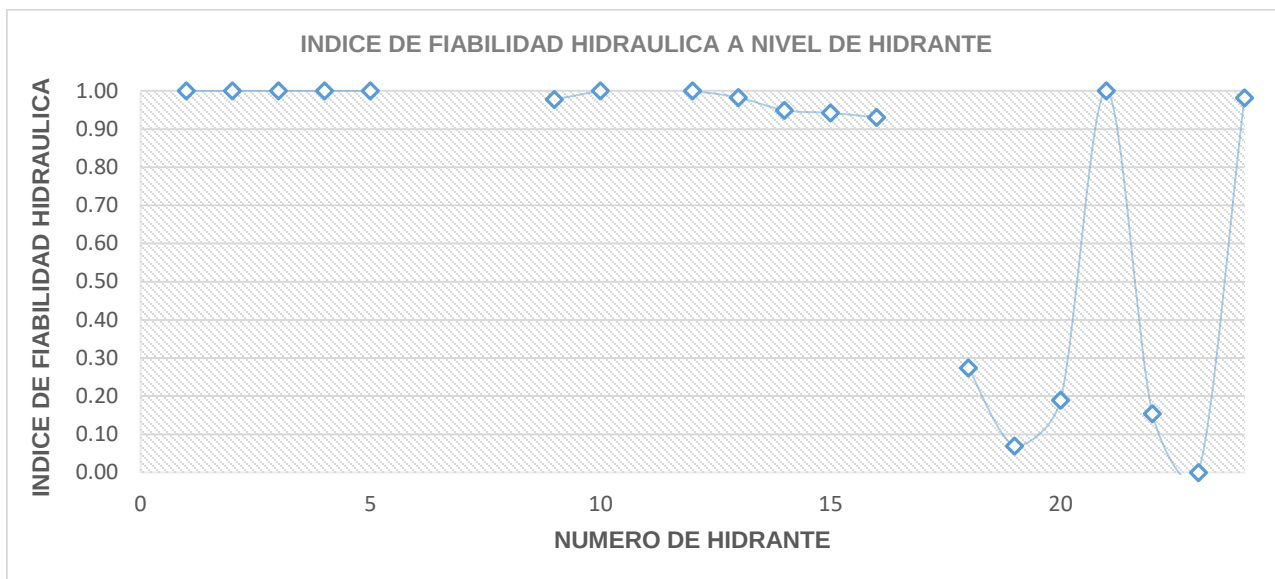


Figura 28. Fiabilidad hidráulica a nivel de hidrante
Elaboración: Autor, 2017

5.2. Red San Pedro

Tabla 15. Resumen de la red en estudio

Nombre		San Pedro
Ubicación		Provincia de Loja, cantón de Catamayo y parroquia San Pedro de la Bendita
Área de cobertura de riego		94 Ha
Descarga nominal en la conducción principal		178.56 L/s
Configuraciones generadas		500
Nudos		546
	Hidrantes	143
	Descarga nominal	11.16 L/s
	Presión mínima de trabajo	32 mca

Fuente: (Briceño, 2016)

5.2.1. Emplazamiento geométrico de los nudos

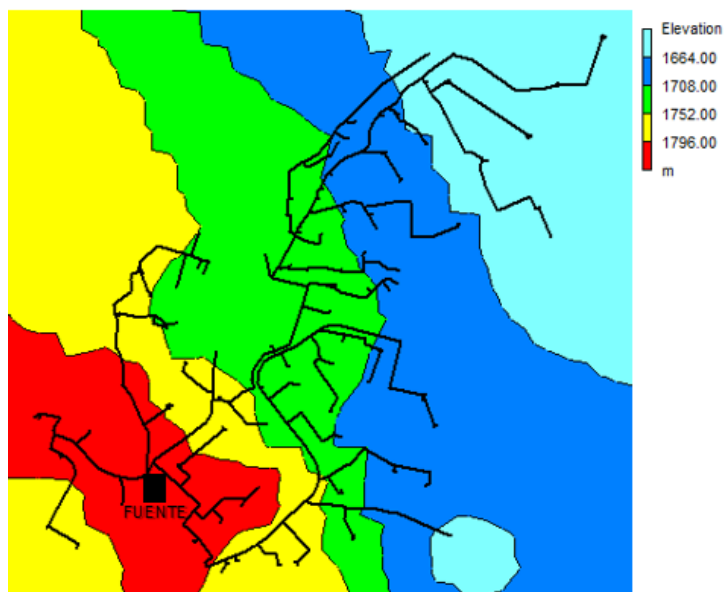


Figura 29. Mapa de elevaciones de la red San Pedro
Fuente: Epanet 2.0

La red está emplazada en terreno empinado cuyas cotas fluctúan entre 1664 y 1796 msnm. En esta red la carga geométrica toma un papel muy importante en el cumplimiento de la presión consigna.

Como se puede observar los nudos más alejados del reservorio, que por lo general son los denominados críticos tienen a su favor una gran carga geométrica para el correcto funcionamiento de la red.

5.2.2. Determinación del caudal máximo circulante

En la tabla 16 se detalla los parámetros necesarios para la determinación del caudal máximo probabilístico. Posterior a ésta se realiza el respectivo cálculo paso a paso.

Tabla 16. Parámetros para la determinación de caudal máximo, empleando el método de Clement

DATOS Y PARAMETROS DE DISEÑO			
q_s	Descarga continua especifica	0.84	L/s/ha
A_p	Área de la parcela a ser irrigada	1	ha
A	Área de riego total	94	ha
d	Descarga nominal del hidrante	11.16	L/s
u_{pa}	Calidad de operación	1.645	95%
r	coeficiente de uso	0.667	-
R	Número total de hidrantes de consumo	143	u
n_{ba}	Número mínimo de hidrantes en operación simultanea		u

Fuente: (Briceño, 2016)

Tiempo de operación promedio de cada hidrante durante el periodo de diseño

$$t' = \frac{0.84 \times 94}{143 \times 11.16} = 0.049h$$

Probabilidad de encontrar un hidrante abierto

$$p = \frac{0.049}{0.667} = 0.074$$

Probabilidad de encontrar un hidrante cerrado

$$p_{cerrado} = (1 - 0.074) = 0.926$$

Numero de hidrantes operando simultáneamente considerando una garantía de suministro del 95%.

$$N = 143 \times 0.074 + 1.645 \times \sqrt{143 \times 0.074 \times (1 - 0.074)} = 15.73 \approx 16$$

Por lo tanto el caudal máximo circulante aguas abajo de la conducción principal es:

$$Q_{diseño} = N \times d = 16 \times \frac{11.16L}{s} = \frac{178.56 L}{s}$$

5.2.1. Generación de configuraciones

El número de configuraciones a ser evaluados deber ser mayor al de hidrantes que tiene la red Lamaddalena y Sagardoy (2000), por esto se considera evaluar 500 configuraciones, con una dotación por hidrante de 11.16 L/s y una máxima demanda 178.56 L/s. En la tabla 17 se muestra 4 de las configuraciones generadas, elegidas al azar.

Todas las configuraciones son anexadas en la hoja denominada como “B1”. La figura 30 concierne a la configuración 60 ingresada manualmente en Epanet 2.0.

En Epanet 2.0 los nudos son identificados mediante su “ID”, compuesto por caracteres y números. No obstante, al emplear la librería de enlace dinámico (Toolkit) es necesario conocer el “índice” asignado a cada nudo. El índice representa e identifica el orden que internamente se le ha dado a cada nudo, independientemente de su “ID”.

Tabla 17. Configuraciones generadas automáticamente-Red San Pedro

Tabla 17 Configuraciones generadas automáticamente Red San Carlos					
CONFIGURACIÓN					
ID	INDICE	60	199	345	470
CAUDAL (L/s)					
162	99	11.16	0.00	0.00	0.00
194	110	0.00	0.00	0.00	11.16
201	116	0.00	11.16	0.00	0.00
223	132	0.00	0.00	0.00	0.00
61	162	0.00	0.00	11.16	0.00
254	176	0.00	0.00	0.00	0.00
280	196	0.00	0.00	0.00	0.00
335	226	11.16	0.00	0.00	0.00
385	237	0.00	0.00	0.00	0.00
413	264	0.00	0.00	0.00	0.00
434	267	0.00	0.00	11.16	0.00
473	268	0.00	0.00	0.00	0.00
130	270	0.00	0.00	0.00	0.00
104	300	0.00	0.00	0.00	11.16
107	304	0.00	0.00	11.16	0.00
110	305	0.00	0.00	0.00	0.00
101	307	0.00	0.00	0.00	0.00
68	314	0.00	0.00	0.00	0.00
214	321	0.00	0.00	0.00	0.00
183	329	0.00	0.00	11.16	0.00
206	335	0.00	0.00	0.00	0.00
197	337	0.00	0.00	0.00	0.00
188	338	0.00	0.00	0.00	11.16
294	342	0.00	11.16	0.00	0.00
297	344	0.00	0.00	0.00	0.00
229	346	0.00	0.00	0.00	0.00
233	348	0.00	0.00	0.00	0.00
302	350	11.16	11.16	0.00	0.00

Tabla 17 Continuación...

CONFIGURACIÓN					
ID	INDICE	60	199	345	470
CAUDAL (L/s)					
381	351	0.00	0.00	0.00	0.00
371	353	0.00	0.00	11.16	0.00
509	354	0.00	0.00	0.00	0.00
306	356	0.00	0.00	0.00	0.00
309	357	11.16	0.00	0.00	0.00
326	361	0.00	11.16	0.00	0.00
349	362	11.16	0.00	0.00	0.00
16	371	11.16	0.00	0.00	0.00
26	384	0.00	0.00	0.00	0.00
27	385	0.00	0.00	0.00	0.00
33	388	0.00	0.00	0.00	0.00
34	389	0.00	0.00	0.00	0.00
9	397	0.00	0.00	0.00	0.00
217	407	0.00	0.00	0.00	0.00
171	408	0.00	0.00	11.16	0.00
136	409	0.00	0.00	0.00	0.00
159	410	0.00	0.00	0.00	0.00
257	411	0.00	0.00	0.00	0.00
261	412	0.00	0.00	0.00	0.00
277	414	0.00	0.00	0.00	0.00
269	415	0.00	0.00	0.00	0.00
291	418	0.00	0.00	0.00	0.00
431	420	0.00	0.00	11.16	0.00
424	422	0.00	0.00	0.00	11.16
49	425	0.00	0.00	0.00	0.00
48	426	0.00	0.00	0.00	0.00
47	427	0.00	0.00	0.00	0.00
46	428	0.00	0.00	0.00	0.00
75	431	0.00	0.00	0.00	0.00
73	432	0.00	0.00	0.00	0.00
96	434	0.00	0.00	0.00	0.00
405	435	0.00	0.00	0.00	0.00
406	436	0.00	0.00	0.00	0.00
111	437	0.00	0.00	11.16	0.00
92	440	0.00	0.00	0.00	0.00
91	441	0.00	0.00	0.00	0.00
430	442	0.00	0.00	0.00	0.00
442	445	0.00	0.00	0.00	0.00
443	446	0.00	0.00	0.00	11.16
448	448	11.16	0.00	0.00	0.00
449	449	0.00	0.00	11.16	0.00
458	451	0.00	0.00	0.00	0.00
459	452	0.00	0.00	0.00	0.00
457	453	0.00	11.16	11.16	0.00
456	454	0.00	0.00	0.00	0.00
464	455	0.00	0.00	0.00	0.00
465	456	0.00	0.00	0.00	11.16
472	457	0.00	0.00	0.00	0.00
479	459	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 17 Continuación...

CONFIGURACIÓN					
ID	INDICE	60	199	345	470
CAUDAL (L/s)					
480	460	0.00	0.00	0.00	0.00
483	461	0.00	0.00	0.00	0.00
484	462	0.00	0.00	11.16	0.00
495	464	0.00	0.00	0.00	0.00
496	465	0.00	0.00	0.00	0.00
500	466	0.00	0.00	0.00	0.00
502	467	0.00	0.00	0.00	11.16
517	468	0.00	0.00	0.00	0.00
522	469	0.00	0.00	0.00	0.00
519	470	0.00	0.00	0.00	0.00
527	471	0.00	0.00	0.00	11.16
545	476	0.00	0.00	0.00	0.00
546	477	0.00	0.00	11.16	0.00
141	479	11.16	0.00	0.00	0.00
140	480	0.00	0.00	0.00	0.00
147	482	0.00	0.00	0.00	0.00
164	483	0.00	0.00	0.00	0.00
181	484	0.00	0.00	0.00	0.00
177	485	0.00	0.00	0.00	0.00
240	487	0.00	0.00	0.00	0.00
242	488	0.00	0.00	0.00	0.00
249	489	0.00	0.00	0.00	0.00
263	490	0.00	11.16	0.00	0.00
341	493	0.00	0.00	0.00	0.00
342	494	0.00	0.00	0.00	0.00
354	497	11.16	0.00	0.00	0.00
355	498	11.16	11.16	0.00	11.16
353	499	0.00	0.00	0.00	0.00
352	500	0.00	0.00	0.00	0.00
360	501	0.00	0.00	0.00	0.00
361	502	0.00	11.16	0.00	0.00
362	503	0.00	0.00	0.00	0.00
359	504	0.00	0.00	0.00	0.00
380	505	0.00	11.16	0.00	0.00
392	506	0.00	0.00	0.00	0.00
391	507	0.00	0.00	11.16	0.00
397	509	0.00	0.00	0.00	0.00
396	510	0.00	0.00	11.16	11.16
395	511	0.00	0.00	0.00	0.00
6	512	0.00	11.16	0.00	0.00
423	513	0.00	0.00	0.00	0.00
5	514	0.00	0.00	0.00	0.00
131	520	0.00	11.16	0.00	11.16
290	521	11.16	0.00	0.00	11.16
357	522	0.00	0.00	11.16	11.16
358	523	0.00	0.00	0.00	0.00
398	524	0.00	11.16	0.00	0.00
376	525	0.00	11.16	0.00	0.00

Tabla 17 Continuación...

Tabla 17. Configuración...

CONFIGURACIÓN					
ID	INDICE	60	199	345	
CAUDAL (L/s)					
39	527	11.16	0.00	0.00	0.00
41	528	0.00	0.00	0.00	11.16
403	529	0.00	11.16	0.00	0.00
402	530	0.00	0.00	0.00	0.00
416	532	0.00	0.00	0.00	0.00
418	533	11.16	11.16	0.00	11.16
534	534	0.00	11.16	0.00	0.00
535	535	0.00	0.00	0.00	0.00
531	536	11.16	0.00	0.00	0.00
532	537	11.16	0.00	11.16	0.00
542	538	0.00	0.00	0.00	0.00
543	539	0.00	0.00	0.00	0.00
287	540	0.00	0.00	0.00	0.00
288	541	11.16	0.00	0.00	11.16
317	542	0.00	0.00	0.00	0.00
318	543	0.00	0.00	0.00	0.00
314	544	0.00	0.00	0.00	0.00
315	545	0.00	0.00	0.00	0.00
Caudal Total		178.56	178.56	178.56	178.56

Elaboración: Autor, 2017

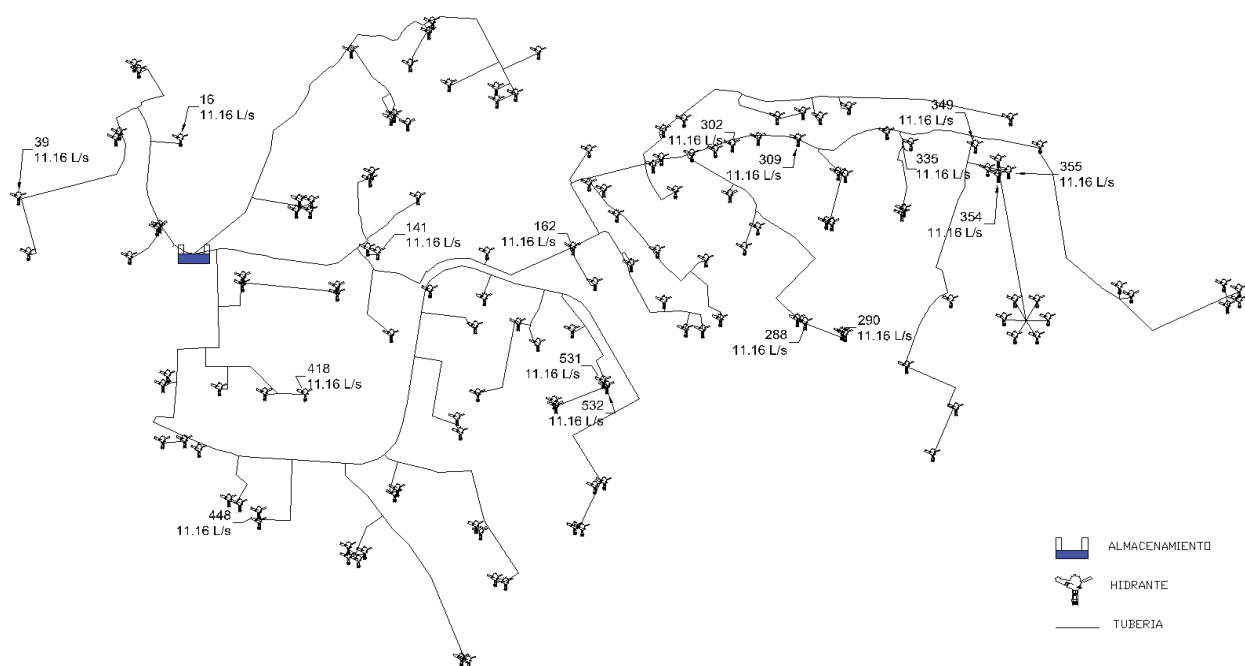


Figura 30. Configuración 60, generada manualmente en Epanet 2.0
Elaboración: Autor, 2017

La probabilidad de apertura de cada hidrante es definida como el cociente entre el número de veces que el hidrante se encuentra en un estado abierto, sobre el número total de configuraciones (500). Esto es definido dentro del anexo “B6” y representado en la figura 31. Por ejemplo el hidrante con índice 99 ha sido abierto 60 veces dentro de las 500 configuraciones, resultando como probabilidad de apertura 12%.

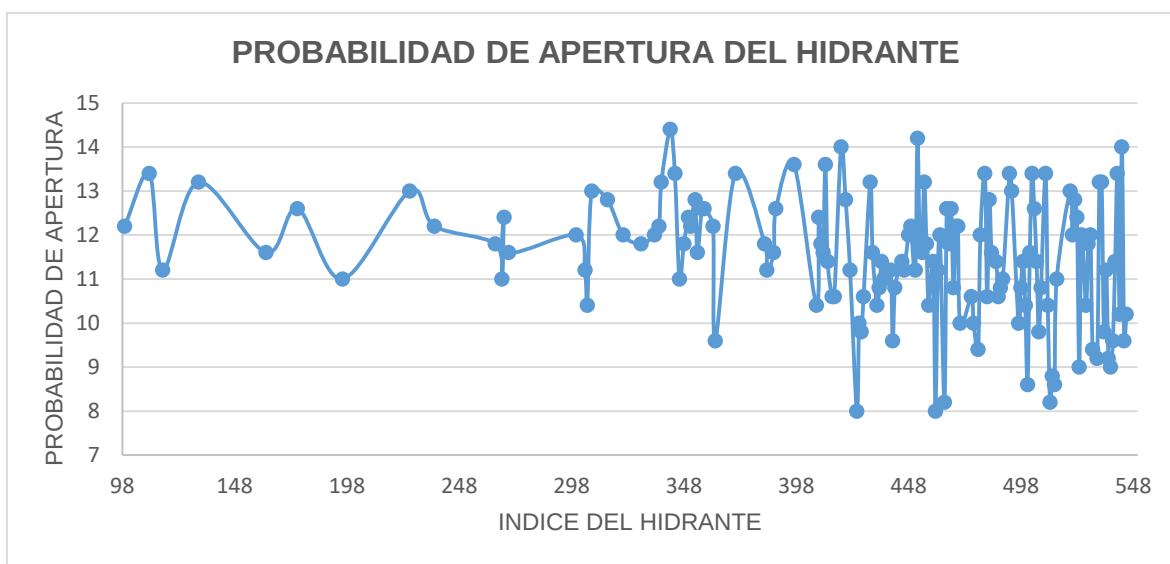


Figura 31. Probabilidad de apertura de cada hidrante
Elaboración: Autor, 2017

5.2.2. Evaluación del desempeño hidráulico a nivel de hidrante y sistema

En la tabla 18, se ha realizado un filtro a las configuraciones(R) en las que el hidrante con índice 407 ($j=407$) se encuentra abierto emitiendo 11.16 L/s (columna 2), por consiguiente el coeficiente en la columna 4 es 1 dentro de la respectiva configuración, si la presión del nudo es mayor que la de consigna (columna 3) el coeficiente indicado en la columna 5 también es 1, finalmente en la columna 6 se tiene el producto de los dos coeficientes. Todo esto conforme se indica en el inciso 2.3.1.1, presentándose al final de la tabla el índice del hidrante.

Tabla 18. Índice de fiabilidad hidráulica a nivel de hidrante con índice 407- red San Pedro, con la generación de 500 configuraciones y presión de consigna 32 mca

Configuración R	Caudal (L/s)	Presión (mca)	Abierto=1 Cerrado=0 $Ih_{407,r}=10$	Cumple=1 No cumple=0 $Ip_{407,r}>20$	INDICE DE FIABILIDAD DEL HIDRANTE $\sum_{r=1}^c Ih_{j,r}, Ip_{j,r}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0	41.62	0	1	0
2	0	41.56	0	1	0
3	11.16	31.73	1	0	0
4	0	41.56	0	1	0
5	0	38.75	0	1	0
6	0	41.53	0	1	0
7	0	41.50	0	1	0
8	0	41.51	0	1	0
9	0	41.63	0	1	0
10	0	41.58	0	1	0
11	0	41.57	0	1	0
12	0	38.73	0	1	0
13	0	41.52	0	1	0
14	0	41.45	0	1	0
15	0	41.54	0	1	0
16	0	41.58	0	1	0
17	0	38.58	0	1	0
18	0	41.59	0	1	0
19	0	41.58	0	1	0
20	0	41.61	0	1	0
21	0	41.52	0	1	0
22	0	41.56	0	1	0
23	0	41.57	0	1	0
24	0	38.76	0	1	0
25	0	40.44	0	1	0
26	0	40.45	0	1	0
27	0	41.61	0	1	0
28	0	41.35	0	1	0
29	0	41.59	0	1	0
30	11.16	34.55	1	1	1
31	0	41.34	0	1	0
32	11.16	34.54	1	1	1
33	11.16	34.28	1	1	1
34	0	38.77	0	1	0
35	11.16	34.51	1	1	1
36	0	41.27	0	1	0

Tabla 18 continuación...

Configuración R	Caudal (L/s)	Presión (mca)	Abierto=1 Cerrado=0 $Ih_{407,r} \approx 10$	Cumple=1 No cumple=0 $Ip_{407,r} > 20$	INDICE DE FIABILIDAD DEL HIDRANTE $\sum_{r=1}^c Ih_{j,r}, Ip_{j,r}$
8	0	41.57	0	1	0
39	0	40.45	0	1	0
40	0	41.54	0	1	0
41	0	41.57	0	1	0
42	0	41.61	0	1	0
43	0	41.62	0	1	0
44	0	41.62	0	1	0
45	0	41.64	0	1	0
46	0	41.58	0	1	0
47	0	41.57	0	1	0
48	0	40.41	0	1	0
49	11.16	34.47	1	1	1
50	0	41.43	0	1	0
51	11.16	31.72	1	0	0
52	0	41.48	0	1	0
53	0	41.59	0	1	0
54	0	41.58	0	1	0
55	0	41.60	0	1	0
56	0	41.29	0	1	0
57	0	41.59	0	1	0
58	11.16	31.73	1	0	0
59	11.16	34.53	1	1	1
60	0	41.53	0	1	0
61	0	41.61	0	1	0
62	0	41.62	0	1	0
63	0	41.49	0	1	0
64	0	41.56	0	1	0
65	0	41.57	0	1	0
66	0	41.43	0	1	0
67	11.16	30.83	1	0	0
68	0	41.56	0	1	0
69	0	41.57	0	1	0
70	11.16	34.34	1	1	1
71	0	41.58	0	1	0
72	0	41.59	0	1	0
73	0	41.51	0	1	0
74	0	41.32	0	1	0

Tabla 18. Continuación...

Configuración R	Caudal (L/s)	Presión (mca)	Abierto=1 Cerrado=0 $Ih_{407,r} \approx 10$	Cumple=1 No cumple=0 $Ip_{407,r} > 20$	INDICE DE FIABILIDAD DEL HIDRANTE $\sum_{r=1}^c Ih_{j,r}, Ip_{j,r}$
75	0	41.53	0	1	0
76	0	41.46	0	1	0
77	0	41.26	0	1	0
78	11.16	31.72	1	0	
79	0	41.28	0	1	0
80	0	41.58	0	1	0
81	0	41.43	0	1	0
82	11.16	33.93	1	1	1
83	0	40.48	0	1	0
84	0	41.60	0	1	0
85	11.16	34.24	1	1	1
86	0	41.34	0	1	0
87	0	41.51	0	1	0
88	0	41.10	0	1	0
89	0	41.57	0	1	0
90	0	39.75	0	1	0
91	11.16	34.27	1	1	1
92	0	41.59	0	1	0
93	0	41.23	0	1	0
94	0	39.86	0	1	0
95	0	40.44	0	1	0
96	0	41.59	0	1	0
97	0	41.49	0	1	0
98	0	41.59	0	1	0
99	0	41.58	0	1	0
100	0	41.51	0	1	0
101	0	38.82	0	1	0
102	0	41.52	0	1	0
103	0	41.59	0	1	0
104	0	41.49	0	1	0
105	0	41.59	0	1	0
106	0	41.57	0	1	0
107	0	41.57	0	1	0
108	0	41.56	0	1	0
109	0	41.53	0	1	0
110	0	41.47	0	1	0
111	0	41.62	0	1	0

Tabla 18. Continuación...

Configuración R	Caudal (L/s)	Presión (mca)	Abierto=1 Cerrado=0 $Ih_{407,r} \approx 10$	Cumple=1 No cumple=0 $Ip_{407,r} > 20$	INDICE DE FIABILIDAD DEL HIDRANTE $\sum_{r=1}^c Ih_{j,r}, Ip_{j,r}$
112	0	41.56	0	1	0
113	0	41.60	0	1	0
114	11.16	34.46	1	1	1
115	0	38.76	0	1	0
116	0	41.56	0	1	0
117	0	38.74	0	1	0
118	0	41.57	0	1	0
119	0	41.48	0	1	0
120	0	38.78	0	1	0
121	0	40.47	0	1	0
122	0	41.57	0	1	0
123	0	41.54	0	1	0
124	0	41.53	0	1	0
125	0	41.48	0	1	0
126	0	38.77	0	1	0
127	0	41.60	0	1	0
128	0	38.82	0	1	0
129	0	41.59	0	1	0
130	0	41.59	0	1	0
131	0	40.47	0	1	0
132	11.16	34.43	1	1	1
133	0	38.11	0	1	0
134	0	41.57	0	1	0
135	11.16	34.50	1	1	1
136	11.16	34.54	1	1	1
137	0	41.62	0	1	0
138	0	41.57	0	1	0
139	0	41.49	0	1	0
140	0	41.50	0	1	0
141	0	41.45	0	1	0
142	0	41.53	0	1	0
143	0	40.41	0	1	0
144	0	41.56	0	1	0
145	0	41.55	0	1	0
146	0	41.61	0	1	0
147	0	41.00	0	1	0

Tabla 18. Continuación...

Configuración R	Caudal (L/s)	Presión (mca)	Abierto=1 Cerrado=0 $Ih_{407,r} \approx 10$	Cumple=1 No cumple=0 $Ip_{407,r} > 20$	INDICE DE FIABILIDAD DEL HIDRANTE $\sum_{r=1}^c Ih_{j,r}, Ip_{j,r}$
148	11.16	23.19	1	0	0
149	0	40.43	0	1	0
150	0	40.39	0	1	0
151	0	37.84	0	1	0
152	0	38.77	0	1	0
153	11.16	27.43	1	0	0
154	0	40.46	0	1	0
155	11.16	34.48	1	1	1
156	0	41.59	0	1	0
157	0	41.57	0	1	0
158	0	41.61	0	1	0
159	0	41.54	0	1	0
160	0	39.87	0	1	0
161	0	38.64	0	1	0
162	0	41.52	0	1	0
163	0	41.55	0	1	0
164	0	41.61	0	1	0
165	0	41.62	0	1	0
166	0	41.59	0	1	0
167	0	41.60	0	1	0
168	0	41.59	0	1	0
169	0	41.59	0	1	0
170	0	41.20	0	1	0
171	0	41.50	0	1	0
172	0	38.12	0	1	0
173	0	40.25	0	1	0
174	0	41.54	0	1	0
175	0	41.59	0	1	0
176	0	40.24	0	1	0
177	0	41.33	0	1	0
178	0	41.56	0	1	0
179	0	41.59	0	1	0
180	0	41.59	0	1	0
181	0	41.57	0	1	0
182	0	38.67	0	1	0
183	0	41.40	0	1	0

Tabla 18. Continuación...

Configuración R	Caudal (L/s)	Presión (mca)	Abierto=1 Cerrado=0 $Ih_{407,r} \approx 10$	Cumple=1 No cumple=0 $Ip_{407,r} > 20$	INDICE DE FIABILIDAD DEL HIDRANTE $\sum_{r=1}^c Ih_{j,r}, Ip_{j,r}$
184	0	41.58	0	1	0
185	0	41.45	0	1	0
186	0	41.51	0	1	0
187	0	41.58	0	1	0
188	0	41.55	0	1	0
189	0	41.50	0	1	0
190	0	41.61	0	1	0
191	0	41.49	0	1	0
192	11.16	34.39	1	1	1
193	0	41.35	0	1	0
194	0	41.53	0	1	0
195	0	41.56	0	1	0
196	0	41.59	0	1	0
197	0	40.44	0	1	0
198	0	41.33	0	1	0
199	0	41.26	0	1	0
200	0	38.81	0	1	0
201	0	41.52	0	1	0
202	0	41.56	0	1	0
203	0	41.50	0	1	0
204	0	41.62	0	1	0
205	0	41.30	0	1	0
206	0	41.56	0	1	0
207	0	41.57	0	1	0
208	0	41.49	0	1	0
209	11.16	34.40	1	1	1
210	11.16	27.48	1	0	0
211	0	41.59	0	1	0
212	0	41.54	0	1	0
213	0	41.52	0	1	0
214	0	41.35	0	1	0
215	0	41.53	0	1	0
216	0	41.40	0	1	0
217	0	41.61	0	1	0
218	0	41.49	0	1	0

Tabla 18. Continuación...

Configuración R	Caudal (L/s)	Presión (mca)	Abierto=1 Cerrado=0 $Ih_{407,r} \approx 10$	Cumple=1 No cumple=0 $Ip_{407,r} > 20$	INDICE DE FIABILIDAD DEL HIDRANTE $\sum_{r=1}^c Ih_{j,r}, Ip_{j,r}$
219	0	41.37	0	1	0
220	0	38.79	0	1	0
221	0	41.59	0	1	0
222	0	41.61	0	1	0
223	0	41.56	0	1	0
224	0	41.40	0	1	0
225	0	41.33	0	1	0
226	0	41.48	0	1	0
227	0	41.60	0	1	0
228	0	41.61	0	1	0
229	11.16	34.54	1	1	1
230	0	41.57	0	1	0
231	11.16	33.82	1	1	1
232	11.16	34.50	1	1	1
233	0	41.56	0	1	0
234	0	38.76	0	1	0
235	11.16	34.52	1	1	1
236	0	41.55	0	1	0
237	0	41.53	0	1	0
238	11.16	34.57	1	1	1
239	0	41.62	0	1	0
240	0	41.51	0	1	0
241	0	41.56	0	1	0
242	0	41.48	0	1	0
243	0	41.57	0	1	0
244	0	35.98	0	1	0
245	0	41.55	0	1	0
246	0	41.57	0	1	0
247	0	38.53	0	1	0
248	0	41.59	0	1	0
249	0	41.62	0	1	0
250	0	38.73	0	1	0
251	0	41.32	0	1	0
252	0	41.58	0	1	0
253	0	40.44	0	1	0
254	0	41.63	0	1	0

Tabla 18. Continuación...

Configuración R	Caudal (L/s)	Presión (mca)	Abierto=1 Cerrado=0 $Ih_{407,r} \approx 10$	Cumple=1 No cumple=0 $Ip_{407,r} > 20$	INDICE DE FIABILIDAD DEL HIDRANTE $\sum_{r=1}^c Ih_{j,r}, Ip_{j,r}$
255	0	41.44	0	1	0
256	0	41.60	0	1	0
257	0	40.50	0	1	0
258	0	41.31	0	1	0
259	0	38.74	0	1	0
260	0	41.51	0	1	0
261	0	41.59	0	1	0
262	0	41.59	0	1	0
263	11.16	34.44	1	1	1
264	0	41.51	0	1	0
265	0	41.26	0	1	0
266	0	41.50	0	1	0
267	0	41.54	0	1	0
268	11.16	34.45	1	1	1
269	0	40.46	0	1	0
270	0	41.59	0	1	0
271	0	41.63	0	1	0
272	0	41.52	0	1	0
273	0	41.57	0	1	0
274	0	40.51	0	1	0
275	0	41.58	0	1	0
276	0	38.56	0	1	0
277	0	41.59	0	1	0
278	0	38.74	0	1	0
279	0	41.64	0	1	0
280	0	41.58	0	1	0
281	0	41.62	0	1	0
282	0	41.52	0	1	0
283	11.16	34.48	1	1	1
284	0	41.53	0	1	0
285	0	41.40	0	1	0
286	0	41.49	0	1	0
287	0	41.58	0	1	0
288	0	38.83	0	1	0
289	0	41.63	0	1	0
290	0	41.59	0	1	0

Tabla 18. Continuación...

Configuración R	Caudal (L/s)	Presión (mca)	Abierto=1 Cerrado=0 $Ih_{407,r} \approx 10$	Cumple=1 No cumple=0 $Ip_{407,r} > 20$	INDICE DE FIABILIDAD DEL HIDRANTE $\sum_{r=1}^c Ih_{j,r}, Ip_{j,r}$
291	0	40.46	0	1	0
292	0	38.75	0	1	0
293	0	41.59	0	1	0
294	11.16	27.40	1	0	0
295	0	41.59	0	1	0
96	0	41.61	0	1	0
297	11.16	34.50	1	1	1
298	0	41.59	0	1	0
299	0	38.76	0	1	0
300	0	41.08	0	1	0
301	0	41.60	0	1	0
302	0	41.56	0	1	0
303	0	41.58	0	1	0
304	0	41.45	0	1	0
305	0	41.61	0	1	0
306	0	41.62	0	1	0
307	11.16	34.49	1	1	1
308	0	41.59	0	1	0
309	0	41.34	0	1	0
310	0	41.51	0	1	0
311	0	40.42	0	1	0
312	0	41.57	0	1	0
313	0	41.57	0	1	0
314	0	41.55	0	1	0
315	11.16	27.47	1	0	0
316	0	41.50	0	1	0
317	0	40.44	0	1	0
318	0	41.52	0	1	0
319	0	41.52	0	1	0
320	0	41.48	0	1	0
321	11.16	26.57	1	0	0
322	0	38.79	0	1	0
323	0	41.52	0	1	0
324	11.16	27.50	1	0	0
325	0	41.48	0	1	0
326	11.16	34.51	1	1	1

Tabla 18. Continuación...

Configuración R	Caudal (L/s)	Presión (mca)	Abierto=1 Cerrado=0 $Ih_{407,r} \approx 10$	Cumple=1 No cumple=0 $Ip_{407,r} > 20$	INDICE DE FIABILIDAD DEL HIDRANTE $\sum_{r=1}^c Ih_{j,r}, Ip_{j,r}$
327	0	41.59	0	1	0
328	0	41.55	0	1	0
329	0	41.59	0	1	0
330	0	41.52	0	1	0
331	0	41.49	0	1	0
332	0	41.62	0	1	0
333	0	41.48	0	1	0
334	0	41.37	0	1	0
335	0	40.51	0	1	0
336	0	41.48	0	1	0
337	0	38.79	0	1	0
338	0	41.48	0	1	0
339	0	41.55	0	1	0
340	0	40.35	0	1	0
341	11.16	27.45	1	0	0
342	0	41.58	0	1	0
343	0	41.61	0	1	0
344	0	41.52	0	1	0
345	0	41.60	0	1	0
346	0	41.62	0	1	0
347	0	41.61	0	1	0
348	0	41.21	0	1	0
349	0	41.26	0	1	0
350	0	41.59	0	1	0
351	0	41.52	0	1	0
352	0	41.56	0	1	0
353	0	38.18	0	1	0
354	0	41.51	0	1	0
355	0	41.54	0	1	0
356	0	41.27	0	1	0
357	0	37.75	0	1	0
358	11.16	34.52	1	1	1
359	0	41.55	0	1	0
360	0	39.87	0	1	0
361	0	40.50	0	1	0
362	0	41.58	0	1	0

Tabla 18. Continuación...

Configuración R	Caudal (L/s)	Presión (mca)	Abierto=1 Cerrado=0 $Ih_{407,r} \approx 10$	Cumple=1 No cumple=0 $Ip_{407,r} > 20$	INDICE DE FIABILIDAD DEL HIDRANTE $\sum_{r=1}^c Ih_{j,r}, Ip_{j,r}$
363	0	41.10	0	1	0
364	0	38.80	0	1	0
365	0	41.51	0	1	0
366	0	38.72	0	1	0
367	0	41.57	0	1	0
368	0	41.57	0	1	0
369	0	41.59	0	1	0
370	0	40.21	0	1	0
371	0	41.55	0	1	0
372	0	40.39	0	1	0
373	0	38.72	0	1	0
374	0	41.61	0	1	0
375	0	41.38	0	1	0
376	0	41.54	0	1	0
377	0	41.31	0	1	0
378	0	41.53	0	1	0
379	0	41.59	0	1	0
380	0	41.57	0	1	0
381	0	38.17	0	1	0
382	0	41.59	0	1	0
383	0	41.62	0	1	0
384	0	41.55	0	1	0
385	0	41.61	0	1	0
386	0	40.48	0	1	0
387	0	41.57	0	1	0
388	0	41.53	0	1	0
389	0	41.31	0	1	0
390	0	41.47	0	1	0
391	0	41.58	0	1	0
392	0	41.49	0	1	0
393	0	38.79	0	1	0
394	0	41.31	0	1	0
395	0	41.35	0	1	0
396	0	41.56	0	1	0
397	0	41.53	0	1	0
398	0	41.60	0	1	0

Tabla 18. Continuación...

Configuración R	Caudal (L/s)	Presión (mca)	Abierto=1 Cerrado=0 $Ih_{407,r} \approx 10$	Cumple=1 No cumple=0 $Ip_{407,r} > 20$	INDICE DE FIABILIDAD DEL HIDRANTE $\sum_{r=1}^c Ih_{j,r}, Ip_{j,r}$
399	0	41.56	0	1	0
400	0	41.59	0	1	0
401	0	41.52	0	1	0
402	0	40.41	0	1	0
403	0	41.52	0	1	0
404	0	41.60	0	1	0
405	11.16	31.34	1	0	0
406	0	41.48	0	1	0
407	11.16	27.47	1	0	0
408	0	41.48	0	1	0
409	0	41.58	0	1	0
410	0	41.57	0	1	0
411	0	41.53	0	1	0
412	0	38.67	0	1	0
413	0	38.81	0	1	0
414	0	41.58	0	1	0
415	0	41.43	0	1	0
416	0	41.50	0	1	0
417	0	40.24	0	1	0
418	0	40.44	0	1	0
419	0	41.63	0	1	0
420	0	41.29	0	1	0
421	0	41.57	0	1	0
422	0	41.57	0	1	0
423	0	38.75	0	1	0
424	0	41.51	0	1	0
425	0	41.57	0	1	0
426	0	40.22	0	1	0
427	0	38.72	0	1	0
428	0	41.55	0	1	0
429	0	40.26	0	1	0
430	0	41.57	0	1	0
431	0	38.76	0	1	0
432	0	41.59	0	1	0
433	0	41.56	0	1	0
434	11.16	34.48	1	1	1

Tabla 18. Continuación...

Configuración R	Caudal (L/s)	Presión (mca)	Abierto=1 Cerrado=0 $Ih_{407,r} \approx 10$	Cumple=1 No cumple=0 $Ip_{407,r} > 20$	INDICE DE FIABILIDAD DEL HIDRANTE $\sum_{r=1}^c Ih_{j,r}, Ip_{j,r}$
435	0	41.64	0	1	0
436	0	38.77	0	1	0
437	0	41.57	0	1	0
438	0	41.47	0	1	0
439	0	40.49	0	1	0
440	0	38.73	0	1	0
441	0	41.53	0	1	0
442	0	41.56	0	1	0
443	0	41.59	0	1	0
444	11.16	34.45	1	1	1
445	0	41.61	0	1	0
446	0	38.79	0	1	0
447	0	41.10	0	1	0
448	0	41.56	0	1	0
449	11.16	34.44	1	1	1
450	0	41.37	0	1	0
451	0	41.31	0	1	0
452	0	41.50	0	1	0
453	0	41.58	0	1	0
454	0	41.59	0	1	0
455	0	40.39	0	1	0
456	0	40.41	0	1	0
457	0	40.46	0	1	0
458	0	40.40	0	1	0
459	0	41.53	0	1	0
460	0	41.57	0	1	0
461	11.16	31.60	1	0	0
462	0	41.59	0	1	0
463	0	41.59	0	1	0
464	0	41.47	0	1	0
465	11.16	34.50	1	1	1
466	11.16	34.47	1	1	1
467	0	41.59	0	1	0
468	0	41.31	0	1	0
469	0	41.57	0	1	0
470	0	41.56	0	1	0
471	0	40.46	0	1	0

Tabla 18. Continuación...

Configuración R	Caudal (L/s)	Presión (mca)	Abierto=1 Cerrado=0 $Ih_{407,r} \approx 10$	Cumple=1 No cumple=0 $Ip_{407,r} > 20$	INDICE DE FIABILIDAD DEL HIDRANTE $\sum_{r=1}^c Ih_{j,r}, Ip_{j,r}$
472	0	40.44	0	1	0
473	0	40.48	0	1	0
474	0	41.59	0	1	0
475	0	38.73	0	1	0
476	0	41.54	0	1	0
477	0	38.75	0	1	0
478	0	41.57	0	1	0
479	0	40.39	0	1	0
480	0	41.45	0	1	0
481	0	41.53	0	1	0
482	0	41.55	0	1	0
483	0	41.57	0	1	0
484	0	41.58	0	1	0
485	0	41.59	0	1	0
486	0	35.65	0	1	0
487	0	40.42	0	1	0
488	0	41.51	0	1	0
489	0	38.75	0	1	0
490	0	41.56	0	1	0
491	0	41.55	0	1	0
492	11.16	31.66	1	0	0
493	0	41.55	0	1	0
494	0	41.47	0	1	0
495	0	41.34	0	1	0
496	0	41.61	0	1	0
497	0	41.64	0	1	0
498	0	41.62	0	1	0
499	0	41.57	0	1	0
500	0	41.33	0	1	0
			$\sum_{r=1}^c Ih_{j,r} = 51$		$\sum_{r=1}^c Ih_{j,r}, Ip_{j,r} = 34$
INDICE DE FIABILIDAD DEL HIDRANTE			$\alpha_j = \frac{\sum_{r=1}^c Ih_{j,r}, Ip_{j,r}}{\sum_{r=1}^c Ih_{j,r}} = \frac{34}{51} = 0.67$		

Elaboración: Autor, 2017

La tabla 19 y figura 32 muestra el valor del índice de fiabilidad de todos los hidrantes pertinentes de la red, al final de la tabla se determina el índice del sistema como al promedio de la fiabilidad estos hidrantes.

Tabla 19. Índice de fiabilidad hidráulica a nivel de hidrante y del sistema.

INDICE	HIDRANTE (j)	INDICE DE FIABILIDAD α_j
99	162	1
110	194	1
116	201	0
132	223	0.98
162	61	0
176	254	0
196	280	1
226	335	1
237	385	0
264	413	0.98
267	434	1
268	473	0.93
270	130	0
300	104	0.16
304	107	0
305	110	0
307	101	0.77
314	68	0
321	214	0
329	183	0.91
335	206	1
337	197	1
338	188	0
342	294	1
344	297	0.98
346	229	1
348	233	1
350	302	1
351	381	1
353	371	1
354	509	1
356	306	0.98
357	309	1
361	326	0.98
362	349	1
371	16	0.89

Tabla 19. Continuación...

384	26	0.98
385	27	1
388	33	1
89	34	1
397	9	0.67
407	217	0.67
408	171	1
409	136	0
410	159	0
411	257	0
412	261	1
414	277	0
415	269	1
418	291	1
420	431	1
422	424	0
425	49	1
426	48	1
427	47	1
428	46	1
431	75	0
432	73	0.67
434	96	0
435	405	1
436	406	1
437	111	0.93
440	92	1
441	91	0.98
442	430	1
445	442	1
446	443	1
448	448	1
449	449	1
451	458	1
452	459	1
453	457	1
454	456	1
455	464	1
456	465	1
457	472	1
459	479	1
460	480	1

Tabla 19. Continuación...

INDICE	HIDRANTE (j)	INDICE DE FIABILIDAD α_j
461	483	1
462	484	1
464	495	0.98
465	496	1
466	500	1
467	502	1
468	517	0.98
469	522	1
470	519	1
471	527	1
476	545	1
477	546	1
479	141	0
480	140	0
482	147	0
483	164	1
484	181	0.75
485	177	0.70
487	240	0.89
488	242	0.73
489	249	0.81
490	263	1
493	341	1
494	342	1
497	354	1
498	355	1
499	353	1
500	352	1
501	360	1
502	361	0.98
503	362	1
504	359	1
505	380	1
506	392	1
507	391	1
509	397	1
510	396	1
511	395	1
512	6	1

Tabla 19. Continuación...

INDICE	HIDRANTE (j)	INDICE DE FIABILIDAD α_j
513	423	0
514	5	1
520	131	0.94
521	290	1
522	357	1
523	358	1
524	398	1
525	376	1
527	39	0.98
528	41	1
529	403	0
530	402	0
532	416	0
533	418	0
534	534	1
535	535	1
536	531	1
537	532	1
538	542	1
539	543	1
540	287	1
541	288	1
542	317	1
543	318	1
544	314	1
545	315	1
$\alpha_{sys} = \frac{\sum \alpha_j}{N}$		0.8

Elaboración: Autor, 2017

El resultado del índice del sistema nos indica que existe la probabilidad de que alrededor del 80% del caudal de diseño es extraído sin ningún problema. Esto equivale a 13 hidrantes funcionando simultáneamente emitiendo un caudal de 145 L/s.

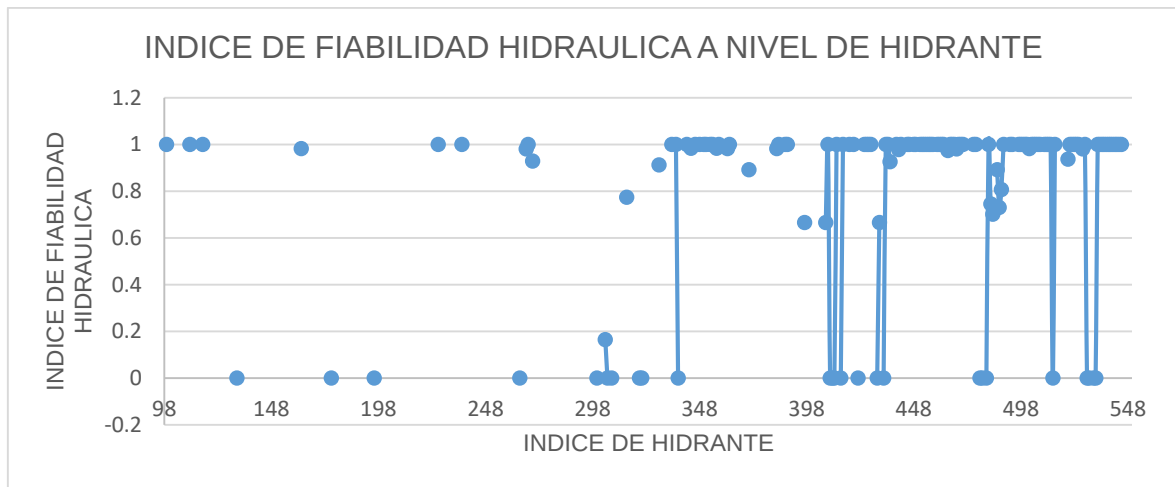


Figura 32. Fiabilidad hidráulica nivel de hidrante con la generación aleatoria de 500 configuraciones y caudal máximo en la línea en cuestión de 178.56 L/s.

Elaboración: Autor, 2017

En la presente red existen 25 hidrantes críticos, con un valor de fiabilidad a nivel de hidrante de 0. Esto se debe por las grandes pérdidas que se producen al trasegar el caudal de diseño por tuberías de reducido diámetro, creando un régimen de flujo turbulento que aumenta significativamente las pérdidas por longitud y accesorio.

Al implementar redes localizadas a los nudos críticos se aumenta el índice de fiabilidad del sistema a 0.83, por consiguiente rescata el correcto funcionamiento de 3 nudos y mejora el índice de otros, como se muestra en la figura 34.

La figura 33, muestra los sectores de las que se implementó las redes malladas, cabe recalcar que el aumento de presión se da en todos los nudos, es decir, tanto en los hidrantes como nudos de enlace. No obstante el índice de fiabilidad solo es afectado por los hidrantes.

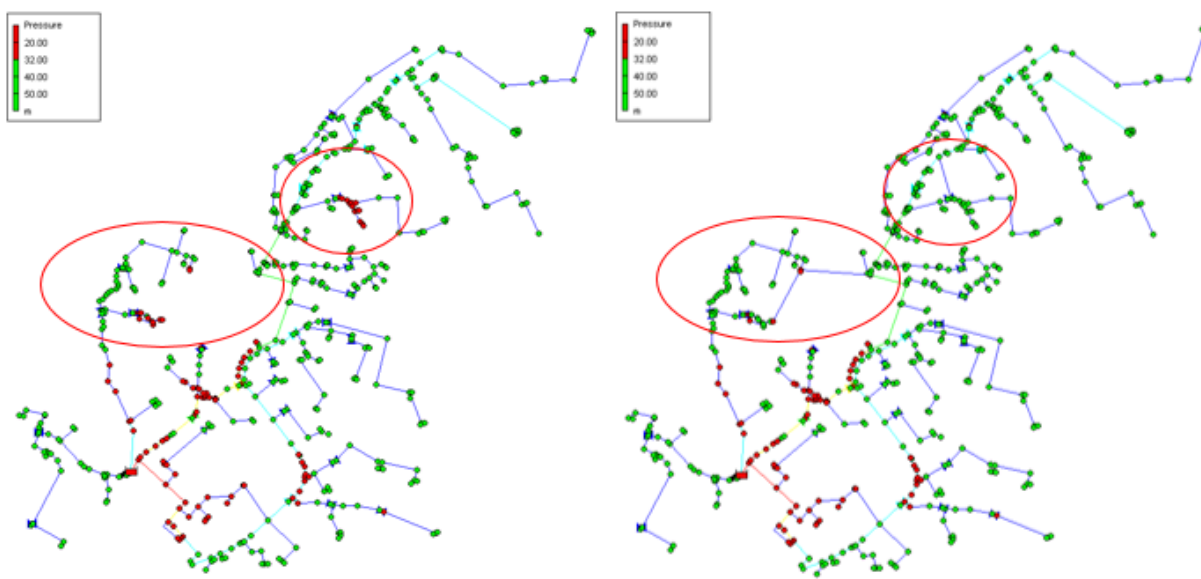


Figura 33. Conformación de las redes localizadas-red San Pedro
Elaboración: Autor, 2017

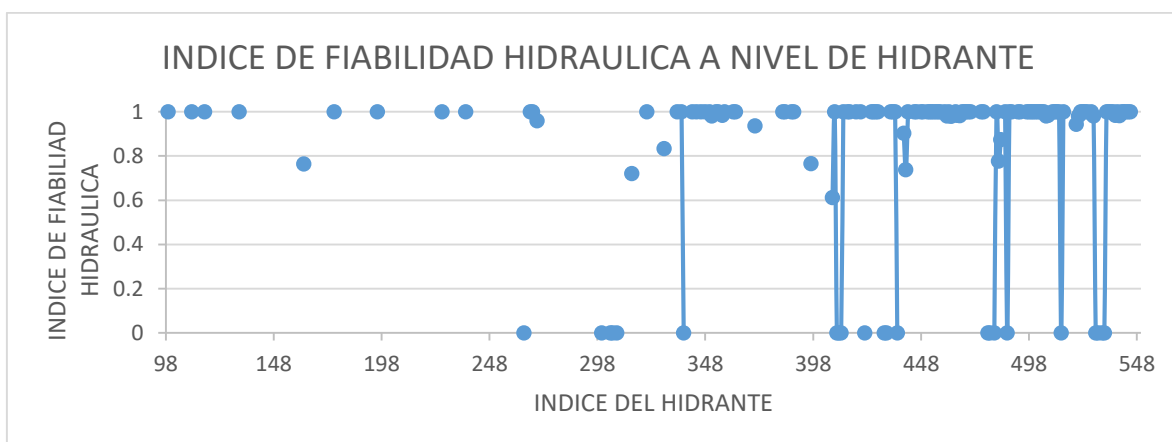


Figura 34. Fiabilidad hidráulica a nivel de hidrante con la generación aleatoria de 500 configuraciones, con un caudal máximo en la línea en cuestión de 178.56 L/s, implantando redes localizadas.
Elaboración: Autor, 2017

Fiabilidad del sistema en función de la rugosidad de los diferentes materiales existentes

Tabla 20 rugosidad absoluta en tuberías de diferentes materiales.

Material	Rugosidad	Fiabilidad
PVC	0.0015	0.80
Polietileno	0.007	0.80
GRP	0.03	0.78
Hierro dulce asfaltado	0.12	0.74
Hierro galvanizado	0.15	0.73
Hierro dúctil	0.25	0.73
Concreto	0.3	0.72
Acero comercial	0.45	0.72
Acero bridado	0.9	0.70

Sin duda el material del que están compuestas las tuberías tienen un papel importante en la fiabilidad hidráulica de una red de riego, ya que aumenta considerablemente las pérdidas por longitud y por ende disminuye el índice de fiabilidad del sistema, en la tabla 20 se muestra la rugosidad de diferentes materiales con los que a menudo son fabricadas las tuberías, empleando estas rugosidades absolutas se determina el índice de la fiabilidad del sistema para la red San Pedro en la misma tabla, los resultados también son mostrados en la figura 35.

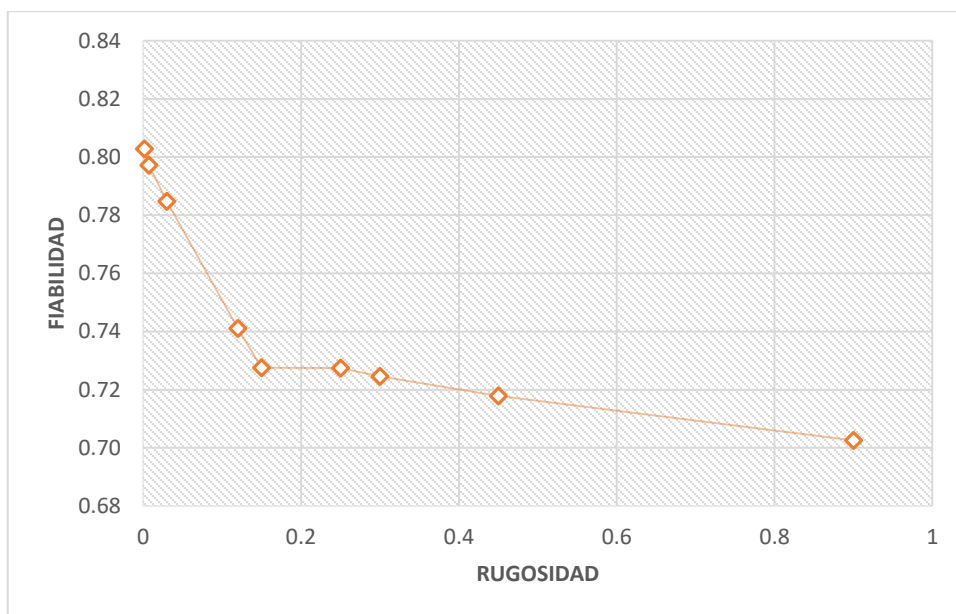


Figura 35. Índice de fiabilidad para distintas rugosidades
Elaboración: Autor, 2017

Fiabilidad del sistema en función del incremento de la rugosidad provocada por la corrosión en el acero galvanizado.

La relación entre la rugosidad absoluta y el tipo de agua que conduce la tubería tiene un papel importante en la fiabilidad hidráulica del sistema al pasar los años, ya que ésta disminuye considerablemente dependiendo de la cantidad de cloruros y materia orgánica dentro del agua. En la figura 36 se observa el valor del índice de fiabilidad de la red en estudio, considerando que el material de las tuberías es de acero galvanizado, para un periodo extendido de 40 años.

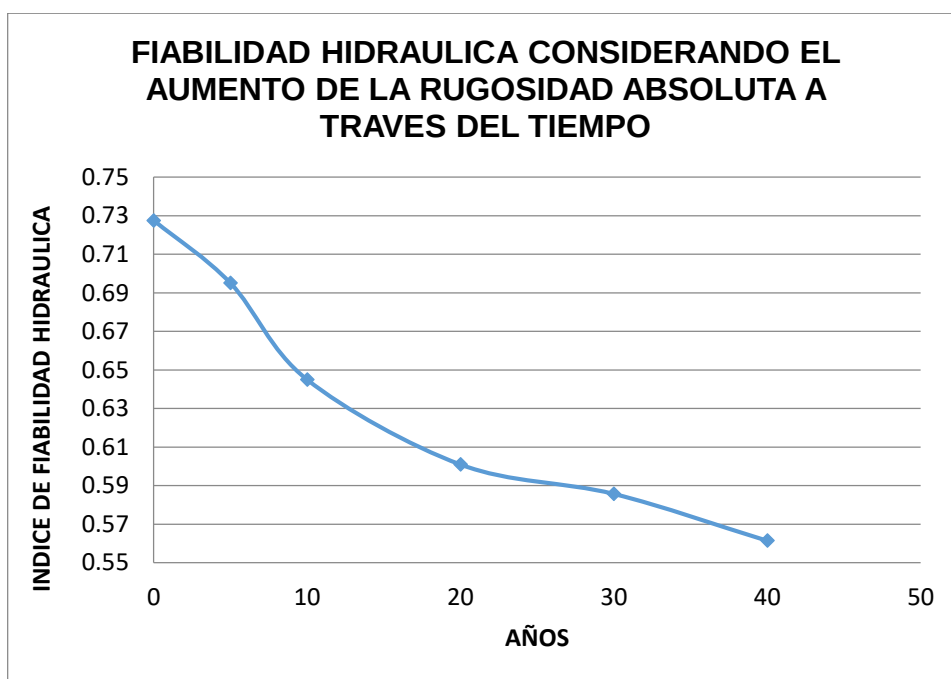


Figura 36. Índice de fiabilidad para distintas rugosidades
Elaboración: Autor, 2017

Finalmente se valora el desempeño de la red en función del número de hidrantes funcionando simultáneamente, partiendo desde 22.32 L/s correspondiendo al caudal emitido por 2 hidrantes hasta el caudal máximo 178.56, es evidente en la figura 37 que el índice de fiabilidad del sistema es inversamente proporcional al caudal afuyente. No obstante la variación del índice de fiabilidad hidráulica no es significativa (0.825 a 0.803), como sucede al cambiar el material del que está compuesto las tuberías (0.8 a 0.7).

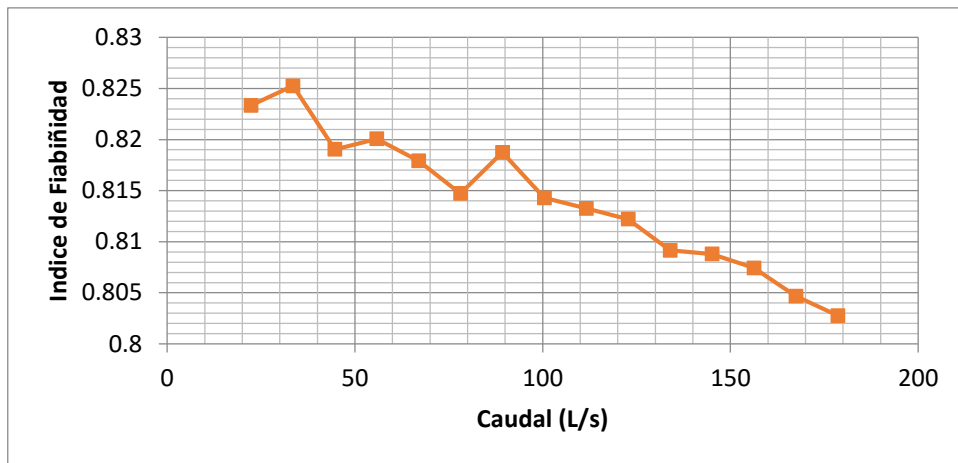


Figura 37. Índice de fiabilidad hidráulica del sistema en función del número de hidrantes funcionado simultáneamente.
Elaboración: Autor, 2017

CONCLUSIONES

- Al implementar la metodología AKLA, se valora el desempeño de las redes de riego presurizadas Sinistra Ofanto y San Pedro, en las que se garantiza el funcionamiento de 15 y 107 hidrantes, los mismos que cubren un área de irrigación 45Ha y 75Ha, respectivamente.
- La fiabilidad hidráulica de una red presurizada a la demanda depende de muchos factores como la topografía, material de las tuberías, diseño agronómico, diseño hidráulico, pero sobre todo de los diferentes escenarios que puedan darse. La metodología AKLA considera todos estos aspectos para determinar la fiabilidad hidráulica del sistema. No obstante, está limitada a un régimen estacionario, que mantiene siempre un caudal constante en la línea principal. Esta metodología sencilla resultaría vana, de no contar con las herramientas informáticas que se dispone hoy en día.
- Se puede determinar el índice de fiabilidad de un sistema de pocos hidrantes mediante la metodología AKLA al ingresar manualmente cada una de las configuraciones en Epanet 2.0. Sin embargo, para una gran cantidad de hidrantes como es el caso de la red San Pedro (500 configuraciones de 143 hidrantes) esta tarea sería tediosa. La librería de enlace dinámico ("Toolkit") proporciona la capacidad de simular un sin número de escenarios en cuestión de minutos.
- Al evaluar el desempeño de las redes colectivas a presión, se determina que ninguna es 100% fiable. El implementar redes malladas en tres sectores específicos de la red de San Pedro, logra incluir el funcionamiento de hidrantes que en el mejor de los casos pasaron de un índice de fiabilidad a nivel de hidrante de 0 a 1, por consiguiente el valor del índice de fiabilidad del sistema aumenta de 0.8 a 0.83.
- La rugosidad absoluta de las tuberías influye considerablemente en la valoración del desempeño de la red San Pedro. Al evaluar el sistema con diversos materiales que

definen las paredes desde lisas a corrugadas, el valor del índice del sistema disminuye de 0.8 a 0.7, como consecuencia dejan de funcionar 14 hidrantes.

- Según la teoría existente, a medida que el sistema cumple su vida útil existen un incremento en función lineal de la rugosidad absoluta como consecuencia la fiabilidad del sistema decrece. Al evaluar la red de San Pedro para un material galvanizado en la tubería propensa a la corrosión para un periodo de 40 años, el índice de fiabilidad del sistema disminuyó significativamente de 0.73 a 0.56, como resultado dejan de funcionar 27 hidrantes.

RECOMENDACIONES

- La presente investigación contempla a redes de riego presurizadas con una sola presión consigna, se recomienda adaptar la presente metodología a redes sectorizadas que tengan varias presiones de consigna.
- Adaptar una interfaz gráfica al módulo creado en la presente investigación, con la finalidad de proporcionar un entorno visual sencillo, donde se haga uso un conjunto de imágenes y objetos gráficos que facilite la interacción.

BIBLIOGRAFIA

- Aguirre, J. (2015). *Funciones de coste asociadas a elementos de una red hidráulica presurizada. (Tesis de pregrado)*. Universidad Técnica Particular de Loja, Loja.
- Al-zahrani, M., & Syed, J. L. (2005). Evaluation of Municipal Water Distribution System Reliability Using Minimum Cut-set Method. *J. King University*, 18(1), 67-82.
- Briceño, J. (2016). *Comprobación de metodologías de optimización en sistemas de riego. (Tesis de pregrado)*. Universidad Técnica Particular de Loja, Loja.
- Clément, R. (1966). Calcul des débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant à la demande. *La Houille Blanche*, (5), 553-576. <http://doi.org/10.1051/lhb/1966034>
- Fernández, I. (2011). *Optimización operacional de redes de riego a presión con varios puntos de suministro de agua. Aplicación a la red de distribución de la cr de palos de la frontera. (Tesis de pregrado)*. Universidad de Córdoba.
- Heimann, G. (s. f.). *Control de nivel en reservorios*.
- Kaufmann, A., Grouchko, D., & Cruon, R. (1977). *Mathematical Models for The Study of the Reliability of Systems*. New York: ACADEMIC PRESS, INC.
- Khadra, R., Lamaddalena, N., & Inoubli, N. (2013). Four Decades of Progress in Monitoring and Modeling of Processes in the Soil-Plant- Atmosphere System: Applications and Challenges Optimization of on demand pressurized irrigation networks and on-farm constraints. *Procedia Environmental Sciences*, 19(19), 942-954. <http://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.104>
- Lamaddalena, N., Khadra, R., & Fouial, A. (2015). Use of localized loops for the rehabilitation of on-demand pressurized irrigation distribution systems. *Irrigation Science*, 33(6), 453-468. <http://doi.org/10.1007/s00271-015-0481-5>
- Lamaddalena, N., Khadra, R., & Tlili, Y. (2012). Reliability-Based Pipe Size Computation of On-Demand Irrigation Systems. *Water Resources Management*, 26(2), 307-328. <http://doi.org/10.1007/s11269-011-9919-6>
- Lamaddalena, N., & Sagardoy, J. . (2000). *Performance analysis of on-demand pressurized irrigation. International Centre for advanced Mediterranean Agronomic Studies (Vol. 53)*. ROMA. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Lapo, M. (2012). *Diseño óptimo de sistemas de riego a presión. (Tesis de maestría)*. Universitat Politècnica de València, Valencia.

- Liotta, M., Carrión, R., Ciancaglini, N., & Olguín, A. MANUAL DE CAPACITACIÓN (2015). MAGAP. (2011). *Plan nacional de riego y drenaje 2011-2026*.
- Martines, J. B. (2010). Cost and reliability comparison between branched and looped water supply networks. *Journal of Hydroinformatics*, 150-160. <http://doi.org/10.2166/hydro.2009.080>
- Martínez, J., Montalvo, I., Izquierdo, J., & Pérez, R. (2011). Reliability and Tolerance Comparison in Water Supply Networks. *sprineg*, 1437-1448. <http://doi.org/10.1007/s11269-010-9753-2>
- Méndez, P., Inostroza, J., & Carillanca, I. (2004). *LIBRO INIA FITOGENETICOS*.
- Mijares, F. J. A. (1989). *Fundamentos de Hidrología de superficie. Journal of Chemical Information and Modeling* (Primera ed, Vol. 53). México. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Pereira, L. S., Juan Valero, J. A., Picornell, M., & Tarjuelo, J. (2010). *El Riego Y Sus Tecnologías*.
- Planells, P., Ortega, J. F., Valiente, M., Montero, J., & Tarjuelo, J. M. (1999). CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE REDES COLECTIVAS DE RIEGO, 6.
- Reca, J., Martínez, J., Roldán, J., & Callejón, J. (2002). Análisis de la fiabilidad de una red de riego en función de la simultaneidad de la demanda. *Ingeniería del agua*, 9(2), 157. <http://doi.org/10.4995/ia.2002.2612>
- Rocha, A. (2007). *Hidraulica de tuberias y canales. Susferrinmaquinas.Com.Ar*.
- Rossman, L. a. (2000). EPANET Programmer's Toolkit, 1-74.
- Salas, A. F., & Pérez, L. (s. f.). Hidráulica y riegos. US.
- Saldarriaga, J. (1998). *Hidráulica de tuberías*. (L. Buitrago, Ed.). Algaomega.
- Tarjuelo, J. M., Moreno, M. A., Planells, P., & Ortega, J. F. (s. f.-a). Presión y caudal necesarios en cabecera de redes de riego a la demanda según la calidad de servicio deseada.
- Tarjuelo, J. M., Moreno, M. A., Planells, P. Y., & Ortega, J. f. (s. f.-b). Presión Y Caudal Necesarios En Cabecera De Redes De Riego a.
- Yannopoulos, S., & Spiliotis, M. (2013). Water Distribution System Reliability Based on Minimum Cut - Set Approach and the Hydraulic Availability. *Water Resources Management*, 27(6), 1821-1836. <http://doi.org/10.1007/s11269-012-0163-5>

LINKOGRAFIA

- Anónimo. (2016). Conducciones forzadas y materiales de tubería. Recuperado a partir de https://www.uclm.es/area/ing_rural/Hidraulica/Diapositivas/DiapositivasTema5.pdf
- Aprender a programar. (2016). Recuperado a partir de <http://www.aprenderaprogramar.com/>
- EcuRed. (s. f.). Recuperado a partir de http://www.ecured.cu/Riego_de_los_cultivos
- Ernesto Helfgott. (2010). Sistema de Riego Tecnificado. Recuperado a partir de http://minagri.gob.pe/portal/download/pdf/direccionesyoficinas/direccion_informacion_agraria/videoconferencias/riego_tecnificado-26agos10.pdf
- FAO. (2016). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado 17 de enero de 2017, a partir de http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/ecu/indexesp.stm
- Miliarium Aureum, S. . (2004). Miliarium.com. Recuperado a partir de http://www.miliarium.com/Monografias/Sequia/Metodos_Riego.htm
- Montserrat, V., Alduán, A., Cots, L., & Barragán, J. (2012, septiembre 10). ¿Turnos o demanda? En el proyecto de redes de distribución de riego a presión. Recuperado a partir de <http://repositori.udl.cat/handle/10459.1/45935>
- Tola, M. (s. f.). *Diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego presurizado, en tres fincas modelo para la producción de quinua orgánica en el departamento de oruro*. Oruro. Recuperado a partir de: http://www.minagri.gob.ar/site/desarrollo_rural/producciones_regionales/01_origen_vegetal/07_quinua/_documentos/cientifica/tola_sumi_martin_ever_diseno_agronomico_hidraulico_agr.pdf

ANEXOS

Los anexos de la presente investigación se encuentran adjuntos dentro de los archivos de Microsoft Excel denominados como ANEXO A y ANEXO B

ANEXOS A

A1	Determinación de configuraciones
A2	Presión de cada nudo luego de establecer la respectiva configuración
A3	Determinación del coeficiente 1 en caso de cumplir con la presión consigna
A4	Determinación de coeficiente 1 en caso de que el hidrante se encuentre abierto
A5	Determinación del producto de los dos coeficientes anteriores y la determinación de la fiabilidad
A6	Probabilidad de apertura de cada hidrante

ANEXOS B

B1	Determinación de configuraciones
B2	Presión de cada nudo luego de establecer la respectiva configuración
B3	Determinación del coeficiente 1 en caso de cumplir con la presión consigna
B4	Determinación de coeficiente 1 en caso de que el hidrante se encuentre abierto
B5	Determinación del producto de los dos coeficientes anteriores y la determinación de la fiabilidad
B6	Probabilidad de apertura de cada hidrante
B7	Índice de fiabilidad con varias casuísticas.
B8	Índice de fiabilidad en red modificada con redes malladas localizadas