



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

ANÁLISIS DE LA RED PRESURIZADA DE LA SECCIÓN 01 DEL DISTRITO DE RIEGO 001, PABELLÓN DE ARTEAGA, AGUASCALIENTES

OSVALDO GALVÁN CANO

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2019

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y
DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, la que suscribe, **“Oswaldo Galván Cano”**, Alumno de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor **“Dr. Adolfo Exebio García”**, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis **“ANÁLISIS DE LA RED PRESURIZADA DE LA SECCIÓN 01 DEL DISTRITO DE RIEGO 001, PABELLÓN DE ARTEAGA, AGUASCALIENTES”**, y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y la que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Texcoco de Mora, Estado de México, a 25 de noviembre de 2019

Oswaldo Galván Cano

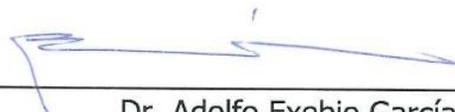
Vo. Bo. del Dr. Adolfo Exebio García

La presente tesis titulada: **Análisis de la red presurizada de la sección 01 del distrito de riego 001, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes**, realizada por el alumno: **Oswaldo Galván Cano**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



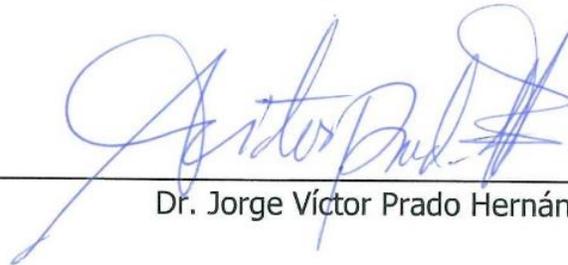
Dr. Adolfo Exebio García

ASESOR



Dr. Enrique Palacios Vélez

ASESOR



Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

Montecillo, Texcoco, Estado de México, 25 de noviembre de 2019

ANÁLISIS DE LA RED PRESURIZADA DE LA SECCIÓN 01 DEL DISTRITO DE RIEGO 001, PABELLÓN DE ARTEAGA, AGUASCALIENTES

Oswaldo Galván Cano, MC.

Colegio de Postgraduados, 2019

RESUMEN

El proyecto “Modernización Integral del Distrito de Riego 001” contemplaba una reconversión completa de cultivos, en el cual se consideraron hortalizas, actualmente en el patrón de cultivos establecido no se encuentra ninguno de los cultivos propuestos. En la actualidad el sistema opera en una combinación de riego por turnos y riego a la demanda lo que genera que algunos hidrantes no les llegue la presión requerida. El objetivo de la investigación fue analizar la red de distribución presurizada de la sección 01 del distrito de riego 001, Pabellón de Arteaga en un escenario de sequía, considerando las condiciones actuales de operación y planeación del recurso agua, con la finalidad de mejorar la operación. Para ello se estimaron los requerimientos de riego con la ecuación propuesta por la FAO, se empleó el software EPANET para analizar el comportamiento de la red bajo una demanda por turnos y para un riego a demanda libre se aplicó la primera fórmula generalizada de Clément. Los resultados generados por las simulaciones indicaron que con la actual red instalada en la sección 01 hidráulicamente no es posible operar con riego a la demanda ya que los caudales que se requieren conducir se incrementan, generando pérdidas por fricción mayores a las de diseño y por consiguiente una reducción en la presión en los nodos e hidrantes.

Palabras clave: EPANET, Clément, requerimientos de riego, análisis hidráulico, simulación.

ANALYSIS OF THE PRESSURIZED NETWORK OF SECTION 01 OF THE IRRIGATION DISTRICT 001, PABELLÓN DE ARTEAGA, AGUASCALIENTES

Oswaldo Galván Cano, MC.

Colegio de Postgraduados, 2019

ABSTRACT

The project "Integral Modernization of the Irrigation District 001" contemplated a complete reconversion of crops, in which vegetables were considered, currently in the established crop pattern none of the proposed crops are found. Currently, the system operates in a combination of shift irrigation and demand irrigation, which means that some hydrants do not reach the required pressure. The objective of the investigation was to analyze the pressurized distribution network of section 01 of the irrigation district 001, Pavilion of Arteaga in a drought scenario, considering the current conditions of operation and planning of the water resource, in order to improve the operation. To this end, the irrigation requirements were estimated using the equation proposed by FAO, EPANET software was used to analyze the behavior of the network under a demand for shifts, and for Clément the first generalized formula was applied. The results generated by the simulations indicated that with the current network installed in section 01 hydraulically it is not possible to operate with irrigation on demand since the flows that are required to drive are increased, generating friction losses greater than those of design and therefore a reduction in pressure in the nodes and hydrants.

Keywords: EPANET, Clément, irrigation requirements, hydraulic analysis, simulation.

DEDICATORIAS

A mi familia

Ya que gran parte de lo mejor que hay en nosotros, está ligado al amor que hay en la familia, y que sigue siendo la medida de nuestra estabilidad porque mide nuestro sentido de la lealtad. Todos los otros pactos de amor o temor derivan de ella y se modelan sobre ella.

A mis padres

De no haber sido por el apoyo recibido de ustedes, su estímulo y su inquebrantable confianza en mí, jamás habría llegado a este momento, por eso, con gratitud permanente, emoción y respeto hoy les digo: padres he cumplido. Inicio el camino y de hoy en adelante la responsabilidad es mía.

A mis hermanos

Que con su amor me han enseñado a salir adelante. Gracias por su paciencia, gracias por preocuparse por su hermano mayor, gracias por compartir sus vidas, pero sobre todo, gracias por estar en otro momento tan importante en mi vida.

Oswaldo Galván Cano

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento en la realización de mis estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados y el postgrado de Hidrociencias, por darme la oportunidad de desarrollarme no solo profesional sino también personalmente.

Al Dr. Adolfo Exebio García, por su paciencia y dedicación, por guiarme en las etapas que comprendieron mis estudios de Postgrado, por compartir sus conocimientos que a lo largo de su desarrollo profesional y personal ha adquirido.

Al Dr. Enrique Palacios Vélez, por todo el apoyo brindado en la elaboración de este trabajo y por compartir su experiencia y conocimientos.

Al Dr. Víctor Prado Hernández por el gran apoyo brindado, por sus acertadas observaciones y todas las atenciones incondicionales para la realización de esta tesis.

Al Distrito de Riego 001, Pabellón Aguascalientes, tanto personal de la Asociación de Usuarios como de la CONAGUA, ingenieros: Jorge Delgado, Luis Alberto Serafín y directivos de la Asociación, por todo el apoyo recibido en la elaboración de este trabajo.

A mis compañeros del posgrado, que con quienes durante esta etapa de estudiante encontré una segunda familia y con quienes comparto bonitos recuerdos...

A todos:

¡MUCHAS GRACIAS!

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE CUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. JUSTIFICACIÓN	3
3. OBJETIVOS	4
3.1. Objetivo General	4
3.2. Objetivos Específicos	4
4. HIPÓTESIS	5
4.1. Hipótesis General	5
4.2. Hipótesis Específicas	5
5. REVISIÓN DE LITERATURA	6
5.1. Antecedentes del Proyecto Modernización Integral del D.R. 001	6
5.2. Avances del Proyecto Modernización Integral del D.R. 001	10
5.3. Diseño Agronómico	12
5.3.1. Evapotranspiración de referencia (ET_0)	12
5.3.2. Coeficiente de cultivo (K_C)	14
5.3.3. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_C)	15
5.3.4. Corrección a evapotranspiración de cultivo (ET_C Ajustada)	16
5.3.5. Precipitación efectiva (P_{EF})	20
5.3.6. Requerimiento de riego neto (RR_N)	22
5.3.7. Requerimiento bruto o total (RR_B)	22
5.4. Modelación Hidráulica	27
5.4.1. Clasificación de los modelos	27
5.4.2. Análisis hidráulico en redes de abastecimiento de agua	28
5.4.3. Ecuaciones fundamentales de la hidráulica	30
5.4.4. Principios fundamentales de análisis de redes abiertas	36
5.4.5. Principios fundamentales de análisis de redes cerradas	36
5.4.6. Programas para la modelación de redes de distribución de agua	39
5.4.7. EPANET	40
5.4.8. Análisis hidráulico en EPANET	41
6. MATERIALES Y MÉTODOS	50

6.1. Zona de Estudio.....	50
6.2. Recopilación de Información.....	50
6.2.1. Información climatológica.....	50
6.2.2. Topología de la red de distribución	51
6.2.3. Presa Calles.....	51
6.2.4. Coeficientes de cultivo	52
6.2.5. Requerimientos de riego	53
6.2.6. Caudal requerido por cultivo para una superficie unitaria	54
6.2.7. Superficie total a regar actualmente por el sistema	55
6.3. Modelo Hidráulico	56
6.3.1. EPANET.....	56
6.3.2. Primera fórmula generalizada de Clément	57
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
7.1. Diseño agronómico.....	59
7.1.1. Láminas diarias	59
7.1.2. Laminas mensuales	60
7.1.3. Volúmenes mensuales.....	61
7.1.4. Mes de mayor demanda	63
7.1.5. Tiempo de riego por cultivo	65
7.1.6. Superficie por cultivo sección 01	68
7.1.7. Lámina de riego ponderada	69
7.2. Análisis hidráulico	70
7.2.1. Primera simulación distribución por turnos	71
7.2.2. Segunda simulación distribución por turnos.....	73
7.2.3. Tercera simulación distribución por turnos.....	76
7.2.4. Cuarta simulación distribución por turnos y a la demanda.....	79
7.2.5. Simulación distribución a la demanda.....	83
8. CONCLUSIONES	85
9. RECOMENDACIONES	87
10. LITERATURA CITADA.....	88
11. ANEXOS	91

LISTA DE CUADROS

Página

Cuadro 5.1. Lámina de riego diaria promedio en el proyecto ejecutivo.....	9
Cuadro 5.2. Volúmenes por cultivo en el proyecto ejecutivo.....	9
Cuadro 5.3. Avances de construcción del proyecto.	11
Cuadro 5.4. Avances de tecnificación del DR 001.	11
Cuadro 5.5. Coeficiente de lluvia efectiva según Blaney y Criddle.	21
Cuadro 5.6. Salinidad del suelo según la CE del extracto de saturación del suelo.....	23
Cuadro 5.7. Tolerancia de los cultivos a las sales según el rendimiento.	25
Cuadro 5.8. Coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams.	41
Cuadro 5.9. Coeficiente de rugosidad absoluta de Darcy-Weisbach.	43
Cuadro 5.10. Coeficiente de rugosidad de Manning.	44
Cuadro 6.1. Información climatológica de INIFAP.....	51
Cuadro 6.2. Valores de K_c mensuales.	52
Cuadro 6.3. Valores de K_c en porciento de desarrollo.	53
Cuadro 6.4. Duración del ciclo de los cultivos actuales.....	54
Cuadro 6.5. Caudal demandado por hectárea.	54
Cuadro 6.6. Superficie considerada por cada sección.	55
Cuadro 6.7. Distribución de horarios de riego de los hidrantes.....	57
Cuadro 7.1. Requerimientos de riego promedio diarios.	59
Cuadro 7.2. Requerimientos de riego mensuales parte 1.	60
Cuadro 7.3. Requerimientos de riego mensuales parte 2.	61
Cuadro 7.4. Volúmenes de riego mensuales en parte 1.	62
Cuadro 7.5. Volúmenes de riego mensuales en parte 2.	62
Cuadro 7.6. Requerimientos diarios del mes de mayo parte 1.....	64
Cuadro 7.7. Requerimientos diarios del mes de mayo parte 2.....	65
Cuadro 7.8. Tiempos de riego primera simulación.	66
Cuadro 7.9. Tiempos de riego segunda simulación.	67
Cuadro 7.10. Tiempos de riego tercera simulación.	68
Cuadro 7.11. Superficie por cultivo para la sección 01.	69
Cuadro 7.12. Lámina de riego neta ponderada.	69

Cuadro 7.13. Caudales a la entrada de la sección 01 primera simulación.....	71
Cuadro 7.14. Hidrantes donde la presión es menor a 25 m primera simulación.	72
Cuadro 7.15. Caudales a la entrada de la sección 01 segunda simulación.	74
Cuadro 7.16. Hidrantes donde la presión es menor a 25 m segunda simulación.	75
Cuadro 7.17. Presiones de hidrantes primera vs segunda simulación.....	75
Cuadro 7.18. Caudales a la entrada de la sección 01 tercera simulación.....	76
Cuadro 7.19. Hidrantes donde la presión es menor a 25 m tercera simulación.	77
Cuadro 7.20. Presiones de hidrantes primera vs tercera simulación.	78
Cuadro 7.21. Caudales a la entrada de la sección 01 cuarta simulación.....	79
Cuadro 7.22. Hidrantes donde la presión es menor a 25 m cuarta simulación.	80
Cuadro 7.23. Comparativa de resultados de Clément.....	83
Cuadro 7.24. Caudales a la demanda lateral margen izquierda sección 01.	84

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 5.1. Proyecto de modernización y tecnificación del DR 001, (Jirón, 2018).	10
Figura 5.2. Avances del proyecto en el DR 001, (Jirón, 2018).	11
Figura 5.3. Evapotranspiración de referencia (ET_o), (Allen, et al., 2006).	12
Figura 5.4. Curva del coeficiente del cultivo, (Allen, et al., 2006).	15
Figura 5.5. Evapotranspiración del cultivo (ET_c), (Allen, et al., 2006).	16
Figura 5.6. Fracción de área sombreada.	17
Figura 5.7. Variación por advección, (Pizarro, 1996).	19
Figura 5.8. Acumulación de sales en riego por goteo, (Monge, 2018).	24
Figura 5.9. Entradas y salidas en un modelo de simulación de una red de distribución de agua, (Martínez, 2002).	29
Figura 5.10. Elementos de una red de distribución de agua, (Martínez, 2002).	29
Figura 5.11. Ecuación de continuidad aplicada a tuberías, (Ángeles, 2013).	30
Figura 5.12. Representación esquemática de un nodo, (Martínez, 2002).	31
Figura 5.13. Diferentes tipos de energía en una tubería, (Arteaga, et al., 2006).	33
Figura 5.14. Red cerrada de distribución de agua, (Saldarriaga, 2016)	36
Figura 6.1. Ubicación del DR 001, Pabellón de Arteaga, Ags.	50
Figura 6.2. Nivel del espejo del agua en la presa Calles.	52
Figura 7.1. Variación de caudales a la entrada de la sección 01 primera simulación. ..	72
Figura 7.2. Variación de caudales a la entrada de la sección 01 segunda simulación..	74
Figura 7.3. Variación de caudales a la entrada de la sección 01 tercera simulación. ...	77
Figura 7.4. Variación de caudales a la entrada de la sección 01 cuarta simulación.	80

1. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad del agua es considerada uno de los factores más críticos para la producción de alimentos, desarrollo económico, y la vida en sí misma. La presencia o ausencia de este recurso natural determina la salud y bienestar de las sociedades (Sánchez Cohen y García Vargas, 2010).

Tijerina Chávez, *et al.*, (2001) menciona que para el desarrollo de un país, depende en gran medida de sus posibilidades para alcanzar una producción agrícola que le permita satisfacer sus necesidades y obtener excedentes para exportación, siempre y cuando el agua sea suministrada de manera eficiente.

En México, el riego es de primordial importancia para producir los alimentos y las materias primas que demanda el crecimiento de la población y su desarrollo. La superficie dominada en México con aguas superficiales y subterráneas mediante la infraestructura correspondiente, es del orden de los 7.32 millones de hectáreas irrigadas, de las cuales aproximadamente 3.3 millones de hectáreas están bajo la jurisdicción de los distritos de riego (DR) (CONAGUA, 2018).

Inzunza López, (2008) señala que la disponibilidad de agua para las actividades agropecuarias en los distritos de riego del país, depende del personal encargado de administrar el recurso, los cuales deben basar la operación en volúmenes reales disponibles considerando el patrón de cultivos que maximice el ingreso de los productores e incremente la productividad, esta aproximación debe ser integral al considerar el manejo del agua a nivel distrito y parcelario.

El contar con infraestructura (a nivel de parcela y de distribución) permite gestionar el recurso de manera eficiente ante cada situación que se presente. Sin embargo el tener instalaciones sofisticadas, no es suficiente, se deben implementar trabajos de operación y mantenimiento del sistema, generación de programas o calendarios de riego, entre otras actividades de manera que se potencie el mejoramiento global de la producción.

El distrito de riego 001 (DR 001) Pabellón de Arteaga es la primer distrito de riego en México, la fuente de abastecimiento de la cual se alimenta es la Presa Calles la cual fue construida entre 1926 y 1931 y puesta en operación en 1931, dando inicio a su operación dicho distrito.

En el 2004 inicia el proyecto para modernizar el DR 001, entubando el agua desde la obra de toma de la presa hasta la parcela e implementado sistema de riego por goteo, actualmente el proyecto se encuentra aún en proceso de construcción y operando solo las partes ya terminadas, pero presenta muchos cambios con respecto al proyectado, no solo en la parte constructiva sino también en la parte operacional.

El sistema fue proyectado para solo manejar un solo tipo sistema de riego que es el de goteo, actualmente hay usuarios que riegan con sistemas de aspersion que requieren mayor presión para operar, a esto se le suma que los usuarios no respetan su turno de riego asignado y riegan a demanda libre ocasionando que en ciertos puntos de la red secundaria la carga no sea suficiente y algunos usuarios no puedan regar debido a la falta de carga para que el hidrante pueda suministrar el agua.

Otro problema importante es que en el proyecto original se contemplaba que el sistema regara las 24 horas del día los 7 días de la semana sin embargo esto no es así ya que se riega la mayor parte de la superficie durante el día y de lunes a sábado este problema se debe en parte a que actualmente no se cuenta con telemetría instalada y que una vez concluido el proyecto este último problema sea corregido.

De igual es importante destacar que la presa cierra del 15 de diciembre al 15 de enero, esto para llevar acabo trabajo de mantenimiento entre otros.

En todos estos casos, la elaboración de un modelo matemático de la red constituye un elemento clave para el éxito de la gestión. Por ello, hablar de mejoras en la gestión técnica de las redes significa, entre otras cosas, hablar de mejora en la modelación de las mismas.

2. JUSTIFICACIÓN

Bonet Pérez, *et al.*, (2010) menciona que el agua disponible para riego de los cultivos está cada vez más limitada tanto cuantitativa como cualitativamente debido al crecimiento acelerado de las demandas para uso doméstico e industrial, ello hace cada vez más la necesidad de contar con sistemas de riego más eficientes capaces de mantener la humedad del suelo dentro de límites apropiados.

El proyecto “**Modernización Integral del Distrito de Riego 001**” contemplaba una reconversión completa de cultivos, en el cual se consideraron hortalizas: ajo, coliflor, lechuga, pimiento y tomate, dejando a tras los cultivos forrajeros, de grano entre otros que se sembraban en el momento de concebir el proyecto; actualmente en el patrón de cultivos establecido no se encuentra ninguno de estos cultivos propuestos y esto es porque el DR 001 Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, se ubica en una cuenca lechera por lo que muchos usuarios tienen ganado, por ello continúan sembrando cultivos forrajeros (maíz, alfalfa, pasto), de grano (maíz, frijol), entre otros.

De la información que reporta la Asociación Civil de Usuarios (ACU), al ciclo agrícola primavera-verano del 2018, de la superficie actualmente regada por el sistema la mayor parte pertenece a maíz forrajero y de grano; seguido por la: alfalfa, fresa y esparrago estos dos últimos de recientemente incorporaron al patrón de cultivos. Ese mismo año con apoyo del gobierno se comenzó a producir arándano con un aproximado de 2 hectáreas, de tener la rentabilidad esperada por los usuarios del distrito, pasará a formar parte del patrón de cultivos.

Al disponer solamente de 32.5 hectómetros cúbicos (hm^3) de agua concesionada de la presa Calles por parte de CONAGUA, surge la interrogante si la parte del sistema que actualmente está construido y la que falta por construirse tendrá la capacidad para satisfacer las demandas del patrón de cultivos actual, ya que para un mismo cultivo se pueden tener diversas fechas de siembra, traduciéndose en diferentes etapas de desarrollo, demandas e intervalos de riego; por ello es necesario llevar a cabo una simulación la red presurizada del DR 001 para entender su funcionamiento bajo diferentes escenarios, tales como cambios en el patrón de cultivos, en la operación y mantenimiento, cambio climático, entre otros posibles escenarios.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Analizar la red de distribución presurizada de la sección 01 del distrito de riego 001, Pabellón de Arteaga en un escenario de precipitación ausente, considerando las condiciones actuales de operación, patrón de cultivos actual y planeación del recurso agua, con la finalidad de mejorar la operación.

3.2. Objetivos Específicos

- Generar los requerimientos de riego del patrón de cultivos actual del distrito de riego.
- Estimar las superficies máximas posibles del patrón de cultivos actual en condiciones de precipitación ausente durante el ciclo agrícola, considerando como limitante el volumen concesionado.
- Analizar la red de la sección 01 en una distribución por turnos y una distribución a demanda libre aplicando la primera fórmula generalizada de Clément a una probabilidad de suministro de 90, 95 y 99%.

4. HIPÓTESIS

4.1. Hipótesis General

El cambio en el patrón de cultivos que se tienen de manera constante dentro del distrito de riego 001, la apertura de hidrantes fuera de su horario de riego y la ausencia de precipitación durante el ciclo agrícola, afecta la capacidad de suministro de la red presurizada actualmente instalada en la sección 01 ocasionando pérdida de presión en los hidrantes.

4.2. Hipótesis Específicas

- Actualizar los requerimientos de riego del patrón de cultivos actual permitirá establecer las superficies máximas por cada cultivo, con proyecto terminado.
- Establecer las superficies máximas del patrón de cultivos actual permitirá saber que cultivos deben reducirse en superficie en condiciones de precipitación, sin rebasar el volumen concesionado de 32.5 hm³ anuales por parte de la presa Calles.
- Analizar la red presurizada de la sección 01, bajo condiciones de distribución por turnos y a demanda libre permitirá saber si la red presurizada instalada actualmente en la sección 01 tiene la capacidad hidráulica para operar a demanda libre o apegarse a una distribución por turnos.

5. REVISIÓN DE LITERATURA

Valdez Torres, *et al.*, (2017) menciona que la mayor parte del agua dulce disponible en México se destina al riego agrícola, principalmente a los 86 distritos de riego. Si bien la importancia de los distritos de riego en la producción de alimentos es ampliamente reconocida, en su operación persisten una serie de problemas relacionados con su infraestructura, operación y administración, los cuales pueden explicarse por una gestión ineficiente de los mismos.

En México, los recursos hidráulicos, además de ser escasos, se encuentran mal distribuidos, ya que en las planicies costeras, a excepción de la Península de Baja California y Sonora, hay abundancia de agua, mientras que en el resto del país es poca o muy escasa (Mejía Saénz, *et al.*, 2002).

5.1. Antecedentes del Proyecto Modernización Integral del D.R. 001

Maciel Pérez, *et al.*, (2009) detallan que en el año 2004 el gobierno del estado a través de la Comisión para el Desarrollo Agropecuario del Estado de Aguascalientes (CODAGEA) y con el apoyo de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), apoyan la implementación del Proyecto “**Modernización Integral del Distrito de Riego 001**” e inician obras con el entubamiento de las redes de conducción desde la obra de toma de la presa “Presidente Calles” hasta la colocación de hidrantes o tomas parcelarias; con una inversión inicial cercana a los 1,100 millones de pesos para beneficiar a más de 2,000 usuarios.

El volumen concesionado de 32,5 hm³, por parte de la CONAGUA, a la Asociación de Usuarios Junta de Aguas del Distrito de Riego 001 Pabellón, A.C., para regar una superficie de 6,100 hectáreas, dentro del cual se incluye el intercambio de alrededor de 55 pozos profundos que se encuentran dentro del distrito de riego.

El objetivo más importante de la modernización (Maciel Pérez, *et al.*, 2009) fue el uso eficiente del agua, es decir, ahorrar agua, ya que actualmente por cada 100 litros que se extraen de la presa se pierden cerca de 50 litros en su recorrido hasta la parcela. Con el entubamiento y el sistema de riego por goteo, la eficiencia aumentara por encima del

76% y se puede incrementar a más del 90% una vez que los usuarios hayan adoptado la nueva manera de regar.

El proyecto contempla regar 6,100 hectáreas que dispondrán agua los 365 días del año y está diseñado para riego diario, si así lo requieren, con 5 turnos de 4 horas 24 minutos y un gasto de 3.84 m³/s en la obra de toma.

Infraestructura proyectada

- **Obra de toma**

Está conectado a una de las 4 tomas de la presa Calles, constituido por 1 válvula de compuerta, 2 válvulas mariposa, un medidor de flujo de precisión, by-pass para el llenado gradual de la línea de conducción y rejilla prefiltrado aguas arriba de la obra de toma para remoción de sólidos mayores a 2”.

- **Conducción de tramo muerto**

Es una línea de conducción muerta de 9 kilómetros de tubería de Poliéster Reforzado de Fibra de Vidrio (PRFV) de 1.8 a 1.5 metros de diámetro, de una presión nominal 10 kg/cm², con una capacidad ordinaria de 3,840 lps.

- **Cruces subacuáticos**

El trayecto de la línea de conducción muerta, hace dos cruces subacuáticos de 150 y 300 m de longitud respectivamente con dos líneas de tubería de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) de 1.2 m (48”) de diámetro, sumergidos hasta el fondo de la Presa Jocoqui a una profundidad de 30 m. En la entrada del Cañón del Brujo (el primer cruce) se cuenta con 4 válvulas reguladoras de presión con el fin de reducir presión aguas abajo y evitar sobrepresiones que pudieran dañar la red.

- **Sistema de filtrado**

Aproximadamente a 7.5 km de conducción el agua llega a un plataforma de filtrado de 320 tinas de grava-arena con capacidad de filtrar hasta 7,000 lps quedando así removida toda la materia orgánica y sólidos en suspensión mayores a 80 micrones de manera que sea apta para uso en cualquier sistema de riego por goteo. Posterior al sistema de filtrado, el agua limpia es conducida a través de la línea de tubería de PRFV dentro de un túnel de aproximadamente 1.4 km de longitud.

- **Red de distribución principal**

En la zona de riego para la distribución del agua se cuenta con una red de 54 km de longitud conformada por dos circuitos cerrados de tubería de PRFV de 1.6 a 0.6 m de diámetro que garantiza la entrega del agua a las 19 secciones de riego que fue dividido el distrito de riego. Esta red cuenta con válvulas, medidores de flujo, bifurcaciones y puntos de seccionamiento, los cuales permiten detección de fugas, así como hacer reparaciones en caso de fallas en alguna parte del sistema sin dejar de suministrar el flujo de la misma.

- **Red de distribución secundaria**

La red de distribución principal cuenta con bifurcaciones secundarias equipadas con válvulas mariposa, válvulas reductoras de presión y medidores de flujo que permiten la entrega del flujo que permiten la entrega del flujo necesario y a la presión adecuada para cada una de las 19 secciones de riego para después ser conducida a través de redes de tuberías de Policloruro de Vinilo (PVC) en circuito cerrado que suman un total de 441 km de longitud de tuberías de 4”(100 mm) a 24”(630 mm), de presiones nominales que varían entre 5 y 7 kg/cm², para hacer la entrega del agua requerida a cada uno de los 2,439 hidrantes que cubren el distrito de riego.

- **Hidrate parcelario**

Dispositivo que cuenta con un medidor de flujo, válvulas reductoras-sostenedoras de presión, filtro de seguridad, inyector de fertilizante tipo véntury que opera con la carga hidráulica disponible del sistema.

- **Telemetría**

Consiste en 27 puntos en puntos estratégicos para cubrir la zona de riego y la línea de conducción, las cuales permiten el control de las válvulas y monitoreo del flujo y presión, al igual que con cámaras de video y un medidor de nivel de la presa, con opción de monitorear y controlar los 2,439 hidrantes.

El sistema opera sin ningún costo de energía, ya que utiliza la carga estática disponible de la presa y aprovechando el desnivel topográfico.

Los requerimientos de riego netos fueron determinados para el proyecto ejecutivo por el método de Blaney y Criddle modificado por Phelan. La capacidad del sistema se determinó a partir del Cuadro 5.1 y Cuadro 5.2, tomando como lámina de diseño 4.90 mm/día (lámina requerida por el cultivo de máxima demanda) una eficiencia del sistema de 98% y un tiempo de operación de 22 horas, dando un caudal requerido en la obra de toma de 3,840 lps.

Cuadro 5.1. Lámina de riego diaria promedio en el proyecto ejecutivo.

Mes	Lámina de riego diaria promedio (mm/día)					Promedio
	Lechuga	Pimiento	Tomate	Coliflor	Ajo	
Mar	-	-	-	-	2.16	2.16
Abr	-	-	-	-	4.32	4.32
May	-	-	-	-	4.9	4.9
Jun	-	-	-	-	4.54	4.54
Jul	0.83	-	-	-	2.32	1.57
Ago	4.22	-	-	-	0.24	2.23
Sep	3.77	1.87	-	-	-	2.82
Oct	0.52	4.58	3.48	3.18	-	2.94
Nov	-	4.67	4.63	4.68	-	4.66
Dic	-	4.13	4.1	3.66	-	3.96
Ene	-	3.3	2.5	1.25	-	2.35
Feb	-	3.66	2.77	-	-	3.21
Mar	-	0.32	-	-	-	0.32

Fuente: Proyecto Ejecutivo “Modernización Integral del Distrito de Riego 001”.

Cuadro 5.2. Volúmenes por cultivo en el proyecto ejecutivo.

Cultivo	Superficie (ha)	% de Superficie	Volumen neto (hm ³)	Eficiencia (%)	Volumen bruto (hm ³)
Lechuga	700	11.50	2.00	98	2.00
Pimiento	1,900	31.10	12.21	98	12.50
Tomate	1,000	16.40	4.55	98	4.60
Coliflor	600	9.80	2.35	98	2.40
Ajo	1,900	31.10	10.74	98	11.00
Total	6,100	100.00	31.85		32.50

Fuente: Proyecto Ejecutivo “Modernización Integral del Distrito de Riego 001”.

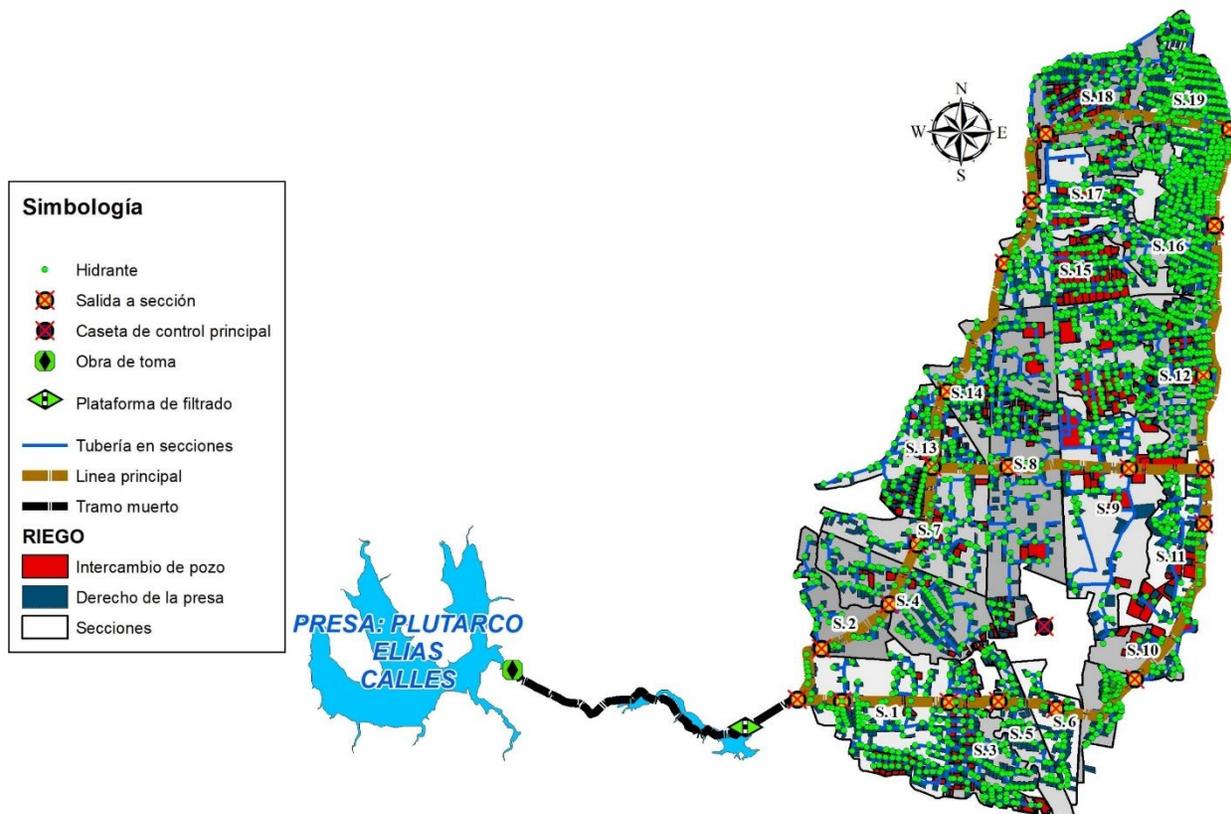


Figura 5.1. Proyecto de modernización y tecnificación del DR 001, (Jirón, 2018).

5.2. Avances del Proyecto Modernización Integral del D.R. 001

Jirón Barrios, (2018) señala que se tiene completamente instalados los nueve km que conforman el tramo muerto, y un 72% de la red de conducción principal nivel distrito, teniendo ya completo el primer anillo, faltando por instalar cerca de 15 de los 54 km que se tenían proyectados, con lo cual se concluiría el cierre del segundo circuito, por lo que, con excepción de la sección 12, las primeras 15 secciones ya cuentan con abastecimiento de agua de riego presurizado, mismas que de igual forma, ya cuentan con estructura para salida sección o bifurcaciones para distribuir el agua a presión con tubería de PVC a nivel sección. En cuanto a tubería de PVC, de igual forma a excepción de las secciones 12 y 15 que cuentan con algunos tramos ya instalados, en las primeras 14 secciones, ya se tiene el 100 % de la tubería de distribución a nivel sección (Cuadro 5.3). En lo que respecta a la tecnificación parcelaria, a la fecha se han ejecutado la tecnificación de un poco más de 3,000 hectáreas, las cuales se encuentran distribuidas en las primeras 15 secciones y parte de la sección 17 (Cuadro 5.4 y Figura 5.2).

Cuadro 5.3. Avances de construcción del proyecto.

Tipo de conducción	Longitud proyectada (km)	Longitud construida (km)	Longitud faltante (km)
Tramo muerto PRFV	9.05	9.05	0.00
Tubería principal PRFV	54.46	39.01	15.45
Tubería secundaria PVC	441.06	283.88	157.18

Cuadro 5.4. Avances de tecnificación del DR 001.

Tipo de riego	Superficie (ha)		Porcentaje de avance
	Proyectado	Avance	
Convenio de intercambio	1,351.88	27.30	2.00%
Derecho de agua superficial	4,748.12	3,028.80	63.77%
Total	6,100.00	3,056.10	50.08%

Fuente: (Jirón Barrios, 2018).

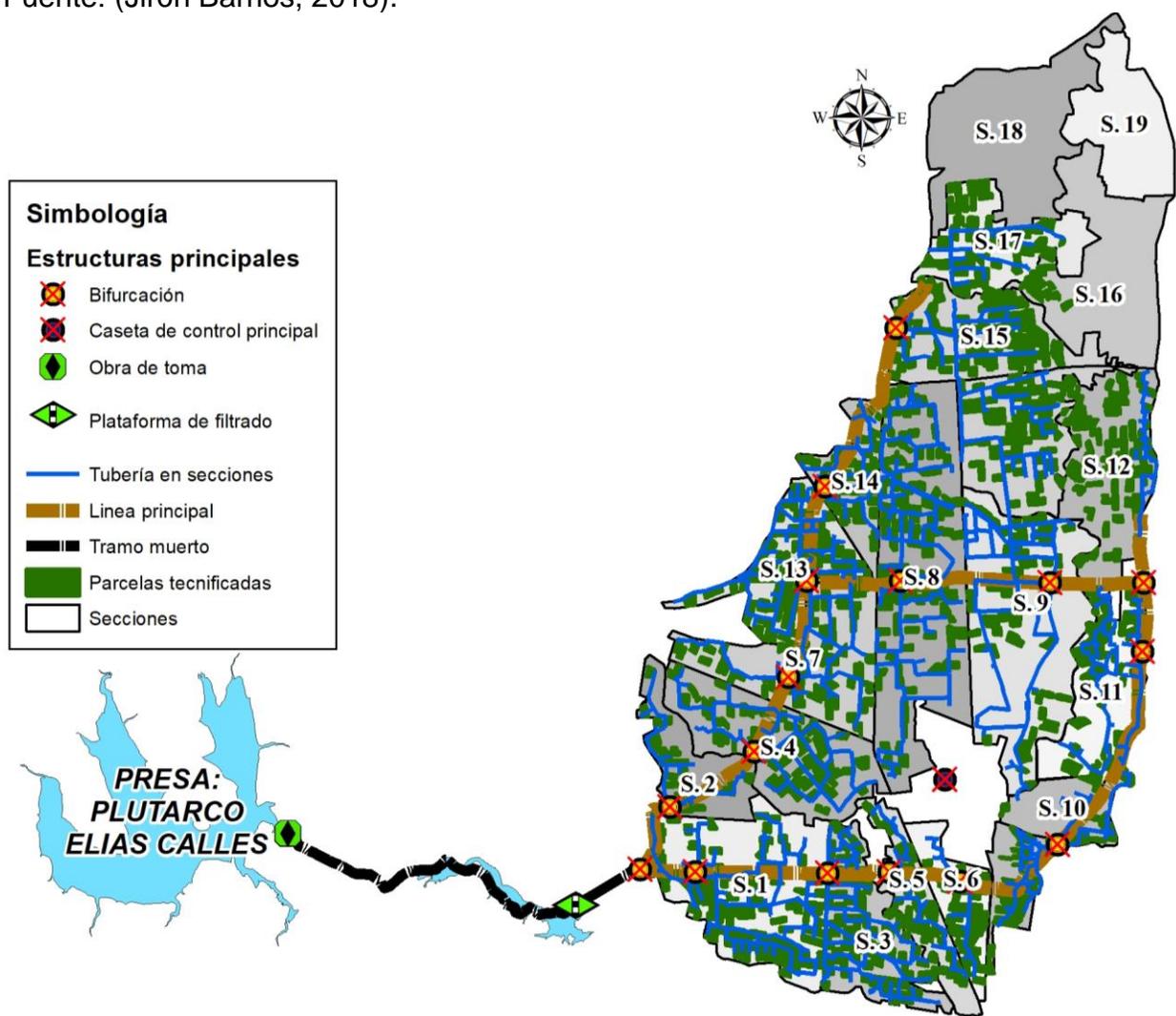


Figura 5.2. Avances del proyecto en el DR 001, (Jirón, 2018).

La operación del sistema se inició en el ciclo primavera-verano del 2010 con una superficie aproximada de 400 ha, a la fecha el sistema riega aproximadamente 1,300 ha, la operación es de forma manual, esto por falta de recursos para concluir las obras; dejando la adquisición de los equipos para la telemetría al final, que permiten la automatización y control remoto de válvulas, hidrantes y otros componentes del sistema, de igual manera no se cuenta con personal capacitado que opere el sistema, por ello la jefatura del DR 001 junto con la ACU, han subcontratado una empresa privada que los apoye con estos trabajos, por lo que es esta empresa externa es la que actualmente lleva a cabo la elaboración de calendarios, planes de riego y operación del sistema.

5.3. Diseño Agronómico

El diseño agronómico es el planteamiento general del sistema de riego en relación con las condiciones del medio (fuente de abastecimiento, suelo, cultivo, clima, parcela, etc.), con la finalidad primordial de determinar los parámetros del riego (lámina, intervalo, tiempo, etc.); garantizando que la instalación sea capaz de suministrar, las necesidades de riego del cultivo(s) durante el periodo de máximo consumo (Ángeles Montiel, 2012).

5.3.1. Evapotranspiración de referencia (ET_0)

Allen, *et al.*, (2006) la definen como la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia (correspondiente a un cultivo hipotético pasto o alfalfa con características específicas), que ocurre sin restricciones de agua, a la que denomina ET_0 ; este concepto se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo.



Figura 5.3. Evapotranspiración de referencia (ET_0), (Allen, *et al.*, 2006).

Ruíz Álvarez, *et al.*, (2014) señala que la gestión de los recursos hídricos requiere información precisa de la ET_0 , variable meteorológica indispensable en la explicación de procesos ambientales físicos.

Existen varios métodos (Aguilera Contreras y Martínez Elizondo, 1996) para estimar la evapotranspiración, los cuales se han clasificado en métodos directos que proporcionan información directa del total de agua requerida por los cultivos, utilizando instrumentos para su medición, y aportan valores muy apegados a la realidad, y los indirectos que proporcionan una estimación del requerimiento de agua a través de todo el ciclo vegetativo mediante la utilización de fórmulas empíricas.

Doorenbos y Pruitt, (1977) publicaron en el boletín 24 de la Serie FAO Riego y Drenaje “Necesidades de agua de los cultivos” algunas metodologías para el cálculo de la ET_0 :

- El método de Penman modificado se consideró que ofrecía los mejores resultados con el mínimo error posible con relación a un cultivo de referencia (pasto).
- El método del tanque de evaporación, ofreciese estimaciones aceptables, en función de la localización del tanque.
- El método de la radiación fue sugerido para las áreas donde los datos climáticos disponibles incluían la medición de las horas de insolación, la nubosidad o la radiación, pero no la velocidad del viento ni la humedad atmosférica.
- El método de Blaney-Cridle para las áreas donde los datos climáticos disponibles incluían solamente datos de temperatura del aire.

Actualmente, el único modelo aceptado y estandarizado universalmente para estimar la ET_0 es el método de Penman-Monteith modificado por la FAO, este modelo fue validado y avalado por la Comisión Internacional de Riego y Drenaje y la Organización Meteorológica Mundial (Allen *et al.*, 1998) citado por (Ruíz Álvarez, *et al.*, 2014).

Allen, *et al.*, (2006) derivaron de la ecuación original de Penman-Monteith, de las ecuaciones de la resistencia aerodinámica y superficial, a partir de un cultivo hipotético con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia superficial de 70 s m^{-1} y un albedo de 0.23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado.

La ecuación utiliza datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento. Para asegurar la precisión del cálculo, los datos climáticos deben ser medidos o ser convertidos a 2 m de altura.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (5.1)$$

Donde:

- ET_o = Evapotranspiración de referencia [mm día^{-1}]
- R_n = Radiación neta en la superficie del cultivo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]
- R_a = Radiación extraterrestre [mm día^{-1}]
- G = Flujo del calor de suelo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]
- T = Temperatura media del aire a 2 m de altura [$^{\circ}\text{C}$]
- u_2 = Velocidad del viento a 2 m de altura [m s^{-1}]
- e_s = Presión de vapor de saturación [kPa]
- e_a = Presión real de vapor [kPa]
- $e_s - e_a$ = Déficit de presión de vapor [kPa]
- Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]
- γ = Constante psicrométrica [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]

A diferencia de los demás metodologías para la estimación de la ET_o , la ecuación (5.1) permite hacer estimaciones a nivel de horas, los procedimientos para el cálculo de los diversos parámetros que la fórmula requiere se detallan en el boletín 56 de la Serie FAO Riego y Drenaje “Evapotranspiración del cultivo”.

5.3.2. Coeficiente de cultivo (K_c)

Los coeficientes de desarrollo del cultivo (K_c) definen la influencia del cultivo sobre la evapotranspiración. (Villalobos Reyes, *et al.*, 2005).

Vicente Ángeles, (2012) menciona que el K_c expresa la relación entre la evapotranspiración del cultivo en consideración (ET_c) y la evapotranspiración de referencia (ET_o) en una etapa de crecimiento concreta.

El K_c incorpora las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo; durante el crecimiento del cultivo la variación del K_c va expresando los cambios en la vegetación y en el grado de cobertura del suelo (Allen, *et al.*, 2006).

Esta variación se representa por la curva del K_c (Figura 5.4) para describir y construir la curva: se requieren los K_c correspondientes a la etapa inicial ($K_{c\ ini}$), la etapa de mediados de temporada ($K_{c\ med}$) y la etapa final ($K_{c\ fin}$).

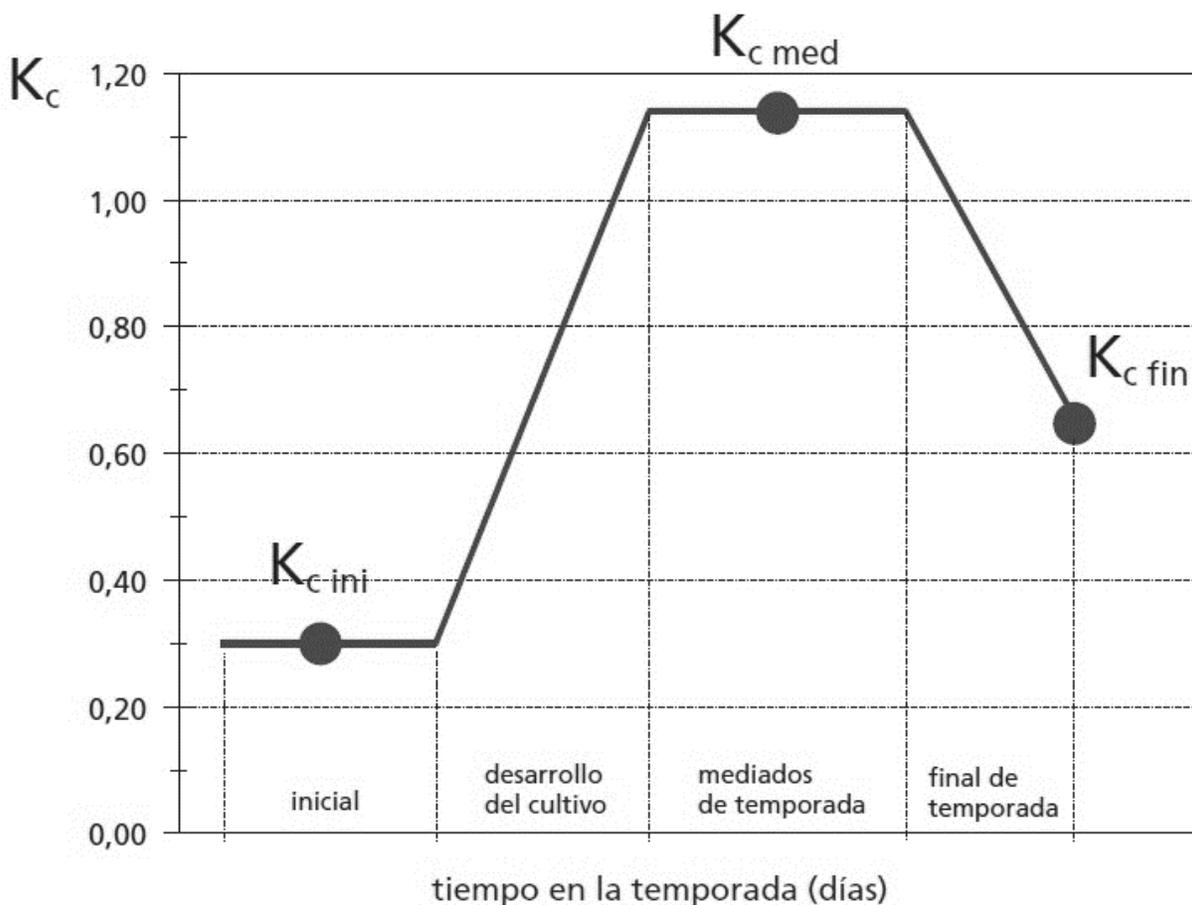


Figura 5.4. Curva del coeficiente del cultivo, (Allen, *et al.*, 2006).

5.3.3. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c)

Allen, *et al.*, (2006) la define como la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas reinantes, a la que denomina ET_c .

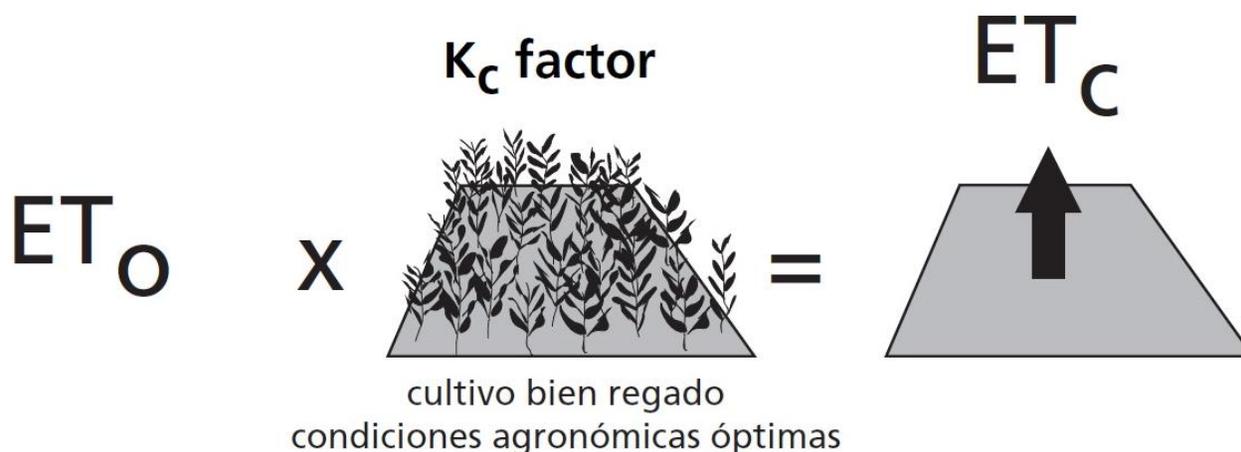


Figura 5.5. Evapotranspiración del cultivo (ET_c), (Allen, et al., 2006).

El valor de ET_c es calculado a través del enfoque del coeficiente del cultivo, donde los efectos de las condiciones del tiempo atmosférico son incorporados en la ET_0 y las características del cultivo son incorporadas en el K_c (Allen, et al., 2006).

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (5.2)$$

Donde:

- ET_c = Evapotranspiración del cultivo [mm día^{-1}]
- K_c = Coeficiente del cultivo del mes [adimensional]
- ET_0 = Evapotranspiración de referencia [mm día^{-1}]

5.3.4. Corrección a evapotranspiración de cultivo (ET_c Ajustada)

Franco Salas y Pérez Urrestarazu, (2007) señalan que el agua que se aplica solo a una fracción de la superficie del suelo, la evapotranspiración es distinta que cuando el agua se aplica a toda la superficie, el efecto de la localización y la alta frecuencia de aplicación suponen, con respecto a otros sistemas de riego, una disminución de la evaporación y un aumento de la transpiración, por lo que los requerimientos netos se corrigen.

Corrección por localización (F_L)

Vicente Ángeles, (2012) señala que en microaspersión y goteo únicamente se humedece una porción del suelo, dado que en cultivos jóvenes o ampliamente espaciados, sólo una porción de la superficie se da la evapotranspiración del cultivo y en las estimaciones

convencionales de ET_c , se asume que hay pérdidas de agua de la zona húmeda no cubierta por el cultivo o transpiración de plantas no deseadas (malezas). Pizarro Cabello, (1996) menciona que se han propuesto numerosos procedimientos que corrigen la ET_c por el efecto de localización, el más práctico es el que se basa en la fracción de área sombreada por el cultivo (F_{SOM}) como se muestra en la Figura 5.6.

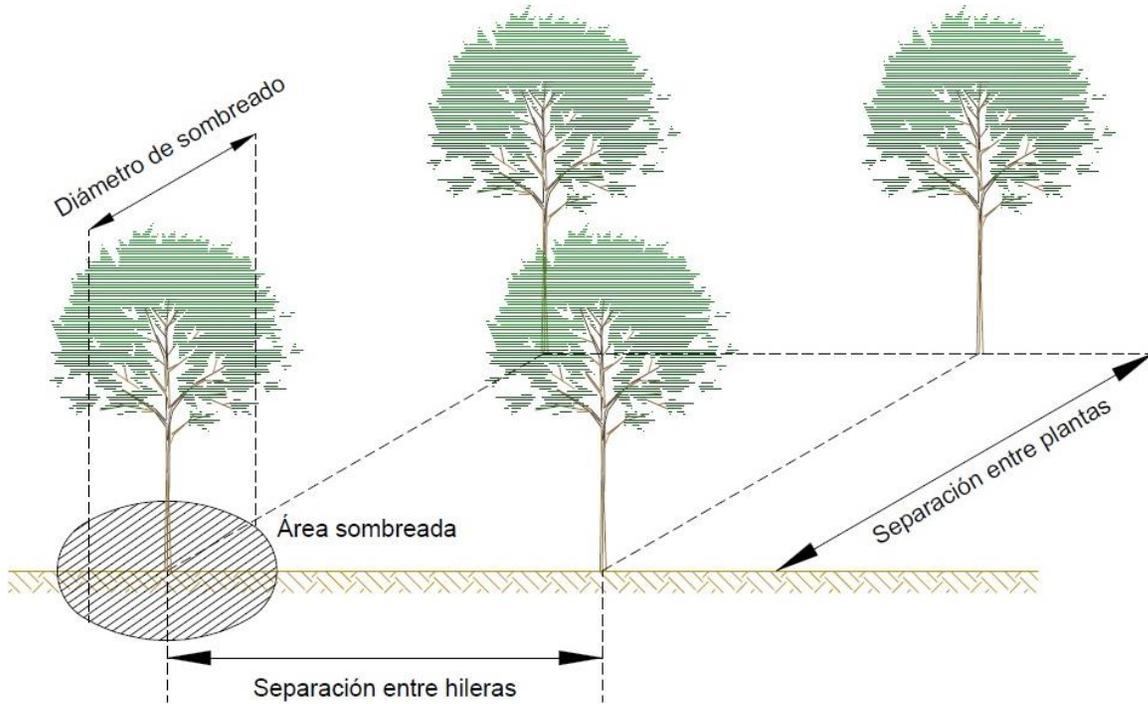


Figura 5.6. Fracción de área sombreada.

$$F_{SOM} = \frac{A_S}{S_{MP}} \quad (5.3)$$

Donde:

- F_{SOM} = Fracción de área sombreada [adimensional]
- A_S = Área sombreada por la planta o proyección de la copa [m^2]
- S_{MP} = superficie del marco de plantación [m^2]

Estos métodos suponen que a efectos de evapotranspiración el área sombreada se comporta casi igual que la superficie del suelo en riegos no localizados, mientras que el área no sombreada elimina el agua con una intensidad mucho menor. Diversos autores (Pizarro Cabello, 1996) han estudiado la relación entre F_L y F_{SOM} obteniendo las fórmulas siguientes:

Aljibury

$$F_L = 1.34F_{SOM} \quad (5.4)$$

Decroix

$$F_L = 0.1 + F_{SOM} \quad (5.5)$$

Hoare

$$F_L = F_{SOM} + 0.5(1 - F_{SOM}) \quad (5.6)$$

Keller

$$F_L = F_{SOM} + 0.15(1 - F_{SOM}) \quad (5.7)$$

Donde:

- F_L = Factor de riego localizado [adimensional]

Pizarro Cabello, (1996) señala que estas fórmulas la relación entre F_L y F_{SOM} es lineal, sin embargo en la realidad tal relación no se cumple y que para valores menores de F_{SOM} , las necesidades calculadas pueden ser menores que las reales, por lo que es recomendable que al aplicar estas fórmulas no perder de vista su significado real. Como no está claro cuál de ellos es el mejor, lo que se suele hacer es calcularlo por todos los métodos, eliminar los dos valores extremos y sacar la media de los otros dos.

Corrección climática (F_C)

Pizarro Cabello, (1996) menciona que la ET_0 utilizada en el cálculo equivale al valor medio del periodo estudiado, por lo que debe ser multiplicada por un factor de corrección climática (F_C), pues de otra forma las necesidades calculadas serían también un valor medio, lo que quiere decir que aproximadamente la mitad de los años el valor calculado será insuficiente; se adopta el criterio de Hernández Abreu de multiplicar la ET_C por un factor de corrección comprendido entre 1.15 y 1.20.

Corrección por advección (F_A)

Los efectos del movimiento de aire, tienen un efecto considerable en el microclima del cultivo, ya que este microclima depende, de la extensión de la superficie regada y de las características de los terrenos colindantes (Franco Salas y Pérez Urrestarazu, 2007). La corrección (F_A) a aplicar depende del tamaño de la zona de riego, como se muestra en

la Figura 5.7 tomada del boletín 24 de la Serie FAO Riego y Drenaje “Necesidades de agua de los cultivos” por Pizarro Cabello, (1996). Sin embargo, es un factor muy difícil de estimar, normalmente se toma de tablas o de gráficas cuando esto es posible, y cuando no es posible, simplemente no se considera dentro del cálculo.

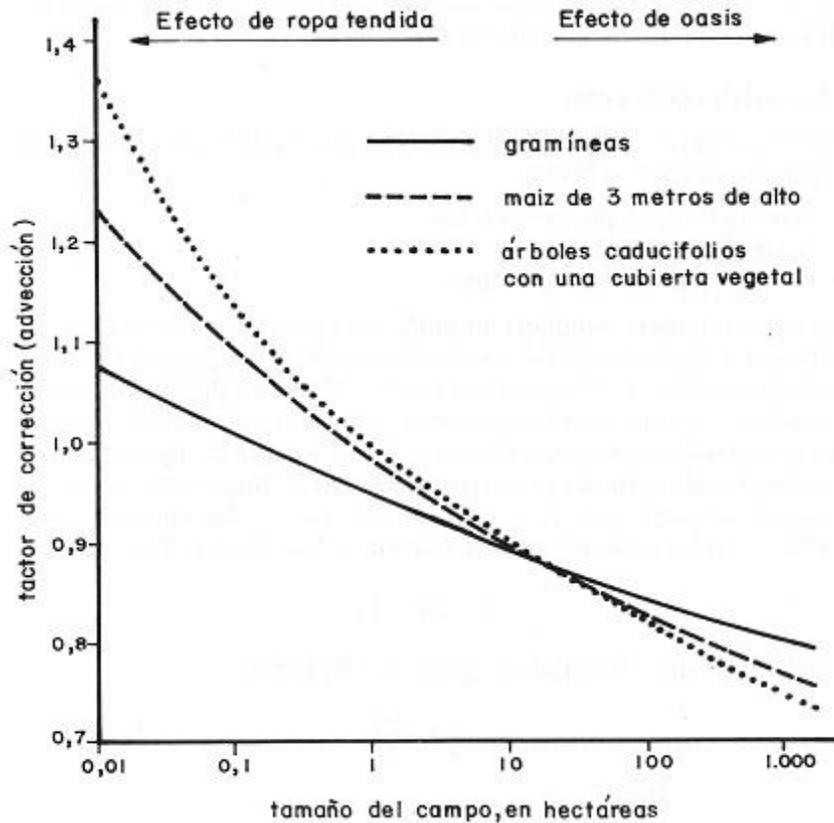


Figura 5.7. Variación por advección, (Pizarro, 1996).

Por lo que para la corrección de los requerimientos de riego se multiplica cada factor de corrección por el requerimiento de riego neto:

$$ET_{C \text{ Ajustada}} = ET_C F_L F_C F_A \quad (5.8)$$

Donde:

- $ET_{C \text{ Ajustada}}$ = Evapotranspiración del cultivo ajustada [mm día^{-1}]
- ET_C = Evapotranspiración del cultivo [mm día^{-1}]
- F_L = Factor de riego localizado [adimensional]
- F_C = Corrección climática [adimensional]
- F_A = Corrección por advección [adimensional]

5.3.5. Precipitación efectiva (P_{EF})

Dastane, (1978) define la precipitación efectiva (P_{EF}) como el requerimiento de agua de los cultivos, que es útil directamente y/o indirectamente para su producción en el sitio donde precipita. El método más preciso para determinar la precipitación efectiva es a través de observación en campo. Al igual que para el cálculo de la ET_0 para la precipitación efectiva existen varios métodos empíricos para su determinación, Smith, (1992) público en el boletín 46 de la Serie FAO Riego y Drenaje “*Cropwat a computer program for irrigation planning and management*” las siguientes metodologías:

Porcentaje fijo

Es un porcentaje fijo de la precipitación real y se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_{EF} = aP_{mensual} \quad (5.9)$$

Donde:

- P_{EF} = Precipitación efectiva del mes [mm]
- $P_{mensual}$ = Precipitación mensual [mm]
- a = Porcentaje fijo [decimal]

Donde “a” es un porcentaje fijo que debe dar el usuario para dar cuenta de las pérdidas por escorrentía y percolación profunda. Normalmente las pérdidas son alrededor del 10 al 30%, por lo tanto $a = 0.7 - 0.9$.

Precipitación confiable (ecuación FAO/AGLW)

Un análisis llevado a cabo para diferentes climas semiáridos y subhúmedos, por el Servicio de Aguas de la FAO para estimar la precipitación confiable, desarrollo una formula empírica a partir del efecto combinado de la precipitación confiable (80% de probabilidad de excedencia) y las pérdidas estimadas debido a la Escorrentía Superficial (ES) y a la Percolación Profunda (PP). Esta fórmula puede ser utilizada para fines de diseño, en caso que se requiera el valor de la precipitación con 80 % de probabilidad de excedencia:

$$P_{EF} = 0.6P_{mensual} - 10 \quad P_{mensual} \leq 70 \text{ mm} \quad (5.10)$$

$$P_{EF} = 0.8P_{mensual} - 24 \quad P_{mensual} > 70 \text{ mm} \quad (5.11)$$

Donde:

- P_{EF} = Precipitación efectiva del mes [mm]
- $P_{mensual}$ = Precipitación mensual [mm]

USDA Soil Conservation Service

Ecuación desarrollada por el USCS:

$$P_{EF} = \frac{P_{mensual}(125 - 0.2P_{mensual})}{125} \quad P_{mensual} \leq 250 \text{ mm} \quad (5.12)$$

$$P_{EF} = 125 + 0.1P_{mensual} \quad P_{mensual} > 250 \text{ mm} \quad (5.13)$$

Donde:

- P_{EF} = Precipitación efectiva del mes [mm]
- $P_{mensual}$ = Precipitación mensual [mm]

Coefficientes de efectividad de Blaney y Criddle

Blaney y Criddle (1962) citado por (Aguilera Contreras y Martínez Elizondo, 1996) proponen un método que consiste en aplicar un coeficiente de aprovechamiento diferente a cada pulgada de lluvia observada, según se muestra en la siguiente tabla.

Cuadro 5.5. Coeficiente de lluvia efectiva según Blaney y Criddle.

Lluvia total observada		Lluvia considerada efectiva		
		Coeficiente de aprovechamiento	Acumulación total	
en pulgadas	en mm			Pulgadas
1	25	0.95	0.95	23.7
2	50	0.90	1.85	46.3
3	75	0.82	2.67	67.0
4	100	0.65	3.32	83.0
5	125	0.45	3.77	94.5
6	150	0.25	4.02	100.5
> 6	> 150	0.05	-	-

Fuente: (Aguilera Contreras y Martínez Elizondo, 1996).

Conforme la lluvia acumulada va aumentando, el coeficiente de aprovechamiento va disminuyendo, hasta que para más de 150 mm de lluvia aproximadamente 6", este coeficiente es de sólo un 5%.

5.3.6. Requerimiento de riego neto (RR_N)

Doorenbos y Pruitt, (1977) mencionan que los métodos para estimar los requerimientos de agua de los cultivos se utilizan debido a la dificultad de obtener mediciones en campo; a menudo los métodos deben aplicarse en condiciones climáticas y agronómicas muy diferentes de aquellas en las que se desarrollaron originalmente, sin embargo, con frecuencia se necesitan datos sobre los requerimientos de riego de los cultivos a corto plazo para la planificación de los proyectos.

Las metodologías, ampliamente aceptadas para estimar el requerimiento de agua de los cultivos, se han conciliado en dos conceptos muy conocidos, el K_c y ET_o , siendo, la evapotranspiración del cultivo (ET_c) el producto de ambas (Villalobos Reyes, *et al.*, 2005). Los requerimientos de riego netos vienen dada por la siguiente ecuación:

$$RR_N = ET_{C \text{ Ajustada}} - P_{EF} \quad (5.14)$$

Donde:

- RR_N = Requerimiento de riego neto [mm día^{-1}]
- $ET_{C \text{ Ajustada}}$ = Evapotranspiración del cultivo ajustada [mm día^{-1}]
- P_{EF} = Precipitación efectiva [mm día^{-1}]

Para efectos de diseño, las aportaciones por precipitación efectiva no se consideran, por lo que se considera la ecuación (5.15) para fines de diseño o análisis:

$$RR_N = ET_{C \text{ Ajustada}} \quad (5.15)$$

5.3.7. Requerimiento bruto o total (RR_B)

Las necesidades totales son mayores que las necesidades netas, ya que es preciso aportar cantidades adicionales para compensar las pérdidas causadas por percolación profunda, por salinidad y por uniformidad de riego.

Corrección por aguas salinas

En México las áreas de producción agrícola que presentan mayores problemas de salinidad son los DR, la salinidad es considerada un problema serio ya que aproximadamente entre el 26 y el 30% del área está afectada por exceso de sales en diferente grado y por manto freático superficial (Fernández, 1990, IMTA, 1997) citada por (Pulido Madrigal, *et al.*, 2010). Monge Redondo, (2018) menciona que la conductividad eléctrica (CE) sirve para medir la concentración total de sales en una solución, y especificar si la CE es del agua de riego o de la solución del suelo.

Cuadro 5.6. Salinidad del suelo según la CE del extracto de saturación del suelo.

Tipo de suelo	Salinidad	CE (dS/m)	Efectos
Normales	Muy ligera	0 a 2	Casi nulos
	Ligera	2 a 4	Puede afectar los cultivos sensibles
Salinos	Mediana	4 a 8	La mayoría de los cultivos son afectados
	Fuerte	8 a 16	Solo prosperan cultivos tolerantes
	Muy fuerte	> 16	Solo se desarrollan cultivos muy tolerantes

Fuente: (Monge Redondo, 2018).

Monge Redondo, (2018) menciona que cuando se riega por goteo existe un riesgo en el momento que comienzan las lluvias, ya que si no llueve lo suficiente como para desplazar las sales por debajo de la zona radicular, el agua de lluvia puede introducir a la zona radicular las sales acumuladas en la parte superior del bulbo húmedo, por ello se recomienda mantener riego activo durante las primeras lluvias de la temporada, si estas son débiles, para evitar la entrada de las sales a la zona ocupada por las raíces. Ya que la evapotranspiración remueve solamente el agua hacia la atmosfera, dejando las sales en el suelo y concentrando más la solución, es necesario realizar acciones que permitan remover las sales que se acumulen, Vicente Ángeles, (2012) señala que el método más práctico para controlar la concentración de sales, para evitar situaciones desfavorables para el desarrollo de los cultivos, es el lavado del suelo (lavado de sales).

Lavado de sales

La fracción de lavado de sales (F_{LS}) es la cantidad de agua extra que se requiere para disolver las sales y desplazarlas de las zonas ocupadas por las raíces de las plantas

(Monge Redondo, 2018). El lavado depende del tipo de cultivo, del tipo de riego y de la salinidad del suelo, esta práctica cobra mayor importancia en los riegos localizados.



Figura 5.8. Acumulación de sales en riego por goteo, (Monge, 2018).

El cálculo de las necesidades de lavado se realiza según el valor de la salinidad del agua de riego, del valor de la tolerancia de los cultivos a la salinidad y del tipo riego.

Lavado en riego por goteo:

$$F_{LS} = \frac{CE_w}{2 CE_{es, max}} \quad (5.16)$$

Lavado en riego por aspersión o gravedad:

$$F_{LS} = \frac{CE_w}{5 CE_{es, max} - CE_w} \quad (5.17)$$

Donde:

- F_{LS} = Fracción de lavado de sales [adimensional]
- CE_w = Conductividad eléctrica del agua de riego [mmhos/cm]
- $CE_{es, max}$ = Máxima conductividad del extracto de saturación del suelo deseada [mmhos/cm]

Para los valores de máxima conductividad del extracto de saturación del suelo, Ayers y Westcot, (1976) publicaron en el boletín 29 de la Serie FAO Riego y Drenaje “*Water quality for agriculture*” para ciertos cultivos los siguientes valores.

Cuadro 5.7. Tolerancia de los cultivos a las sales según el rendimiento.

Tipo de cultivo	Cultivo	100%		90%		75%		50%		Máx
		Ce _s dS/m	CE _w dS/m	CE _s dS/m						
Extensivos	Algodón	7.7	5.1	9.6	6.4	13.0	8.4	17.0	12.0	27.0
Extensivos	Arroz	3.0	2.0	3.8	2.6	5.1	3.4	7.2	4.8	11.5
Extensivos	Cacahuete	3.2	2.1	3.5	2.4	4.1	2.7	4.9	3.3	6.5
Extensivos	Cártamo	5.3	3.5	6.2	4.1	7.6	5.0	9.9	6.6	14.5
Extensivos	Cebada	8.0	5.3	10.0	6.7	13.0	8.7	18.0	12.0	28.0
Extensivos	Frijol (Grano)	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	6.5
Extensivos	Guisantes	1.3	0.9	2.0	1.3	3.1	2.1	4.9	3.2	9.0
Extensivos	Habas (Grano)	1.6	1.1	2.6	1.8	4.2	2.0	6.8	4.5	12.0
Extensivos	Maíz y Linaza	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10.0
Extensivos	Rem. Azucarera	7.0	4.7	8.7	5.8	11.0	7.5	15.0	10.0	24.0
Extensivos	Sorgo	4.0	2.7	5.1	3.4	7.2	4.8	11.0	7.2	18.0
Extensivos	Soya	5.0	3.3	5.5	3.7	6.2	4.2	7.5	5.0	10.0
Extensivos	Trigo	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.4	13.0	8.7	20.0
Hortícolas	Brócoli	2.8	1.9	3.9	2.6	5.5	3.7	8.2	5.5	13.5
Hortícolas	Camote	1.5	1.0	2.4	1.6	3.8	2.5	6.0	4.0	10.5
Hortícolas	Cebolla	1.2	0.8	1.8	1.2	2.8	1.8	4.3	2.9	7.5
Hortícolas	Coles/Repollo	1.8	1.2	2.8	1.9	4.4	2.9	7.0	4.6	12.0
Hortícolas	Espinacas	2.0	1.3	3.3	2.2	5.3	3.5	8.6	5.7	15.0
Hortícolas	Frijoles (Verdes)	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	6.5
Hortícolas	Lechuga	1.3	0.9	2.1	1.4	3.2	2.1	5.2	3.4	9.0
Hortícolas	Maíz Grano	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10.0
Hortícolas	Melón	2.2	1.5	3.6	2.4	5.7	3.8	9.1	6.1	16.0
Hortícolas	Papa/Patata	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10.0
Hortícolas	Pepino	2.5	1.7	3.3	2.2	4.4	2.9	6.3	4.2	10.0
Hortícolas	Pimientos	1.5	1.0	2.2	1.5	3.3	2.2	5.1	3.4	8.5
Hortícolas	Rábano	1.2	0.8	2.0	1.3	3.1	2.1	5.0	3.4	9.0
Hortícolas	Remolacha de Huerta	4.0	2.7	5.1	3.4	6.8	4.5	9.6	6.4	15.0
Hortícolas	Tomate	2.5	1.7	3.5	2.3	5.0	3.4	7.6	5.0	12.5
Hortícolas	Zanahoria	1.0	0.7	1.7	1.1	2.8	1.9	4.6	3.1	8.0
Forrajeros	Alfalfa	2.0	1.3	3.4	2.2	5.4	3.6	8.8	5.9	15.5
Forrajeros	Alpiste	4.6	3.1	5.9	3.9	7.9	5.3	11.1	7.4	18.0
Forrajeros	Cebada	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.3	13.0	8.7	20.0
Forrajeros	Maíz	1.8	1.2	3.2	2.1	5.2	3.5	8.6	5.7	15.5
Forrajeros	Pasto Sudán	2.8	1.9	5.1	3.4	8.6	5.7	14.4	9.6	26.0
Forrajeros	Trigo	7.5	5.0	9.0	6.0	11.0	7.4	15.0	9.8	22.0
Forrajeros	Zacate	2.0	1.3	3.2	2.1	5.0	3.3	8.0	5.3	14.0
Frutales	Aceituna	2.7	1.8	3.8	2.6	5.5	3.7	8.4	5.6	14.0

Fuente: (Ayers y Westcot, 1976).

Cuadro 5.7. Continuación...

Tipo de cultivo	Cultivo	100%		90%		75%		50%		Máx
		Ce _s dS/m	CE _w dS/m	CE _s dS/m						
Frutales	Aguacate	1.3	0.9	1.8	1.2	2.5	1.7	3.7	2.4	6.0
Frutales	Albaricoque	1.6	1.1	2.0	1.3	2.6	1.8	3.7	2.5	6.0
Frutales	Almendra	1.5	1.0	2.0	1.4	2.8	1.9	4.1	2.7	7.0
Frutales	Ciruelo	1.5	1.0	2.1	1.4	2.9	1.9	4.3	2.8	7.0
Frutales	Durazno	1.7	1.1	2.2	1.4	2.9	1.9	4.1	2.7	6.5
Frutales	Frambuesa	1.0	0.7	1.4	1.0	2.1	1.4	3.2	2.1	5.5
Frutales	Fresa	1.0	0.7	1.3	0.9	1.8	1.2	2.5	1.7	4.0
Frutales	Granada	2.7	1.8	3.8	2.6	5.5	3.7	8.4	5.6	14.0
Frutales	Higo	2.7	1.8	3.8	2.6	5.5	3.7	8.4	5.6	14.0
Frutales	Limón	1.7	1.1	2.3	1.6	3.3	2.2	4.8	3.2	8.0
Frutales	Manzana	1.7	1.0	2.3	1.6	3.3	2.2	4.8	3.2	8.0
Frutales	Naranja	1.7	1.1	2.3	1.6	3.2	2.2	4.8	3.2	8.0
Frutales	Nogal (Nuez)	1.7	1.1	2.3	1.6	3.3	2.2	4.8	3.2	8.0
Frutales	Palmera Datilera	4.0	2.7	6.8	4.5	10.9	7.3	17.9	12.0	32.0
Frutales	Pera	1.7	1.0	2.3	1.6	3.3	2.2	4.8	3.2	8.0
Frutales	Toronja	1.8	1.2	2.4	1.6	3.4	2.2	4.9	3.3	8.0
Frutales	Uva/Vid	1.5	1.0	2.5	1.7	4.1	2.7	6.7	4.5	12.0
Frutales	Zarzamora/ Mora	1.5	1.0	2.0	1.3	2.6	1.8	3.8	2.5	6.0

Fuente: (Ayers y Westcot, 1976).

Las necesidades brutas o totales de riego estarán definidas por la siguiente expresión:

$$RR_B = \frac{RR_N}{CU(K)} \quad (5.18)$$

Donde:

- RR_B = Requerimiento de riego bruto [mm día⁻¹]
- RR_C = Requerimiento de riego neto [mm día⁻¹]
- CU = Coeficiente de uniformidad [decimal]

K es el que resulte menor entre:

- K = EA = Eficiencia de aplicación [decimal]
- K = 1 - F_{LS}

Si se optara por no corregir el requerimiento de riego netos, entonces las necesidades brutas o tales se estiman con el requerimiento de riego neto.

5.4. Modelación Hidráulica

Un primer significado de la palabra modelo nos la da el diccionario: *esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja.*

Martínez, (2002) define un modelo matemático como un problema en el cual la solución no es única y no viene dada exclusivamente por un único planteamiento matemático, sino que incorpora decisiones basadas en criterios espaciales o en reglas dependientes de los datos de partida o de experiencias previas.

En el análisis hidráulico los modelos matemáticos deben tener en cuenta varios aspectos, como el comportamiento de la red a lo largo del tiempo de su operación, el nivel de detalle del mismo; en función de estos parámetros el modelo tendrá unas características u otras.

5.4.1. Clasificación de los modelos

Clasificación en función de la naturaleza del modelo

En función de su naturaleza, se pueden clasificar los modelos (Martínez Solano, 2002):

- **Modelo físico:** Muestra qué es y qué hace el sistema modelado, representa morfológicamente dicho modelo, es decir, describe cuál es su implantación física.
- **Modelo teórico:** Describe la esencia o el concepto de lo que se trata de representar, sin entrar en el detalle de su implantación física (describe qué es y qué hace el objeto a modelar, independientemente del aspecto que tiene).

Clasificación en función de la variable temporal

Para el análisis hidráulico de una red de distribución de agua se puede optar por los modelos estáticos y los modelos dinámicos (Martínez, 2002):

- **Modelo estático:** se analiza la red para un único estado de cargas. Se considera que las variables de cálculo (altura piezométrica y caudal) como las condiciones de contorno (en general, niveles en los depósitos y demandas en los nudos) son constantes a lo largo de todo el cálculo.
- **Modelo dinámico:** se analizan una sucesión de diferentes estados de carga a lo largo del día, semana o mes. Se considera tanto las variables como las condiciones de contorno que cambian durante el proceso de cálculo.

Clasificación en función del nivel de detalle y objetivos del modelo

Según Martínez, (2002) para el planteamiento de análisis de una red de distribución se debe hacer una distinción a los objetivos perseguidos por el modelo a utilizar para su análisis:

- **Modelo de detalle:** conocer el comportamiento de la red en determinadas situaciones o escenarios. Es el caso de comportamiento de la red cuando sucede una avería en conducciones principales o determinación de los niveles de servicio en los momentos de máxima demanda.
- **Modelo estratégico:** conocer el comportamiento global de la red. Este modelo se caracterizará por un nivel de detalle bajo, es decir, se trata de modelos arteriales, el objetivo primordial es estudiar el comportamiento de las instalaciones más importantes de la red, como estaciones de bombeo, depósitos de regulación, etc.
- **Macromodelos:** son una simplificación de la red, están constituidos por un reducido número de elementos significativos de la red tales como depósitos, bombas, nudos de medida de presión o caudal, elementos de control, etc.

5.4.2. Análisis hidráulico en redes de abastecimiento de agua

El análisis de un sistema de distribución de agua consiste, en determinar las alturas piezométricas de todos los nodos y caudales que circulan por los tramos de tuberías, a partir de sus características (longitudes, diámetros y rugosidades), información de las piezas especiales (niveles de los depósitos, curvas características de los equipos de bombeo, grado de apertura de válvulas de regulación, presión de regulación de válvulas reductoras y sostenedoras, etc.), consumos o demandas que se realizan en las tomas y la altura piezométrica de la fuente de abastecimiento (Figura 5.9).

La forma en que se considera la variabilidad del tiempo en el análisis del sistema es la que permite distinguir diferentes tipos de modelos. Se puede definir una red de distribución (Martínez, 2002), como un conjunto de elementos conectados entre sí cuya finalidad es conducir el agua desde una o varias fuentes de abastecimiento (presa, lagos, acuíferos, pozos, etc.) a los puntos de consumo (edificios, industrias, tomas de riego e

incendio, etc.), manteniendo unas buenas condiciones cuantitativas y cualitativas (Figura 5.10).

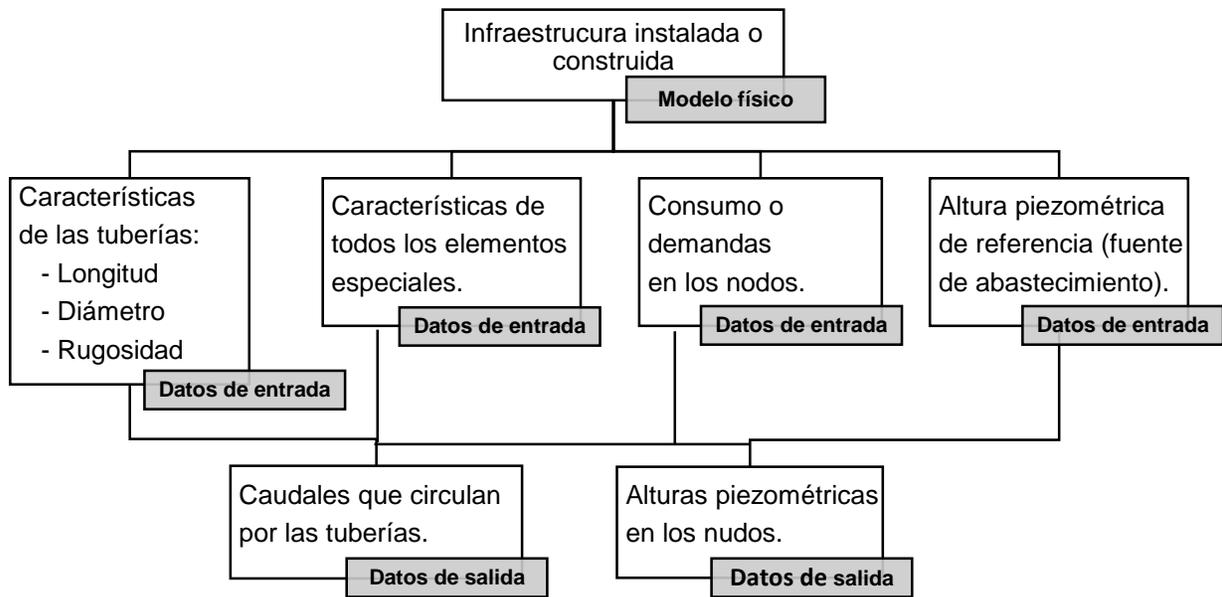


Figura 5.9. Entradas y salidas en un modelo de simulación de una red de distribución de agua, (Martínez, 2002).

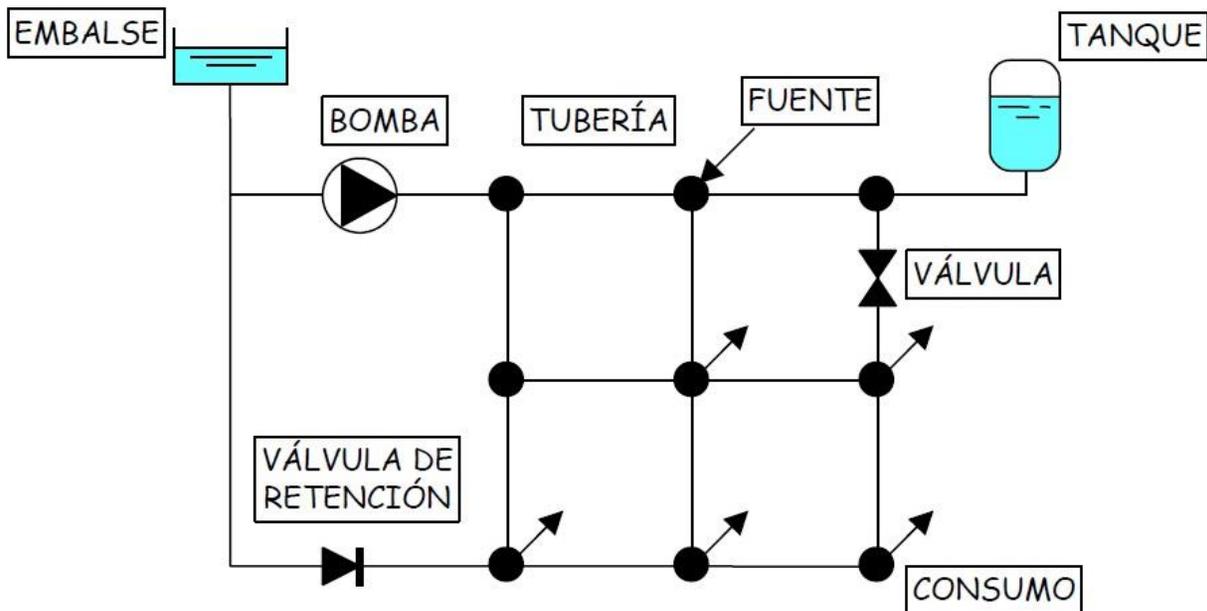


Figura 5.10. Elementos de una red de distribución de agua, (Martínez, 2002).

Las redes se clasifican, de acuerdo con sus configuraciones básicas, en los tres tipos siguientes (Saldarriaga, 2016):

- **Redes abiertas:** se caracterizan por no tener ningún “circuito cerrado”.
- **Redes cerradas:** Su característica primordial es tener algún tipo de circuito cerrado en el sistema. El objetivo es tener un sistema redundante de tuberías, aumentando así la confiabilidad del abastecimiento.
- **Redes dendríticas:** este tipo de redes se utiliza en los sistemas de riego a presión, en particular en los de riego localizado de alta frecuencia, las tuberías se bifurcan constantemente para cubrir todo el terreno que debe irrigarse.

5.4.3. Ecuaciones fundamentales de la hidráulica

En la mecánica de fluidos los métodos de análisis consideran la capacidad del flujo para transportar materia y el mecanismo por el que cambia sus propiedades de un lugar a otro para lo cual se establece como axioma que en los fluidos se satisfagan los principios básicos de la mecánica del medio continuo (Sotelo, 2011):

- Conservación de la materia (principio de continuidad)
- Segunda ley de Newton (impulso y cantidad de movimiento)
- Conservación de la energía (primera ley de la termodinámica)
- Segunda ley de la termodinámica

1. Ecuación de continuidad

Ángeles, (2013), señala que el volumen de agua que cruza por unidad de tiempo a través de una tubería ciega en la sección transversal 1, debe pasar también por la sección transversal 2, si entre ambas secciones no existen aportes ni consumos.

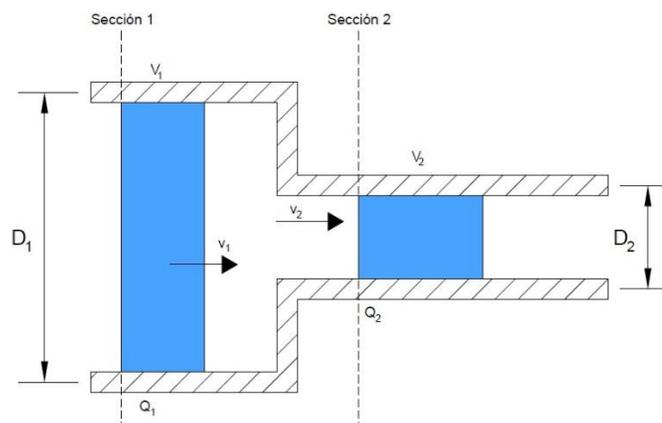


Figura 5.11. Ecuación de continuidad aplicada a tuberías, (Ángeles, 2013).

Analíticamente se tendría que el volumen 1 es igual al volumen 2:

$$V_1 = V_2$$

Dividiendo el volumen por el tiempo, resulta la ecuación de gasto:

$$\frac{V_1}{t} = \frac{V_2}{t}$$

La ecuación de continuidad será el gasto 1 será igual al gasto 2:

$$Q_1 = Q_2 \quad (5.19)$$

Ángeles, (2013) menciona que la ecuación de continuidad, la constituye el Principio de Cruce, el cual establece que el caudal que entra a un cruce o nodo, forzosamente debe ser igual al que sale de éste.

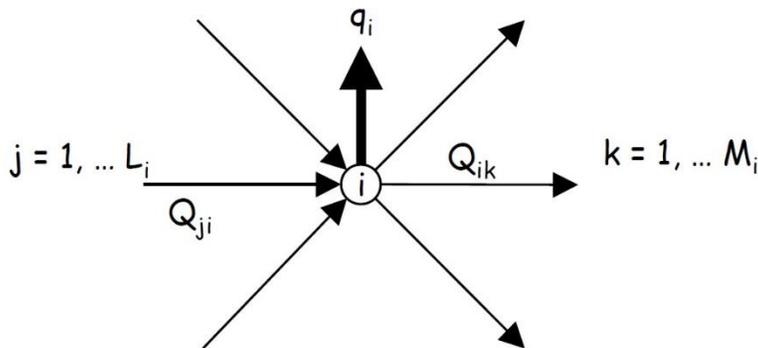


Figura 5.12. Representación esquemática de un nodo, (Martínez, 2002).

Si se tiene un nodo i en una red (Figura 5.12) se define:

- Q_{ij} = Representa el caudal que llega al mismo desde un nodo j .
- Q_{ik} = El caudal que parte del nodo i hacia un nodo k .
- q_i = Caudal que abandona el sistema (demanda) o ingresa en él a través del nodo i . Este caudal es positivo si es consumido en el nodo y negativo en caso contrario.

La ecuación de continuidad quedará, en régimen permanente, como sigue:

$$\sum_{j=1}^{L_i} Q_{ij} - \sum_{k=1}^{M_i} Q_{ik} = q_i \quad (5.20)$$

El caudal demandado más el caudal que continúa después del nodo i al siguiente nodo, se consideran como salidas, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\sum_{j=1}^{L_i} Q_{ij} - \left(\sum_{k=1}^{M_i} Q_{ik} + q_i \right) = 0 \quad (5.21)$$

En modelos de simulación de período extendido, las ecuaciones se resuelven como si se tratase de un régimen permanente, para la ecuación (5.21) de continuidad en los nodos se modifica parcialmente para tener en cuenta la posibilidad de almacenar un volumen de agua entre dos instantes de tiempo (Martínez, 2002):

$$\sum_{j=1}^{L_i} Q_{ij} - \sum_{k=1}^{M_i} Q_{ik} = q_i + S_i \frac{\Delta H_i}{\Delta t} \quad (5.22)$$

Se definen dos nuevas variables más en los nodos, además del intervalo de tiempo entre los dos instantes calculados, Δt :

- S_i = Sección transversal del nodo i.
- H_i = Altura piezométrica en el nodo i.

2. Ecuación de conservación de la energía

En el análisis de flujos a presión se presentan tres tipos de energía, según (Arteaga, et al., 2006) son los siguientes:

- I. **Energía cinética o de movimiento:** en hidráulica también conocida como carga de velocidad. Es la energía resultante de aplicar una fuerza a una determinada masa líquida comunicándole una aceleración, realizándose un desplazamiento:

$$h_v = \frac{v^2}{2g} \quad (5.23)$$

- II. **Energía mecánica o de presión:** correspondiente al trabajo mecánico ejecutado por las fuerzas debidas a la presión, se representa por la carga de presión:

$$h_p = \frac{p}{\gamma} \quad (5.24)$$

- III. **Energía potencial:** correspondiente al trabajo realizado por las fuerzas debidas de la acción de gravedad y se puede definir como el producto del peso ($W=Mg$), del cuerpo líquido por la altura respecto al plano de referencia:

$$E_p = Wh \quad (5.25)$$

En hidráulica la carga de posición, depende de la situación del origen o línea de referencia (L.Z.) de la cual se mide la elevación. El trabajo del peso es independiente de la trayectoria real seguida y depende sólo de los valores de punto inicial y punto final:

$$Ep = hz \quad (5.26)$$

En la Figura 5.13 se representan de manera gráfica las diferentes energías descritas.

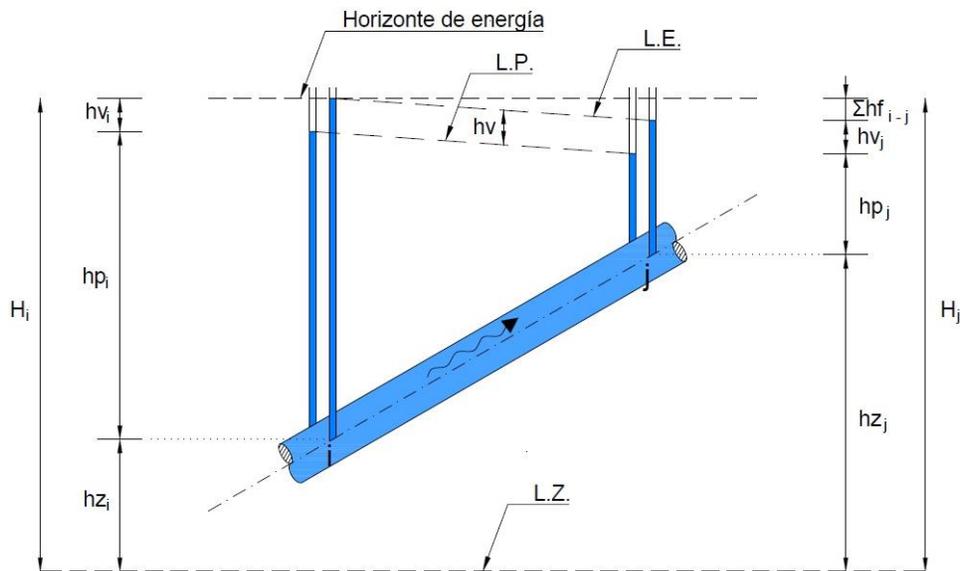


Figura 5.13. Diferentes tipos de energía en una tubería, (Arteaga, et al., 2006).

Analizando la Figura 5.13 en el nodo i se tiene que la cantidad total de carga será igual a la suma de las tres formas descritas de energía, es decir:

$$H_i = hv_i + hp_i + hz_i$$

En el nodo j la carga total es:

$$H_j = hv_j + hp_j + hz_j$$

De acuerdo a la ley de conservación de energía, la energía total que tenga el nodo i , tendrá el mismo valor en el nodo j :

$$H_i = H_j$$

Arteaga, et al., (2006) señala que la línea de energía (L.E.), la cual une los niveles de carga total, forma una línea, en cuyos puntos involucra la carga de posición, la carga de presión, la carga de velocidad; esta línea se abate conforme se desarrolla la longitud de tubería, debido a las pérdidas de energía, tanto de las de fricción como localizadas.

La línea piezométrica (L.P.), une los niveles de presión estáticos y la línea de energía, que une los niveles dinámicos o de energía. Siempre la carga de posición va a estar condicionada a la ubicación del plano de referencia (L.Z.), que está determinada por la diferencia de elevaciones entre el eje de la tubería y el plano L.Z. De manera que la ecuación de energía queda expresada de la siguiente manera:

$$H_i = H_j + \sum hf_{i-j} \quad (5.27)$$

O bien sustituyendo las ecuaciones (5.23), (5.24) y (5.26):

$$hz_i + \frac{v_i^2}{2g} + \frac{P_i}{\gamma} = hz_j + \frac{v_j^2}{2g} + \frac{P_j}{\gamma} + \sum hf_{i-j} \quad (5.28)$$

Perdidas de carga

I. Perdidas por fricción

Arteaga, *et al.*, (2006) las define como la oposición que existe entre el mismo líquido y las paredes del conducto, debido a la presencia de las fuerzas cortantes entre las partículas líquidas, provocadas por la viscosidad del fluido, y las paredes del contorno, originadas por la rugosidad, provocando cierta fuerza contraria al flujo llamada fricción. Saldarriaga, (2016) menciona que la ecuación de Darcy-Weisbach es la ecuación de resistencia fluida más general para el caso de tuberías circulares fluyendo a presión.

$$hf_{ij} = f \frac{L_{ij} v_{ij}^2}{D_{ij} 2g} \quad (5.29)$$

Donde:

- hf_{ij} = Pérdida de carga por fricción del nodo i al nodo j [m]
- f = Factor de fricción [adimensional]
- L_{ij} = Longitud del nodo i al nodo j [m]
- D_{ij} = Diámetro del nodo i al nodo j [m]
- v_{ij} = Velocidad media del nodo i al nodo j [m s⁻¹]
- g = Aceleración gravitacional [m s⁻²]

Para la determinación del factor de fricción f se tienen muchas expresiones, a continuación se expresan algunas comúnmente utilizadas (Arteaga, *et al.*, 2006):

- a) Flujo Laminar
 - Fórmula de Hagen – Poiseuille
- b) Flujo turbulento liso
 - Fórmula de Nikuradse
 - Fórmula de Blassius
 - Fórmula de Karman-Prandtl
- c) Flujo turbulento de transición
 - Fórmula de White-Colebrook
 - Fórmula de Mody
 - Fórmula de Swamee y Jain
- d) Flujo turbulento rugo
 - Fórmula de Nikuradse
 - Fórmula de Karman-Prandtl

Existen otras expresiones para estimar las pérdidas de carga por fricción a partir de coeficientes y que están en función del gasto. A continuación se mencionan las más comúnmente utilizadas:

- a) Fórmula de Chezy-Manning
- b) Fórmula de Hazen-Williams

II. Pérdidas localizadas

Arteaga, *et al.*, (2006) las define como las pérdidas provocadas por las obstrucciones de piezas especiales y/o accesorios necesarios para la operación del sistema, estas reciben el nombre de pérdidas localizadas o menores.

$$h_m = k_m \frac{v_{ij}^2}{2g} \quad (5.30)$$

Donde:

- h_m = Pérdida de carga por el accesorio [m]
- k_m = coeficiente de pérdidas menores [adimensional]

5.4.4. Principios fundamentales de análisis de redes abiertas

Como principio de se plantea que en cada una de las uniones o nodos de la red se debe cumplir la ecuación de continuidad (5.19) o (5.21) según sea el caso a analizar y la ecuación de conservación de la energía (5.27) o (5.28), y las ecuaciones (5.29) y (5.30) para las pérdidas por fricción y localizadas respectivamente.

5.4.5. Principios fundamentales de análisis de redes cerradas

Saldarriaga, (2016) describe los siguientes fundamentos, si se considera la red de la Figura 5.14, donde $Q_{D1}, Q_{D2}, Q_{D3}, Q_{D4}, \dots, Q_{DNU}$, son caudales consumidos en cada uno de los nodos, algunos de los cuales podrían tener un valor nulo en un momento dado, y que $Q_{e1}, Q_{e2}, Q_{e3}, \dots, Q_{em}$, son los caudales que alimentan a la red de distribución, se establece la siguiente ecuación:

$$\sum_{i=1}^m Q_e = \sum_{i=1}^{NU} Q_D \quad (5.31)$$

Donde NU es el número de uniones (nodos) que existe en la red.

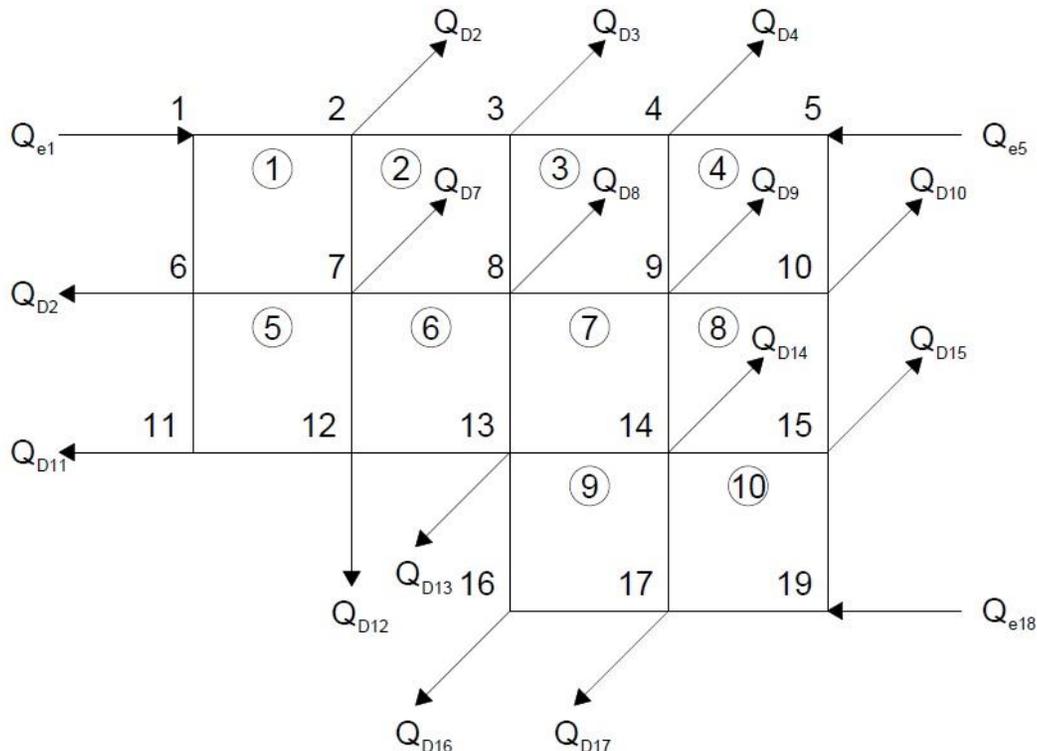


Figura 5.14. Red cerrada de distribución de agua, (Saldarriaga, 2016)

La ecuación (5.31) es una ecuación de conservación de la masa. Por otro lado, para cada uno de los nodos se puede establecer una ecuación similar, debido a que localmente se debe cumplir que la masa se conserve:

$$\sum_{j=1}^{NT_i} Q_{ij} - Q_{Di} = 0 \quad (5.32)$$

Donde NT_i es el número de tubos que llegan al nodo i , y Q_{ij} , representa el caudal que pasa por la tubería ij hacia el nodo i desde el nodo j . Puede ser positivo (va hacia el nodo i) o negativo (sale de dicho nodo).

Para cada uno de los caudales Q_{ij} de la ecuación (5.32) se puede plantear la siguiente ecuación de conservación de la energía entre los nodos j y i , incluyendo las pérdidas por fricción (5.27) y las pérdidas menores ecuación (5.30):

$$H_j - H_i = \sum k_{mij} \frac{v_{ij}^2}{2g} + hf$$

$$H_j - H_i = \frac{v_{ij}^2}{2g} \left(\sum k_{mij} + f_{ij} \frac{L_{ij}}{D_{ij}} \right)$$

Se pone la ecuación en función del caudal

$$H_j - H_i = \frac{Q_{ij}^2}{2gA_{ij}^2} \left(\sum k_{mij} + f_{ij} \frac{L_{ij}}{D_{ij}} \right)$$

En donde se ha utilizado la ecuación de Darcy-Weisbach para el cálculo de las pérdidas por fricción. Si se despeja Q_{ij} de esta última ecuación se obtiene la siguiente expresión, la cual relaciona el caudal que pasa por la tubería ij con las alturas piezométricas en los nodos i y j .

$$Q_{ij} = \left(\frac{H_j - H_i}{\sum k_{mij} + f_{ij} \frac{L_{ij}}{D_{ij}}} \right)^{1/2} \sqrt{2gA_{ij}} \quad (5.33)$$

Si se reemplaza este último resultado en la ecuación (5.32) se obtiene:

$$\sum_{j=1}^{NT_i} \left(\frac{H_j - H_i}{\sum k_{mij} + f_{ij} \frac{L_{ij}}{D_{ij}}} \right)^{1/2} \sqrt{2gA_{ij}} - Q_{Di} = 0 \quad (5.34)$$

Donde NT_i representa el número de tuberías que llega a la unión (nodo) i . A fin de tener en cuenta en forma automática el signo del caudal ij la ecuación (5.33) se puede cambiar por la siguiente expresión:

$$Q_{ij} = \sqrt{2gA_{ij}} \frac{H_j - H_i}{\left(\sum k_{mij} + f_{ij} \frac{L_{ij}}{D_{ij}} \right)^{1/2}} (|H_j - H_i|)^{1/2} \quad (5.35)$$

A las ecuaciones de tipo (5.35) se les conocen como “ecuaciones de altura piezométrica”. En la red se tienen en total (NU-1) ecuaciones de este tipo, debiéndose conocer H_1 , o cualquier otra altura piezométrica en la red para poder solucionar dichas ecuaciones. En caso contrario se puede suponer alguna de las alturas piezométricas, ya que los valores absolutos de éstas no afectan la distribución de caudales, y además debe tenerse en cuenta que las ecuaciones de altura piezométrica son ecuaciones no lineales. Por otro lado, a partir de los circuitos de tubos que conforman la red, los cuales pueden ser adyacentes o superpuestos, se pueden plantear las siguientes ecuaciones, una para cada uno de los circuitos que conforman la red de distribución, a partir de la ecuación (5.32) de continuidad en las uniones que conforman el circuito, y de la ecuación de conservación de la energía alrededor del circuito:

$$\sum_{j=1}^{NT_{i'}} hf_{ij} + \sum_{j=1}^{NT_{i'}} hm_{ij} = 0 \quad (5.36)$$

Donde $NT_{i'}$ es el número de tubos del circuito i . Luego, si se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach en esta última ecuación en conjunto con la expresión de las pérdidas menores como función de la altura de velocidad, se obtiene la siguiente expresión:

$$\sum_{j=1}^{NT_{i'}} \frac{Q_{ij}^2}{2gA_{ij}^2} \left(\sum k_{mij} + f_{ij} \frac{L_{ij}}{D_{ij}} \right) = 0 \quad (5.37)$$

Las ecuaciones de tipo (5.37) se conocen como las “*ecuaciones de caudal*” de la red. En total se tienen NC ecuaciones de caudal, donde NC es el número de circuitos que conforman la red. Nuevamente se puede observar que son ecuaciones no lineales.

Para el análisis de la red cerrada se tienen en total NC+ (UN-1) ecuaciones utilizadas para encontrar las alturas piezométricas en cada nodo. Sin embargo, este conjunto de ecuaciones no puede ser resuelto fácilmente debido a su naturaleza no lineal.

Una vez más debe establecerse una convención de signos para las ecuaciones de caudal (5.37). Los caudales en el circuito se consideran positivos si giran en el sentido de las agujas del reloj y negativos si lo hacen en sentido contrario:

$$\sum_{j=1}^{NT_{ij}} \frac{\left(\sum k_{mij} + f_{ij} \frac{L_{ij}}{D_{ij}} \right)}{2gA_{ij}} Q_{ij}(|Q_{ij}|) = 0 \quad (5.38)$$

Los métodos de análisis de redes de tuberías utilizan conjuntos de ecuaciones de altura piezométrica y de caudal para solucionar la red. En todos los casos se conocen los diámetros y rugosidades de las tuberías, lo cual implica que en realidad se trata de procesos de comprobación de diseño y no de diseños en sí.

5.4.6. Programas para la modelación de redes de distribución de agua

El objetivo de todo modelo matemático que se programa en un ordenador, tiene la finalidad de obtener resultados con la mayor exactitud posible, del comportamiento real del sistema físico que representa.

Martínez, (2002) menciona que por el año 1985, surge el término Hidroinformática (del inglés Hydroinformatics, propuesto por Abbott en 1991). Este autor define la hidroinformática como “*el estudio de los flujos de información relativos a las corrientes de agua y todo lo que ésta transporta, junto con las interacciones con entorno tanto naturales como artificiales*”.

Existen varios programas de cómputo comerciales, utilizados para el cálculo y/ o análisis de redes de distribución de abastecimiento de agua como lo son: WaterCAD, KYPIPE (PIPE2018), EPANET, GisRed v2.0, REDES, GESTAR entre otros.

5.4.7. EPANET

Es un programa de ordenador que realiza simulaciones en periodos extendidos del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de suministro a presión. Efectúa un seguimiento de la evolución de los caudales en las tuberías, presiones en los nodos, niveles en los depósitos, y la concentración química presente en el agua, a lo largo del periodo de simulación en múltiples intervalos de tiempo (Rossman, 2000).

Rossman, (2000) señala que EPANET contiene un simulador hidráulico muy avanzado que ofrece las siguientes prestaciones:

- No existe límite en cuanto al tamaño de la red que puede procesarse.
- Las pérdidas de carga pueden calcularse mediante las fórmulas de:
 - Hazen-Williams
 - Darcy-Weisbach
 - Chezy-Manning.
- Contempla pérdidas menores en codos, accesorios, etc.
- Admite bombas de velocidad fija o variable.
- Determina el consumo energético y sus costos.
- Considera varios tipos de válvulas, tales como de corte, de retención, y reguladoras de presión o caudal.
- Admite depósitos de geometría variable (cuyo diámetro varíe con el nivel).
- Considerar diferentes tipos de demanda en los nodos, cada uno con su propia curva de modulación en el tiempo.
- Modelar tomas de agua cuyo caudal dependa de la presión.
- Admite leyes de control simples, basadas en el valor del nivel en los depósitos o en la hora prefijada por un temporizador, y leyes de control más complejas basadas en reglas lógicas.

5.4.8. Análisis hidráulico en EPANET

1. Pérdidas por fricción

EPANET contempla tres ecuaciones para el cálculo de las pérdidas por fricción, descritas a continuación:

I. Formula de Hazen-Williams

Rossman, (2000) menciona que la fórmula de Hazen-Williams es la más utilizada en EEUU. Sin embargo, no puede utilizarse para líquidos distintos del agua, y fue desarrollada originalmente sólo para flujo turbulento.

$$hf_{ij} = 10.64 * \frac{Q_{ij}^{1.852} * L_{ij}}{C^{1.852} * D_{ij}^{4.871}} \quad (5.39)$$

Donde:

- hf_{ij} = Pérdida de carga por fricción del nodo i al nodo j [m]
- Q_{ij} = Caudal que circula del nodo i al nodo j [m³ s⁻¹]
- L_{ij} = Longitud del nodo i al nodo j [m]
- C = Coeficiente de rugosidad [adimensional]
- D_{ij} = Diámetro del nodo i al nodo j [m]

Cuadro 5.8. Coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams.

Material	Coeficiente (universal)
Fierro fundido	130 – 140
Hormigón o revestido de hormigón	120 – 140
Fierro galvanizado	120
Plástico (PVC o PE)	140 – 150
Acero	140 – 150
Cerámica	110

Fuente: (Rossman, 2000).

II. Formula de Darcy-Weisbach

Desde el punto de vista académico (Rossman, 2000), la fórmula de Darcy-Weisbach es la más correcta, y es aplicable a todo tipo de líquidos y regímenes.

$$hf_{ij} = 0.0827 * f * \frac{L_{ij} * Q_{ij}^2}{D_{ij}^5} \quad (5.40)$$

Donde:

- hf_{ij} = Pérdida de carga por fricción del nodo i al nodo j [m]
- f = Factor de fricción [adimensional]
- L_{ij} = Longitud del nodo i al nodo j [m]
- Q_{ij} = Caudal que circula del nodo i al nodo j [$m^3 s^{-1}$]
- D_{ij} = Diámetro del nodo i al nodo j [m]

El factor de fricción está en función del número de Reynolds (Re) y de la rugosidad absoluta (ϵ). El número de Reynolds permite evaluar la preponderancia de las fuerzas viscosas sobre las de inercia, para un conducto cilíndrico es:

$$Re = \frac{Dv}{\nu} \quad (5.41)$$

Donde:

- Re = Número de Reynolds [adimensional]
- D = Diámetro del tramo [m]
- v = Velocidad media del agua [$m s^{-1}$]
- ν = Viscosidad cinemática del fluido [$m^2 s^{-1}$]

Al aplicar la fórmula de Darcy-Weisbach, EPANET emplea distintos métodos para calcular el factor de fricción f , dependiendo del tipo de régimen (Rossman, 2000):

- Para flujo laminar ($Re < 2,000$) emplea la fórmula de Hagen–Poiseuille (Bhave, 1991):

$$f = \frac{64}{Re} \quad (5.42)$$

- Para flujo turbulento ($Re > 4,000$) emplea la aproximación explícita de Swamee y Jain a la fórmula de Colebrook-White (Bhave, 1991):

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (5.43)$$

- Para el flujo de transición ($2,000 < Re < 4,000$) aplica una interpolación cúbica al diagrama de Moody (Dunlop, 1991):

$$f = (X_1 + R(X_2 + R(X_3 + X_4))) \quad (5.44)$$

$$R = \frac{Re}{2000} \quad (5.45)$$

$$X_1 = 7 * FA - FB \quad (5.46)$$

$$X_2 = 0.128 - 17 * FA + 2.5 * FB \quad (5.47)$$

$$X_3 = -0.128 + 13 * FA - 2 * FB \quad (5.48)$$

$$X_4 = R(0.032 - 3 * FA + 0.5 * FB) \quad (5.49)$$

$$FA = Y_3^{-2} \quad (5.50)$$

$$FB = FA * \left(2 - \frac{0.00514215}{Y_2 * Y_3}\right) \quad (5.51)$$

$$Y_2 = \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \quad (5.52)$$

$$Y_3 = -0.86859 * \ln\left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{4000^{0.9}}\right) \quad (5.53)$$

Cuadro 5.9. Coeficiente de rugosidad absoluta de Darcy-Weisbach.

Material	ε (mm)
Fierro fundido	0.25
Hormigón o revestido de hormigón	0.3 – 3.0
Fierro galvanizado	0.15
Plástico (PVC o PE)	0.0015
Acero	0.03
Cerámica	0.3

Fuente: (Rossman, 2000).

III. Formula de Chezy-Manning

Finalmente, la fórmula de Chezy-Manning es utilizada usualmente para canales y tuberías de gran diámetro, donde la turbulencia está muy desarrollada.

$$hf_{ij} = 10.294 * \frac{n^2 * Q_{ij}^2 * L_{ij}}{D_{ij}^{5.33}} \quad (5.54)$$

Donde:

- hf_{ij} = Pérdida de carga por fricción del nodo i al nodo j [m]
- n = Coeficiente de rugosidad [adimensional]
- Q_{ij} = Caudal que circula del nodo i al nodo j [m³ s⁻¹]
- L_{ij} = Longitud del nodo i al nodo j [m]
- D_{ij} = Diámetro del nodo i al nodo j [m]

Cuadro 5.10. Coeficiente de rugosidad de Manning.

Material	n (universal)
Fierro fundido	0.012 – 0.015
Hormigón o revestido de hormigón	0.012 – 0.017
Fierro galvanizado	0.015 – 0.017
Plástico (PVC o PE)	0.011 – 0.015
Acero	0.015 – 0.017
Cerámica	0.013 – 0.015

Fuente: (Rossman, 2000).

2. Pérdidas localizadas

El coeficiente de pérdidas menores k_m , referido a la altura de velocidad, en EPANET se transforma en el factor equivalente m , que multiplica al cuadrado del caudal, mediante la siguiente relación (Rossman, 2000):

$$m = \frac{0.02517k_m}{D^4} \quad (5.55)$$

3. Método del gradiente hidráulico

El método que emplea EPANET para resolver simultáneamente las ecuaciones de continuidad en los nodos y las ecuaciones de comportamiento hidráulico de las tuberías, para un instante dado es el método del gradiente hidráulico (Rossman, 2000). El método del gradiente fue desarrollado por los profesores E. Todini y E.P.O'Connell en la Universidad de Newcastle upon Tyne y por R. Salgado, como parte de su tesis doctoral en 1982-1983 (Saldarriaga, 2016).

El método del gradiente para el cálculo de redes de distribución de aguas está basado en el hecho de que al tenerse un flujo permanente se garantiza que se cumplan las ecuaciones de conservación de la masa en cada uno de los nodos de la red y la ecuación de conservación de la energía en cada uno de los circuitos de ésta.

En cada nodo se debe cumplir la ecuación de continuidad ecuación (5.21). Debe haber relación no lineal entre las pérdidas por fricción y el caudal para cada uno de los tubos que conforman la red.

Si se tienen en cuenta las pérdidas menores y la posible existencia de bombas en algunos de los tubos de la red, la forma general, para todos los tubos:

$$H_i - H_j = h_{ij} = \alpha Q^n + \beta Q + \gamma \quad (5.56)$$

Donde

- H = Altura piezométrica en el nodo.
- h = Pérdida de carga total en el tramo
- α , β y γ = Parámetros característicos del tubo, la válvula y las bombas.
- Q = caudal que circula en el tramo.
- n = exponente del caudal, que depende de la fórmula utilizada para el cálculo de las pérdidas por fricción (n = 1.852 para Hazen-Williams y n = 2 para Darcy-Weisbach y Chezy-Manning).

Si en una tubería particular solo ocurren pérdidas por fricción y pérdidas menores la ecuación (5.56) toma la siguiente forma:

$$h_{ij} = \alpha Q^n \quad (5.57)$$

Donde α es igual a:

$$\alpha = h_f + \sum h_m$$

Para el método el gradiente hidráulico se hace las siguientes definiciones adicionales, con el fin de describir la topología de la red en forma matricial:

- NT = Número de tuberías de la red.
- NN = Número de nodos con altura piezométrica desconocida.
- [A12] = Matriz de conectividad asociada a cada uno de los nodos de la red, su dimensión es NT x NN con solo dos elementos diferentes de cero en la *i*-ésima fila:

$$A_{12}(i,j) = \begin{cases} -1 & \text{en la columna correspondiente al nodo inicial del tramo } i \\ 1 & \text{en la columna correspondiente al nodo final del tramo } i \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

- NS = Número de nodos de altura piezométrica fija o conocida
- [A10] = Matriz topológica tramo a nodo para los NS nodos de altura piezométrica fija, su dimensión es NT x NS con un valor igual a -1 en la filas correspondientes a los tramos conectados a nodos de altura piezométrica fija.

Teniendo en cuenta las anteriores, la perdida por altura piezométrica en cada tramo de tubería que conecte dos nodos de la red es:

$$[A11][Q] + [A12] = -[A10][H_0] \quad (5.58)$$

Donde:

- [A11] = Matriz diagonal de NT x NT definida como sigue:

$$[A11] = \begin{bmatrix} \alpha_1 Q_1^{(n1-1)} + \beta_1 + \frac{\gamma_1}{Q_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \alpha_{NT} Q_{NT}^{(n1-1)} + \beta_{NT} + \frac{\gamma_{NT}}{Q_{NT}} \end{bmatrix} \quad (5.59)$$

- [Q] = Vector de caudales con dimensión NT x 1
- [H] = Vector de alturas piezométricas desconocidas con dimensión NN x 1
- [H₀] = Vector de alturas piezométricas desconocidas con dimensión NN x 1

Es evidente que la ecuación (5.58) es una ecuación de conservación de energía. La ecuación de continuidad para todos los nodos de la red es:

$$[A21][Q] = [q] \quad (5.60)$$

Donde:

- $[A21]$ = Matriz transpuesta de $[A12]$
- $[q]$ = Vector de consumo (demanda) o de entrada (oferta) en cada nodo de la red, con dimensiones $NT \times 1$

En forma compacta, las ecuaciones (5.58) y (5.60) se pueden expresar en términos matriciales:

$$\begin{bmatrix} [A11] & [A12] \\ [A21] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [Q] \\ [H] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A10] & [H_0] \\ & [q] \end{bmatrix} \quad (5.61)$$

En esta última ecuación, la parte superior corresponde a la relación Q *versus* H y la parte inferior corresponde a la conservación de la masa en cada uno de los nodos. Dado que la parte superior es no lineal, la ecuación (5.61) no puede ser resuelta en forma directa. Es necesario utilizar algún algoritmo iterativo. El método del gradiente consiste en hacer una expansión truncada de Taylor. Al operar simultáneamente sobre el campo ($[Q]$, $[H]$) y aplicar el operador gradiente se obtiene:

$$\begin{bmatrix} [N] & [A11] & [A12] \\ & [A21] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [dQ] \\ [dH] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [dE] \\ [dq] \end{bmatrix} \quad (5.62)$$

Donde:

- $[N]$ = Matriz diagonal (n_1, n_2, \dots, n_{NT}) con dimensión $NT \times NT$
- $[A11]'$ = Matriz con dimensión $NT \times NT$ definida como:

$$[A11]' = \begin{bmatrix} \alpha_1 Q_1^{(n_1-1)} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \alpha_{NT} Q_{NT}^{(n_{NT}-1)} \end{bmatrix} \quad (5.63)$$

En cualquier iteración i , $[dE]$ representa el desbalance de energía por unidad de peso (altura piezométrica) en cada tubo y $[dq]$ representa el desbalance de caudal en cada nodo. Estos desbalances están dados, respectivamente, por las siguientes ecuaciones:

$$[dE] = [A11][Q_i] + [A12][H_i] + [A10][H_0] \quad (5.64)$$

y

$$[dq] = [A21][Q_i] - [q] \quad (5.65)$$

El objetivo del método del gradiente es solucionar el sistema descrito mediante la ecuación (5.62), teniendo en cuenta que para cada iteración es evidente que:

$$[dQ] = [Q_{i+1}] - [Q_i] \quad (5.66)$$

y

$$[dH] = [H_{i+1}] - [H_i] \quad (5.67)$$

Obviamente, la solución puede calcularse resolviendo el siguiente sistema (teniendo en cuenta la ecuación (5.60)):

$$\begin{Bmatrix} [dQ] \\ [dH] \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [N] & [A11]' & [A12] \\ & [A21] & [0] \end{Bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} [dE] \\ [dq] \end{Bmatrix} \quad (5.68)$$

Recurriendo al álgebra matricial es posible calcular en forma explícita la matriz inversa del sistema representado por la ecuación (5.68). Si se procede de esta manera y se introducen las ecuaciones (5.64), (5.65), (5.66) y (5.67) es posible demostrar que la solución de la ecuación (5.67) está dada por las siguientes dos ecuaciones:

$$[H_{i+1}] = -\{[A21]([N][A11]')^{-1}[A12]\}^{-1} * \{[A21]([N][A11])^{-1}([A11][Q_i] + [A10][H_0]) - ([A21][Q_i] - [q])\} \quad (5.69)$$

$$[Q_{i+1}] = \{[l] - ([N^{-1}][A11]') - [A11]\} [Q_i] - \{([N][A11]')^{-1}([A12][H_{i+1}] + [A10][H_0])\} \quad (5.70)$$

Es posible rescribir la ecuación (5.69) como un sistema de ecuaciones lineales para las cabezas desconocidas $[H_{i+1}]$, en la siguiente forma:

$$\begin{aligned} & \{[A21]([N][A11])^{-1}[A12]\}[H_{i+1}] = \\ & -\{[A21]([N][A11])^{-1}([A11][Q_i] + [A10][H_0]) - ([A21][Q_i] - [q])\} \end{aligned} \quad (5.71)$$

El planteamiento del método del gradiente es el sistema descrito mediante la ecuación (5.62). Los sistemas descritos por las ecuaciones (5.70) y (5.71) conforman la solución al problema.

Descripción del proceso iterativo

Las ecuaciones (5.70) y (5.71) representan un sistema acoplado que debe ser resuelto en forma iterativa. El paso más complicado en cada iteración es la solución del sistema representado mediante la ecuación (5.71), ya que se trata de un sistema de ecuaciones disperso, simétrico, lineal y definido positivamente con NN incógnitas: las alturas piezométricas desconocidas $[H_{i+1}]$ en los nodos de la red. Una vez se conoce este vector es posible calcular $[Q_{i+1}]$ en forma explícita, mediante la ecuación (5.70). El proceso de solución se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Se suponen unos caudales iniciales en cada uno de los tubos de la red (no necesariamente balanceados, lo cual implica ahorro de tiempo).
2. Se resuelve el sistema representado por la ecuación (5.71) utilizando un método estándar para la solución de ecuaciones lineales simultáneas.
3. Con $[H_{i+1}]$ calculado se utiliza la ecuación (5.70) para determinar $[Q_{i+1}]$.
4. Con este $[Q_{i+1}]$ se vuelve a ensamblar el sistema (5.71) para encontrar un nuevo $[H_{i+1}]$.
5. El proceso se repite hasta que en dos iteraciones sucesivas $[H_{i+1}] \approx [H_i]$.

A partir de la segunda iteración, los sistemas representados por las ecuaciones (5.70) y (5.71) se simplifican, ya que se tendría lo siguiente:

$$[A_{21}][Q_i] - [q] = 0$$

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Zona de Estudio

Localización

El Distrito de Riego 001 Pabellón de Arteaga cuenta con una superficie aproximada de 11,800 ha, es el primer distrito de riego en México y se localiza a 35 km al norte de la ciudad de Aguascalientes, en los municipios de Pabellón de Arteaga, Rincón de Romos y Tepezalá a una altitud promedio de 1,900 msnm, siendo abastecido por la presa Presidente Plutarco Elías Calles que se encuentra en el municipio de San José de Gracia.

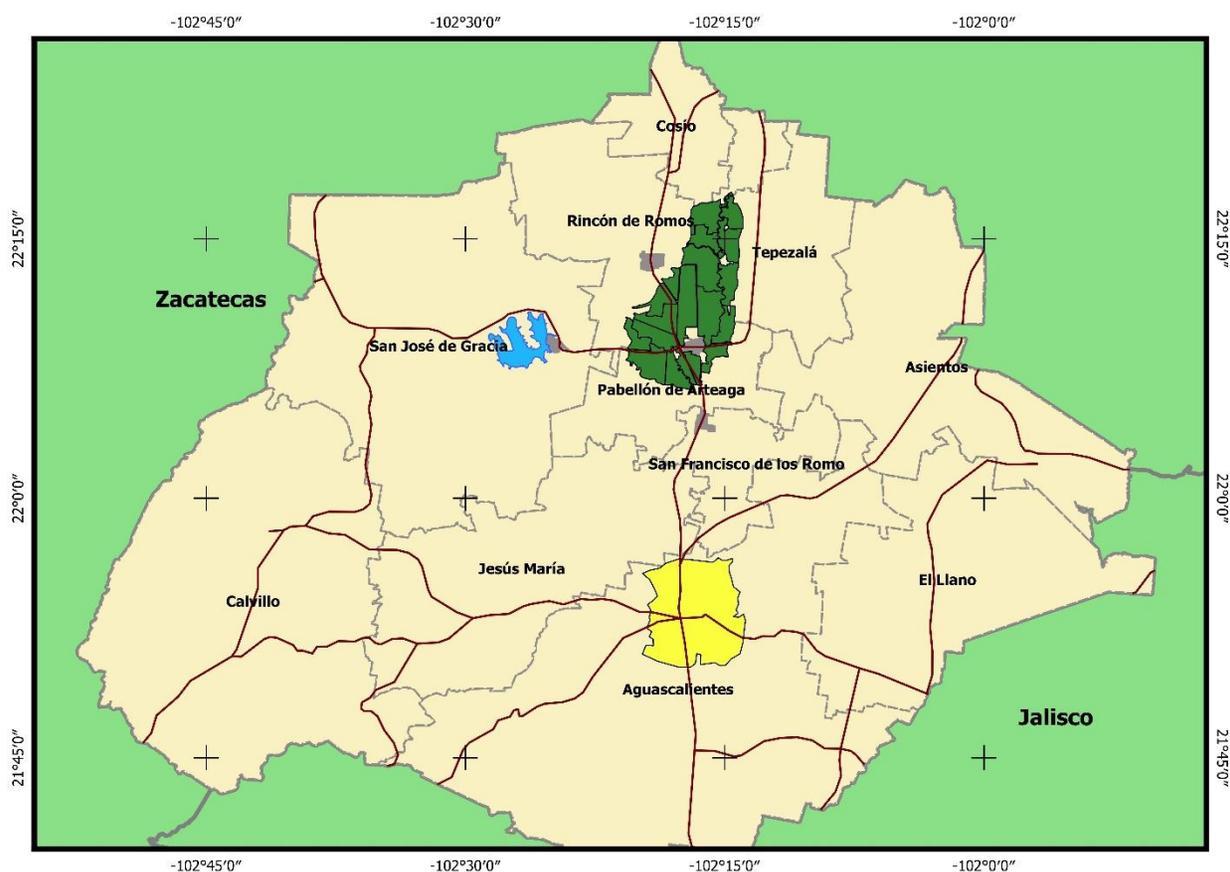


Figura 6.1. Ubicación del DR 001, Pabellón de Arteaga, Ags.

6.2. Recopilación de Información

6.2.1. Información climatológica

Para estimar los requerimientos de riego netos, se tomó información de la estación CEPAB (estación automática de INIFAP).

Cuadro 6.1. Información climatológica de INIFAP.

Nombre	Latitud	Longitud	Altitud	Variables
CEPAB	22°9'54.1"	-102°17'42.7"	1949.0	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura máxima • Temperatura mínima • Radiación Global • Velocidad promedio del viento • Humedad relativa • Evapotranspiración de referencia

De la estación CEPAB se extrajeron los datos diarios que se tenían registrados desde que empezó a operar en mayo del 2003 a marzo del 2019 y se promediaron por cada día, los cuales representaran los valores para el ciclo agrícola 2019 – 2020 que inicia el 01 de octubre de 2019 y termina el 30 de septiembre de 2020.

6.2.2. Topología de la red de distribución

Se obtuvieron los planos de diseño del proyecto ejecutivo de la línea principal, se tomó el plano final de construcción de la sección 01 que contempla los cambios de ciertos hidrantes o cancelaciones, para las secciones 02 a 19 se consideraron como un punto dentro de la línea principal.

6.2.3. Presa Calles

Se obtuvieron los registros del nivel de la superficie libre del agua de la presa del 01 de octubre de 2010 al 30 de septiembre de 2018.

Para las simulaciones se tomara el Nivel de Agua Mínimo Extraordinario (N.A.M.E.) de la presa 1993.25 msnm que es la cota con la que debe de funcionar la conducción y el filtrado de acuerdo al proyecto ejecutivo.

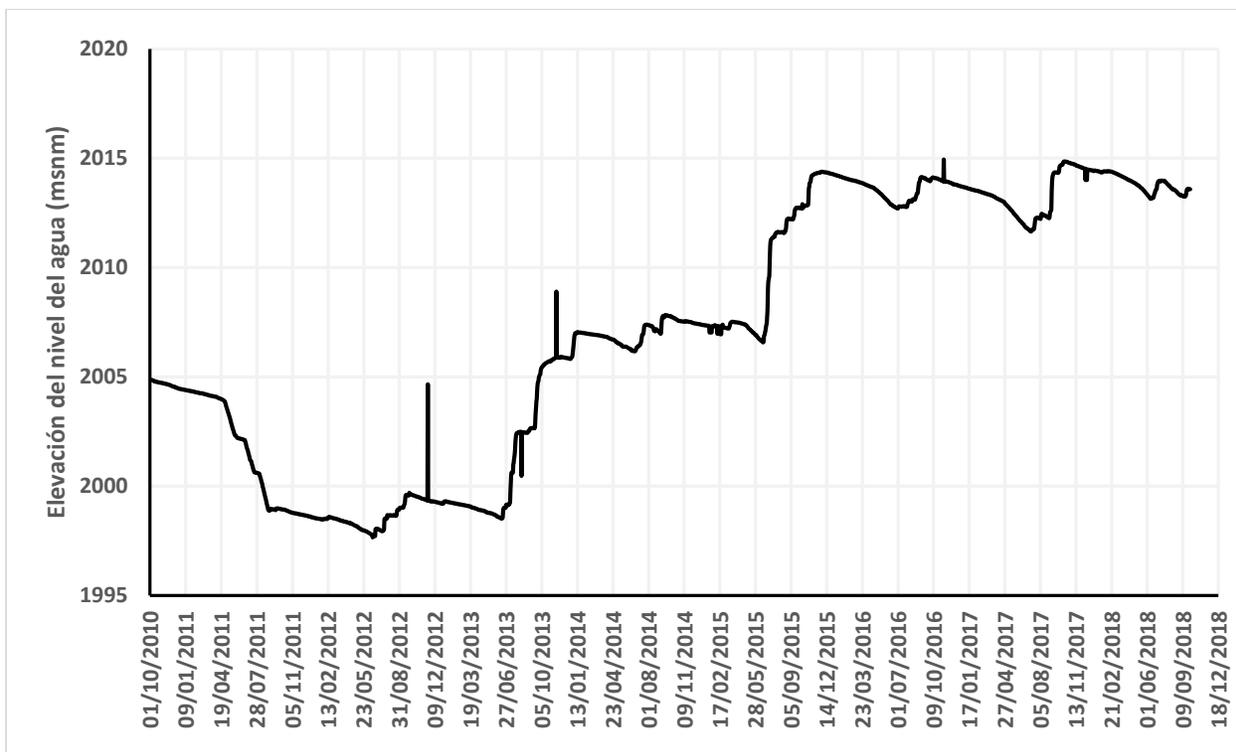


Figura 6.2. Nivel del espejo del agua en la presa Calles.

6.2.4. Coeficientes de cultivo

Los valores se tomaron del manual de FAO 56, boletín técnico de INIFAP, libro de Aguilera y Martínez (1996) y la pagina web de AgriMet Crop Coefficients.

Cuadro 6.2. Valores de K_c mensuales.

Mes	Alfalfa	Nogal Adulto	Vid
1	0.65	0.10	0.20
2	0.75	0.10	0.23
3	0.85	0.40	0.30
4	1.00	0.50	0.50
5	1.10	0.70	0.70
6	1.13	0.90	0.80
7	1.12	1.20	0.80
8	1.08	1.20	0.75
9	1.00	1.20	0.67
10	0.90	0.70	0.50
11	0.80	0.20	0.35
12	0.65	0.20	0.25

Fuente: INIFAP, Aguilera y Martínez (1996).

Cuadro 6.3. Valores de K_c en porciento de desarrollo.

%	Arándano	Espárrago	Fresa	Calabacita	Cebolla	Chile	Frijol	Maíz	Pepino
0	0.20	0.40	0.16	0.45	0.30	0.48	0.50	0.42	0.45
5	0.22	0.43	0.17	0.47	0.50	0.50	0.54	0.45	0.47
10	0.36	0.47	0.24	0.50	0.50	0.55	0.60	0.48	0.50
15	0.56	0.50	0.35	0.53	0.50	0.65	0.65	0.51	0.53
20	0.71	0.53	0.48	0.55	0.50	0.75	0.73	0.60	0.55
25	0.81	0.57	0.62	0.60	0.55	0.80	0.80	0.65	0.60
30	0.85	0.60	0.76	0.65	0.69	0.90	0.90	0.70	0.65
35	0.85	0.70	0.89	0.70	0.82	0.95	0.97	0.80	0.70
40	0.85	0.80	0.95	0.75	0.95	0.93	1.05	0.90	0.75
45	0.85	0.90	0.95	0.80	1.00	1.03	1.10	1.00	0.80
50	0.85	1.00	0.95	0.81	1.00	1.05	1.12	1.05	0.81
55	0.85	1.00	0.95	0.82	1.00	1.05	1.12	1.07	0.82
60	0.85	1.00	0.95	0.80	1.00	1.05	1.10	1.08	0.80
65	0.85	1.00	0.95	0.79	1.00	1.03	1.05	1.07	0.79
70	0.85	1.00	0.95	0.77	1.00	1.00	1.02	1.05	0.77
75	0.85	1.00	0.89	0.75	1.00	0.97	0.95	1.02	0.75
80	0.85	1.00	0.80	0.72	1.00	0.90	0.87	1.00	0.72
85	0.85	1.00	0.67	0.71	0.87	0.85	0.80	0.95	0.71
90	0.85	1.00	0.51	0.70	0.75	0.80	0.72	0.90	0.70
95	0.85	1.00	0.32	0.67	0.62	0.70	0.70	0.87	0.67
100	0.85	1.00	0.10	0.65	0.50	0.60	0.62	0.85	0.65

Fuente: Aguilera y Martínez (1996) y AgriMet Crop Coefficients.

6.2.5. Requerimientos de riego

Previamente se calcula la evapotranspiración de referencia con la ecuación (5.1) y se calibran los valores con los reportados por la estación automática CEPAB de INIFAP, con la ecuación (5.2) se estima la evapotranspiración del cultivo y se hacen sus respectivas correcciones (climática, localización y salinidad descritos en el apartado 5.3.4. y 5.3.7.), para cada cultivo se establece un periodo o ciclo.

Se consideró una eficiencia de conducción y distribución del 95% y una eficiencia de aplicación para micro irrigación del 95% y aspersion del 85% y para la calidad del agua se tomó del último estudio realizado por la asociación de usuarios del distrito con un valor para la conductividad eléctrica de 0.1368 dS m⁻¹.

Cuadro 6.4. Duración del ciclo de los cultivos actuales.

Tipo	Ciclo	Cultivo	Inicio	Fin	Ciclo del cultivo
Forrajeros	PV	Maíz	15/04/2020	05/09/2020	144
	Perenne	Alfalfa	01/10/2019	29/09/2020	365
Hortalizas	PV	Chile	15/01/2020	22/07/2020	190
	PV	Cebolla	15/01/2020	01/08/2020	200
	OI	Cebolla	04/10/2019	29/04/2020	209
	PV	Pepino	06/03/2020	01/07/2020	118
	OI	Pepino	01/08/2020	26/11/2020	118
	PV	Calabacita	06/03/2020	06/06/2020	93
	OI	Calabacita	01/08/2019	01/11/2020	93
	Perenne	Fresa	15/03/2020	14/03/2021	365
Perennes	Perenne	Espárrago	10/02/2020	08/02/2021	365
	Perenne	Parras/Vid	01/02/2020	31/01/2021	365
	Perenne	Nogal/Nuez	01/03/2020	28/02/2021	365
	Perenne	Arándano	01/02/2020	30/01/2021	365
	Grano	PV	Maíz	15/04/2020	15/10/2020
PV		Frijol	05/07/2020	05/10/2020	93

6.2.6. Caudal requerido por cultivo para una superficie unitaria

El caudal demandado por hidrante depende de la superficie de riego, la distribución de emisores y el caudal de los emisores, por lo cual, se hace un cálculo por cultivo para una superficie unitaria de 1.0 ha el caudal requerido y para la superficie real del hidrante, se multiplicara el caudal unitario por la superficie efectivamente regada por cada salida del hidrante (cálculo de caudal por hidrante).

Cuadro 6.5. Caudal demandado por hectárea.

Cultivo	No. de		Separación entre		Caudal	
	cintas	emisores	laterales (m)	emisores (m)	del emisor (lph)	por hectárea (lps)
Alfalfa	1	1	10.0	10.0	432.00	12.00
Arándano	1	1	2.0	0.7	4.00	8.55
Espárrago	1	1	0.8	0.3	1.02	12.59
Fresa	2	1	1.2	0.2	1.02	23.61
Nogal Adulto	1	1	10.0	10.0	360.00	10.00
Vid	1	1	3.0	0.5	2.00	3.70

Cuadro 6.5. Continuación...

Cultivo	No. de		Separación entre		Caudal	
	cintas	emisores	laterales (m)	emisores (m)	del emisor (lph)	por hectárea (lps)
Calabacita	1	1	1.8	0.2	1.02	7.87
Cebolla	2	1	1.8	0.2	1.02	15.74
Chile	2	1	1.8	0.2	1.02	15.74
Frijol	1	1	0.8	0.3	1.02	12.59
Maíz (Forrajero)	1	1	0.8	0.3	1.02	12.59
Maíz (Grano)	1	1	0.8	0.3	1.02	12.59
Pepino	1	1	1.8	0.2	1.02	7.87

6.2.7. Superficie total a regar actualmente por el sistema

Para determinar la superficie total que el sistema de riego debe regar actualmente se tomó para las secciones que están en proceso de construcción o sin construirse la superficie que se consideró en el proyecto ejecutivo, para las demás secciones se tomó la información que tiene la asociación de usuarios del distrito.

Con la finalidad de obtener el caudal que circularía por la línea principal y así determinar la presión a la entrada de la sección 01.

Cuadro 6.6. Superficie considerada por cada sección.

Sección	Superficie regada (ha)	Sección	Superficie regada (ha)
1	317.25	11	144.61
2	78.63	12	478.63
3	353.82	13	215.68
4	235.05	14	132.38
5	115.51	15	716.45
6	91.73	16	574.90
7	166.85	17	129.96
8	316.71	18	456.39
9	387.08	19	404.26
10	144.66	Total	5,460.54

6.3. Modelo Hidráulico

En la generación de un modelo intervienen una gran cantidad de datos correspondientes a distintos aspectos del funcionamiento de la red:

- Descripción física y localización geográfica de las infraestructuras (planos de la red de distribución presurizada).
- En una red de abastecimiento presurizada, la presión es un parámetro muy importante y está íntimamente ligada a la elevación del punto que se esté considerando (nivel del espejo del agua en la presa).
- Caudales demandados en la tomas o hidrantes (requerimientos de riego).
- Tiempos de riego o distribución de horarios de riego, requerido para cada uno de los cultivos, dependerá de la lámina de aplicación por parte del sistema de riego, de la infiltración básica del suelo y de la lámina requerida por los cultivos.

Por otra parte, el modelo matemático de una red de distribución de agua consistirá en un conjunto de elementos (líneas y nodos) que representan a las tuberías, las conexiones y demás elementos de dicha red (bombas y pozos, válvulas reguladoras y automáticas, depósitos y embalses, y los puntos de consumo o inyección que forman la red).

6.3.1. EPANET

El objetivo de la distribución del agua en los hidrantes es que llegue a cada una de las parcelas con el caudal y a la presión requerida, entonces es necesario conocer el caudal que cada hidrante requeriría el cual está en función del caudal unitario por cada cultivo y la superficie o tamaño del bloque que debe regar el hidrante por cada turno.

Considerando el riego para el 100 % de la superficie del distrito se debe aplicar en dos días, disponiendo como máximo 48 horas, por lo cual para dicho periodo, se podrían hacer hasta 15 cambios o turnos de posición del riego de 3.2 horas (3 horas 12 minutos).

Entonces, se propone distribuir de la manera más uniforme posible todos los hidrantes de la sección 01 su operación a lo largo del tiempo disponible de riego, es decir quedarían operando distribuidos en los siguientes horarios.

Cuadro 6.7. Distribución de horarios de riego de los hidrantes.

No	Horarios de operación
1	00:00 - 03:12
2	03:12 - 06:24
3	06:24 - 09:36
4	09:36 - 12:48
5	12:48 - 16:00
6	16:00 - 19:12
7	19:12 - 22:24
8	22:24 - 01:36
9	01:36 - 04:48
10	04:48 - 08:00
11	08:00 - 11:12
12	11:12 - 14:24
13	14:24 - 17:36
14	17:36 - 20:48
15	20:48 - 24:00

Establecidos los horarios de operación se generaran curvas de demanda en EPANET y con los caudales calculados para cada de hidrante en función del cultivo asignado.

6.3.2. Primera fórmula generalizada de Clément

En una red de riego a la demanda cada usuario puede abrir su toma o hidrante cuando considere conveniente, si bien con unos ciertos condicionantes derivados del cultivo (requerimientos de riego) y del hidrante de que disponga (umbral máximo de caudal y presión). El caudal circulante por un tramo de la red será una función aleatoria, dependiendo directamente del número de tomas abiertas y del caudal que se derive por cada una de ellas. Evidentemente el valor que aseguraría el suministro de agua en cualquier circunstancia sería el correspondiente a la suma de todas las demandas, lo que supondría que todas las tomas de la red deberían estar abiertas al mismo tiempo.

Ésta es una situación poco improbable, que conduciría a una red muy cara por estar sobredimensionada. Por ello, el enfoque de las fórmulas de cálculo de caudales pico en redes de riego a la demanda ha consistido en caracterizar el comportamiento de la apertura de tomas ajustándolo a un método o distribución estadística, mediante el cual

se estima con una determinada probabilidad el número de tomas que pueden estar abiertas simultáneamente.

Clément (1966) propuso para hidrantes heterogéneos con distintas descargas y probabilidades de funcionamiento en un instante dado la ecuación (6.1), conocida como la primera fórmula generalizada de Clément:

$$Q_{ji} = \sum_{i=1}^n p_i q_i + z \sqrt{\sum_{i=1}^n p_i (1 - p_i) q_i^2} \quad (6.1)$$

Donde:

- Q_{ji} = Es el caudal que debe ser conducido por el tramo ji [lps]
- n = Población de tomas que abastece el tramo ji [adimensional]
- p_i = Probabilidad de que la toma i esté abierta [adimensional]
- $1 - p_i$ = Probabilidad de que la toma i esté cerrado [adimensional]
- q_i = Caudal demandado por la toma i [lps]
- z = Variable normal estandarizada

Empleando la ecuación (6.1), se analizara la red de la sección 01 para un periodo de 12 horas diarias con la finalidad de detectar los hidrantes que no les llega la presión necesaria si el sistema opera a demanda libre.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Diseño agronómico

7.1.1. Láminas diarias

Los requerimientos fueron determinados con la ecuación (5.1), sin tomar en cuenta la precipitación efectiva simulando un escenario para un ciclo agrícola de sequía dado que hay cultivos perennes que no se riegan todo el año como espárrago, nogal y vid. También se consideró que la presa cierra del 15 de diciembre al 14 de enero, por cuestiones de mantenimiento a la red, los requerimientos para ese periodo fueron descontados ya que la finalidad es analizar la red bajo el suministro de agua de la presa y no de los pozos u otros fuentes que entran en funcionamiento cuando la presa deja de operar.

Cuadro 7.1. Requerimientos de riego promedio diarios.

Cultivo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	(mm/día)											
Perenne	7.3	9.8	13.0	17.2	20.8	22.4	22.7	24.4	20.7	19.2	10.0	8.5
Alfalfa	3.6	5.1	7.0	8.2	8.3	7.3	6.0	5.4	3.9	3.3	2.7	2.5
Arándano	2.0	0.7	1.8	3.4	4.0	3.8	3.4	3.5	2.9	2.7	2.0	1.7
Espárrago	0.0	2.0	2.1	2.7	3.1	3.4	3.9	4.5	3.8	3.5	2.7	2.3
Fresa	1.7	1.4	0.8	1.2	2.2	3.2	3.9	4.4	3.7	3.4	2.6	2.1
Nogal Adulto	0.0	0.0	0.4	0.5	1.3	2.0	2.4	3.3	3.6	4.0	0.0	0.0
Vid	0.0	0.6	0.9	1.2	1.9	2.6	3.0	3.3	2.7	2.3	0.0	0.0
P - V	2.5	4.1	12.0	22.8	25.0	24.1	21.3	17.0	11.0	5.8	0.0	0.0
Calabacita	0.0	0.0	2.4	4.0	3.9	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cebolla	1.2	1.7	3.3	5.2	5.4	4.9	3.1	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0
Chile	1.3	2.4	4.0	5.3	5.5	4.5	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Frijol	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	4.9	3.5	2.6	0.0	0.0
Maíz (Forrajero)	0.0	0.0	0.0	2.4	3.0	3.9	4.7	4.8	3.8	0.0	0.0	0.0
Maíz (Grano)	0.0	0.0	0.0	2.4	3.0	3.9	4.7	4.8	3.7	3.2	0.0	0.0
Pepino	0.0	0.0	2.3	3.6	4.2	3.5	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
O - I	2.7	3.4	4.3	3.5	0.0	0.0	0.0	4.8	5.8	6.9	5.3	1.6
Calabacita	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	3.0	2.5	2.0	0.0
Cebolla	2.7	3.4	4.3	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	1.4	1.6
Pepino	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	2.8	2.8	1.9	0.0
Total	12.5	17.4	29.3	43.5	45.8	46.5	44.0	46.2	37.5	31.9	15.3	10.2

7.1.2. Láminas mensuales

En los cuadros Cuadro 7.2 y Cuadro 7.3 se muestran el acumulado de las láminas diarias con respecto a los días que emplean de cada mes al igual que el requerimiento y volumen por hectárea por cada ciclo agrícola que comprende cada cultivo. Los cultivos perennes son los que demandan mayor cantidad de agua, es importante recordar que los requerimientos no contemplan la precipitación esto con la finalidad de representar las condiciones en tiempos sin precipitación, donde los cultivos de mayor demanda se ven afectados en el aspecto que la superficie sembrada para estos cultivos debe reducirse ya que se tiene un volumen concesionado anualmente el cual no debe rebasarse.

Cuadro 7.2. Requerimientos de riego mensuales parte 1.

Cultivo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
	(mm/mes)								
Perenne	124.0	283.6	403.1	516.7	644.8	672.3	703.5	756.0	621.6
Alfalfa	61.0	148.3	217.6	246.5	256.4	218.7	186.1	168.5	117.1
Arándano	34.4	21.0	57.2	100.6	124.9	114.1	106.6	107.9	88.3
Espárrago	0.0	56.8	64.7	80.8	95.6	103.1	120.1	139.4	114.9
Fresa	28.6	39.4	24.1	36.5	69.2	96.1	121.5	136.0	111.5
Nogal Adulto	0.0	0.0	12.5	14.8	39.7	60.9	75.6	102.7	109.3
Vid	0.0	18.1	27.1	37.4	59.0	79.3	93.5	101.4	80.4
P - V	43.0	119.4	347.9	618.5	774.3	639.3	541.2	451.5	233.4
Calabacita	0.0	0.0	62.3	118.7	122.2	21.2	0.0	0.0	0.0
Cebolla	20.4	50.7	100.8	155.0	167.0	148.0	97.3	2.5	0.0
Chile	22.6	68.7	125.1	160.2	169.5	133.8	68.8	0.0	0.0
Frijol	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	83.9	151.9	104.1
Maíz (Forrajero)	0.0	0.0	0.0	37.7	92.2	115.8	144.3	148.6	19.2
Maíz (Grano)	0.0	0.0	0.0	37.7	92.2	115.8	144.3	148.6	110.2
Pepino	0.0	0.0	59.7	109.1	131.3	104.7	2.6	0.0	0.0
O - I	45.2	96.4	134.8	104.9	0.0	0.0	0.0	150.0	174.6
Calabacita	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.9	90.1
Cebolla	45.2	96.4	134.8	104.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pepino	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	73.1	84.5
Total	212.2	499.5	885.8	1,240.0	1,419.1	1,311.6	1,244.7	1,357.4	1,029.6

Cuadro 7.3. Requerimientos de riego mensuales parte 2.

Cultivo	Oct	Nov	Dic	RR Neto	RR Bruto	Volumen neto	Volumen bruto
	(mm/mes)			(mm/año)	(mm/año)	(m ³ /ha/año)	(m ³ /ha/año)
Perenne	530.0	298.6	110.3	5,664.5	5,962.6	56,644.9	59,626.2
Alfalfa	101.1	79.7	34.3	1,835.3	1,931.9	18,353.2	19,319.2
Arándano	83.8	61.5	24.0	924.5	973.1	9,244.9	9,731.4
Espárrago	109.1	80.0	23.0	987.4	1,039.4	9,874.4	10,394.1
Fresa	105.9	77.5	29.0	875.4	921.4	8,753.7	9,214.5
Nogal Adulto	59.9	0.0	0.0	475.4	500.4	4,753.8	5,004.0
Vid	70.2	0.0	0.0	566.5	596.3	5,664.9	5,963.0
P - V	61.0	0.0	0.0	3,829.5	4,031.0	38,294.6	40,310.1
Calabacita	0.0	0.0	0.0	324.4	341.4	3,243.5	3,414.2
Cebolla	0.0	0.0	0.0	741.6	780.6	7,415.9	7,806.3
Chile	0.0	0.0	0.0	748.8	788.2	7,488.0	7,882.1
Frijol	13.0	0.0	0.0	352.8	371.4	3,528.2	3,713.9
Maíz (Forrajero)	0.0	0.0	0.0	557.8	587.1	5,577.7	5,871.2
Maíz (Grano)	48.1	0.0	0.0	696.8	733.4	6,967.7	7,334.4
Pepino	0.0	0.0	0.0	407.4	428.8	4,073.6	4,288.0
O - I	209.9	93.4	22.8	1,032.1	1,086.4	10,321.1	10,864.3
Calabacita	78.7	2.0	0.0	247.7	260.8	2,477.1	2,607.5
Cebolla	45.6	42.5	22.8	492.3	518.2	4,922.8	5,181.9
Pepino	85.7	48.9	0.0	292.1	307.5	2,921.1	3,074.8
Total	800.9	392.0	133.1	10,526.1	11,080.1	105,260.6	110,800.7

7.1.3. Volúmenes mensuales

La superficie a regar por el sistema de riego que se consideró fue de 5,460 hectáreas las cuales se distribuyeron entre los cultivos del Cuadro 7.1. Las 5,460 hectáreas son la suma de la superficie que se riega actualmente por las secciones que están operando más la superficie que se tiene contemplado de las secciones que están en proceso de construcción. La superficie total se distribuyó para cada cultivo de manera que no superara por mes las 5,460 ha. El cultivo de calabacita en el ciclo agrícola de primavera – verano concentra la mayor parte de la superficie.

Cuadro 7.4. Volúmenes de riego mensuales en parte 1.

Cultivo	Sup. M. (ha)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
		(dam ³)						
Perenne	1,110	225.5	478.3	620.6	868.5	1,120.0	1,192.9	1,301.0
Alfalfa	60	36.6	89.0	130.5	147.9	153.9	131.2	111.7
Arándano	300	103.1	63.1	171.7	301.9	374.7	342.4	319.9
Espárrago	350	0.0	198.8	226.3	282.9	334.5	360.8	420.4
Fresa	300	85.8	118.3	72.2	109.6	207.5	288.3	364.5
Nogal Adulto	50	0.0	0.0	6.2	7.4	19.9	30.5	37.8
Vid	50	0.0	9.0	13.5	18.7	29.5	39.7	46.8
P - V	4,350	107.5	298.4	2,490.6	4,654.9	5,154.8	2,165.4	1,381.9
Calabacita	2,900	0.0	0.0	1,806.3	3,441.1	3,544.2	614.6	0.0
Cebolla	250	50.9	126.7	252.0	387.4	417.4	370.1	243.2
Chile	250	56.6	171.7	312.9	400.5	423.7	334.6	172.1
Frijol	200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	167.9
Maíz (Forrajero)	200	0.0	0.0	0.0	75.5	184.4	231.6	288.6
Maíz (Grano)	350	0.0	0.0	0.0	132.1	322.7	405.3	505.0
Pepino	200	0.0	0.0	119.4	218.3	262.5	209.3	5.2
O - I	650	90.5	192.9	269.6	209.8	0.0	0.0	0.0
Calabacita	250	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cebolla	200	90.5	192.9	269.6	209.8	0.0	0.0	0.0
Pepino	200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	6,110¹	423.5	969.6	3,380.8	5,733.2	6,274.8	3,358.3	2,682.9

¹ Superficie máxima total durante los tres ciclos agrícolas.

Cuadro 7.5. Volúmenes de riego mensuales en parte 2.

Cultivo	Sup. Máx. (ha)	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Volumen neto	Volumen bruto
		(dam ³)						
Perenne	1,110	1,422.9	1,166.7	1,076.6	744.7	260.1	10,477.7	11,029.2
Alfalfa	60	101.1	70.3	60.6	47.8	20.6	1,101.2	1,159.2
Arándano	300	323.8	264.8	251.4	184.4	72.1	2,773.5	2,919.4
Espárrago	350	487.8	402.2	381.9	280.0	80.4	3,456.0	3,637.9
Fresa	300	408.1	334.6	317.6	232.5	87.0	2,626.1	2,764.3
Nogal Adulto	50	51.3	54.7	29.9	0.0	0.0	237.7	250.2
Vid	50	50.7	40.2	35.1	0.0	0.0	283.2	298.2

Cuadro 7.5. Continuación...

Cultivo	Sup. Máx. (ha)	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Volumen neto	Volumen bruto
		(dam ³)						
P - V	4,350	1,127.0	632.1	194.1	0.0	0.0	18,206.8	19,165.0
Calabacita	2,900	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9,406.2	9,901.2
Cebolla	250	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1,854.0	1,951.6
Chile	250	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1,872.0	1,970.5
Frijol	200	303.7	208.1	25.9	0.0	0.0	705.6	742.8
Maíz (Forrajero)	200	297.1	38.4	0.0	0.0	0.0	1,115.5	1,174.2
Maíz (Grano)	350	520.0	385.5	168.2	0.0	0.0	2,438.7	2,567.0
Pepino	200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	814.7	857.6
O - I	650	338.4	394.3	459.2	187.8	45.6	2,188.1	2,303.2
Calabacita	250	192.3	225.3	196.7	5.0	0.0	619.3	651.9
Cebolla	200	0.0	0.0	91.2	85.0	45.6	984.6	1,036.4
Pepino	200	146.1	168.9	171.3	97.8	0.0	584.2	615.0
Total	6,110¹	2,888.3	2,193.1	1,729.9	932.5	305.7	30,872.6	32,497.4

¹ Superficie máxima total durante los tres ciclos agrícolas.

Las superficie está distribuida de tal manera que no sobrepasa el volumen concesionado de 32.5 hectómetros cúbicos que se tienen por ciclo agrícola. El mes con mayor demanda para esta simulación resulto ser mayo con 6,274.8 decámetros cúbicos (dam³).

Para la simulación hidráulica de la sección 01, se tomó del mes de mayo el día de mayor demanda y como el tiempo de riego es de 48 horas se consideró también el complemento al día de mayor demanda.

7.1.4. Mes de mayor demanda

El día con mayor demanda es el 27 de mayo con una lámina total aplicar de 42.60 mm día⁻¹, como se mencionaba en el apartado anterior el tiempo de riego es de 48 horas, si se considera desde el 01 de octubre que es el inicio del ciclo agrícola a simular, se formaran bloques de dos días, el 26 y 27 de mayo forman un bloque de 48 horas. Por lo que el sistema para ese intervalo de riego aplicara una lámina total de 83.89 mm, 41.29 mm del día 26 y 42.60 mm del día 27.

Cuadro 7.6. Requerimientos diarios del mes de mayo parte 1.

Día	Alfalfa	Arándano	Espárrago	Fresa	Nogal	Vid	Calabacita
	(mm/día)						
01/05/2020	5.64	4.09	2.78	1.57	0.75	1.51	4.04
02/05/2020	5.45	3.97	2.70	1.54	0.76	1.48	3.89
03/05/2020	5.46	4.00	2.72	1.58	0.79	1.52	3.90
04/05/2020	5.43	3.99	2.72	1.60	0.82	1.55	3.87
05/05/2020	5.30	3.90	2.66	1.59	0.83	1.54	3.76
06/05/2020	5.00	3.69	2.52	1.53	0.81	1.48	3.53
07/05/2020	5.45	4.04	2.76	1.70	0.92	1.65	3.83
08/05/2020	5.38	4.00	2.74	1.71	0.94	1.66	3.76
09/05/2020	5.57	4.16	2.85	1.81	1.01	1.76	3.88
10/05/2020	5.33	3.99	2.74	1.76	1.00	1.71	3.69
11/05/2020	5.40	4.06	2.79	1.82	1.04	1.77	3.72
12/05/2020	5.23	3.94	2.71	1.80	1.04	1.75	3.59
13/05/2020	5.10	3.86	2.66	1.79	1.06	1.74	3.48
14/05/2020	5.10	3.87	2.66	1.83	1.11	1.77	3.46
15/05/2020	5.02	3.83	2.63	1.83	1.14	1.77	3.38
16/05/2020	5.27	4.04	2.78	1.96	1.24	1.89	3.53
17/05/2020	5.10	3.92	2.70	1.93	1.25	1.87	3.39
18/05/2020	5.33	4.11	2.83	2.05	1.36	1.98	3.51
19/05/2020	5.37	4.16	2.86	2.11	1.42	2.03	3.52
20/05/2020	5.40	4.20	2.89	2.16	1.48	2.08	3.54
21/05/2020	5.34	4.15	2.87	2.17	1.51	2.09	3.49
22/05/2020	5.48	4.27	2.96	2.27	1.60	2.18	3.57
23/05/2020	5.33	4.15	2.88	2.24	1.60	2.15	3.47
24/05/2020	5.38	4.20	2.92	2.30	1.67	2.21	3.49
25/05/2020	5.29	4.13	2.88	2.30	1.69	2.21	3.43
26/05/2020	5.24	4.10	2.87	2.31	1.73	2.22	3.39
27/05/2020	5.38	4.22	2.96	2.42	1.82	2.32	3.48
28/05/2020	5.16	4.05	2.85	2.36	1.80	2.26	3.33
29/05/2020	5.20	4.09	2.89	2.42	1.87	2.31	3.33
30/05/2020	5.05	3.98	2.84	2.39	1.86	2.28	3.21
31/05/2020	5.20	4.11	2.96	2.51	1.95	2.39	3.28

Cuadro 7.7. Requerimientos diarios del mes de mayo parte 2.

Día	Cebolla	Chile	Maíz (Forrajero)	Maíz (Grano)	Pepino	Total
	(mm/día)					
01/05/2020	5.07	5.32	2.41	2.41	4.09	39.67
02/05/2020	4.89	5.14	2.34	2.34	3.96	38.47
03/05/2020	4.91	5.16	2.37	2.37	3.98	38.75
04/05/2020	4.89	5.13	2.37	2.37	3.97	38.71
05/05/2020	4.77	5.01	2.33	2.33	3.88	37.93
06/05/2020	4.50	4.73	2.22	2.22	3.67	35.91
07/05/2020	4.91	5.16	2.43	2.43	4.01	39.28
08/05/2020	4.85	5.09	2.42	2.42	3.97	38.94
09/05/2020	5.03	5.26	2.52	2.52	4.12	40.48
10/05/2020	4.82	5.03	2.43	2.43	3.93	38.87
11/05/2020	4.89	5.09	2.48	2.48	3.97	39.51
12/05/2020	4.74	4.92	2.43	2.43	3.83	38.41
13/05/2020	4.63	4.80	2.42	2.42	3.73	37.69
14/05/2020	4.63	4.79	2.47	2.47	3.71	37.87
15/05/2020	4.56	4.71	2.48	2.48	3.65	37.47
16/05/2020	4.79	4.94	2.65	2.65	3.83	39.57
17/05/2020	4.64	4.78	2.61	2.61	3.70	38.49
18/05/2020	4.86	4.98	2.78	2.78	3.86	40.42
19/05/2020	4.90	5.01	2.86	2.86	3.89	41.00
20/05/2020	4.94	5.03	2.93	2.93	3.91	41.49
21/05/2020	4.88	4.96	2.94	2.94	3.85	41.19
22/05/2020	5.02	5.08	3.04	3.04	3.94	42.46
23/05/2020	4.89	4.93	2.99	2.99	3.82	41.45
24/05/2020	4.94	4.97	3.05	3.05	3.84	42.01
25/05/2020	4.86	4.87	3.02	3.02	3.77	41.46
26/05/2020	4.82	4.82	3.03	3.03	3.72	41.29
27/05/2020	4.96	4.94	3.14	3.14	3.81	42.60
28/05/2020	4.77	4.74	3.05	3.05	3.65	41.06
29/05/2020	4.81	4.77	3.10	3.10	3.67	41.57
30/05/2020	4.68	4.62	3.04	3.04	3.55	40.56
31/05/2020	4.84	4.76	3.17	3.17	3.65	41.99

7.1.5. Tiempo de riego por cultivo

El tiempo de riego requerido para cada uno de los cultivos, depende de la lámina horaria y de la lámina de riego aplicar. Para la sección 01 se realizaron tres simulaciones con

respecto al tiempo de riego por cultivo: la primera considerando las condiciones de los sistemas de riego para los días 26 y 27 de mayo de 2020, la segunda para los mismos días ajustando los gastos de los emisores para que todos los cultivos tuvieran el mismo tiempo de riego y la tercera si se llegaran a presentar las máximas demandas de todos los cultivos en las 48 horas que se tienen para regar también se ajustaran los gastos de los emisores para que todos los cultivos tuvieran el mismo tiempo de riego eliminando la flexibilidad que pudieran tener al momento de regar.

Cuadro 7.8. Tiempos de riego primera simulación.

Cultivo	Lámina de riego (mm)	Lámina horaria (mm/h)	q_E (lph)	Tiempo de riego (h)	Grados de libertad	Caudal por hectárea (lps)
Alfalfa	10.52	4.32	432.00	2.44	1.31	12.00
Arándano	8.23	3.08	4.00	2.67	1.20	8.55
Espárrago	5.76	4.53	1.02	1.27	2.52	12.59
Fresa	4.61	8.50	1.02	0.54	5.90	23.61
Nogal	3.42	3.60	360.00	0.95	3.37	10.00
Vid	4.43	1.33	2.00	3.32	0.96	3.70
Calabacita	6.82	2.83	1.02	2.41	1.33	7.87
Cebolla	9.68	5.67	1.02	1.71	1.87	15.74
Chile	9.69	5.67	1.02	1.71	1.87	15.74
Maíz (Forrajero)	6.05	4.53	1.02	1.34	2.40	12.59
Maíz (Grano)	6.05	4.53	1.02	1.34	2.40	12.59
Pepino	7.49	2.83	1.02	2.64	1.21	7.87

Como se puede observar en el Cuadro 7.8 el tiempo de riego para la primera simulación que abarca los días 26 y 27 de mayo de 2020, la mayoría de los cultivos se encuentran dentro del tiempo establecido para regar (3.2 horas) a excepción del cultivo de vid, esto debido a que el gotero que usan no tiene la capacidad suficiente de suministrar la lámina que requiere la vid en las 3.2 horas. A excepción de la vid los demás cultivos presentan una flexibilidad para regar, es decir que no necesariamente iniciado el turno el hidrante comiencen a regar.

Otro aspecto importante es la lámina horaria que aplican los goteros, aspersores (alfalfa) y microaspersores (nogal) cuyas laminas llegan a superar los 4 mm/h esto puede convertirse en un problema ya que si la infiltración básica que presentan los suelos

donde se tienen estos sistemas es menor a las láminas horarias pueden generar encharcamientos en las parcelas y afectar aquellos cultivos que son muy sensibles al encharcamiento. Para el Cuadro 7.8 se anexaron los caudales por hectárea previamente calculados en el Cuadro 6.5.

Para la segunda simulación se respetaron los mismos días 26 y 27 solo se ajustó el caudal del emisor para que todos los cultivos regarán exactamente en las 3.2 horas.

Cuadro 7.9. Tiempos de riego segunda simulación.

Cultivo	Lámina de riego (mm)	Lámina horaria (mm/h)	q_E (lph)	Tiempo de riego (h)	Grados de libertad	Caudal por hectárea (lps)
Alfalfa	10.52	3.29	328.83	3.20	1.00	9.13
Arándano	8.23	2.57	3.34	3.20	1.00	7.14
Espárrago	5.76	1.80	0.40	3.20	1.00	5.00
Fresa	4.61	1.44	0.17	3.20	1.00	4.00
Nogal	3.42	1.07	106.81	3.20	1.00	2.97
Vid	4.43	1.38	2.08	3.20	1.00	3.84
Calabacita	6.82	2.13	0.77	3.20	1.00	5.92
Cebolla	9.68	3.02	0.54	3.20	1.00	8.40
Chile	9.69	3.03	0.55	3.20	1.00	8.42
Maíz (Forrajero)	6.05	1.89	0.43	3.20	1.00	5.26
Maíz (Grano)	6.05	1.89	0.43	3.20	1.00	5.26
Pepino	7.49	2.34	0.84	3.20	1.00	6.50

Para la segunda simulación se eliminó cualquier flexibilidad que se tuviera para regar, ajustando el tiempo de riego exactamente a las 3.2 horas que se tienen por cada turno, las láminas horarias que se muestran en el Cuadro 7.9 son menores a 4 mm/h y así evitar encharcamientos en la parcela.

Se recalcularon los caudales por hectárea tomando ahora el nuevo valor del caudal del emisor, los nuevos caudales a suministrar por hectárea para todos los cultivos fueron menores a 10 lps, lo que se puede traducir en un menor caudal a circular por los tramos de la red a diferencia de los caudales suministrados por la primera simulación donde se tenían caudales mayores a 20 lps, lo que puede generar que en tramos donde los diámetros sean menores a 200 mm (8") y de longitudes largas las pérdidas por fricción generen valores altos y por consiguiente la presión disminuya.

Cuadro 7.10. Tiempos de riego tercera simulación.

Cultivo	Lámina de riego (mm)	Lámina horaria (mm/h)	q_E (lph)	Tiempo de riego (h)	Grados de libertad	Caudal por hectárea (lps)
Alfalfa	11.3	3.53	353.26	3.20	1.00	9.81
Arándano	8.54	2.67	3.47	3.20	1.00	7.42
Espárrago	8.84	2.76	0.62	3.20	1.00	7.68
Fresa	8.4	2.63	0.32	3.20	1.00	7.30
Nogal	8.72	2.72	272.43	3.20	1.00	7.57
Vid	7.16	2.24	3.35	3.20	1.00	6.21
Calabacita	8.22	2.57	0.92	3.20	1.00	7.13
Cebolla	10.16	3.17	0.57	3.20	1.00	8.81
Chile	10.66	3.33	0.60	3.20	1.00	9.25
Maíz (Forrajero)	9.68	3.02	0.68	3.20	1.00	8.39
Maíz (Grano)	9.68	3.02	0.68	3.20	1.00	8.39
Pepino	8.24	2.58	0.93	3.20	1.00	7.16

Para la tercera simulación es un caso poco probable, donde coincidieran las necesidades máximas de los cultivos dentro de las 48 horas, igual que en la segunda simulación, se ajustaron los caudales de los emisores para que regaran en las 3.2 horas, se observa en el Cuadro 7.10 que las láminas horarias también son menores a 4 mm/h y el caudal a suministrar para todos los cultivos es menor a 10 lps. Sin embargo cultivos como: espárrago, fresa, nogal, vid, maíz (forrajero) y maíz (grano) tuvieron un incremento considerable en el caudal a suministrar por hectárea que van de un 50% hasta 150%.

7.1.6. Superficie por cultivo sección 01

La superficie que se consideró por cada cultivo para la sección 01 no es más que la multiplicación de la superficie total del cultivo (columna 2 del Cuadro 7.11) por el porcentaje que representa la superficie total de la sección 01 con respecto a la superficie total a regar en el ciclo agrícola.

Ya que es poco probable que las superficies que riega cada hidrante al asignarle un cultivo su suma de estos de exactamente lo que se calculó (columna 3 Cuadro 7.11) se trató de que la superficie final se asemejara lo mayor posible a dicho calculo (columna 4 Cuadro 7.11).

Cuadro 7.11. Superficie por cultivo para la sección 01.

Cultivo	Superficie total por cultivo (ha)	Superficie por cultivo calculada (ha)	Superficie por cultivo final (ha)
Alfalfa	60	3.49	5.73
Arándano	300	17.43	17.51
Espárrago	350	20.33	23.26
Fresa	300	17.43	17.50
Nogal Adulto	50	2.90	5.86
Vid	50	2.90	3.47
Calabacita	2,900	168.48	167.80
Cebolla	250	14.52	17.45
Chile	250	14.52	11.64
Maíz (Forrajero)	200	11.62	11.58
Maíz (Grano)	350	20.33	11.94
Pepino	200	11.62	23.50

7.1.7. Lámina de riego ponderada

Con el objetivo de simular la red en una condición de riego a la demanda se determinó para el mes crítico (Cuadro 7.4 y Cuadro 7.5) una lámina bruta de riego ponderada, la cual se considerara aplicar por todos los hidrantes de la sección 01.

Cuadro 7.12. Lámina de riego neta ponderada.

Cultivo	Lámina neta total (mm/día)	Superficie (ha)	Superficie acumulada (ha)	Superficie (%)	Lámina neta parcial (mm/día)
Alfalfa	8.27	60	60	1.14%	0.09
Chile	5.47	250	310	4.75%	0.26
Cebolla	5.39	250	560	4.75%	0.26
Pepino	4.23	200	760	3.80%	0.16
Arándano	4.03	300	1060	5.70%	0.23
Calabacita	3.94	2900	3960	55.13%	2.17
Espárrago	3.08	350	4310	6.65%	0.21
Maíz (Forrajero)	2.97	200	4510	3.80%	0.11
Maíz (Grano)	2.97	350	4860	6.65%	0.20
Fresa	2.23	300	5160	5.70%	0.13
Vid	1.90	50	5210	0.95%	0.02
Nogal Adulto	1.28	50	5260	0.95%	0.01

Se sumaron las láminas netas parciales dando 3.85 mm/día, y se dividió entre la eficiencia de conducción y distribución del 95%, se obtuvo una lámina bruta ponderada de 4.05 mm/día, la cual se empleó para determinar las dotaciones por hidrante en la simulación de riego a la demanda para la sección 01.

7.2. Análisis hidráulico

En la obra de toma se consideró la carga que genera la elevación de 1993.25 msnm (nivel de agua mínimo extraordinario de la presa calles) que es el nivel mínimo de operación con la que debe de funcionar la conducción y plataforma de filtrado. Para la línea principal se consideró los planos de diseño, debido a que no se pudo contar con el acceso a los planos de construcción finales, se consideró las válvulas reguladoras de presión (VRP) que se ubican en el tramo muerto de la línea principal al inicio del cruce del “Cañón del Brujo” las cuales están calibradas a 2.80 kg/cm², también se consideró la pérdida que genera la plataforma de filtrada que es alrededor de 0.25 kg/cm².

De la sección 02 a 19 se consideraron como un nodo dentro de la red principal pero con un caudal asignado para cada turno, con la finalidad de simular la red principal si estuvieran regando todas las parcelas del distrito para poder obtener las presiones a la entrada de la sección 01 por cada turno de riego. A partir de la columna 4 del Cuadro 7.11 donde se le asignó un cultivo a cada hidrante, y con la información del caudal por hectárea del Cuadro 7.8, Cuadro 7.9 y Cuadro 7.10, se obtuvo el caudal que debe suministrar cada hidrante (se multiplico dicho valor con respecto a la superficie que riega cada bloque del hidrante) de la sección 01. Se agruparon los hidrantes de modo que por cada turno los caudales a entregar en la entrada de la sección 01 no variaran tanto.

En la sección 01 se consideraron las 4 válvulas reguladoras de presión existentes, la primera VRP se ubica en la estructura de la salida a sección en el ramal de la margen izquierda calibrada a 3.5 kg/cm², la segunda VRP también se ubica en la estructura de la salida a sección pero en el ramal de la margen derecha calibrada a 4.5 kg/cm², la tercera VRP se ubica en el nodo A115 calibrada a 3.5 kg/cm² y la cuarta VRP se ubica en el nodo A189 calibrada a 3.8 kg/cm².

Se consideraron también todas las piezas especiales (válvulas seccionadoras, válvulas de aire y drenes) al igual que las piezas de PVC (codos, tees, reducciones, etc.) que

marcaba el plano de construcción de la sección 01 para obtener las pérdidas localizadas dentro de la red. La topografía que se empleó fue la que se entregó dentro del proyecto ejecutivo.

Se realizaron siete simulaciones en total: las tres primeras simulaciones se describen en el apartado de tiempo de riego por cultivo, la cuarta simulación abriendo de manera aleatorio hidrantes ajenos a su turno de riego asignado, la quinta, sexta y séptima simulación con riego a la demanda aplicando la primera fórmula de Clément a una probabilidad en toda la red de la sección 01 de 99%, 95% y 90% respectivamente en un periodo de operación de 12 horas diarias, estas tres últimas simulaciones se consideraron como una red abierta dado que la fórmula de Clément acumula solo si son redes abiertas.

7.2.1. Primera simulación distribución por turnos

El caudal mínimo que se presentó a la entrada de la sección 01, fue en los turnos 14 y 15 (208.36 lps), y el máximo en el turno 13 (223.73 lps) presentado una variación máxima entre caudales de 6.9% (15.37 lps).

Cuadro 7.13. Caudales a la entrada de la sección 01 primera simulación.

Turno	Horario	Caudal (lps)
1	00:00 - 03:12	212.15
2	03:12 - 06:24	212.15
3	06:24 - 09:36	213.92
4	09:36 - 12:48	213.62
5	12:48 - 16:00	211.19
6	16:00 - 19:12	215.67
7	19:12 - 22:24	220.85
8	22:24 - 01:36	220.03
9	01:36 - 04:48	209.41
10	04:48 - 08:00	221.96
11	08:00 - 11:12	222.90
12	11:12 - 14:24	209.96
13	14:24 - 17:36	223.73
14	17:36 - 20:48	208.36
15	20:48 - 24:00	208.36

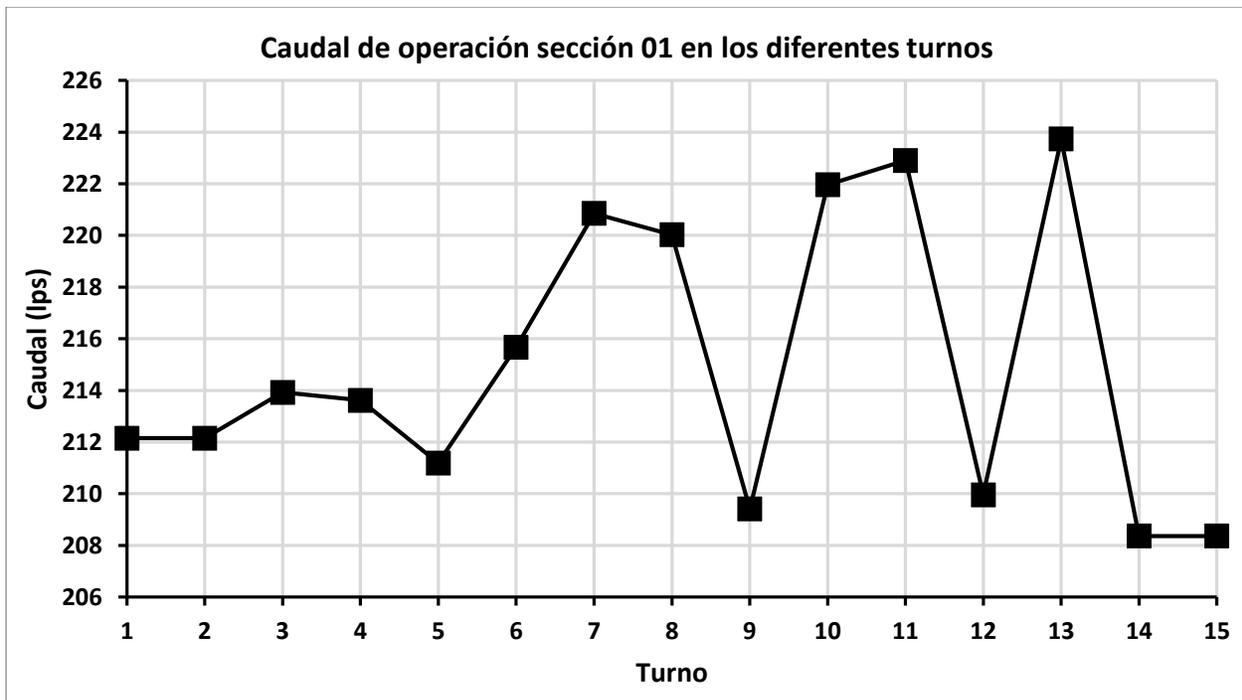


Figura 7.1. Variación de caudales a la entrada de la sección 01 primera simulación.

En esta simulación 27 hidrantes de los 126 operando en la sección 01 no les llegó la presión mínima (2.5 kg/cm^2) requerida para funcionar, oscilando entre 0.43 y 2.44 kg/cm^2 a excepción del nodo A111 que presentó una presión negativa. En el Cuadro 7.14 se muestran los hidrantes que no cumplen con la presión mínima.

Cuadro 7.14. Hidrantes donde la presión es menor a 25 m primera simulación.

Hidrante	Elevación (m)	Demanda (lps)	Presión (m)	Carga (m)	Turno
A46	1,934.97	14.27	10.89	1,945.86	1,2,3
A61	1,924.73	13.12	11.87	1,936.60	1,2,3
A169	1,897.19	10.5	23.57	1,920.76	1,2,3
A200	1,901.53	10.5	19.93	1,921.47	1,2,3
A206	1,900.35	10.5	15.53	1,915.88	1,2,3
A58	1,933.49	10.5	19.69	1,958.45	4,5,6
A79	1,924.93	20.99	4.52	1,944.62	4,5,6
A87	1,913.56	6.56	19.95	1,918.08	4,5,6
A91	1,914.29	19.68	16.04	1,934.24	4,5,6
A229	1,915.42	19.68	11.17	1,931.47	4,5,6
A244	1,901.60	7.14	13.7	1,912.77	7,8,9
A93	1,922.36	6.56	22.78	1,936.06	10,11,12

Cuadro 7.14. Continuación...

Hidrante	Elevación (m)	Demanda (lps)	Presión (m)	Carga (m)	Turno
A255	1,919.36	13.13	21.31	1,942.14	10,11,12
A82	1,904.63	6.56	24.42	1,925.94	13
A96	1,915.18	13.12	16.82	1,939.60	13,14,15
A111	1,916.39	19.68	-7.18	1,933.21	13,14,15
A120	1,899.26	6.56	22.73	1,892.09	13,14,15
A121	1,896.47	19.68	4.26	1,919.21	13,14,15
A137	1,895.04	7.13	23.73	1,899.30	13,14,15
A144	1,891.99	6.56	23.75	1,915.72	13,14,15
A162	1,896.81	6.56	21.64	1,920.57	13,14,15
A165	1,893.13	10.5	15.99	1,914.77	13,14,15
A170	1,900.02	19.68	14.83	1,916.01	13,14,15
A193	1,901.19	6.56	20.16	1,916.02	13,14,15
A205	1,904.85	13.12	5.69	1,925.01	13,14,15
A243	1,902.79	10.5	17.03	1,908.48	13,14,15
A252	1,913.96	6.56	20.78	1,930.98	13,14,15

La presión a la entrada de la sección 01 en las 48 horas oscilo entre 4.89 y 4.92 kg/cm². Se llegan presentar velocidades de hasta 2.89 m/s generando pérdidas de fricción de hasta 20.65 m en dichos tramos. Algunos tramos de 100 mm (4") la velocidad oscila entre 2.0 y los 2.89 m/s presentando pérdidas por fricción de hasta 22 m.

7.2.2. Segunda simulación distribución por turnos

El caudal mínimo que se presentó a la entrada de la sección 01, fue en los turnos 14 y 15 (115.46 lps), y el máximo en el turno 11 (137.59 lps) presentado una variación máxima entre caudales de 16.1% (22.13 lps).

En la segunda simulación donde se ajusta el caudal del emisor para aplicar la lámina requerida en las 3.2 horas que dura el turno, los caudales a la entrada de la red de la sección 01 disminuyen hasta en 45% con respecto a los de la primera simulación, generando que las pérdidas por fricción disminuyan y por consiguiente que la presión a 24 de los 27 hidrantes que no les llegaba la presión mínima en la primera simulación ahora cuenten con la presión requerida suficiente para operar.

Cuadro 7.15. Caudales a la entrada de la sección 01 segunda simulación.

Turno	Horario	Caudal (lps)
1	00:00 - 03:12	128.14
2	03:12 - 06:24	128.14
3	06:24 - 09:36	129.48
4	09:36 - 12:48	120.05
5	12:48 - 16:00	121.53
6	16:00 - 19:12	124.99
7	19:12 - 22:24	132.64
8	22:24 - 01:36	128.14
9	01:36 - 04:48	124.24
10	04:48 - 08:00	133.32
11	08:00 - 11:12	137.59
12	11:12 - 14:24	130.67
13	14:24 - 17:36	126.62
14	17:36 - 20:48	115.46
15	20:48 - 24:00	115.46

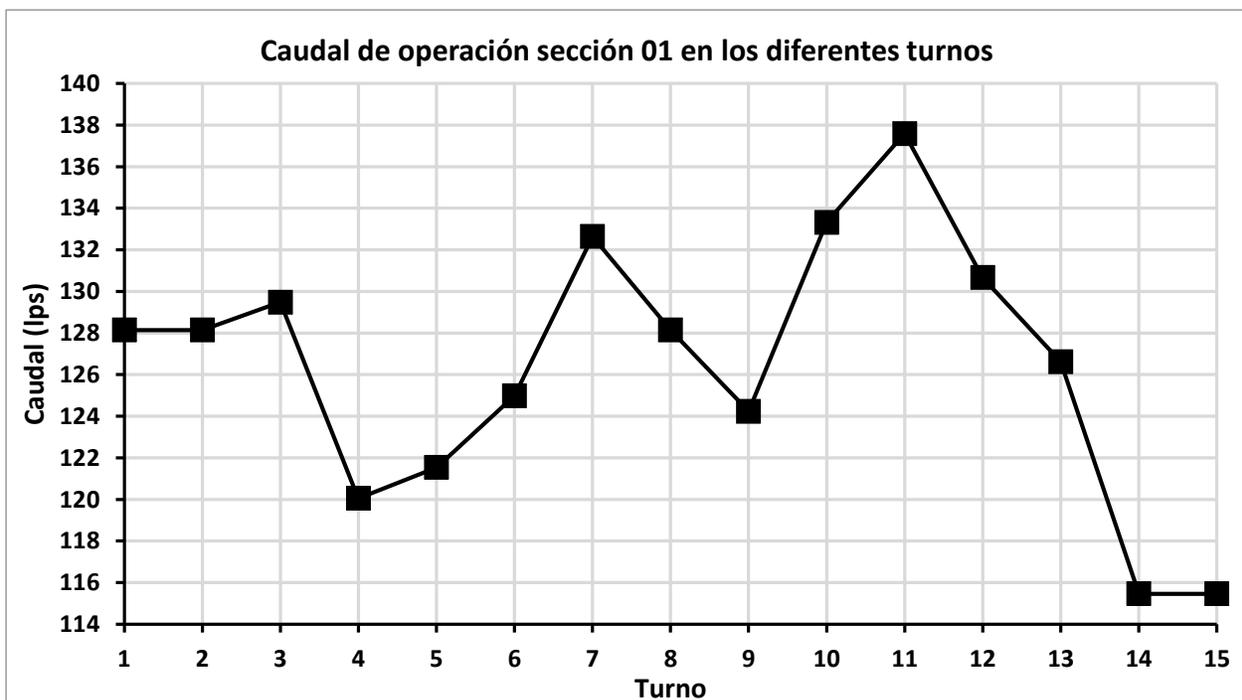


Figura 7.2. Variación de caudales a la entrada de la sección 01 segunda simulación.

En el Cuadro 7.16 se muestran los hidrantes que no cumplen con la presión mínima para la segunda simulación donde solo tres hidrantes presentan una presión menor a 25 m.

Cuadro 7.16. Hidrantes donde la presión es menor a 25 m segunda simulación.

Hidrante	Elevación (m)	Demanda (lps)	Presión (m)	Carga (m)	Turno
A46	1,934.97	11.93	1,951.07	16.10	1,2,3
A61	1,924.73	7.01	1,948.37	23.63	1,2,3
A244	1,901.60	5.97	1,945.38	23.02	7,8,9

Cuadro 7.17. Presiones de hidrantes primera vs segunda simulación.

Hidrante	Primera simulación		Segunda simulación		Δ (m)
	Demanda (lps)	Presión (m)	Demanda (lps)	Presión (m)	
A46	14.27	10.89	11.93	16.10	5.21
A61	13.12	11.87	7.01	23.63	11.76
A169	10.50	23.57	4.38	36.06	12.49
A200	10.50	19.93	4.38	32.87	12.94
A206	10.50	15.53	4.17	33.26	17.73
A58	10.50	19.69	4.17	26.75	7.06
A79	20.99	4.52	8.33	33.03	28.51
A87	6.56	19.95	4.94	34.26	14.31
A91	19.68	16.04	3.34	33.09	17.05
A229	19.68	11.17	3.34	46.35	35.18
A244	7.14	13.70	5.97	23.02	9.32
A93	6.56	22.78	4.94	28.47	5.69
A255	13.13	21.31	7.01	29.09	7.78
A82	6.56	24.42	4.94	33.41	8.99
A96	13.12	16.82	7.01	30.44	13.62
A111	19.68	-7.18	3.34	48.18	55.36
A120	6.56	22.73	4.94	37.65	14.92
A121	19.68	4.26	3.34	38.51	34.25
A137	7.13	23.73	5.96	40.40	16.67
A144	6.56	23.75	4.94	37.51	13.76
A162	6.56	21.64	4.94	38.84	17.20
A165	10.50	15.99	4.38	33.98	17.99
A170	19.68	14.83	3.34	33.10	18.27
A193	6.56	20.16	4.94	31.87	11.71
A205	13.12	5.69	9.87	26.36	20.67
A243	10.50	17.03	4.17	32.74	15.71
A252	6.56	20.78	4.94	36.98	16.20

En el Cuadro 7.17 se muestra una comparativa de los hidrantes que no cumplían con la presión mínima en la primera simulación contra las nuevas presiones si se ajusta el caudal del emisor. El hidrante A111 que en la primera simulación se genera una presión negativa al ajustar el caudal de los emisores las pérdidas disminuye de manera significativa teniendo ahora una presión mayor, ya que la red debe suministrar menos agua por cada turno. A diferencia de la primera simulación no se presentan velocidades mayores a 2 m/s y las pérdidas por fricción no rebasan los 7 m a diferencia de la primera simulación donde había pérdidas de hasta 22 m.

7.2.3. Tercera simulación distribución por turnos

El caudal mínimo que se presentó a la entrada de la sección 01, fue en los turnos 14 y 15 (140.64 lps), y el máximo en el turno 10 (170.70 lps) presentado una variación máxima entre caudales de 17.1% (30.06 lps). En esta simulación se reajustó el caudal del emisor a partir del requerimiento máximo de cada cultivo, a diferencia de la segunda simulación donde se reajustó a partir de los requerimientos que se presentaban en el mes crítico y que no precisamente representaban los requerimientos máximos del cultivo.

Cuadro 7.18. Caudales a la entrada de la sección 01 tercera simulación.

Turno	Horario	Caudal (lps)
1	00:00 - 03:12	164.75
2	03:12 - 06:24	164.75
3	06:24 - 09:36	164.90
4	09:36 - 12:48	148.06
5	12:48 - 16:00	148.28
6	16:00 - 19:12	151.53
7	19:12 - 22:24	163.74
8	22:24 - 01:36	162.55
9	01:36 - 04:48	158.48
10	04:48 - 08:00	170.70
11	08:00 - 11:12	170.27
12	11:12 - 14:24	162.66
13	14:24 - 17:36	151.60
14	17:36 - 20:48	140.64
15	20:48 - 24:00	140.64

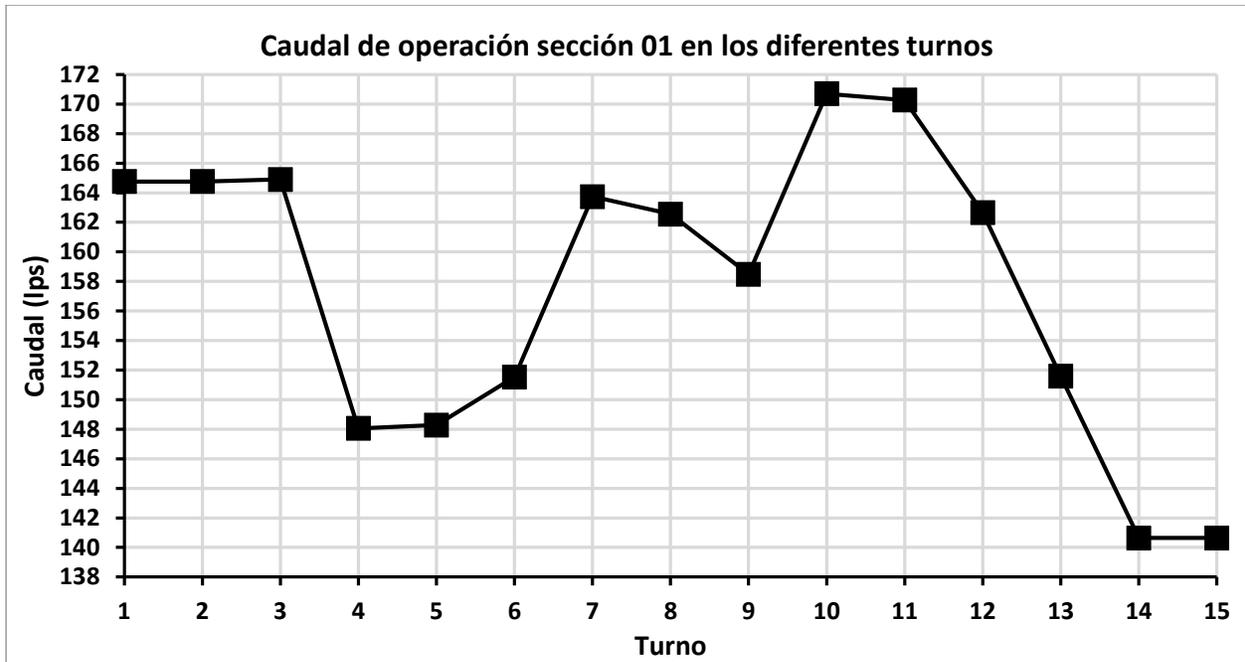


Figura 7.3. Variación de caudales a la entrada de la sección 01 tercera simulación.

En el Cuadro 7.19 se muestran los hidrantes que no cumplen con la presión mínima para la tercera simulación donde solo tres hidrantes presentan una presión menor a 25 m.

Cuadro 7.19. Hidrantes donde la presión es menor a 25 m tercera simulación.

Hidrante	Elevación (m)	Demanda (lps)	Presión (m)	Carga (m)	Turno
A46	1,934.97	12.39	1,950.08	15.11	1,2,3
A61	1,924.73	7.35	1,947.81	23.08	1,2,3
A244	1,901.60	6.20	1,943.04	20.69	7,8,9
A205	1,904.85	11.9	1,924.71	21.92	13,14,15

Al igual que la segunda simulación el ajustar los caudales de los emisores para que proporcionen el agua que requiere el cultivo en el tiempo de 3.2 horas no genera flujos grandes en las tuberías lo que genera grandes pérdidas de presión en los tramos de menor diámetro. Los hidrantes que no alcanzaron la presión mínima en la segunda simulación son los mismos que se presentan en la tercera simulación, solo que en esta simulación se anexo una hidrantes más. Es importante resaltar que el caudal del emisor influye demasiado ya que al tratar de suministrar más agua en menor tiempo las tuberías instaladas actualmente en la sección 01 no tienen la capacidad suficiente para conducir el agua generando pérdidas de presión considerables.

Cuadro 7.20. Presiones de hidrantes primera vs tercera simulación.

Hidrante	Primera simulación		Tercera simulación		Δ (m)
	Demanda (lps)	Presión (m)	Demanda (lps)	Presión (m)	
A46	14.27	10.89	12.39	15.11	4.22
A61	13.12	11.87	7.35	23.08	11.21
A169	10.50	23.57	7.00	32.16	8.59
A200	10.50	19.93	7.00	28.78	8.85
A206	10.50	15.53	6.40	28.29	12.76
A58	10.50	19.69	6.40	24.93	5.24
A79	20.99	4.52	12.80	25.96	21.44
A87	6.56	19.95	5.95	31.03	11.08
A91	19.68	16.04	6.09	29.68	13.64
A229	19.68	11.17	6.09	41.66	30.49
A244	7.14	13.70	6.20	20.69	6.99
A93	6.56	22.78	5.95	26.41	3.63
A255	13.13	21.31	7.35	28.18	6.87
A82	6.56	24.42	5.95	31.05	6.63
A96	13.12	16.82	7.35	27.39	10.57
A111	19.68	-7.18	6.09	41.67	48.85
A120	6.56	22.73	5.95	36.57	13.84
A121	19.68	4.26	6.09	36.09	31.83
A137	7.13	23.73	6.19	38.59	14.86
A144	6.56	23.75	5.95	36.62	12.87
A162	6.56	21.64	5.95	36.79	15.15
A165	10.50	15.99	7.00	32.12	16.13
A170	19.68	14.83	6.09	31.09	16.26
A193	6.56	20.16	5.95	30.65	10.49
A205	13.12	5.69	11.90	21.92	16.23
A243	10.50	17.03	6.40	28.81	11.78
A252	6.56	20.78	5.95	35.32	14.54

En el Cuadro 7.20 se muestra una comparativa de los hidrantes que no cumplían con la presión mínima en la primera simulación contra las nuevas presiones si se ajusta el caudal del emisor. Aunque se aumentó el caudal en los emisores con respecto a los caudales de la segunda simulación y menores a los caudales de la primera simulación para poder satisfacer los requerimientos máximos por cada cultivo la pérdida de presión no es tanta como la primera simulación. A diferencia de la primera simulación no se

presentan velocidades mayores a 2 m/s y las pérdidas por fricción no rebasan los 8 m a diferencia de la primera simulación donde había pérdidas de hasta 22 m.

7.2.4. Cuarta simulación distribución por turnos y a la demanda

En esta cuarta simulación se tomaron 40 hidrantes para que su apertura fuera de manera aleatoria, dentro de los 15 turnos establecidos. Los caudales a la entrada de la sección 01 presentaron una variación máxima entre turnos de un 63.5% concentrando gran parte de la demanda durante el día, es decir, aquellos usuarios que tienen asignado regar durante la noche sin embargo deciden no acatar su turno y lo cambian sin previo aviso a un turno en el día.

El caudal máximo que se presenta es de 370.36 lps en el turno 4 y el caudal mínimo se presenta durante la noche con un valor de 135.10 lps en el turno 7. En el Cuadro 7.21 se muestran los caudales a la entrada de la sección 01.

Cuadro 7.21. Caudales a la entrada de la sección 01 cuarta simulación

Turno	Horario	Caudal (lps)
1	00:00 - 03:12	141.40
2	03:12 - 06:24	141.40
3	06:24 - 09:36	224.49
4	09:36 - 12:48	370.36
5	12:48 - 16:00	367.94
6	16:00 - 19:12	262.53
7	19:12 - 22:24	135.10
8	22:24 - 01:36	143.44
9	01:36 - 04:48	143.07
10	04:48 - 08:00	135.88
11	08:00 - 11:12	211.25
12	11:12 - 14:24	282.05
13	14:24 - 17:36	310.00
14	17:36 - 20:48	220.19
15	20:48 - 24:00	136.44

Es importante mencionar que en esta simulación se consideraron las condiciones de los sistemas como en la primera simulación, es decir el mismo caudal del emisor que actualmente proporcionan las cintas y microaspersores.

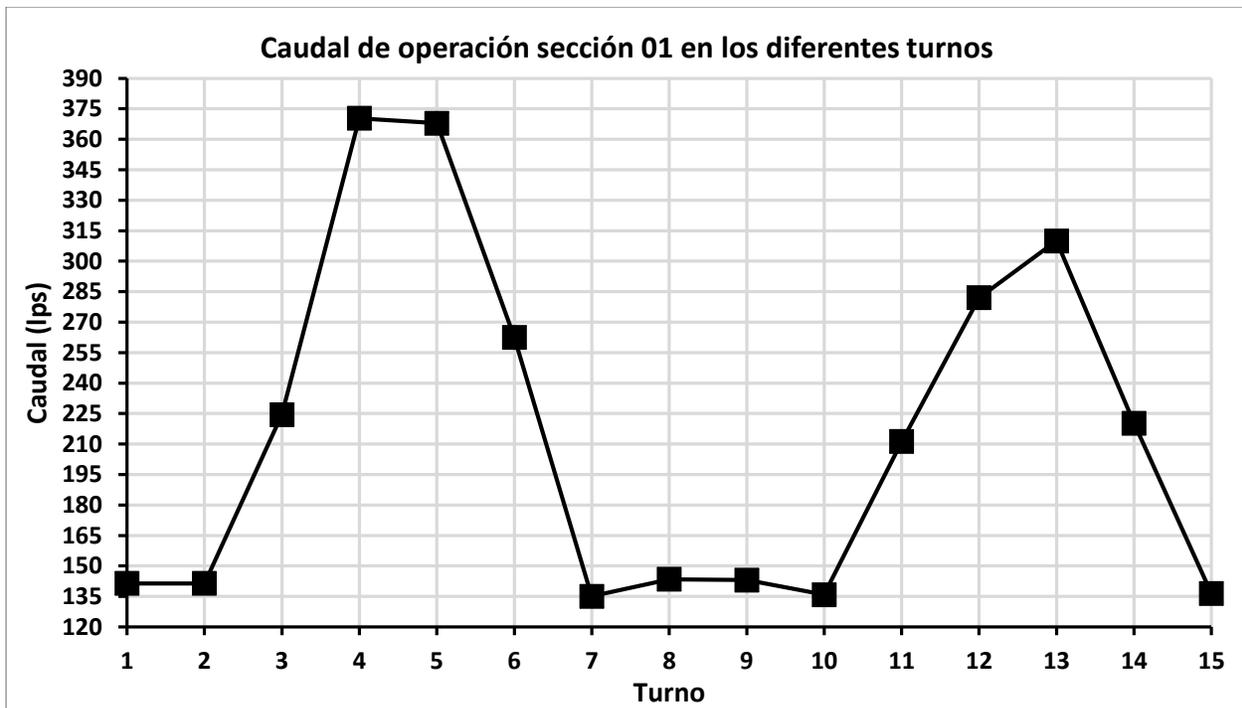


Figura 7.4. Variación de caudales a la entrada de la sección 01 cuarta simulación.

En el Cuadro 7.22 se muestran los hidrantes que no cumplen con la presión mínima para la cuarta simulación donde solo tres hidrantes presentan una presión menor a 25 m.

Cuadro 7.22. Hidrantes donde la presión es menor a 25 m cuarta simulación.

Hidrante	Elevación (m)	Demanda (lps)	Presión (m)	Carga (m)	Turno
A46	1,934.97	14.27	1,945.86	10.89	1,2,3
A61	1,924.73	13.12	1,936.53	11.80	1,2,3
A90	1,917.13	6.56	1,939.72	22.59	3
A206	1,900.35	10.50	1,915.58	15.23	1,2,3
A45	1,933.49	10.50	1,954.11	20.62	4,5,6
A58	1,924.93	10.50	1,943.65	18.72	4,5,6
A76	1,919.49	6.56	1,938.75	19.26	4,5,6
A79	1,913.56	20.99	1,905.34	-8.22	4,5,6
A87	1,914.29	6.56	1,915.38	1.09	4,5,6
A91	1,915.42	19.68	1,912.60	-2.82	4,5,6
A116	1,900.06	6.56	1,914.54	14.48	4,5,6
A117	1,898.59	6.56	1,911.91	13.32	4,5,6
A118	1,897.40	6.56	1,910.36	12.97	4,5,6
A127	1,895.03	6.56	1,908.23	13.20	4,5,6

Cuadro 7.22. Continuación...

Hidrante	Elevación (m)	Demanda (lps)	Presión (m)	Carga (m)	Turno
A128	1,894.01	6.56	1,906.47	12.46	4,5,6
A130	1,894.06	6.56	1,905.40	11.34	4,5,6
A135	1,893.77	6.56	1,904.15	10.38	4,5,6
A142	1,899.11	6.56	1,912.85	13.74	4,5,6
A148	1,894.88	6.56	1,904.48	9.60	4,5,6
A152	1,896.58	6.56	1,903.28	6.70	4,5,6
A159	1,893.82	6.56	1,902.23	8.40	4,5,6
A160	1,893.32	6.56	1,902.20	8.88	4,5,6
A169	1,897.19	10.50	1,898.24	1.05	4,5,6
A179	1,909.99	6.59	1,923.31	13.32	4,5,6
A186	1,898.32	6.56	1,915.70	17.38	4,5,6
A199	1,903.04	6.56	1,899.52	-3.52	4,5,6
A200	1,901.53	10.50	1,895.65	-5.88	4,5,6
A204	1,900.66	7.13	1,901.10	0.44	4,5,6
A208	1,906.49	13.12	1,916.53	10.04	4,5,6
A214	1,908.03	6.56	1,915.14	7.11	4,5,6
A228	1,903.62	10.50	1,906.41	2.80	4,5,6
A229	1,901.60	19.68	1,888.82	-12.78	4,5,6
A244	1,922.36	7.14	1,941.82	19.47	7,8,9
A255	1,904.63	13.13	1,910.50	5.87	10,11,12
A80	1,916.51	6.56	1,937.40	20.89	12
A119	1,895.67	6.56	1,916.01	20.34	12
A122	1,896.07	13.12	1,916.30	20.23	12
A161	1,892.78	6.56	1,907.95	15.17	12
A163	1,898.77	6.57	1,914.02	15.25	12
A227	1,904.33	6.56	1,929.00	24.67	12
A248	1,893.77	6.56	1,908.74	14.97	12
A255	1,904.63	13.13	1,910.50	5.87	12
A75	1,919.55	6.56	1,943.28	23.73	13
A82	1,915.18	6.56	1,929.82	14.64	13,14
A93	1,919.36	6.56	1,916.61	-2.75	11,12,13
A96	1,916.39	13.12	1,917.13	0.74	12,13,14
A101	1,912.90	13.12	1,933.76	20.86	13
A108	1,901.57	6.56	1,913.32	11.74	13

Cuadro 7.22. Continuación...

Hidrante	Elevación (m)	Demanda (lps)	Presión (m)	Carga (m)	Turno
A111	1,899.26	19.68	1,874.84	-24.42	13,14,15
A120	1,896.47	6.56	1,896.02	-0.46	13,14
A121	1,895.04	19.68	1,876.11	-18.93	13,14,15
A133	1,895.73	6.20	1,891.97	-3.76	13
A137	1,891.99	7.13	1,891.15	-0.84	12,13,14
A144	1,896.81	6.56	1,897.98	1.17	13,14
A145	1,895.71	10.50	1,896.16	0.45	13
A162	1,893.13	6.56	1,890.39	-2.74	12,13,14
A165	1,900.02	10.50	1,893.16	-6.86	12,13,14
A170	1,901.19	19.68	1,893.24	-7.95	13,14
A183	1,901.38	10.50	1,922.08	20.70	13
A193	1,904.85	6.56	1,906.43	1.58	13,14
A195	1,903.53	6.56	1,896.48	-7.05	13
A205	1,902.79	13.12	1,886.15	-16.64	13,14,15
A222	1,907.84	6.56	1,920.83	12.99	13
A224	1,907.38	6.56	1,920.73	13.35	13
A243	1,913.96	10.50	1,916.80	2.85	12,13,14
A249	1,904.40	6.56	1,921.51	17.11	13
A250	1,903.78	6.50	1,921.60	17.82	13
A252	1,895.82	6.56	1,891.75	-4.06	13,14

En esta simulación donde se apertura hidrantes de manera aleatoria principalmente durante el día se tienen 68 hidrantes de los 126 operando en la sección 01 no les llega la presión mínima requerida para operar, y donde se llega a presentar presiones negativas en muchos hidrantes. A diferencia de la primera simulación donde se respetaba el caudal del emisor que da la cinta de riego y el turno de cada hidrante, solo 27 hidrantes durante el intervalo de riego no les llega la presión requerida, ahora con aperturas de hidrantes de manera aleatoria la cantidad de hidrantes que no les llega la presión requerida aumenta de manera considerable. Por lo que es indispensable apegarse al turno asignado para evitar que la presión caiga en muchos hidrantes y esto debe en gran medida a que la red no está capacitada para trabajar a demanda libre, y esto se debe a que muchos tramos su diámetro es de 4 y 6”.

7.2.5. Simulación distribución a la demanda

En esta simulación se considero una operación completa de riego a la demanda libre, aplicando la primera fórmula generalizada de Clément y a cada hidrante se le asigno las características del sistema de riego de acuerdo al cultivo que se le fue establecido en los planos que se muestran en los anexos. Todos los hidrantes aplicaron la misma lámina de riego la cual se determinó en el apartado 7.1.7. , en un periodo de operación de 12 horas diarias.

Lamaddalena y Sagardoy, (2000) recomiendan valores entre 95% y 99% para la garantía de suministro, con el fin de evitar fallos inaceptables a la hora de cubrir la demanda en ciertas partes de la red. Vicente Ángeles, (2013) menciona que aumentar la probabilidad por arriba de 95% la garantía de suministro crecerá muy poco, ya que la función estadística de la garantía crece exponencialmente y tiene un punto de inflexión alrededor del 95%.

En el Cuadro 7.23 se muestran los resultados de analizar la red con una garantía de suministro de 90%, 95% y 99%.

Cuadro 7.23. Comparativa de resultados de Clément.

Garantía de suministro	90 %	95 %	99%
Hidrantes presión \geq 25 m	31	27	23
Hidrantes $0 <$ presión $<$ 25 m	50	45	32
Hidrantes presión $<$ 0 m	45	54	71
Caudal a la entrada (lps)	355.48	371.94	402.82
Velocidad máxima (m/s)	4.08	4.37	4.92
Velocidad mínima (m/s)	0.26	0.30	0.38
Pérdida de fricción máxima (m)	16.97	19.28	26.75

Como se puede observar que en el Cuadro 7.23 los caudales necesarios para operar a la demanda incrementan de un 40 a un 100% con respecto a las tres primeras simulaciones por turnos, la simulación cuatro en algunos turnos se presentan caudales a la entrada de la sección aproximados a la garantía de suministro del 95%. Sin embargo la cantidad de hidrantes que presentan presiones negativas es menor con respecto a todas las simulaciones a la demanda ya que solo 17 hidrantes presentan presiones negativas y esto es porque no están operando todos hidrantes de manera aleatoria.

Las velocidades que se presentan en la garantía de suministro de 99% en un 38% del total de los tramos presentan velocidades mayores a 2 m/s lo que genera pérdidas de presión considerables en el recorrido de la conexión de la sección 01 a los hidrantes. Si se garantiza un suministro del 95% el número de tramos donde las velocidades son mayores a 2 m/s tan solo representa el 26% del total de los tramos y con un 90% solo un 19% de los tramos presentan velocidades mayores a 2 m/s.

Cuadro 7.24. Caudales a la demanda lateral margen izquierda sección 01.

Nodo		q_H	Q_{90%}	Q_{95%}	Q_{99%}
Inicio	Fin	(lps)	(lps)	(lps)	(lps)
A1	A2	0.00	355.48	371.94	402.82
A2	A3	0.00	68.04	74.51	86.66
A3	A4	0.00	68.04	74.51	86.66
A4	A5	0.00	68.04	74.51	86.66
A5	A6	0.00	68.04	74.51	86.66
A6	A21	0.00	58.24	64.27	75.59
A21	A23	0.00	55.65	61.58	72.71
A23	A25	2.92	53.17	59.01	69.97
A25	A26	6.96	51.61	57.42	68.34
A26	A27	12.94	49.25	54.96	65.66
A27	A28	0.00	46.98	52.48	62.79
A28	A33	0.00	41.84	47.07	56.88
A33	A35	13.12	38.44	43.36	52.58
A35	A36	0.00	31.77	36.12	44.29
A36	A37	10.49	31.77	36.12	44.29
A37	A38	6.56	28.37	32.42	40.02
A38	A39	0.00	25.44	29.33	36.63
A39	A40	0.00	25.44	29.33	36.63
A40	A41	13.12	25.44	29.33	36.63
A41	A42	0.00	21.49	24.93	31.37
A42	A43	13.12	21.49	24.93	31.37
A43	A44	0.00	17.30	20.20	25.66
A44	A45	10.49	17.30	20.20	25.66
A45	A46	14.27	13.29	15.72	20.29

8. CONCLUSIONES

Los requerimientos de riego estimados no se les resta la precipitación, ya que el objetivo era considerar un año seco. Los cultivos que demanda mayor cantidad de agua son las berries, espárrago y alfalfa este último demanda 19,319.2 m³/ha/año que es una cantidad considerable en una zona donde los últimos años los periodos de sequía se han extendido.

Al no considerar la precipitación efectiva la superficie máxima para cada cultivo en condiciones de precipitación ausente donde los cultivos de alta demanda de agua se ven limitados a diferencia de las hortalizas que requirieren menos agua y en periodos cortos.

Si se considera la precipitación en los requerimientos, los cultivos perenes pueden aumentar su superficie de riego sin embargo considerar la precipitación al momento de planificar puede ocasionar un déficit en el volumen concesionado por parte de la presa cuando se lleguen a presentar años secos.

Otro dato importante es que en el cálculo de los requerimientos de riego se emplearon coeficientes de cultivo de literatura, por lo que se recomienda calcular los coeficientes para los cultivos del distrito.

Los resultados generados por las simulaciones indicaron que con la actual red instalada en la sección 01 hidráulicamente no es posible operar con riego a la demanda ya que los caudales que se requieren conducir se incrementan, generando pérdidas por fricción mayores a las de diseño y por consiguiente una reducción en la presión en los nodos e hidrantes.

De querer operar a demanda libre, para reducir el número de hidrantes que no les llegue la presión requerida se deberá dejar pasar más presión en las válvulas reguladoras de presión, sin embargo la tubería no está capacitada para resistir una mayor presión ya que prácticamente toda la tubería de la sección 01 es clase 5, con excepción de 8 tramos que son clase 7.

Para que la sección 01 riegue a la demanda se deben cambiar los diámetros de las tuberías y no es operativo ni rentable por el costo que conlleva cambiar toda la red, la

mejor alternativa es generar un arreglo óptimo por turnos que permita que a todos los hidrantes les llegue la presión mínima requerida.

No obstante queda por analizar las demás secciones que ya se tienen construidas, las simulaciones servirán como soporte en la toma de decisiones referentes a la operación, ya que permitiría entre otras cosas: elaboración de planes de riego, cálculo de volúmenes por ciclo agrícola, entre otros.

No se puede esperar que ninguna ecuación formulada para el cálculo de la evapotranspiración y basada en datos climáticos, determine la evapotranspiración perfectamente, bajo diferentes situaciones climáticas específicas. Esto debido principalmente a la simplificación en la formulación y los errores en la recopilación de los datos climáticos.

9. RECOMENDACIONES

Los modelos hidráulicos son una herramienta práctica que ayuda a la toma de decisiones, sin embargo como todo modelo matemático debe calibrarse de acuerdo a las condiciones que se desea simular, por ello es importante tomar mediciones de las variables que conforman el modelo. Para simular la red se recomienda tomar mediciones de presión y caudales en los hidrantes y puntos clave dentro de la red para poder calibrar el modelo y tener valores más certeros.

La asociación de usuarios y la jefatura de distrito de riego puesta por la CONAGUA, requieren identificar tendencias en los patrones de uso y eficiencia, para fijar metas y mejorar la productividad por unidad de volumen de agua y por unidad de superficie de suelo.

Para la planificación normal del riego y propósitos de manejo, para la definición de calendarios básicos de riego, se recomienda estimar los coeficientes de cultivo (K_c) para afinar los requerimientos de riego porque actualmente no se cuenta con dicha información y los valores de K_c empleados pueden no ser los más aptos.

Dado que existe la alternativa de transferencia de derechos de agua entre usuarios que ya cuentan con hidrantes es recomendable antes de realizar los cambios analizar el comportamiento de la red ante ya que como se menciona la red no está capacitada para operar con riego a la demanda.

Se recomienda contar con una manual de operación del sistema de riego para evitar fallos en el sistema como pérdidas de presión en los nodos al abrir hidrantes fuera de su turno asignado. Contar con un listado de cultivos que pudieran sembrarse en base a las láminas que requieran ante el constante cambio en el patrón de cultivos.

10. LITERATURA CITADA

- Aguilera Contreras, M. y Martínez Elizondo, R., 1996. Relaciones Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. Cuarta ed. Texcoco: Universidad Autónoma Chapingo.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M., 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO Riego y Drenaje Boletín 56.
- Ángeles Montiel, V., 2012. Diseño Agronómico de Sistemas de Riego Presurizado. Segunda ed. Texcoco (Edo. de México): Universidad Autónoma Chapingo.
- Ángeles Montiel, V., 2013. Fundamentos de Hidráulica para diseño y revisión de Riego Presurizado (Aspectos teóricos). Primera ed. Texcoco (Edo. de México): Universidad Autónoma Chapingo.
- Arteaga Tovar, R. E., Paz S., M. A. y Vázquez S., J. F., 2006. Hidráulica de los Sistemas de Conducción. Primera ed. Texcoco: Universidad Autónoma Chapingo.
- Ayers, R. S. y Westcot, D. W., 1976. water quality for agriculture. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 29.
- Bonet Pérez, C. y otros, 2010. Coeficientes de cultivo para la programación del riego de la piña. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 19(3), pp. 23-27.
- Clément, R., 1966. Calcul des débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant a la demande. La Houille Blanche, Issue 5, pp. 553-575.
- CONAGUA, 2018. Estadísticas Agrícolas de Unidades de Riego Año agrícola 2016-2017. [En línea] Available at: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-agricolas-de-unidades-de-riego> [Último acceso: 29 Enero 2019].
- Dastane, N., 1978. Effective rainfall in irrigated agriculture. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 25.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W., 1977. Crop water requirements. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 24.
- Franco Salas, A. y Pérez Urrestarazu, L., 2007. Universiad de Sevilla. [En línea] Available at: <http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario>

- [/Tema%2010.Riego%20goteo/tutorial_12.htm](#) [Último acceso: 02 Febrero 2018].
- Inzunza López, J. O., 2008. Optimización de patrones de cultivo de distrito de riego de noroeste de México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, VII(2), pp. 157-163.
- Jirón Barrios, G., 2018. Diseño de un modelo y plataforma de gestión, para la operación presurizada del Distrito de Riego 001, Pabellón, Aguascalientes, Texcoco: Colegio de Postgraduados.
- Lamaddalena, N. y Sagardoy, J., 2000. *Performance Analysis of On-Demand Pressurized Irrigation Systems*. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 59.
- Maciel Pérez, L. H. y otros, 2009. Modernización Integral del Distrito de Riego 001 Pabellón, Aguascalientes. Folleto para Productores Núm. 42. Pabellón de Arteaga (Aguascalientes): INIFAP, CIRNOC, Campo Experimental Pabellón.
- Martínez Solano, F. J., 2002. Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica a la gestión técnica de redes de distribución de agua potable. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Mejía Saénz, E., Palacios Vélez, E., Exebio García, A. y Santos Hernández, A. L., 2002. Problemas operativos en el manejo del agua en distritos de riego. *Terra Latinoamericana*, 20(2), pp. 217-225.
- Monge Redondo, M. Á., 2018. Diseño agronómico e hidráulico de riegos agrícolas a presión. Primera ed. Madrid: Agrícola Española S.A.
- Pizarro Cabello, F., 1996. Riegos localizados de alta frecuencia. Tercera ed. Madrid: Mundi-Prensa.
- Pulido Madrigal, L. y otros, 2010. MONITOREO DE LA SALINIDAD MEDIANTE SENSORES REMOTOS. *Terra Latinoamericana*, 28(1), pp. 15-26.
- Rossmann, L. A., 2000. EPANET 2 USERS MANUAL. Cincinnati: Water Supply and Water Resources Division. U.S. Environmental Protection Agency.
- Ruíz Álvarez, O. y otros, 2014. Comportamiento espacio temporal de la evapotranspiración de referencia en la República Mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, Issue 10, pp. 1963-1976.

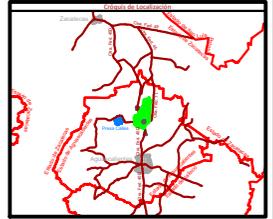
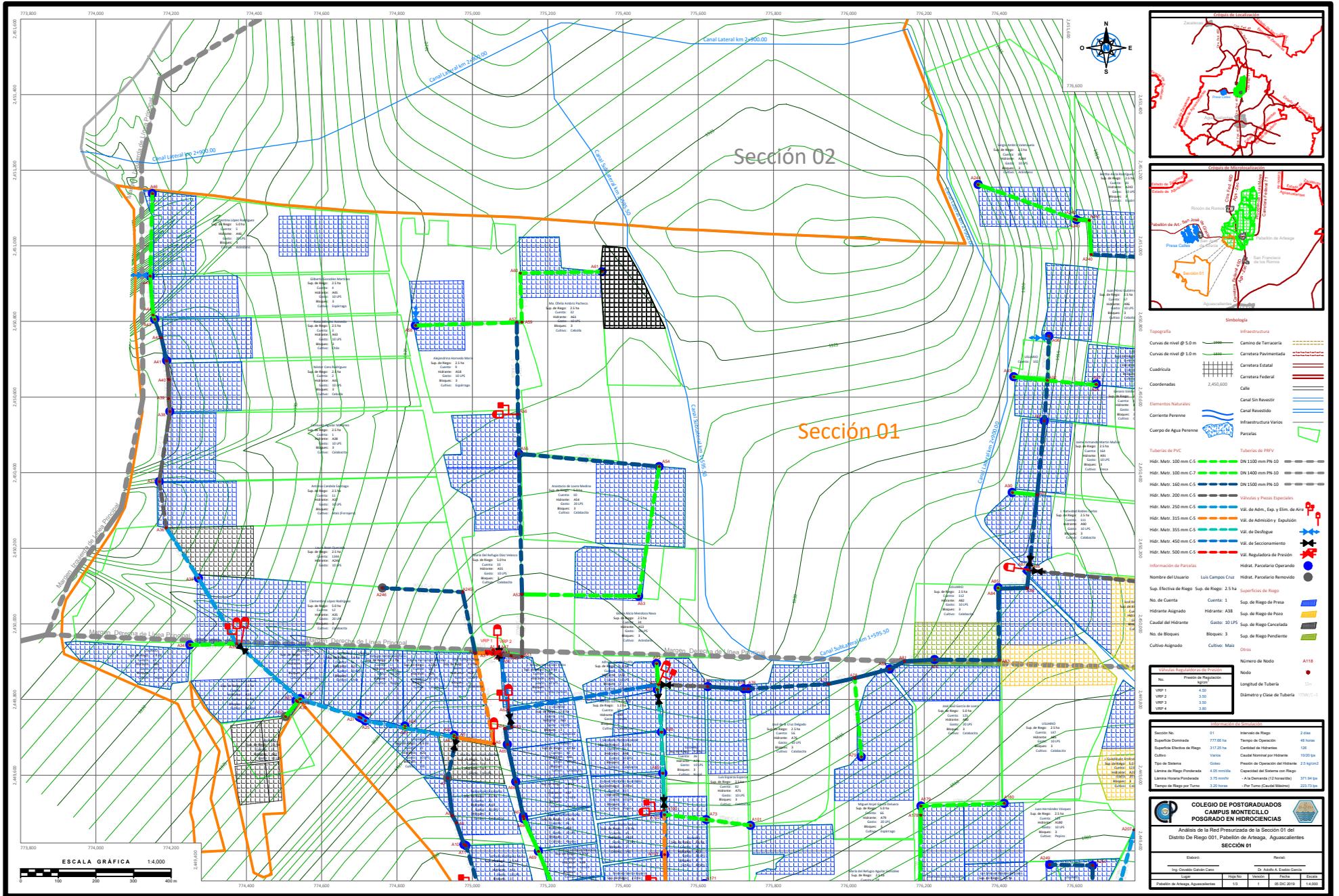
- Saldarriaga G., J., 2016. HIDRÁULICA DE TUBERÍAS ABASTECIMIENTO DE AGUA, REDES, RIEGOS. Tercera ed. Bogota: Alfaomega.
- Sánchez Cohen, I. y García Vargas, M., 2010. Indices de desempeño de los Distritos de Riego del noroeste de México. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas, IX(1), pp. 1-4.
- Smith, M., 1992. Cropwat a computer program for irrigation planning and management. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 46.
- Sotelo Avila, G., 2011. Hidráulica General Volumen 1. Fundamentos. Primera ed. Ciudad de México: LIMUSA.
- Tijerina Chávez, L., Villaman Peña, R., Quevedo Nolasco, A. y Crespo Pichardo, G., 2001. Comparación de algunos métodos micrometeorológicos para estimar la evapotranspiración, en el área de Montecillo, México. Terra Latinoamericana, 19(3), pp. 281-291.
- Valdez Torres, J. B. y otros, 2017. Clasificación y evaluación de los distritos de riego en México con base en indicadores de desempeño. Tecnología y Ciencias del Agua, VIII(4), pp. 79-99.
- Villalobos Reyes, S., Castellanos Ramos, J. Z., Tijerina Chávez, L. y Crespo Pichardo, G., 2005. Coeficientes de desarrollo del cultivo de brócoli con riego por goteo. Terra Latinoamericana, 23(3), pp. 329-333.

11. ANEXOS

Plano de la red presurizada de la sección 01 del distrito de riego 001, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes. 1 de 3.

Plano de la red presurizada de la sección 01 del distrito de riego 001, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes. 2 de 3.

Plano de la red presurizada de la sección 01 del distrito de riego 001, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes. 3 de 3.



Simbología

Curvas de nivel @ 5.0 m	Infraestructura
Curvas de nivel @ 1.0 m	Carrilero de Terracería
Cuadrícula	Carrilero Pavimentado
Coordenadas	Carrilero Estatal
	Carrilero Federal
	Calle
	Canal Sin Revestir
	Canal Revestido
	Infraestructura Varios
	Parcelas

Tabla de PVC

Hidr. Matr. 100 mm C-5	Tuberías de PEV
Hidr. Matr. 100 mm C-7	DN 120 mm PN-10
Hidr. Matr. 150 mm C-5	DN 140 mm PN-10
Hidr. Matr. 200 mm C-5	DN 150 mm PN-10
	Valvulas y Piezas Especiales
Hidr. Matr. 250 mm C-5	Val. de Adm., Exp. y Elm. de Aire
Hidr. Matr. 325 mm C-5	Val. de Admisión y Expulsión
Hidr. Matr. 355 mm C-5	Val. de Dobleque
Hidr. Matr. 450 mm C-5	Val. de Seccionamiento
Hidr. Matr. 500 mm C-5	Val. Reguladora de Presión
	Información de Parcelas
	Hidr. Parcelario Operando
	Hidr. Parcelario Removido
Nombre del Usuario	Luis Campos Cruz
Sup. Efectiva de Riego	Sup. de Riego: 2.5 ha
No. de Cuenta	Cuenta: 1
Hidrone Aislado	Hidrone: ASS
Capadit del Hidrone	Capadit: 10 LPS
No. de Bloques	Bloques: 3
Cultivo Aislado	Cultivo: Maza
	Otros
	Numero de Nudo
	Nudo
	Longitud de Tubería
	Diámetro y Clase de Tubería

Resumen de Datos de la Sección

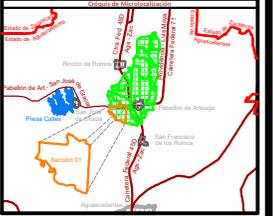
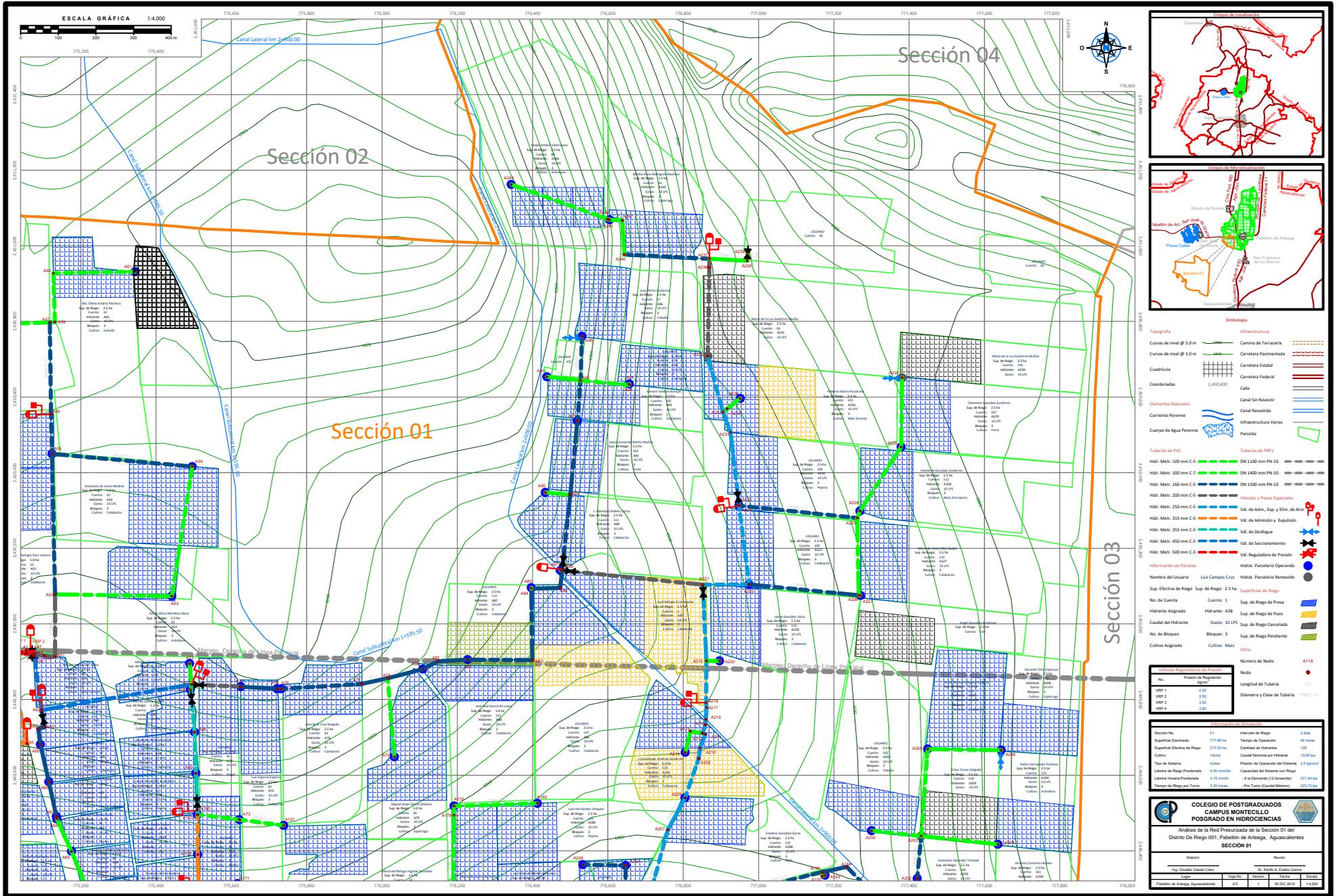
Sección No.	01	Horizonte de Riego	2 días
Superficie Demandada	117.00 ha	Tiempo de Operación	48 horas
Superficie Efectiva de Riego	317.20 ha	Cantidad de Hidrones	120
Cultivos	Varios	Caudal Normal por Hidrone	1000 lpm
Carga de Sistema	Constante	Presión de Operación del Hidrone	2.5 kg/cm ²
Límite de Riego Posterioreada	4.00 mts/m	Capacidad del Sistema con Riego	120000 lpm
Límite de Riego Posterioreada	3.75 mts/m	A la Demanda (12 horas)	371.84 lpm
Tempo de Riego por Zona	2.00 horas	Por Zona (Caudal Máximo)	333.33 lpm

COLEGIO DE POSTGRADUADOS CAMPUS MONTECILLO POSGRADO EN HIDROCIENCIAS

Análisis de la Red Presurizada de la Sección 01 del Distrito De Riego 001, Población de Abastecimiento, Aguascalientes

SECCIÓN 01

Nombre	Reserv
Top. (m)	117.00
Long.	117.00
Diámetro de Abastecimiento	15
Fecha	15/11/2019
Elaborado	15/11/2019



Simbología

Topografía	Infraestructura
Curvas de nivel @ 5.0 m	Centro de Torrería
Curvas de nivel @ 1.0 m	Carretera Pavimentada
Cuadrícula	Carretera Estatal
Coordenadas	Carretera Federal
	Calle
Elementos Naturales	Canal Sin Revestir
Corriente Perenne	Canal Revestido
Corriente Intermitente	Infraestructura Varios
Corriente Estacional	Parcelas
Corriente de Agua Perenne	

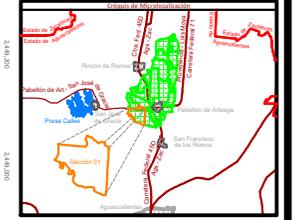
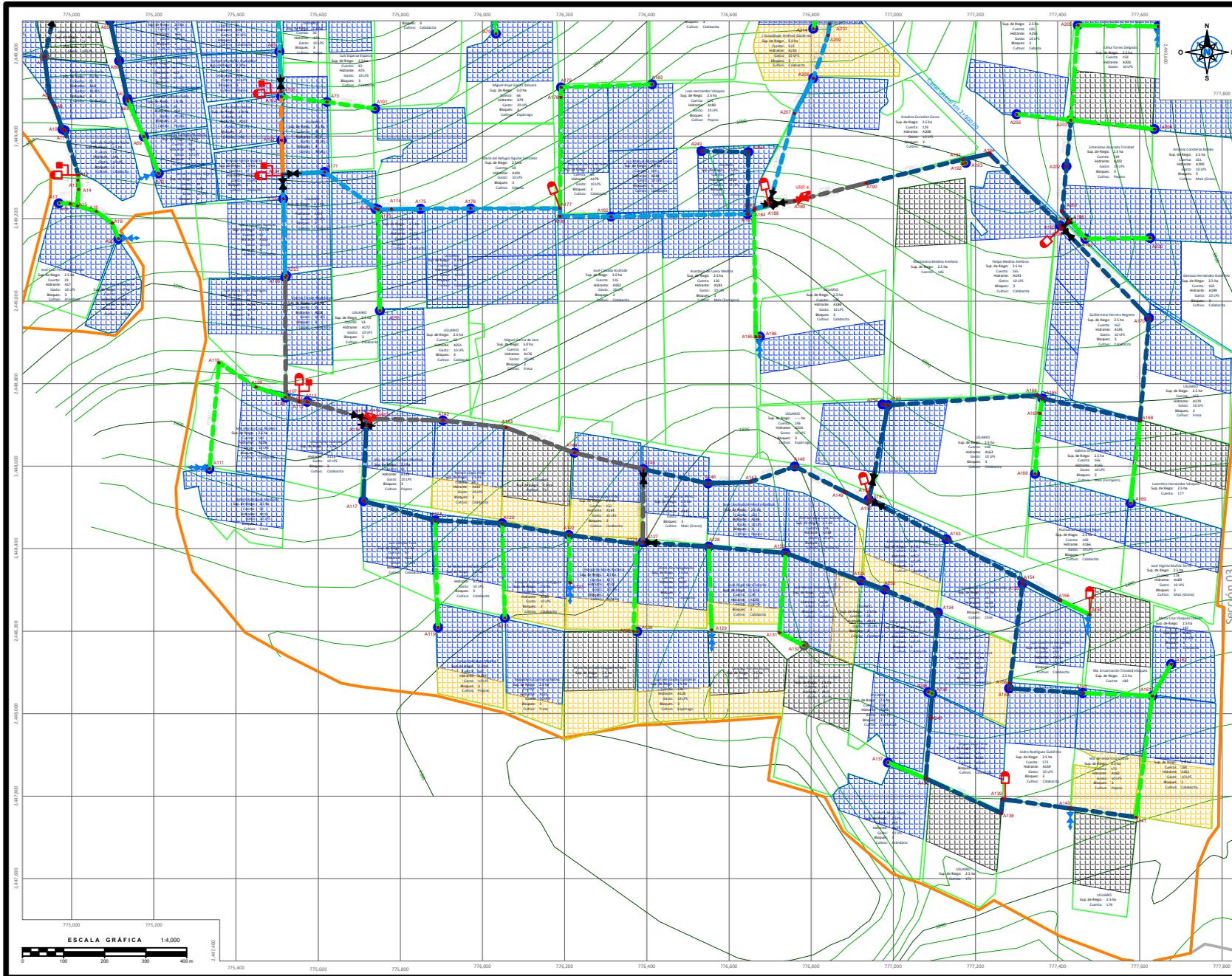
Tuberías de PVC	Tuberías de PEHD
Hidr. Matr. 100 mm C-5	DN 100 mm PN-10
Hidr. Matr. 150 mm C-7	DN 140 mm PN-10
Hidr. Matr. 160 mm C-5	DN 150 mm PN-10
Hidr. Matr. 200 mm C-5	
Valvulas y Piezas Especiales	
Hidr. Matr. 250 mm C-5	Val. de Adm., Exp. y Elm. de Aire
Hidr. Matr. 325 mm C-5	Val. de Admisión y Expulsión
Hidr. Matr. 355 mm C-5	Val. de Dedoque
Hidr. Matr. 450 mm C-5	Val. de Seccionamiento
Hidr. Matr. 500 mm C-5	Val. Regulador de Presión
Información de Parcelas	Hidr. Parcelario Operando
Nombre del Usuario	Luis Campos Cruz
Sup. Efectiva de Riego	Sup. de Riego: 2.5 ha
Sup. de Cuenta	Cuanta: 1
No de Cuenta	Sup. de Riego de Presa
Hidrometro Aligned	Hidrometro: AS3
Capadad del Hidrometro	Capadad: 10 LPS
No. de Bloques	Bloques: 3
Cultivo Aligned	Cultivo: Maza
	Cultivo: Otros

No.	Presión de Operación (kg/cm²)	Longitud (m)	Diametro y Clase de Tubería (mm/C-5)
VWP 1	4.50		
VWP 2	3.50		
VWP 3	3.50		
VWP 4	3.50		

Sección No.	01	Tramo de Riego	2 días
Superficie Demandada	117.00 ha	Tiempo de Operación	48 horas
Superficie Efectiva de Riego	317.20 ha	Cantidad de Hidrantes	120
Cultivos	Varios	Caudal Nominal por Hidrante	1000 lpm
Grupo de Demanda	Coleo	Presión de Demanda del Hidrante	2.5 kg/cm²
Longitud de Línea de Transmisión	4.100 mts	Capacidad del Sistema con Riego	
Límite de Hora Posteriore	3.75 mts/hr	A la Demanda (12 horas)	371.84 lpm
Tempo de Riego por Tramo	3.00 horas	Por Tramo (Caudal Máximo)	322.2 lpm

COLEGIO DE POSTGRADUADOS
CAMPUS MONTECILLO
POSGRADO EN HIDROCIENCIAS

Módulo:		Hidráulica	
Docente Coordinador:	Dr. Acuña R. Emilio García		
Logo:	Logo:	Fecha:	Fecha:
Patron de Riego Aplicaciones:	21	1	01 DEC 2019 14:00



Simbología

Curvas de nivel @ 5.0 m	Infraestructura
Curvas de nivel @ 1.0 m	Camino de Tierra
Cuadrícula	Calle
Coordenadas 2,450,000	Canal Sin Revestido
Elementos Naturales	Canal Revestido
Corriente Perenne	Infraestructura Varios
Cuerpo de Agua Perenne	Parcelas
Tuberías de PVC	Tuberías de PEV
Hidr. Matr. 100 mm C-5	DN 1100 mm PN-10
Hidr. Matr. 100 mm C-7	DN 1400 mm PN-10
Hidr. Matr. 160 mm C-5	DN 1500 mm PN-10
Hidr. Matr. 200 mm C-5	Válvulas y Piezas Especiales
Hidr. Matr. 250 mm C-5	Válv. de Adm. y Exp. y Elem. de Aire
Hidr. Matr. 315 mm C-5	Válv. de Admisión y Expulsión
Hidr. Matr. 355 mm C-5	Válv. de Dobleque
Hidr. Matr. 450 mm C-5	Válv. de Seccionamiento
Hidr. Matr. 500 mm C-5	Válv. Regulador de Presión
Información de Parcelas	Hidrat. Parcelario Operando
Nombre del Usuario	Hidrat. Parcelario Removido
Sup. Efectiva de Riego - Sup. de Riego: 2.5 ha	Superficies de Riego
No. de Cuenta	Sup. de Riego de Presa
Hidrometro Alagado	Sup. de Riego de Pozo
Caudal del Hidrometro	Sup. de Riego Cancelado
No. de Bloques	Sup. de Riego Pendiente
Cultivo Alagado	Cultivos
	Otros
	Número de Nodo
	Nodo
	Longitud de Tubería
	Diámetro y Clase de Tubería

Resumen de Datos

Sección No.	01	Tramo de Riego	2 días
Superficie Destinada	177.00 ha	Tiempo de Operación	48 horas
Superficie Efectiva de Riego	317.20 ha	Cantidad de Hidrometros	120
Cultivos	Varios	Caudal Nominal por Hidrometro	1000 lpm
Tipos de Demanda	Calas	Presión de Operación del Hidrometro	2.5 kg/cm ²
Longitud de Tubería	4.05 km	Capacidad del Sistema con Riego	213 kg/cm ²
Longitud de Tubería Pendiente	3.75 mts	A la Demanda (12 horas)	371.84 lpm
Pérdida de Riego por Fugas	3.00 mts	Por Fugas (Costo Mensual)	332.25 lpm

ANÁLISIS DE LA RED PRESURIZADA DE LA SECCIÓN 01 DEL DISTRITO DE RIEGO 001, PATACIÓN DE ARRAGA, AGUASCALIENTES

SECCIÓN 01

Elaboró:	Revisó:
Sup. Diseño: Gabriel Cruz	Dr. Acosta R. Esteban García
Logo:	Logo:
Fecha:	Fecha:
Patón de Arreglos: Aguilera/Arce	31
	1
	18 DEC 2019
	14.000