

DOI: 10.24850/j-tyca-14-06-10

Notas

Análisis hidráulico de la red presurizada de la sección 01 del Distrito de Riego 001 ante diferentes escenarios de operación

Hydraulic analysis of the pressurized network of section 01 of the Irrigation District 001 at different operation scenarios

Oswaldo Galván-Cano¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8761-2218>

Adolfo Antenor Exebio-García², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3280-0278>

Jorge Víctor Prado-Hernández³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6045-1661>

Enrique Palacios-Vélez⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1716-9377>

¹Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México, galvan.osvaldo@colpos.mx

²Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México, exebio@colpos.mx

³Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco de Mora, Estado de México, México, vpradohdez@gmail.com



⁴Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México,
epalacio@colpos.mx

Autor para correspondencia: Jorge Víctor Prado-Hernández,
vpradohdez@gmail.com

Resumen

La modernización del Distrito de Riego 001 inició en 2004, actualmente sigue en proceso de construcción y operando las secciones de riego completamente terminadas. El proyecto presenta cambios constructivos y de operación respecto al original, por lo que se planteó como objetivo analizar el comportamiento hidráulico de la red de distribución de la sección 01 en siete escenarios de operación, para identificar el más idóneo para el manejo del riego. La demanda de los 126 hidrantes de la sección de estudio se obtuvo por gasto modular, asignando aleatoriamente uno de los cultivos del patrón. Se consideraron el patrón de cultivos e intervalo de riego actuales, y una precipitación nula en todos los escenarios. Los tres primeros escenarios consideran una distribución por turnos, con diferencias en las necesidades de riego y en las láminas horarias de los emisores. El cuarto escenario consideró una distribución mixta por turnos y a la demanda. Estos cuatro escenarios consideraron un intervalo de riego de 48 horas, tiempo de riego de 3.2 horas por turno y fueron simulados en el programa EPANET. El quinto, sexto y séptimo escenario consideraron una distribución a la demanda, aplicando la primera fórmula generalizada de Clément, con una garantía de suministro de 90, 95 y 99

%, respectivamente, con un intervalo de riego diario, y se implementaron en MATLAB. Los resultados indicaron que la red no está capacitada para operar con un riego a la demanda y que, ante el patrón actual de cultivos, un riego por turnos estrictos es una mejor opción.

Palabras clave: redes de riego, riego por turnos, riego a la demanda, Distrito de Riego 001, escenario de riego, simulación hidráulica de redes.

Abstract

The modernization of the 001 Irrigation District began in 2004, currently it is still under construction and only the completely finished irrigation sections are operating. The project presents constructive and operational changes compared to the original, so the objective this study was to analyze the hydraulic behavior of the distribution network of section 01 at seven operation scenarios to identify the one most suitable for irrigation management. The demand for the 126 hydrants in the study section was obtained by modular flow, randomly assigning each one of them one of the crops of the pattern. The current crop pattern and current irrigation interval and zero precipitation were considered in all scenarios. The first three scenarios consider a shift distribution, with differences in the irrigation needs and in the precipitation rates of the emitters. The fourth scenario considered a mixed distribution by shifts and demand. These four scenarios considered an irrigation interval of 48 hours, irrigation time of 3.2 hours per shift and were simulated in the EPANET program. The fifth, sixth and seventh scenarios considered a distribution on demand, applying the first generalized formula of Clément with a guarantee of

supply of 90, 95 and 99 %, respectively, with a daily irrigation interval, and were implemented in MATLAB. The results indicated that the network is not capable of operating with demand irrigation and that, with the current pattern of crops, a strict shift irrigation is a better option.

Keywords: Irrigation networks, shift irrigation, on-demand irrigation, Irrigation District 001, irrigation scenario, networks hydraulic simulation.

Recibido: 01/10/2021

Aceptado: 18/04/2022

Publicado online: 07/07/2022

Introducción

El agua es empleada de diversas formas en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir, o producir e intercambiar bienes y servicios (Conagua, 2018). Es importante destacar que el sector agrícola es el que más agua consume en México, aproximadamente el 76 % del total utilizado a nivel nacional (Conagua, 2018), con altas pérdidas en la conducción y distribución (30 %), y en la aplicación a nivel parcela (Altamirano *et al.*, 2019). Una fuerte competencia por el agua entre los diferentes usos y su utilización ineficiente provoca un balance hídrico negativo en México (Martínez, 2020). Para hacer un uso más eficiente del agua de riego en México se deben establecer acciones estratégicas, como

tecnificación del riego, modernización de las redes de conducción y distribución, medición de la entrega del servicio de riego, y formulación de planes de riego congruentes con la disponibilidad de agua (Conagua, 2017). Se requiere un replanteamiento del patrón de cultivos, pues se ha encontrado que los cultivos con baja productividad ponen en riesgo la disponibilidad de los acuíferos, como en el acuífero Calera (Flores, Cristóbal, Pascual, De-León, & Prado, 2019). Al diseñar un sistema de riego, el desafío más importante es el cálculo de los caudales que circulan en la red, que dependen de condiciones climáticas, patrón de cultivos y comportamiento de los agricultores (Daccache & Lamaddalena, 2010). Íñiguez, De-León, Prado y Rendón (2007) encontraron que el método de entrega a la demanda, con el método probabilístico de Clément, podría ser el más apropiado para rediseñar el sistema de conducción principal del Distrito de Riego (DR) La Begoña, Guanajuato, para garantizar riegos flexibles a un patrón de cultivos diferente al proyectado originalmente. Es importante contemplar la posibilidad de un cambio en el clima de la zona agrícola para garantizar riegos adecuados en años futuros (Granados, Martín, García, & Iglesias, 2015).

El proyecto de modernización del DR inició en 2004, planteado con un sistema de conducción y distribución entubado, alimentado por la presa Plutarco Elías Calles. El sistema de riego fue proyectado como un sistema mixto entre una distribución por turnos y a demanda controlada, para regar por goteo a nivel parcelario. Existen varios problemas que afectan el funcionamiento y rendimiento de la red presurizada. Hay usuarios que riegan por aspersión, técnica de aplicación del agua que requiere mayor presión y agua para operar, que la proyectada

originalmente. Hay usuarios que no respetan el turno de riego asignado y riegan a demanda libre, ocasionando en ciertos puntos de entrega presiones inferiores a las requeridas para que los emisores operen de forma correcta. Otro problema importante es que hay usuarios que riegan por tiempos prolongados para no regar diario, pero el sistema de riego está dimensionado para hacer riegos continuos (diarios). Además, hay algunos usuarios que tienen asignados turnos de riego nocturnos, pero prefieren regar en horarios diurnos. Otro aspecto importante a considerar es que el patrón de cultivos propuesto en el diseño original difiere del patrón de cultivos actualmente establecido dentro del DR. Si bien el proyecto original se concibió con una entrega del agua con cierto grado de flexibilidad, los problemas arriba expuestos y las modificaciones constructivas y del clima respecto del proyecto original podrían generar problemas de abastecimiento en algunas parcelas una vez que la infraestructura quede terminada en su totalidad y se inicie la operación de todo el distrito (Pérez, Smout, Rodríguez, & Carrillo, 2010; Planells, Tarjuelo, Ortega, & Casanova, 2001), pues actualmente están operando pocas secciones y la sección 01 es la más completa. En consecuencia, el objetivo de este trabajo fue analizar el comportamiento hidráulico de la red de conducción principal y la red de distribución de la sección 01 en diferentes escenarios de operación, e identificar la mejor alternativa de entrega del agua. Se consideraron las características actuales del patrón de cultivos, clima y operación. Los escenarios de operación por turno se implementaron en el programa EPANET (EPA, 2020), y los de demanda libre, basados en la primera fórmula generalizada de Clément (1966), se ejecutaron en MATLAB (The Math Works, Inc., 2019).

Materiales y métodos

El DR 001 Pabellón de Arteaga se ubica en los municipios de Pabellón de Arteaga, Rincón de Romos y Tepezalá, y es abastecido por la presa Presidente Plutarco Elías Calles. Se analizó el comportamiento hidráulico de la sección 01 de las 19 secciones que componen el DR 001, por ser la de mayor avance constructivo y porque es totalmente abastecida por la presa Calles, a diferencia de otras secciones, donde algunos hidrantes tienen adecuaciones para recibir el agua de pozos profundos. Galván y Exebio (2020) reportan que la red de conducción de la sección es cerrada, compuesta de 253 tramos (97 % de la longitud) de tubo clase 5 y ocho tramos (3 % de la longitud) de tubo clase 7; actualmente opera con 126 hidrantes de caudales nominales de 10 y 20 l s⁻¹ y cuatro válvulas reguladoras de presión (VRP) calibradas a diferentes presiones de operación para regar 317.25 ha (Figura 1b).

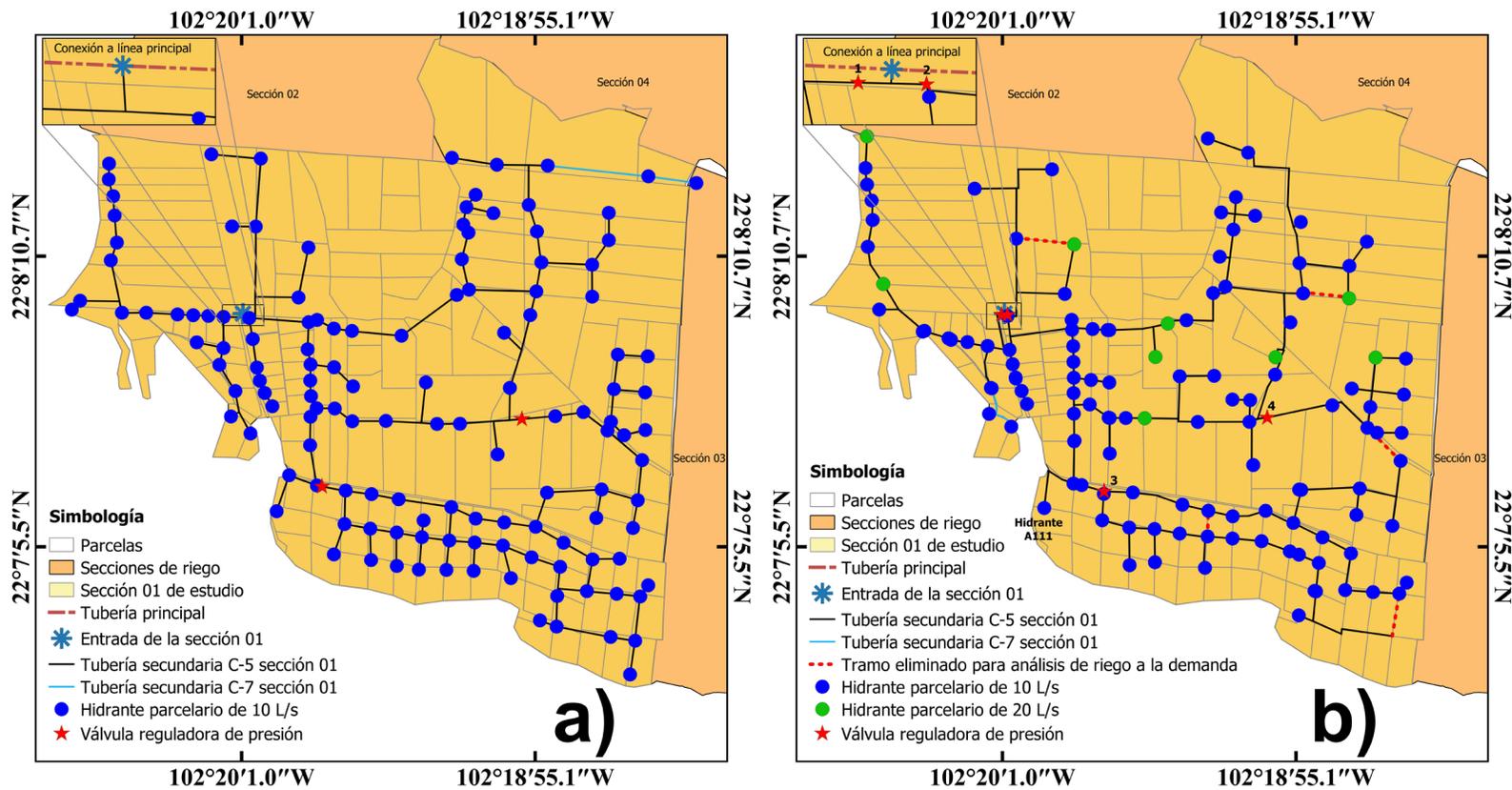


Figura 1. Topología de la sección 01: (a) red original; (b) red instalada.

La red de conducción de la sección 01 tuvo cambios respecto del proyecto inicial (Figuras 1a y 1b), y destacan: reducción de hidrantes de 132 a 126, aumento de las VRP de dos a cuatro y reducción de la superficie de dominio de 353.33 a 317.25 ha. Actualmente el número de hidrantes y superficie de riego está en constante cambio por la venta de los derechos del agua, que aprueba la Asociación Civil de Usuarios (ACU) del DR. La venta de derechos puede realizarse dentro de la misma sección en sitios muy distantes, incluso de una sección a otra, afectando la capacidad de suministro en algunos puntos de la red hidráulica.

Estimación de las necesidades de riego bruto

Las necesidades de riego brutas (NR_B) (mm) se calcularon para compensar el déficit entre la evapotranspiración de cultivo (ET_C) (mm) y la precipitación efectiva (P_{ef}) (mm) durante el crecimiento del cultivo (FAO, 2021). La P_{ef} fue omitida debido a que la precipitación del sitio es errática (INIFAP, 2019). Las NR_B se obtuvieron a partir de las necesidades de riego netas (NR_N) (mm), el coeficiente de uniformidad (CU) de los emisores, las necesidades del lavado de suelos (F_{LS}) y la eficiencia de aplicación (EA) (Ecuación (1)) (Tijerina, 1999):

$$NR_B = \frac{NR_N}{EA} = \frac{NR_N}{CU(1-F_{LS})} \quad (1)$$

Se consideró un CU del 90 %, EA de 95 % para la micro irrigación y 85 % para aspersión (De-León & Robles, 2007). La F_{LS} (adimensional) se determinó con las ecuaciones propuestas en el boletín FAO 24 para riego de baja frecuencia (aspersión) y alta frecuencia (microaspersión y goteo) (Doorenbos & Pruitt, 1977). Los valores de máxima conductividad eléctrica en el extracto de saturación del suelo ($CE_{es, max}$) ($dS\ m^{-1}$) se tomaron del boletín de FAO 29 (Ayers & Westcot, 1976). La conductividad eléctrica en el agua (CE_w) ($dS\ m^{-1}$) de la presa Calles es $0.1368\ dS\ m^{-1}$. Las NR_N se calcularon con un balance de agua en el suelo (De-León &

Robles, 2007), considerando la evapotranspiración del cultivo ajustada ($ET_{C Aj}$), despreciando P_{ef} y las aportaciones por el manto freático.

La $ET_{C Aj}$ resultó de ajustar la ET_C por los factores de localización (F_L), clima (F_C) y advección (F_A) (Ecuación (2)) (Pizarro, 1996):

$$ET_{C Aj} = (F_L)(F_C)(F_A)(ET_C) \quad (2)$$

La ET_C se calculó con los coeficientes de cultivo (k_c) y la evapotranspiración de referencia (ET_O) (mm). Los K_c se tomaron del manual de FAO 56 y la ET_O se calculó con la ecuación de Penman-Monteith (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006). La información climática promedio diaria para el cálculo de ET_O se obtuvo de la estación automática CEPAB (INIFAP, 2019) del periodo de mayo de 2003 a marzo de 2019. El cálculo de las necesidades de riego se hizo con base en las fechas de inicio-fin y duración de los ciclos para cada cultivo establecidos y considerando que el ciclo agrícola inicia 01 de octubre, según información recabada con la ACU.

Caudal unitario por cultivo

En la sección 01 se calculó un caudal por unidad de superficie (unitario) (q_u) por cultivo, en función del marco de instalación y caudales de los emisores que la mayoría de los usuarios emplea en el DR 001, según

información proporcionada por el personal de operación de la ACU. En las secciones 02 a 19 se obtuvo un valor único (valor promedio).

Superficie actual de riego

La superficie de riego total actual en el DR es de 5 460 ha. Esta cantidad resultó de la suma de la superficie de dominio reportada por la ACU en las secciones que ya están operando, y de la superficie proyectada inicialmente en las secciones que están en proceso de construcción y por construirse. Las superficies de las secciones 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19 son las siguientes: 317.25, 78.63, 353.82, 235.05, 115.51, 91.73, 166.85, 316.71, 387.08, 144.66, 144.61, 478.63, 215.68, 132.38, 716.45, 574.90, 129.96, 456.05 y 404.06 ha, respectivamente.

Patrón de cultivos para la sección 01

Se hizo una proyección de la superficie de siembra por cultivo para el ciclo agrícola en todo el DR, de tal manera que la superficie de siembra total no superara por mes las 5 460 ha del DR, y que el volumen demandado resultara igual o menor que el volumen concesionado por la Comisión Nacional del Agua (Conagua) para el ciclo agrícola, cuyo valor es 32.5 hm³. La superficie considerada por cada cultivo en la sección 01 resultó de multiplicar la superficie de siembra del cultivo en el DR por el

porcentaje de la superficie de la sección 01 con respecto a la superficie total a regar en el DR (5.81 %).

Tiempos de riego

El tiempo de riego (T_R) (h) requerido para cada uno de los cultivos, se calculó con la lámina horaria (L_H) (mm h^{-1}) aplicada por los emisores (goteros, micro aspersores y aspersores) y la NR_B de cada cultivo para aplicar el riego en intervalos de 48 h.

Escenarios de operación

Para el planteamiento de los escenarios de operación se tomó como referencia la operación actual, que consiste en regar en intervalos de riego de dos días (48 horas) organizados en 15 turnos de posición del riego de 3.2 horas cada uno (Tabla 1), y considerando que la línea principal del sistema de riego está completamente terminada y regando el 100 % de la superficie del DR. Las superficies por cultivo fueron asignadas de manera aleatoria en la sección 01 para obtener las demandas de riego por hidrante y por turno. Las demandas de riego de las secciones 02 a 19 en los 15 turnos de riego se calcularon con el caudal unitario y con una quinceava parte de la superficie de riego correspondiente a cada sección.

Tabla 1. Horarios de los turnos de operación de riego en el DR 001.

Turno	Horario
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

Los hidrantes riegan la superficie de dominio (0.83 a 1.67 ha) en 1 a 4 bloques y solo pueden regar un bloque a la vez por turno, tal como se hace actualmente y como se proyectó originalmente.

Se propusieron siete escenarios de operación para la sección 01 con base en los cambios que ha tenido el proyecto original de modernización, principalmente en operación de la red presurizada, patrón de cultivos y la

venta de derechos de agua. Los primeros tres escenarios consideraron una entrega por turnos de riego, el cuarto una entrega híbrida por turno de riego y demanda libre, y los últimos tres contemplaron riego a demanda libre. El primer escenario suministra las necesidades de riego del mes crítico del ciclo agrícola proyectado, considerando los emisores instalados actualmente, los cuales emiten un caudal superior al proyectado originalmente, con un intervalo de riego 48 h, distribuido en los 15 turnos de operación (Tabla 1); considera la premisa de que el usuario respeta el turno de riego asignado en el proyecto original. El segundo escenario toma en cuenta las mismas necesidades de riego y mismo número de turnos e intervalo de riego que el primero, pero ajustando la lámina horaria de riego que aplican los emisores actuales para garantizar 3.2 h por turno de riego debido a un decremento del caudal emitido por emisor; el objetivo es usar láminas de riego horarias similares a las del proyecto original, pues actualmente sus valores son diversos y mayores que los proyectados. El tercer escenario considera el suministro de las necesidades de riego máximas que presentaría cada cultivo del ciclo agrícola proyectado, ajustando la lámina horaria de los emisores, como en el segundo escenario, para garantizar 3.2 h por turno de riego en los 15 turnos; el objetivo es contemplar un posible incremento de las necesidades de riego debido a un cambio de fecha en las siembras y en el régimen climático. En el cuarto escenario, las necesidades de riego se estiman como en el escenario uno y considera una entrega híbrida, que es la más apegada a la operación actual, la cual se aplica en ciertos puntos de la red; se consideraron 86 hidrantes, con una entrega de riego por turnos y 40 hidrantes a demanda libre distribuidos aleatoriamente en los

turnos de horarios diurnos, respetando en los 126 hidrantes un tiempo de riego de 3.2 h por turno, y un intervalo de riego de 48 h. El quinto, sexto y séptimo escenarios consideraron el suministro de las necesidades de riego del mes crítico del ciclo agrícola proyectado, con la apertura de hidrantes a una distribución a demanda libre con probabilidad de suministro de 90, 95 y 99 %, respectivamente. En los tres escenarios se consideró un intervalo de riego diario y un tiempo de riego de 12 h. Se plantearon estos escenarios, ya que el proyecto original generó en los usuarios del DR la idea de que el riego sería a la demanda.

Modelación de los escenarios de operación

La simulación hidráulica de los escenarios de operación del primero al cuarto se hizo con el *software* EPANET (Rossman *et al.*, 2020; EPA, 2020). Aunque dicho *software* fue creado para redes de agua potable, se puede emplear para analizar redes de riego, pues el principio hidráulico es el mismo en ambos casos (Pérez-Sánchez, Sánchez, Ramos, & López, 2016). Con los turnos de operación, las superficies de riego y los caudales unitarios se generaron las curvas de demanda en los nodos representativos de las entradas de las secciones 02 a 19 y de los hidrantes de la sección 01. Los caudales a circular para cada tramo de la red para el quinto, sexto y séptimo escenarios se determinaron con la ecuación propuesta por Clément (1966) para hidrantes heterogéneos con distintas descargas y probabilidades de funcionamiento en un instante dado; dichas simulaciones se implementaron con el programa MATLAB® (The

Math Works, Inc., 2019). Las pérdidas por fricción se calcularon con la ecuación de resistencia de Hazen-Williams.

Consideraciones en el análisis hidráulico

La carga hidráulica para todos los escenarios fue de 3.02 kg cm^{-2} , resultado de la diferencia entre la elevación de la obra de toma (1 963.00 msnm) y el nivel de agua mínimo extraordinario (1 993.25 msnm) de la presa Calles, valor mínimo de operación del sistema de riego. Se consideró la presión de operación actual de las VRP (2.80 kg cm^{-2}) en el tramo muerto de la línea principal y 0.25 kg cm^{-2} de pérdida de energía en la plataforma de filtrado, según valores proporcionados por la ACU. El DR está dividido en 19 secciones de riego, cada una de ellas se conecta a la línea de conducción principal en un solo punto para de ahí ramificarse en líneas de conducción de menor jerarquía. Las secciones 02 a 19 simbólicamente fueron representadas como un nodo de entrega en la red principal, con un caudal asignado para cubrir las necesidades de los cultivos en cada turno de riego, a fin de simular el funcionamiento completo de la red principal. En la sección 01 se consideraron los valores a los que están calibradas la VRP1, VRP2, VRP3 y VRP4, los cuales son 3.5, 4.5, 3.5 y 3.8 kg cm^{-2} , respectivamente (Figura 1b), según información proporcionada por la ACU. En el quinto, sexto y séptimo escenarios, la red de la sección se consideró abierta, suprimiendo cuatro tramos de la red (Figura 1b), dado que la fórmula de Clément solo aplica

en redes abiertas, y se contempló una presión común y constante a la entrada de la sección 01 en las 12 h de riego. La presión mínima de operación para los hidrantes fue de 2.5 kg cm^{-2} , para garantizar la pérdida de energía generada por los componentes del hidrante (1.3 kg cm^{-2}), las pérdidas por la conducción por cada bloque (0.2 kg cm^{-2}) y la presión de operación del emisor (1.0 kg cm^{-2}). Se consideraron aceptables valores de velocidad de flujo en un rango de 0.5 a 2.5 m s^{-1} , según lo sugerido por la norma mexicana NMX-O-177-SCFI-2011, que establece los lineamientos generales para proyectos de sistemas de riego (DOF, 2011). De esta manera se evitan diámetros grandes y un encarecimiento de la tubería.

Resultados

El mes con mayor demanda (mes crítico) del ciclo agrícola proyectado fue mayo, con $6\,274.8 \text{ dam}^3$. La identificación del mes crítico permitió encontrar las demandas de riego de los escenarios uno, dos y cuatro, y cinco a siete, correspondientes al par de días (26 y 27) de máxima demanda de ese mes y al día (27) de máxima demanda en dicho mes, respectivamente.

Tiempo de riego por cultivo

El T_R resultó inferior que el tiempo por turno establecido por la ACU (3.2 h) en el primer y cuarto escenarios de operación, con excepción del cultivo de la vid, en el que se emplean goteros con una lámina horaria más baja (Tabla 2). En el segundo escenario se obliga a que el T_R sea igual al tiempo por turno; los q_u demandados por cada cultivo disminuyeron entre 17 y 83 % con respecto al primer y cuarto escenarios; esto se traduce en menores caudales de conducción y menores pérdidas de energía por fricción en los tramos de la red de la sección 01, disminuyendo el riesgo de no suministrar las presiones requeridas en los hidrantes.

Tabla 2. Características de riego en la sección 01 del primer al cuarto escenarios de operación.

Cultivo	Primer, segundo y cuarto escenarios			Tercer escenario		T _R (h)	
	¹ NR _B 26 (mm)	² NR _B 27 (mm)	³ NR _B 48h (mm)	⁴ NR _B máximo (mm)	⁵ NR _B 48h (mm)	Primer y cuarto escenario	Segundo y tercer escenario
Alfalfa	5.23	5.29	10.52	5.65	11.30	2.44	3.20
Arándano	4.10	4.13	8.23	4.27	8.54	2.67	3.20
Espárrago	2.87	2.89	5.76	4.42	8.84	1.27	3.20
Fresa	2.31	2.30	4.61	4.20	8.40	0.54	3.20
Nogal	1.73	1.69	3.42	4.36	8.72	0.95	3.20
Vid	2.22	2.21	4.43	3.58	7.16	3.32	3.20
Calabacita	3.39	3.43	6.82	4.11	8.22	2.41	3.20
Cebolla	4.82	4.86	9.68	5.08	10.16	1.71	3.20
Chile	4.82	4.87	9.69	5.33	10.66	1.71	3.20
Maíz (forrajero)	3.03	3.02	6.05	4.84	9.68	1.34	3.20
Maíz (grano)	3.03	3.02	6.05	4.84	9.68	1.34	3.20
Pepino	3.72	3.77	7.49	4.12	8.24	2.64	3.20

¹NR_B 26 = necesidad de riego bruta del día 26, correspondiente al mes crítico (mayo).

²NR_B 27 = necesidad de riego bruta del día 27, correspondiente al mes crítico (mayo).

³NR_B 48h = necesidad de riego bruta máxima acumulada de dos días (26 y 27) del mes de máxima demanda (mayo), a ser aplicado en 48 h.

⁴NR_B máximo = necesidad de riego bruta máxima diaria del ciclo del cultivo.

⁵NR_B 48 h = dos veces la necesidad de riego bruta máxima diaria del ciclo del cultivo, a ser aplicada en 48 h.

En el tercer escenario resultaron q_u notablemente inferiores que en el primer y cuarto escenarios, y superiores que en el escenario dos, debido a que las necesidades de riego brutas máximas diarias ($NR_{B \text{ máximo}}$) proyectadas a 48 h ($NR_{B \text{ 48h}}$) fueron superiores que las máximas acumuladas en 48 h del mes de máxima demanda; las mayores diferencias se observaron en el espárrago, fresa, nogal, vid, maíz (forrajero y grano), en un rango de 54 a 155 %.

Comportamiento hidráulico de la distribución por turnos

En el primer escenario de operación, los caudales entregados a la entrada de la sección 01 fueron muy diversos (Figura 2). Los turnos de riego 1 al 5 no presentaron grandes fluctuaciones, pero a partir del seis se presentaron varios valores mínimos y máximos relativos. Esta respuesta hidráulica del escenario uno se debe, en gran medida, a que los emisores usados actualmente en el DR son de un caudal mayor a los considerados en el proyecto original; en consecuencia, aplican la demanda de riego en menor tiempo a costa de caudales mayores en la conducción, los cuales no fueron contemplados en las tuberías instaladas actualmente.

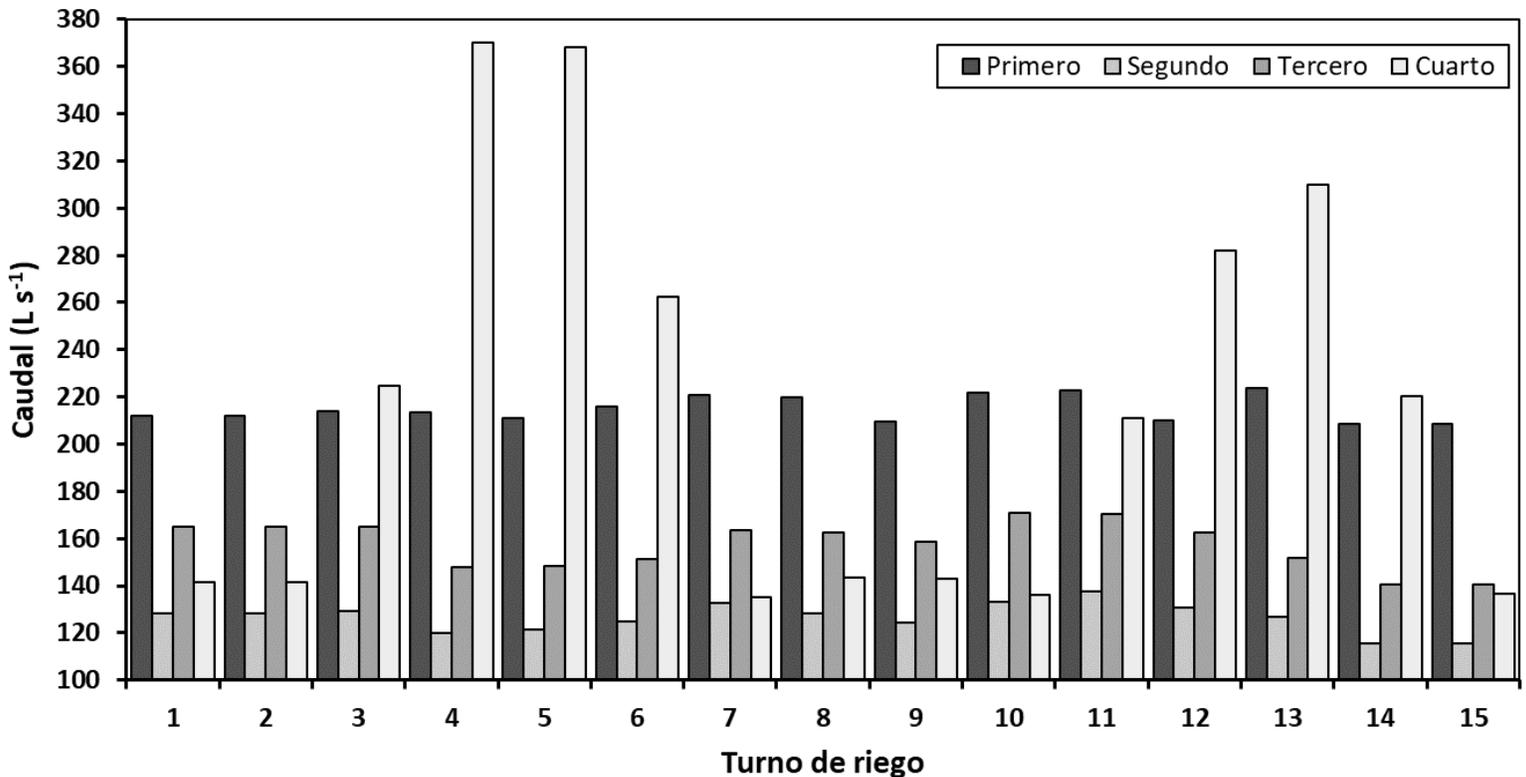


Figura 2. Comportamiento de los caudales en la entrada de la sección 01 del primer al cuarto escenarios de operación.

En el segundo escenario de operación los caudales a la entrada de la sección 01 también tuvieron fluctuaciones como en el primer escenario, pero con menos picos de mínimos y máximos (Figura 2). El ajuste de los caudales de los emisores disminuyó los caudales entregados a la entrada de la red de la sección 01 hasta en un 45 % en promedio con respecto al primer escenario de operación, por lo que era de esperar un mejor comportamiento en el escenario dos que el escenario uno, con menores

velocidades y pérdidas de energía por fricción en los tramos de conducción (Tabla 3).

Tabla 3. Comportamiento hidráulico de la sección 01 en los escenarios de operación por turnos.

Variable comparativa	Escenario			
	1	2	3	4
Hidrantes con presión ≥ 2.5 (kg cm ⁻²)	99	123	122	58
Hidrantes con presión ≥ 1.5 y < 2.5 (kg cm ⁻²)	18	3	4	18
Hidrantes con presión < 1.5 y ≥ 0 (kg cm ⁻²)	8	0	0	33
Hidrantes con presión < 0 (kg cm ⁻²)	1	0	0	17
Caudal máximo a la entrada de la sección (l s ⁻¹)	223.73	137.59	170.70	370.36
Caudal mínimo a la entrada de la sección (l s ⁻¹)	208.36	115.46	140.64	135.10
Fluctuación de caudal a la entrada de la sección (l s ⁻¹)	15.37	22.13	30.06	235.26
Presión mínima a la entrada de la sección (kg cm ⁻²)	5.17	5.19	5.20	5.19
Presión máxima a la entrada de la sección (kg cm ⁻²)	5.14	5.17	5.13	5.09
Velocidad máxima (m s ⁻¹)	2.89	1.64	1.76	4.15
Pérdida de energía máxima (kg cm ⁻²)	2.22	0.69	0.77	2.22

En el tercer escenario de operación los caudales siguieron una tendencia similar que en el segundo escenario (Figura 2). Similarmente que en el segundo escenario, en este escenario el caudal del emisor influyó positivamente, aunque los cultivos demandaron más agua y

aumentaron los caudales en los tramos de la red; solo cinco hidrantes no recibieron la presión de operación mínima (Tabla 3).

En el cuarto escenario los caudales y presiones a la entrada de la sección 01 fueron variados, con un comportamiento distinto a los escenarios 1 a 3 (Figura 2) debido a que actualmente los usuarios riegan sin previo aviso, situación que desfavorece el desempeño de la red hidráulica. Es destacable el incremento del número de hidrantes que no reciben la presión mínima de operación con respecto al primer escenario, lo cual evidencia que no respetar el turno de riego asignado tiene un impacto desfavorable en el funcionamiento de la red (Tabla 3).

La Tabla 3 muestra un resumen de la respuesta hidráulica de la red de la sección 01 a los escenarios de operación 1 a 4. Destaca la importancia de respetar el turno de riego asignado y el ajuste del caudal de los emisores, donde el escenario dos resultó el más favorable y el escenario cuatro el menos favorable.

Comportamiento hidráulico de la distribución a la demanda

En los escenarios cinco, seis y siete los caudales se mantuvieron constantes a la entrada de la sección 01 durante el riego (Tabla 4), incrementando de un 40 a 100 % respecto a los escenarios de operación 1 a 3. No se observaron diferencias apreciables de los comportamientos de los escenarios cinco y seis en relación con los de los turnos diurnos del escenario cuatro. La presión del agua fue de 5 kg cm⁻² en el punto de

conexión de la red de la sección 01 con la línea principal durante las 12 h.

Tabla 4. Comportamiento hidráulico de la sección 01 en los escenarios de operación a demanda libre (garantías de suministro).

Características hidráulicas	Escenario 5 ($p = 90 \%$)	Escenario 6 ($p = 95 \%$)	Escenario 7 ($p = 99 \%$)
Hidrantes con presión ≥ 2.5 (kg cm^{-2})	31	27	23
Hidrantes con presión ≥ 1.5 y < 2.5 (kg cm^{-2})	22	20	19
Hidrantes con presión < 1.5 y ≥ 0 (kg cm^{-2})	28	25	13
Hidrantes con presión < 0 (kg cm^{-2})	45	54	71
Caudal en la entrada de la sección (l s^{-1})	355.48	371.94	402.82
Velocidad máxima (m s^{-1})	4.08	4.37	4.92
Velocidad mínima (m s^{-1})	0.26	0.30	0.38
Pérdida por fricción máxima (m)	16.97	19.28	26.75

Los incrementos en los caudales produjeron mayores pérdidas de energía en la conducción, reduciendo de modo sustancial el número de hidrantes con la presión de operación requerida. Estos resultados contrastan mucho con los obtenidos en los escenarios de operación por turnos de riego. Incluso el escenario cinco, el de menor probabilidad de suministro (90 %), superó de forma importante al escenario cuatro (operación es híbrida) en el número de hidrantes con presiones negativas. En efecto, Fouial, Lamaddalena y Rodríguez (2020) encontraron que cuando la simultaneidad de la apertura de hidrantes es alta (62 %) hay

déficit de presión en algunos hidrantes y una reducción del volumen entregado hasta de 19.0 % en el día de máxima demanda. Del quinto a séptimo escenario se presentaron velocidades que superan la velocidad del agua máxima permisible (2.5 m s^{-1}), las cuales podrían favorecer la ruptura de la tubería por la posible presencia del golpe de ariete, pues su presión máxima permisible es 5.0 kg cm^{-2} .

Discusión

De los siete escenarios que se simularon con el patrón de cultivos actual, el segundo escenario fue el más favorable en el funcionamiento hidráulico de la red de la sección 01. El tercer escenario fue el siguiente con mejores resultados. Los escenarios a demanda libre presentaron más dificultades que los escenarios por turnos de riego, ya que son pocos los hidrantes que satisfacen las presiones de operación. Para operar de manera mixta (turno y libre) o a demanda libre se requieren presiones mayores que 5.0 kg cm^{-2} en la entrada de la sección 01. Este requerimiento demandaría liberar presión en las VRP del tramo muerto de la conducción principal y de la sección 01 mediante un ajuste de sus valores actuales de calibración. Sin embargo, ello implicaría sustituir algunos tramos de la tubería existente por otra tubería con capacidad de trabajo a presiones mayores, pues los transitorios ocasionados por la apertura y cierre aleatorio de hidrantes podría generar presiones excesivas en algunos tramos e hidrantes (Derardja, Lamaddalena, & Fratino, 2019).

Para la implementación de la alternativa de transferencia de derechos de agua es recomendable realizar un análisis del comportamiento hidráulico de la red antes de aprobar el cambio, ya que su respuesta depende de varios aspectos, además de los aquí abordados, tales como la gestión del agua y rehabilitación (Fouial & Rodríguez, 2021). Se deben contemplar las sobrepresiones que generan las aperturas y cierres aleatorios de hidrantes porque pueden generar daños a la infraestructura e interrumpir el servicio de riego (Derardja *et al.*, 2019). En este estudio se observó que la transferencia generó un aumento en las velocidades de conducción y en las pérdidas de energía por fricción. Los cambios imprevistos señalados y la modificación del patrón de cultivos pueden generar una baja uniformidad de la aplicación del riego (Khadra, Lamaddalena, & Inoubli, 2013). Para regar con mayor flexibilidad o a demanda libre en la sección 01, sin afectaciones por la transferencia de derechos de agua, se deberían sustituir los diámetros de las tuberías, lo cual resultaría costoso (Lapo, Pérez, Aliod, & Martínez, 2020; Calejo, Lamaddalena, Teixeira, & Pereira, 2008) y poco operativo, porque su implementación interrumpiría los riegos. La mejor alternativa sería optar por un arreglo óptimo por turnos con emisores que permitan que todos los hidrantes reciban la presión mínima requerida (Lapo *et al.*, 2020).

Queda pendiente analizar el funcionamiento hidráulico conjunto de la red de conducción principal y las redes de conducción de las secciones del sistema de riego del DR 001, incluyendo un análisis de costos, pues en riego a la demanda se ha observado que a pesar de que hay mayor variabilidad de caudales en los tramos terminales de una red que en la tubería principal, resulta más costoso el cambio de diámetros en esta

última (Alduán & Monserrat, 2009). En este estudio y en otros más (Monserrat, Poch, Colomer, & Mora, 2004; Íñiguez *et al.*, 2007) se observó que el método de Clément podría ser una buena alternativa para el diseño de sistemas de riego, pues representa de forma adecuada el comportamiento estadístico de los usuarios riego, salvo en 1 o 2 meses del año, donde puede ser mejor representado por otro tipo de distribución probabilística (Pérez-Sánchez, Carrero, Sánchez-Romero, & López-Jiménez, 2018), proporcionando diferentes grados de flexibilidad en el servicio de riego; sin embargo, esta alternativa requiere sistemas con mayor capacidad de conducción y una inversión inicial alta; no obstante, a largo plazo, los costos de operación se pueden reducir de forma significativa (Espinosa, Flores, Ascencio, & Carrillo, 2016).

Conclusiones

La red actual de la sección 01 hidráulicamente no tiene capacidad para operar con riego a demanda libre o mixta (turno y libre) porque los hidrantes no recibirían el servicio del riego debido a que se incrementan los caudales y las pérdidas de energía en los tramos de la red. Una operación a demanda libre requeriría una modificación de las presiones de calibración de las válvulas reguladoras de presión del tramo muerto de la conducción principal y de la sección 01, conexión de tramos en circuitos cerrados, y la sustitución de tubos con mayor presión de trabajo en varios tramos, por lo que una demanda por turnos estricta es la mejor alternativa. Las condiciones de riego actuales, representadas por el

primer escenario de operación por turnos, son desfavorables, pues 21.4 % de los hidrantes de la sección de estudio no recibirían la presión de operación requerida. La operación por turnos de riego más favorable implicaría disminuir los caudales de los emisores actualmente usados y que la duración de los riegos sea igual que la duración de los turnos de riego actualmente establecida por la ACU (escenarios 2 y 3), logrando con ello disminuir a menos de 3.2 % los hidrantes sin la presión de operación requerida.

Referencias

- Alduán, A., & Monserrat, J. (2009). Estudio comparativo entre la organización a la demanda o por turnos en redes de riego a presión. *Ingeniería del Agua*, 16(3), 235-242. DOI: 10.4995/ia.2009.2951
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Boletín 56). Roma, Italia: Estudio FAO Riego y Drenaje.
- Altamirano, A. A., Valdez, T. J. B., Valdez, L. C., León, B. J. I., Betancourt, L. M., & Osuna, E. T. (2019). Evaluación del desempeño de los distritos de riego en México mediante análisis de eficiencia técnica. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(1), 85-121. DOI: 10.24850/j-tyca-2019-01-04
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1976). *Water quality for agriculture* (Paper No. 29). Rome, Italy: FAO Irrigation and Drainage. Recuperado de <http://www.fao.org/3/t0234e/t0234e00.htm>

- Calejo, M. J., Lamaddalena, N., Teixeira, J. L., & Pereira, L. S. (2008). Performance analysis of pressurized irrigation systems operating on-demand using flow-driven simulation models. *Agricultural Water Management*, 95, 154-162. DOI: 10.1016/j.agwat.2007.09.011
- Clément, R. (1966). Calcul des débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant a la demande. *La Houille Blanche*, 5, 553-575. DOI: <https://doi.org/10.1051/lhb/1966034>
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2017). *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego año agrícola 2015-2016*. Recuperado de https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EA_2015-2016.pdf
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2018). *Estadísticas del agua en México*. Recuperado de http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- Daccache, A., & Lamaddalena, N. (2010). Climate change impacts on pressurised irrigation systems. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, 163(2), 97-105. DOI: 10.1680/ensu.2010.163 .2.97
- Derardja, B., Lamaddalena, N., & Fratino, U. (2019). Perturbation indicators for on-demand pressurized irrigation systems. *Water*, 11(58), 1-14. DOI: 10.3390/w11030558
- De-León, M. B., & Robles, R. B. D. (2007). *Manual para el diseño de zonas de riego pequeñas*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12013/1645>

- DOF, Diario Oficial de la Federación. (2011). *Declaratoria de vigencia de la norma mexicana NMX-O-177-SCFI-2011, lineamientos generales para proyectos de sistemas de riego (cancela a las normas mexicanas NMX-O-177-SCFI-2002 y NMX-O-180-SCFI-2003)*. México, DF, México: Secretaría de Economía. Recuperado de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5205216&fecha=18/08/2011
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. (1977). *Crop water requirements* (Paper No. 24). Rome, Italy: FAO Irrigation and Drainage. Recuperado de <http://www.fao.org/3/f2430e/f2430e.pdf>
- EPA, Environmental Protection Agency. (2020). *EPANET (2.2). Software*. Recuperado de <http://www.epa.gov/water-research/epanet>
- Espinosa, E. B., Flores, M. H., Ascencio, H. R., & Carrillo, F. G. (2016). Análisis técnico y económico del diseño de un sistema de riego a hidrante parcelario utilizando el método por Turnos y la técnica de Clement. *Terra Latinoamericana*, 34(4), 431-440.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2021). *AQUASTAT - Sistema mundial de información de la FAO sobre el agua en la agricultura*. Recuperado de <http://www.fao.org/aquastat/es/data-analysis/irrig-water-use/irrig-water-requirement>

- Flores, R. A., Cristóbal, A. D., Pascual, R. F., De-León, M. B., & Prado, H. J. V. (2019). Agricultural productivity of water in the central area of the Calera aquifer, Zacatecas. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 11(2), 181-199. DOI: <http://dx.doi.org/10.5154/r.inagbi.2019.03.040>
- Fouial, A., Lamaddalena, N., & Rodríguez, D. J. A. (2020). Generating hydrants' configurations for efficient analysis and management of pressurized irrigation distribution systems. *Water*, 20(12), 1-15. DOI: [10.3390/w12010204](https://doi.org/10.3390/w12010204)
- Fouial, A., & Rodríguez, D. J. A. (2021). DESIDS: An integrated decision support system for the planning, analysis, management and rehabilitation of pressurised irrigation distribution systems. *Modelling*, (2), 308-326. DOI: <https://doi.org/10.3390/modelling2020016>
- Galván, C. O., & Exebio, G. A. (2020). Rediseño óptimo de la red presurizada de la sección 01, del distrito de riego 001 Pabellón de Arteaga, Aguascalientes. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 323-331. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.645>
- Granados, A., Martín, C. F. J., García, de J. S., & Iglesias, A. (2015). Adaptation of irrigation networks to climate change: Linking robust design and stakeholder contribution. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 13(4), 1-12. DOI: <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2015134-7549>

INIFAP, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (2019). *Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos*. Recuperado de <https://clima.inifap.gob.mx/Inmysr/Principal/Solicitud>

Íñiguez, C. M., De-León, M. B., Prado, H. J. V., & Rendón, P. L. (2007). Análisis y comparación de tres métodos para determinar la capacidad de conducción de canales, aplicados en el distrito de riego La Begoña. *Ingeniería Hidráulica en México*, 22(2), 81-90.

Khadra, R., Lamaddalena, N., & Inoubli, N. (2013). Optimization of on demand pressurized irrigation networks and on-farm constraints. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 942-954. DOI: 10.1016/j.proenv.2013.06.104

Lapo, P. C. M., Pérez, G. R., Aliod, S. R., & Martínez, S. F. J. (2020). Optimal design of irrigation network shifts and characterization of their flexibility. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(1), 266-314. DOI: 10.24850/j-tyca-2020-01-07

Martínez, P. (2020). Chapter 9. Climate change and water resources in Mexico. In: *Water resources of Mexico*. Raynal-Villasenor, J. A. (ed.). Berlin, Germany: Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-40686-8

Montserrat, J., Poch, R., Colomer, M. A., & Mora, F. (2004). Analysis of Clément's first formula for irrigation distribution networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(2), 99-105. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:2(99)

- Pérez-Sánchez, M., Carrero, L. M., Sánchez-Romero, F. J., & López-Jiménez, P. A. (2018). Comparison between Clément's first formula and other statistical distributions in a real irrigation network. *Irrigation and Drainage*, 67(3), 429-440. DOI: 10.1002/ird.2233
- Pérez-Sánchez, M., Sánchez, R. F. J., Ramos, H. M., & López, J. P. A. (2016). Modeling irrigation networks for the quantification of potential energy recovering: A case study. *Water*, 8(6), 234. DOI: <https://doi.org/10.3390/w8060234>
- Pérez, U. L., Smout, I. K., Rodríguez, D. J. A., & Carrillo, C. M. T. (2010). Irrigation distribution networks' vulnerability to climate change. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(7), 486-493. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000210
- Pizarro, C. F. (1996). *Riegos localizados de alta frecuencia*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Planells, A. P., Tarjuelo, M-B. J. M., Ortega, A. J. F., & Casanova, M. M. I. (2001). Design of water distribution networks for on-demand irrigation. *Irrigation Science*, (20), 189-201. DOI: 10.1007/s002710100045
- Rossmann, L. A., Woo, H., Tryby M., Shang F., Janke R., & Haxton T. (2020). *Manual del usuario de EPANET 2.2*, EPA/600/R-20/133. Cincinnati, USA: Water Supply and Water Resources Division, U.S. Environmental Protection Agency. Recuperado de www.epa.gov/system/files/documents/2021-07/epanet_users_manual_2.2.0-1.pdf

The Math Works, Inc. (2019). *MATLAB (2019a). Software*. Recuperado de <http://www.mathworks.com/>

Tijerina, C. L. (1999). Requerimientos hídricos de cultivos bajo sistemas de fertirrigación. *Terra Latinoamericana*, 17(3), 237-245.