



Sexto
Congreso Nacional de
Riego, Drenaje y Biosistemas
COMEII- 2021 / Hermosillo, Sonora



Artículo: COMEII-21025

Hermosillo, Son., del 9 al 11 de junio de 2021

TECNIFICACIÓN DEL RIEGO POR GRAVEDAD: DE LA TEORÍA A LA PRÁCTICA

Carlos Chávez^{1*}; Carlos Fuentes²

¹Centro de Investigaciones del Agua. Departamento de Ingeniería de Riego y Drenaje. Universidad Autónoma de Querétaro. Cerro de las Campas S.N., Col. Las Campanas, C.P. 76010.

chagcarlos@uaq.mx – 442 192 12 00, Ext. 6036 (*Autor de correspondencia)

²Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac Núm. 8532, Jiutepec, Morelos 62550, México.

Resumen

En México la agricultura tiene la concesión del 76% del agua disponible (superficial y subterránea) y las eficiencias promedio de aplicación están por debajo del 50%. No obstante que en los últimos años se ha optado por cambiar a sistemas de riego presurizados para elevar el Uso Eficiente del Agua (UEA), el sistema de riego por gravedad sigue siendo el método más usado para proporcionar agua a los cultivos. En la literatura se pueden encontrar diversas metodologías para tecnificar el riego, sin embargo, muchas de ellas carecen de información técnica y su aplicación en campo se ve limitada: ecuaciones, pruebas rápidas, toma de muestras, etcétera. En este trabajo se muestran los resultados de una metodología desarrollada y aplicada a sistemas de riego por gravedad para incrementar el UEA. Ésta se aplicó durante el periodo 2014-2019 en tres cultivos: cebada, maíz y sorgo en el Distrito de Riego 023 San Juan del Río Querétaro. Los resultados muestran que, con un diseño eficiente, mediante pruebas de riego, caracterización de la parcela y el cálculo del gasto óptimo mediante una fórmula analítica, se lograron disminuir los tiempos de riego por hectárea y las láminas aplicadas. Las eficiencias de aplicación pasaron del 43% al 95%, mientras que el UEA aumentó en 27, 38 y 47% para el sorgo, cebada y maíz, respectivamente.

Palabras claves: uso eficiente del agua, fórmula analítica, diseño eficiente, riego por gravedad

Introducción

De acuerdo con las estadísticas y estudios recientes que se tienen registro, las eficiencias de aplicación en los Distritos de Riego en México son menores del 50% (CONAGUA, 2018; Chávez y Fuentes, 2018, 2019), 5% por debajo del promedio global (Hoogeveen, 2015 *et al.*; Unver *et al.*, 2017) y por consecuencia, la productividad del agua (kg/m^3) es muy baja comparados con los sistemas de riego presurizados (CONAGUA, 2018). No obstante que se han dado apoyos para modernizar los sistemas de riego tradicional a aspersión y goteo, aún hay diversos factores que ocasionan que los agricultores no opten por estas tecnologías: falta de inversión, poco apoyo gubernamental, pago de personal capacitado para operación de los sistemas, factores sociales, riesgos en la adquisición de equipos que no conocen, entre otros (Hoogeveen *et al.*, 2015; Pereira *et al.*, 2012).

Las bajas eficiencias de aplicación obtenidas en sistemas de riego por gravedad se deben principalmente a las pérdidas de agua asociada con la infiltración profunda, coleos y las inundaciones en algunas partes del suelo como resultado de un diseño de flujo deficiente en la entrada del surco (Chávez y Fuentes, 2019), así como desniveles en las parcelas y el poco conocimiento sobre la cantidad de agua que se le debe suministrar a los cultivos para que puedan desarrollarse plenamente (figura 1). Sin embargo, en un sector donde la demanda de agua ocupa un porcentaje alto del agua disponible, el uso eficiente del agua de riego y el incremento en la productividad son factores cruciales que deben ser atendidos a la brevedad para tener un manejo sostenible del agua y la adaptación al cambio climático (Kenn y Slavich, 2012; Du *et al.*, 2015).



Figura 1. Riegos deficientes en parcelas asociados a coleos y mal diseño del gasto óptimo en la entrada de los surcos

Ante esta problemática, durante los años 2015-2019 la CONAGUA mantuvo un programa de tecnificación en sistemas de riego por gravedad (RIGRAT) en una superficie de 200,000 ha en algunos Distritos de Riego de México. El programa tuvo por objetivo incrementar la eficiencia de aplicación de agua en los cultivos mediante dos ejes principales: diseño oportuno del gasto óptimo en la entrada de los surcos y reducción del tiempo de riego en cada parcela.



Un correcto diseño del caudal que debe de aplicarse a cada surco o melga, requiere del conocimiento de las características de las parcelas (longitud, contenido de humedad, densidad aparente), el cultivo establecido, etapa fenológica y la lámina por aplicar, así como los parámetros medios de la ecuación de infiltración que se esté utilizando: Richards o Green y Ampt (Fuentes y Chávez, 2020).

Para modelar el riego por gravedad se pueden encontrar en la literatura varios modelos de simulación, desde los que son completamente empíricos hasta aquellos que usan las ecuaciones completas de Barré de Saint Venant y Richards para modelar el escurrimiento y la infiltración, respectivamente (Fuentes y Chávez, 2020). El uso de estos modelos (numéricos o analíticos) ayuda a entender de una mejor manera el comportamiento que tiene el agua en los procesos de avance, almacenamiento y recesión. Sin embargo, la complejidad con las que fueron elaborados o las limitaciones que tienen, hacen que su uso sea poco práctico y sólo se utilice con fines de investigación, dejando a un lado su aplicación práctica.

En estudios recientes se ha reportado que es posible tener eficiencias de aplicación altas en sistemas de riego por gravedad, mediante la aplicación del gasto óptimo en la entrada de la melga o surco y manteniendo un coeficiente de uniformidad alto en la parcela denominado Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (Chávez y Fuentes 2018; Fuentes y Chávez 2020; Chávez *et al.*, 2020). Así, el objetivo de este trabajo es mostrar, que, con una metodología rigurosa, es posible incrementar la eficiencia de aplicación y la productividad del agua en sistemas de riego por gravedad en el Distrito de Riego 023, San Juan del Río, Querétaro, México.

Materiales y Métodos

El modelo de la onda cinemática

El modelo de la onda cinemática considera que en la ecuación de cantidad de movimiento de Barré de Saint-Venant los términos inerciales y de presión son despreciables, con respecto a los términos de fricción y gravedad (Chávez y Fuentes, 2018):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = -W \quad (1)$$

$$S_f = S_o \quad (2)$$

donde $A = A(x,t)$ es el área hidráulica (L^2); $Q = Q(x,t)$ es el gasto (L^3T^{-1}); W es el volumen infiltrado por unidad de longitud de surco en la unidad de tiempo (L^2T^{-1}); t es el tiempo (T); S_o es la pendiente del fondo del surco (LL^{-1}) y S_f es la pendiente de fricción (LL^{-1}).

La ecuación de Green y Ampt

El modelo de Green y Ampt (1911) se establece a partir de la ecuación de continuidad y la ley de Darcy con las siguientes hipótesis: a) el perfil de humedad inicial en una columna de suelo es uniforme $\theta = \theta_o$, b) la presión del agua en la superficie del suelo es



hidrostática: $\psi = h \geq 0$, donde h es el tirante de agua, c) existe un frente de humedecimiento bien definido caracterizado por una presión negativa: $\psi = -h_f < 0$, donde h_f es la succión en el frente de humedecimiento y d) la región entre la superficie del suelo y el frente de humedecimiento está completamente saturada (flujo en pistón): $\theta = \theta_s$ y $K = K_s$, donde K_s es la conductividad hidráulica a saturación, es decir, el valor de la conductividad hidráulica de la ley de Darcy correspondiente al contenido volumétrico de agua a saturación. La ecuación diferencial ordinaria resultante es la siguiente:

$$V_i = \frac{dl}{dt} = K_s \left(1 + \frac{h + h_f}{z_f} \right), \quad I(t) = z_f \Delta\theta(t) \quad (3)$$

donde $\Delta\theta = \theta_s - \theta_0$ es el déficit de humedad del suelo, I es el volumen infiltrado acumulado por unidad de superficie de suelo o lámina infiltrada y z_f es la posición del frente de humedecimiento.

Representación analítica para calcular el gasto óptimo

De acuerdo con Fuentes y Chávez (2020), la representación analítica del gasto óptimo de riego está en función de la longitud de la melga, las propiedades hidrodinámicas y de las constantes de humedad del suelo manteniendo, un valor máximo del coeficiente de uniformidad. De esta manera:

$$q_o = \alpha_u K_s L, \quad \alpha_u = \frac{\ell_n}{\ell_n - \frac{S^2}{2K_s} \ln \left(1 + \frac{2K_s}{S^2} \ell_n \right)} \quad (4)$$

en la cual se debe notar que $K_s L = q_m$ representa el gasto unitario mínimo necesario para que el agua arribe a la parte final de la melga, S es la sorbilidad del medio expresado por $S^2 = 2K_s h_f (\theta_s - \theta_0)$ y ℓ_n es la lámina neta de riego. El gasto óptimo por surco se calcula como $Q_o = bq_o$, donde b es el ancho del surco.

Caso de estudio

El Distrito de Riego 023 se encuentra ubicado entre los municipios de San Juan del Río y Pedro Escobedo en el estado de Querétaro (figura 2), y posee una superficie de 11,048 ha. El agua para el riego se obtiene de las presas San Ildefonso, Constitución de 1917 y La Llave, así como del bordo La Venta, y de 54 pozos profundos. Está constituido legalmente por 3 módulos de riego y el programa RIGRAT se llevó a cabo en los módulos II y III en una superficie de 5,021 ha.

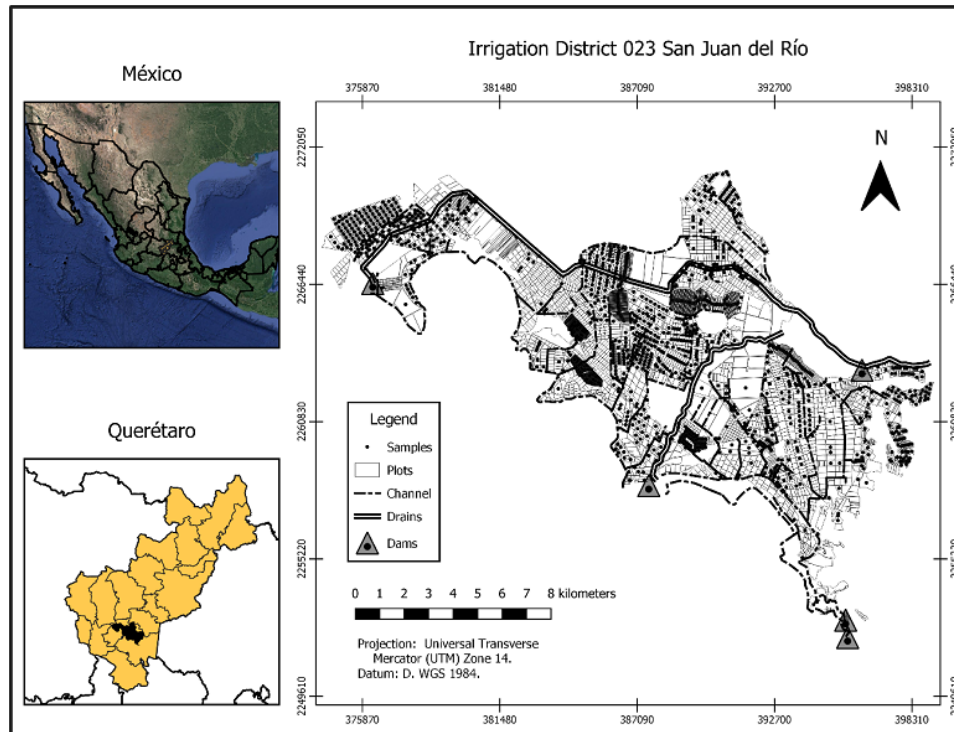


Figura 2. Distrito de Riego 023, San Juan del Río Querétaro, México.

Medición de variables

En las parcelas donde se llevó a cabo el estudio se midieron la longitud, pendiente longitudinal y transversal, textura, densidad aparente, contenidos de humedad inicial y a saturación. Las primeras tres se midieron usando equipos digitales de topografía, la textura se obtuvo en laboratorio mediante el análisis de mallas y el hidrómetro de Bouyoucos, la densidad aparente (ρ_a) se obtuvo utilizando el método del cilindro de volumen conocido, el contenido de humedad inicial mediante un sensor calibrado TDR 300, y el contenido de humedad a saturación se asimiló a la porosidad total del suelo obtenida mediante la relación $\varphi = 1 - \rho_a / \rho_s$, donde ρ_s es la densidad de las partículas de cuarzo tomada como 2.65 g/cm^3 . Los métodos de laboratorio están ampliamente documentados en Chávez y Fuentes (2018, 2019).

Las pruebas de riego

Las pruebas de riego se realizaron en las parcelas con la finalidad de observar el comportamiento del agua y los volúmenes de agua utilizados en cada evento de riego; los tendidos de riego variaron de 10 a 60 surcos, dependiendo del gasto en la entrada del canal. Los resultados de los tiempos de avance y recesión corresponden al promedio de los surcos evaluados en cada tendido de riego.

Eficiencia de Aplicación y Uso Eficiente del Agua

La eficiencia de aplicación (η_A) es definida como (Chávez y Fuentes, 2019):



$$\eta_A = \frac{V_n}{V_b} \quad (5)$$

donde V_n es el volumen de agua almacenada en la zona radicular y V_b es el volumen total de agua aplicada.

El uso eficiente del agua es la relación que existe entre la biomasa presente en un cultivo por unidad de agua utilizada por éste, aunque en estudios recientes se refieren a este término como la productividad del agua de riego (Hang *et al.*, 2018). Esta relación es un indicador que nos permite calcular el valor económico que tiene el agua de riego en la zona. Valores altos de este índice nos indicarán que estamos logrando producir una mayor cantidad de materia orgánica con un menor uso de agua. En este trabajo nos enfocamos en el componente productivo que tiene la cosecha, motivo por el cual utilizaremos el rendimiento obtenido en kg del producto por m^3 de agua utilizado:

$$UEA = \frac{\text{Producción (kg)}}{\text{Rendimiento (m}^3\text{)}} \quad (6)$$

La metodología aquí empleada ha sido aplicada con gran éxito por varios años. La evaluación del riego y caracterización de las parcelas puede consultarse en Chávez y Fuentes (2018, 2019). El diseño del riego por gravedad mediante una fórmula analítica que toma en cuenta los requerimientos de los cultivos y los parámetros del suelo se puede ver en Fuentes y Chávez (2020). Finalmente, el ahorro y evaluación de resultados en las parcelas donde se aplicó esta metodología está documentada en Chávez y Fuentes (2018, 2019) y Chávez *et al.*, (2020). Sin embargo, se da una posibilidad para calcular la conductividad hidráulica saturada a partir de funciones de pedotransferencia (Trejo-Alonso *et al.*, 2020) o redes neuronales (Trejo-Alonso *et al.*, 2021).

Resultados y Discusión

Textura del suelo

La textura del suelo es un indicador de la cantidad de agua que puede almacenar un suelo y por consecuencia, el intervalo de riego con el que deben regarse los cultivos. En la figura 3 se muestra la clasificación general de texturas encontradas en la zona de estudio. Los suelos predominantes fueron 4: Franco (21.33 %), Franco Arcillo Limoso (18.26 %), Franco Limoso (16.44 %) y Franco Arenoso (11.71 %). Esta medida nos permitió detectar los suelos en los que se gastaba más agua y explicar las razones de porqué las eficiencias de aplicación eran más bajas que otros suelos con texturas similares o diferentes.

Las pruebas de riego

Durante el estudio se realizaron 475 pruebas de riego en diferentes etapas fenológicas de los cultivos: siembra, crecimiento, floración y fructificación. Los cultivos en los cuales se realizaron fueron: maíz (*Zea mays*), sorgo (*Sorghum vulgare*) y cebada (*Hordeum vulgare*) en los ciclos primavera verano y otoño invierno (2014-2019). Los resultados muestran que en el 25% de los casos, la lámina que aplicaron por riego es de 30 cm, que representa una eficiencia de aplicación del 43%, mientras que el 50% de los agricultores

aplican una lámina promedio de 23 cm por riego (EA = 69%), y el 25% restante aplica una lámina superior a los 40 cm, que en algunos de los casos han llegado hasta 98 cm, lo que equivale a una eficiencia de aplicación del que va del 16-40%.

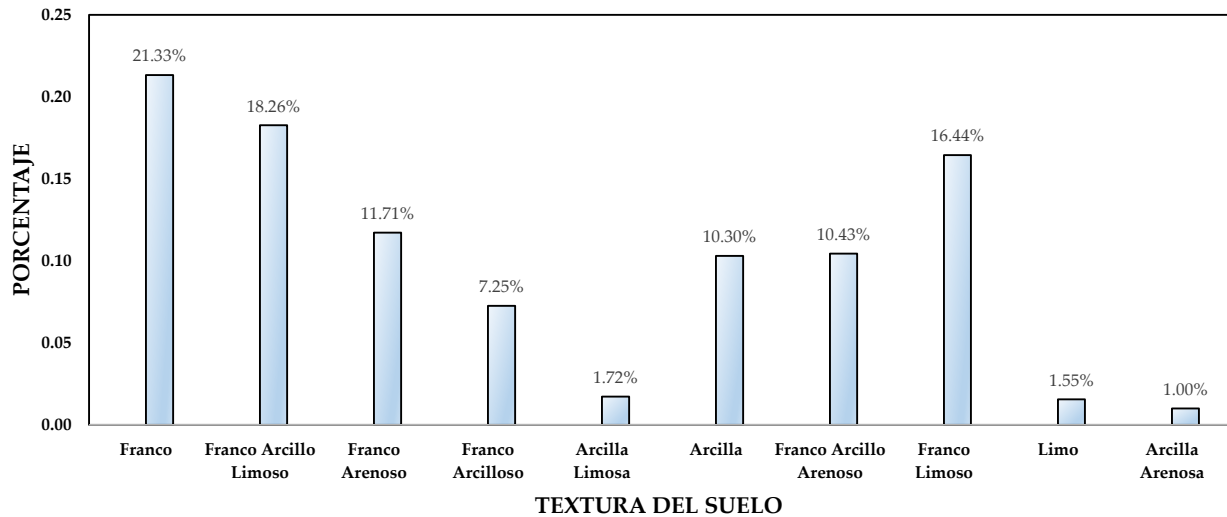


Figura 3. Clasificación de la textura de los suelos en las áreas estudiadas

Las láminas de riego aplicadas están directamente relacionadas con la cantidad de agua que llega a las parcelas, ya que el valor medio es cerca de los 58 lps, pero hay valores mínimos de 3.78 lps y hasta los máximos de 160 lps. Lo anterior trae consigo un problema muy fuerte para el regador, ya que quiere aplicar el mismo tendido de surcos independientemente del caudal que tenga en la entrada de la parcela, lo que lleva a que los tiempos de riego por hectárea sean de 2-6 días y por consecuencia, se tengan bajas eficiencias de aplicación.

Diseño del riego

Con los datos recolectados de las parcelas y los tiempos medidos de la fase de avance y recesión, se procedió a la calibración de los parámetros de la ecuación de infiltración de Green y Ampt (K_s y H_f) utilizando un algoritmo de optimización no lineal. Con la información del cultivo establecido y la etapa fenológica en la que se encontraba, la longitud de los surcos o melgas y los parámetros encontrados en las pruebas de riego, se calculó el gasto óptimo a aplicar en el siguiente tendido con la Ec. (4) (Fuentes y Chávez, 2020). El gasto de entrada en la parcela se dividió entre el resultado obtenido y se encontró el número de surcos por tendido con el que se debería de regar para ese cultivo y parcela en específico.

A manera de ejemplo se muestra que en el caso de la parcela 778 para el cultivo de maíz en etapa de crecimiento se necesitaban aplicar 12 cm, pero el agricultor aplicó una lámina de 35.46 cm en el primer tendido, lo que da una eficiencia de aplicación del 33.84%. Una vez calibrada la fase avance y recesión se calculó el gasto óptimo. Con estos datos se le dice al regador que con el gasto que tiene en la entrada de la parcela debe de abrir únicamente 44 surcos en lugar de los 52 con los que venía regando de manera tradicional. Lo anterior nos permitió tener una disminución de 120 minutos en el tiempo

de riego por tendido y por consecuencia una reducción de 22.86 cm en la lámina de riego y un incremento en la eficiencia de aplicación, al pasar de 33.84 a 95.23%.

Tabla 1. Resultados de la aplicación con diseño en el lote 778

Condición	No. surcos por tendido	Tiempo de riego (min)	Lr (cm)	Ea (%)
Sin diseño	52	225	35.46	33.84
Con diseño	44	105	12.50	95.23

Con esta metodología desarrollada para obtener el gasto óptimo en cada una de las parcelas se logró que los tiempos de riego que se requieren para aplicar los gastos que se han diseñado disminuyeran en más de la mitad (figura 4), donde para el caso por ejemplo de los suelos con textura Franco Limoso donde anteriormente el regador se tardaba en promedio 35 horas por hectárea, ahora lo hace en menos de 10 horas. En las parcelas de texturas Franco y Franco Arcillo Limoso superan las 25 horas/ha, y en algunos casos han llegado hasta 89 horas/ha. De manera general, en las parcelas donde se llevó a cabo el estudio se pudo constatar que los tiempos de riego disminuyeron considerablemente.

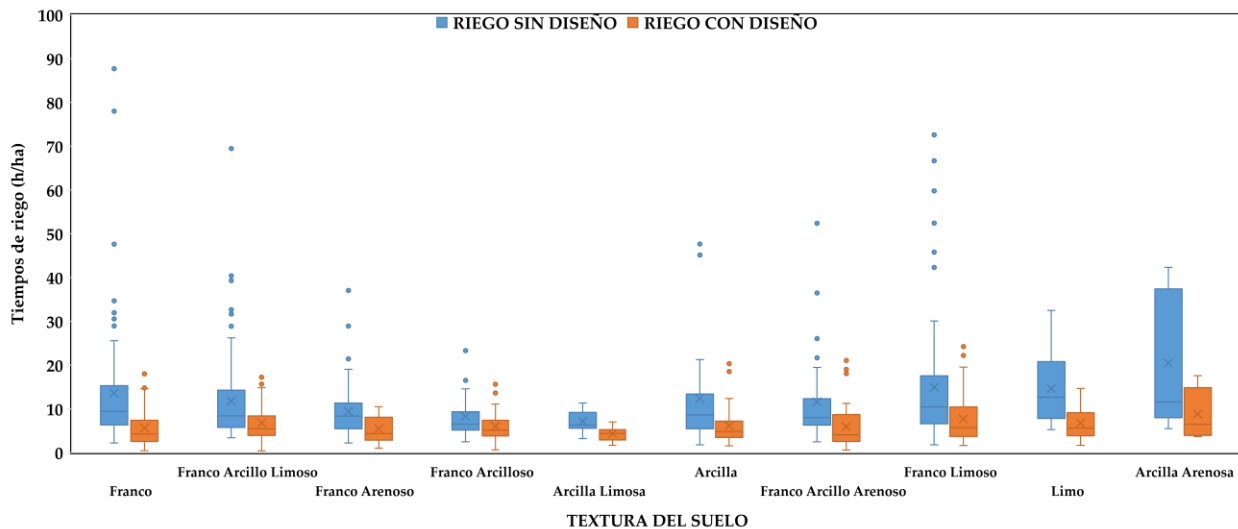


Figura 4. Tiempos de riego por clase textural

Reducción en las láminas de riego

En las parcelas en donde se realizaron las pruebas de riego y aplicaron las recetas de riego calculadas con la Ec. (4), se lograron bajar las láminas de riego en más de la mitad como se muestra en la figura 5. De manera general puede notarse que los regadores tienen una tendencia a aplicar más agua en las parcelas con textura Franca (con un promedio de 40 cm/ha/riego y una máxima de 97 cm/ha/riego), sin embargo, después de que se les muestra la receta y se les da la información del número de surcos por tendido que debe de aplicar, esta lámina se reduce a 15 cm/ha/riego en promedio, lo que trae consigo un ahorro considerable en el Distrito de Riego. Por otra parte, en las parcelas con textura Arcillo Limosa las láminas aplicadas son, en promedio, 19 cm/ha/riego.

Los surcos por tendido que se deben de abrir en función del gasto en la entrada de la parcela y el gasto óptimo son menores a los que el regador acostumbra a aplicar, esto implica mayor trabajo para él y a veces no coopera debido principalmente a que el pago que perciben está en función del número de hectáreas que puedan regar, y de acuerdo con su experiencia, mientras más lento echen el agua en las parcelas, más parcelas pueden atender.

Otro de los problemas detectados en este estudio es que en algunos terrenos las longitudes de riego son mayores a 300 metros, y en estas parcelas las láminas que se aplican por hectárea superan los 40 cm, que en la figura 5 aparecen como puntos atípicos, en donde incluso en algunas parcelas se han detectado que aplican casi 100 cm de lámina por evento de riego, por lo que se les dio la recomendación para que hagan dos o tres seccionamientos a lo largo de sus tendidos originales.

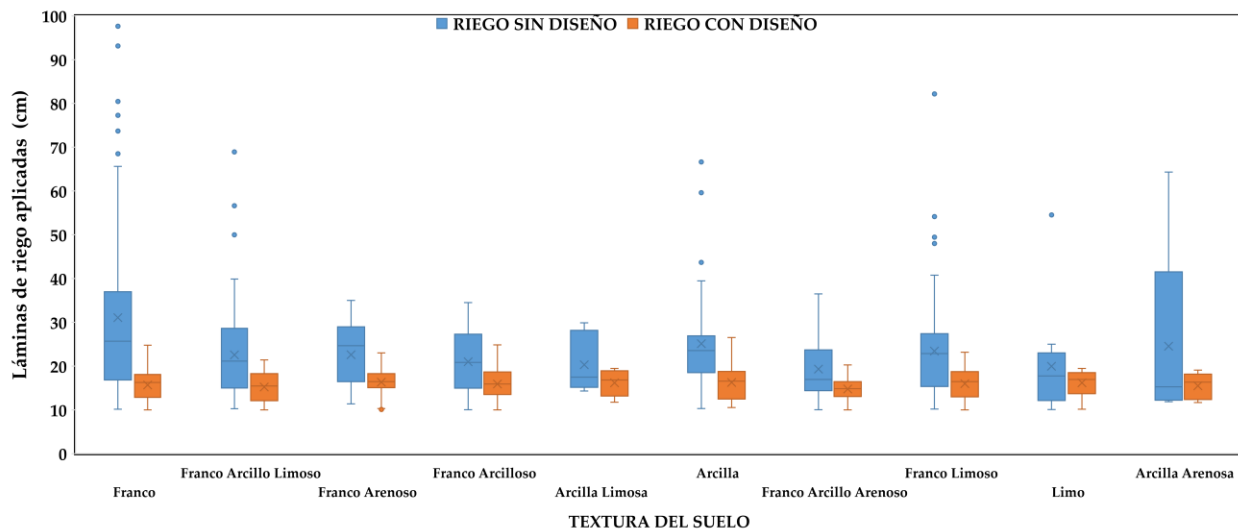


Figura 5. Láminas de riego aplicadas

El diseño eficiente que se realizó nos permitió bajar la cantidad total de agua utilizada en cada uno de los cultivos estudiados. En todos los casos se pudo observar que al aplicar un correcto diseño se redujo la cantidad de agua utilizada por ciclo agrícola. En la figura 6 se muestra el promedio de las evaluaciones realizadas en los años de aplicación de este estudio, que en general se puede observar que la reducción fue del 35% para la cebada y 48% para los cultivos de maíz y sorgo. Los ahorros que se lograron obtener para los cultivos de Maíz y Sorgo representaron el 93% de la cantidad de agua que requirió el sembrar el mismo cultivo en otra hectárea, mientras que para el caso de la cebada los ahorros obtenidos en 2 hectáreas proporcionaron el agua suficiente para sembrar 1 ha adicional.

Uso Eficiente del Agua

El UEA calculado con la ecuación (6) es mostrada en la figura 7. Este valor fue aumentando en el transcurso de los años debido principalmente a que los regadores y el personal encargado de la supervisión aceptaron el diseño del gasto óptimo proporcionado. El aceptar el diseño del riego representó un cambio generacional en la

manera de regar para los agricultores, ya que en varios casos no se tenía conocimiento de las necesidades hídricas de los cultivos. Sin embargo, en el último año de evaluación se lograron incrementos del UEA del 54.0 %, 43.8 % y 23.0% para la cebada, maíz y sorgo, respectivamente.

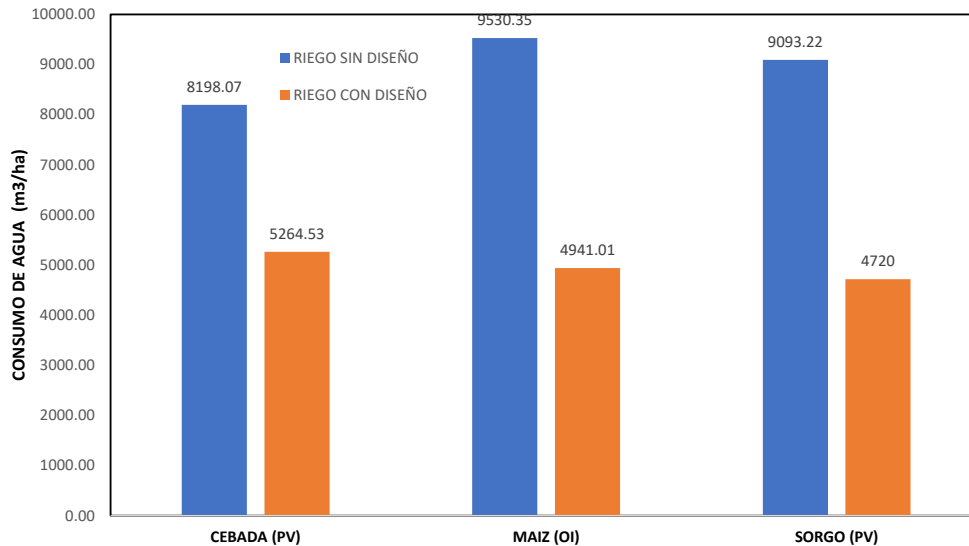


Figura 6. Láminas de riego aplicadas

El UEA en los sistemas de riego por gravedad evaluados también se vio afectado por diversos factores: medio ambientales, sociales, prácticas de manejo, pago por el servicio, renta de tierras, entre otras. En este sentido, en las parcelas con las pendientes más desfavorables y aquellas en donde tenían problemas de encharcamiento, se recomendó realizar nivelaciones de tierras (1,200 ha). Esta práctica ayudó a incrementar la eficiencia en el uso de agua en el ciclo agrícola siguiente, así como a obtener un mejor rendimiento en la cosecha.

Los ahorros de agua obtenidos con diseño eficiente nos ayudaron a tener incrementos en la productividad de los cultivos, ya que sin receta en el caso de la cebada para el último año se cosecharon 0.700 kg por cada metro cúbico de agua utilizado, y con el diseño óptimo, para el mismo metro cúbico de agua se llegaron a cosechar 1.078 kg de grano; en el caso del sorgo, este incremento representó 0.307 Kg adicionales y en el caso del maíz correspondió a 0.591 Kg.

Con el diseño eficiente del gasto óptimo logramos disminuir la cantidad de agua utilizada para producir 1 kilogramo de biomasa (figura 8). Para el caso de la cebada esta reducción fue del 47.45% al pasar de 1.96 m³/kg a 0.93 m³/kg, mientras que para el caso de los cultivos de maíz y sorgo la reducción fue del 38% y 27%, respectivamente. Estos datos son un indicador importante en áreas con recursos hídricos esenciales y permite calcular el valor económico del agua de riego que puede ser maximizado, y por lo tanto será uno de los principales requisitos en la toma de decisiones sobre las políticas de distribución y uso del agua en la producción de alimentos en los próximos años.

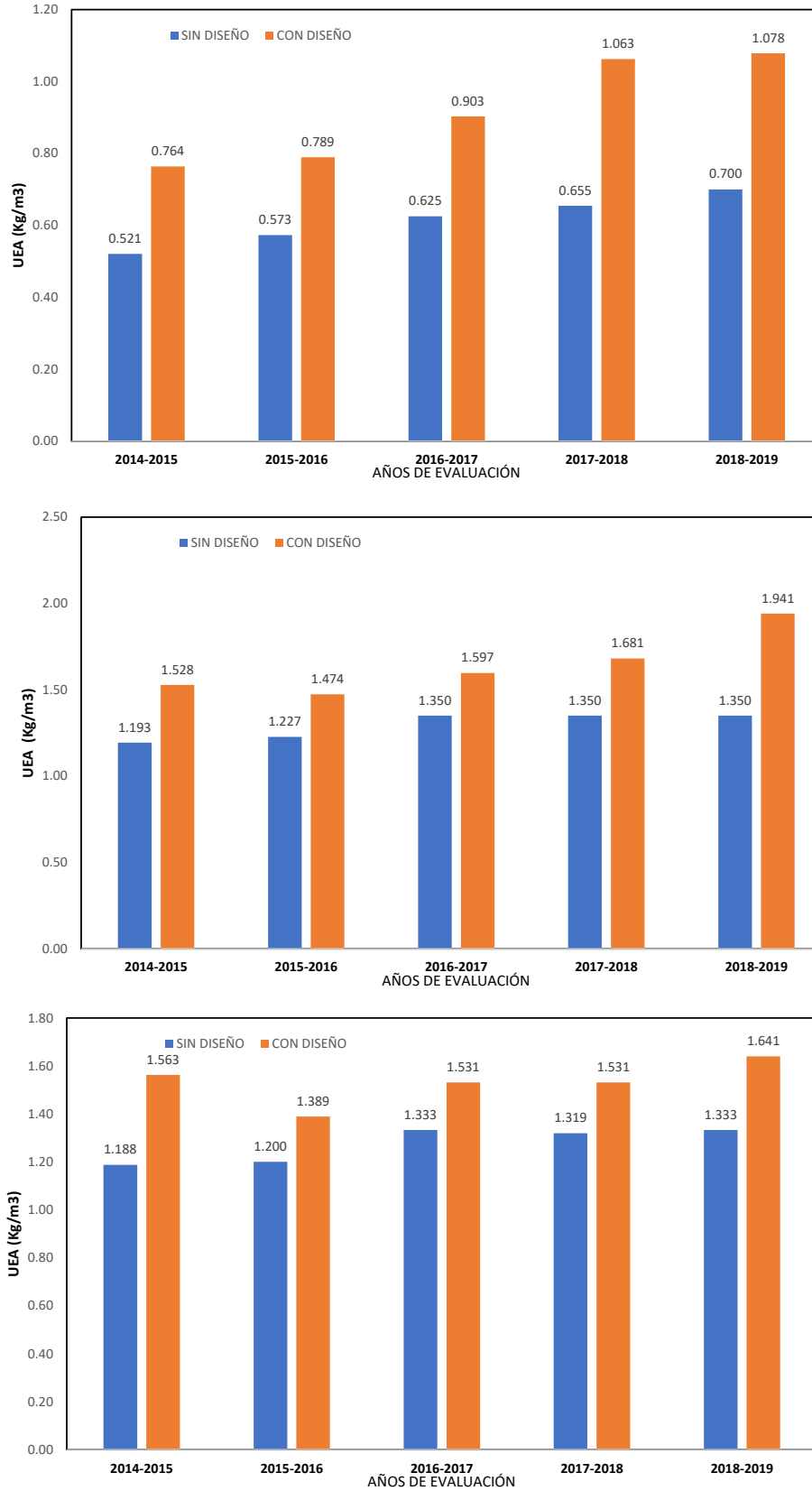


Figura 7. Uso Eficiente del agua obtenido por ciclo agrícola para la cebada, maíz y sorgo, respectivamente.

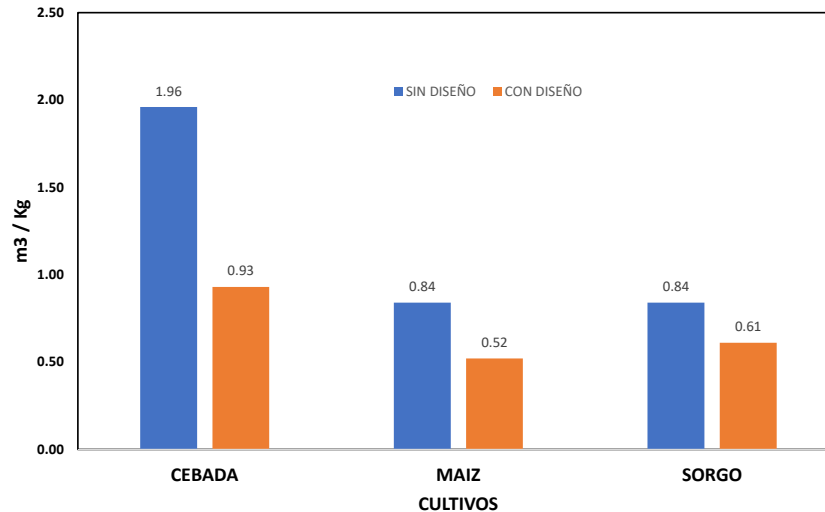


Figura 8. Cantidad de agua utilizada por kilogramo de biomasa

Conclusiones

La metodología empleada en estos años para el diseño de riego por gravedad se usó con excelentes resultados, se pudo ver que cuando se aplica correctamente en las parcelas los tiempos de riego disminuyen, así como las láminas aplicadas. Al reducir, en general, el número de surcos por tendido en un riego se avanza más rápido y por consecuencia hay un ahorro significativo en los volúmenes de agua que se han dejado de aplicar. Esta reducción disminuyó en al menos un 15% y en algunos casos, esta reducción fue del 60% (de 146 surcos originalmente a 59 con diseño). La reducción en el número de surcos por tendido trajo un ahorro significativo en las láminas de agua aplicadas por evento de riego, mismas que se vieron reflejadas en los volúmenes ahorrados por evento de riego. En las parcelas donde se realizaron las pruebas de riego se pudo observar que en promedio la eficiencia de riego es del 42%, y que una vez que se aplica la receta de riego esta eficiencia ha aumentado hasta el 90% o más

La reducción de los tiempos de riego por hectárea impactó considerablemente en las láminas de riego aplicadas a los cultivos. Los ahorros cuantificados fueron mostrados por evento de riego, pero si lo multiplicamos por 3 riegos, que son los que normalmente se otorgan a los agricultores el ahorro es mucho mayor. En general se puede ver que ahorros mínimos son del orden de 450 m³ en los suelos Franco Arcillosos, Limosos y Arcillo limosos. En las parcelas en donde más ahorro hay son aquellas en donde corresponden a las texturas Franca, Arcilla arenosa y Franco arcillo limoso con ahorros que llegaron a representar hasta 4000 m³/ha/riego. No obstante que se trabajó durante 5 años en este programa, los ahorros que se obtienen por cada ciclo siguen siendo significativos para los agricultores, ya que en la temporada de bajas precipitaciones las presas no tienen el almacenamiento suficiente para brindar agua, y es aquí donde se ha visto reflejado el impacto de este diseño: con menos agua han regado la misma área de riego y en ocasiones, como en el ciclo 2018-2019, los ahorros permitieron dar un riego adicional de 15 cm a 2,500 ha.



Finalmente, se pudo comprobar que con el diseño del gasto óptimo que debe de ir en cada surco o melga ayudó a mejorar la eficiencia en el uso del agua, y el incremento de la productividad en los tres cultivos que son regados por gravedad. No obstante que con los sistemas de riego presurizado (aspersión o goteo) se tiene un mayor UEA, este diseño brinda una oportunidad para hacer un mejor uso del recurso, incrementar la productividad y mejorar el rendimiento de los cultivos, siempre y cuando se aplique a cabalidad.

REFERENCIAS

- Chávez, C.; Fuentes, C. Design and evaluation of surface irrigation systems applying an analytical formula in the irrigation district 085, La Begoña, Mexico. *Agric. Water Manag.* 2019, 221, 279–285.
- Chávez, C.; Fuentes, C. Optimization of furrow irrigation by an analytical formula and its impact on reduction of the water applied. *Agrociencia* 2018, 52, 483–496.
- Chávez, C.; Limón-Jiménez, I.; Espinoza-Alcántara, B.; López-Hernández, J.A.; Bárcenas-Ferruzca, E.; Trejo-Alonso, J. Water-Use Efficiency and Productivity Improvements in Surface Irrigation Systems. *Agronomy* 2020, 10, 1759.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). *Estadísticas del agua en México*; CONAGUA: D.F., México, 2018; p. 306.
- Du, T.; Kang, S.; Zhang, J.; Davies, W.J. Deficit irrigation and sustainable water-resource strategies in agriculture for China's food security. *J. Exp. Bot.* 2015, 66, 2253–2269.
- Fuentes, C.; Chávez, C. Analytic Representation of the Optimal Flow for Gravity Irrigation. *Water* 2020, 12, 2710.
- Green, W.H.; Ampt, G.A. Studies in soil physics, I: The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* 1911, 4, 1–24.
- Han, X.; Wei, Z.; Zhang, B.; Han, C.; Song, J. Effects of crop planting structure adjustment on water use efficiency in the irrigation area of Hei River Basin. *Water* 2018, 10, 1305.
- Hoogeveen, J.; Faures, J.M.; Peiser, L.; Burke, J.; van de Giesen, N. GlobWat—a global water balance model to assess water usage in irrigated agriculture. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2015, 19, 3829–3844.
- Keen, B.; Slavich, P. Comparison of irrigation scheduling strategies for achieving water use efficiency in highbush blueberry. *N. Z. J. Crop. Hort. Sci.* 2012, 40, 3–20.
- Pereira, L.S.; Cordery, I.; Iacovides, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving, *Agric. Water Manag.* 2012, 108, 39–51.
- Trejo-Alonso, J.; Fuentes, C.; Chávez, C.; Quevedo, A.; Gutierrez-Lopez, A.; González-Correa, B. Saturated Hydraulic Conductivity Estimation Using Artificial Neural Networks. *Water*, 2021, 13, 705.
- Trejo-Alonso, J.; Quevedo, A.; Fuentes, C.; Chávez, C. Evaluation and Development of Pedotransfer Functions for Predicting Saturated Hydraulic Conductivity for Mexican Soils. *Agronomy* 2020, 10, 1516.
- Unver, O.; Bhaduri, A.; Hoogeveen, J. Water-use efficiency and productivity improvements towards a sustainable pathway for meeting future water demand. *Water Secur.* 2017, 1, 21–27.