

PROSPECTIVA DE SUSTENTABILIDAD PARA LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL NOROESTE DE MÉXICO: USO DEL CONCRETO RECICLADO PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA CON FINES AGRÍCOLAS

Manuel Gutiérrez-Moreno, Alejandro Sánchez-Atondo, Alejandro Mungaray-Moctezuma y Carlos Salazar-Briones

RESUMEN

El Distrito de Riego 014 “Río Colorado” (DR-014), ubicado en el noroeste de México, es uno de los más productivos a nivel nacional. Actualmente la región es abatida por una sequía que puede comprometer la seguridad alimentaria en el futuro y se requiere un manejo sustentable de recursos hídricos en la actividad agrícola de la región, la que utiliza el 92% del agua disponible en el Estado de Baja California. El sistema de abastecimiento de agua a través de canales reporta una eficiencia

de conducción entre el 50-70%. La presente investigación estima las pérdidas de agua por infiltración en la infraestructura de riego mediante el uso de infiltrómetros y modelos matemáticos de Kostiakov. Los resultados indican un volumen infiltrado anual en los canales de tierra del DR-014 de 2.187.801,77m³. Se evalúa el revestimiento utilizando concreto reciclado como una solución económica y sustentable para incrementar la eficiencia en el sector agrícola.

Introducción

Actualmente el 80% de la población enfrenta riesgos a su seguridad hídrica en forma directa o indirecta (Jiménez-Cisneros, 2015). Aunado a lo anterior, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) indica que la escasez de agua obstaculiza la sostenibilidad de los recursos naturales, así como el desarrollo económico y social (ONU, 2015). Uno de los principales usos del recurso hídrico

en el mundo es la agricultura, ya que emplea el 70% del agua disponible y utiliza el 11% de la superficie terrestre (FAO, 2011). La actividad agrícola se realiza por la modalidad de agricultura de secano o a través de infraestructura para irrigación (SEMARNAT, 2015b), esta última responsable de poco más del 40% de los cultivos del mundo (FAO, 2016). En América Latina se incrementó el porcentaje de aprovechamiento de superficie para agricultura de 28% en

1961 hasta 37,6% en 2013 (World Bank Group, 2016b), lo que evidencia el papel que tiene la infraestructura de irrigación en países en desarrollo. Ante el escenario de escasez de agua y la dependencia de la actividad agrícola en muchos países del mundo, la Organización de las Naciones Unidas promueve la reducción de pérdidas de agua como uno de los objetivos para afrontar la escasez de agua y potenciar la agricultura (FAO, 2013), entre las que destacan el

uso de sistemas eficientes para el riego parcelario y “reducir las pérdidas por infiltración mediante el revestimiento de canales o utilización de conductos cerrados” (World Bank Group, 2016c).

Las pérdidas de agua en la agricultura son principalmente de tres tipos: por evapotranspiración, problemas asociados a la operación de la infraestructura y por infiltración; esta última oscila alrededor del 12% (Pedroza González y

PALABRAS CLAVE / Concreto Reciclado / Infiltración / Sustentabilidad /

Recibido: 07/07/2020. Modificado: 12/08/2020. Aceptado: 15/08/2020.

Manuel Gutiérrez-Moreno. Doctor en Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), México. Profesor-Investigador, UABC, México. <https://orcid.org/0000-0001-8371-7354>.

Alejandro Sánchez-Atondo. Doctor en Ciencias, UABC, México. Profesor-Investigador, UABC, México. <https://orcid.org/0000-0003-1313-3200>.

Alejandro Mungaray-Moctezuma. (Autor de correspondencia). Doctor en Ingeniería de

Caminos, Universidad de Castilla-La Mancha, España. Profesor-Investigador, UABC, México. <https://orcid.org/0000-0003-0437-7238>. Dirección: Facultad de Ingeniería, UABC. Benito Juárez S/N esq. Ignacio

López Rayón, Mexicali, Baja California, México. e-mail: alejandra.mungaray@uabc.edu.mx.

Carlos Salazar-Briones. Doctor en Ciencias, UABC, México. Profesor-Investigador, UABC, México. <https://orcid.org/0000-0002-5237-5539>.

SUSTAINABILITY PROSPECTIVE FOR WATER RESOURCES IN NORTHWESTERN MEXICO: USE OF RECYCLED CONCRETE FOR AGRICULTURAL PURPOSE WATER SUPPLY

Manuel Gutiérrez-Moreno, Alejandro Sánchez-Atondo, Alejandro Mungaray-Moctezuma and Carlos Salazar-Briones

SUMMARY

The "Colorado River" irrigation district (DR-014), located in the Northwest of Mexico, is considered as one of the most productive at country. Currently, the region is experiencing a drought that it may compromise food security in the future, making necessary a sustainable management of water resources in the agricultural activity carried out in the region, which uses 92% of available water in the State of Baja California. The supply of water through channel systems reports

a conveyance efficiency between 50-70%. We estimated losses of water by infiltration in the irrigation infrastructure of DR-014 using infiltrometers and Kostiakov's mathematical models. The results indicate an annual infiltrated volume in the open earth channels of land in DR-014 of 2,187,801.77m³. A coating using recycled concrete is evaluated as an economic and sustainable solution to increase efficiency in the agricultural sector.

PERSPECTIVA DE SUSTENTABILIDADE PARA OS RECURSOS HÍDRICOS NO NOROESTE DO MÉXICO: USO DO CONCRETO RECICLADO PARA O ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM FINS AGRÍCOLAS

Manuel Gutiérrez-Moreno, Alejandro Sánchez-Atondo, Alejandro Mungaray-Moctezuma e Carlos Salazar-Briones

RESUMO

O Distrito de Irrigação 014 "Rio Colorado" (DR-014), localizado no noroeste do México, é um dos mais produtivos a nível nacional. Atualmente a região é abatida por uma seca que pode comprometer no futuro a segurança alimentar o que exige uma gestão sustentável dos recursos hídricos na atividade agrícola da região, que utiliza 92% da água disponível no Estado da Baixa Califórnia. O sistema de abastecimento de água através de canais reporta uma eficiência de condução de 50 a

70%. A presente pesquisa calcula as perdas de água, devido a infiltração na infraestrutura de irrigação, mediante a utilização de infiltrômetros e modelos matemáticos de Kostiakov. Os resultados indicam um volume anual infiltrado nos canais de terra do DR-014 de 2.187.801,77m³. É considerado o revestimento utilizando concreto reciclado como uma solução econômica e sustentável para incrementar a eficiência no sector agrícola.

Hinojosa Cuéllar, 2014). En conjunto se reportan pérdidas del 49% durante el transporte del agua hasta la parcela (Peinado-Guevara *et al.*, 2012), adicionalmente existen pérdidas durante la irrigación de la parcela por mal manejo de los agricultores y por el fenómeno de percolación, por lo que más del 50% del agua destinada al sector agrícola no es aprovechada adecuadamente (Exebio-García *et al.*, 2005).

En México, la agricultura representa poco más del 3% del Producto Interno Bruto (World Bank Group, 2016a). El país cuenta con 6.460.000ha de infraestructura de riego, colocándolo en el séptimo lugar a nivel mundial en este rubro. Estas contribuyen a una superficie cultivada de 25.808 miles de hectáreas anuales, empleando para ello 61,82×106m³ de agua durante el periodo 2004-2013, lo que representa el 76% del agua anual disponible en

forma superficial y subterránea en México (FAO, 2016). Sin embargo, debido a los tres tipos de pérdidas mencionados, el aprovechamiento medio nacional del recurso hídrico es de 70% en irrigación parcelaria, 75% en la conducción interparcelaria y 64,7% en la distribución en la red de canales (Peña Peña, 2007), este último debido a las pérdidas por infiltración principalmente.

Los episodios de sequía serán más frecuentes para la región del Centro de Norte América (IPCC, 2014b), por lo que será necesario disminuir la vulnerabilidad y exposición de la población con eficiente planeación del territorio y sus recursos hídricos. En el contexto regional, cabe destacar que de acuerdo con reportes del *US National Drought Mitigation Center*, el Estado de California ha presentado condiciones de sequía que van desde moderada a excepcional en los últimos años y se

reporta que los niveles del lago Mead han disminuido considerablemente desde 2011 (Emetec, 2014; NOAA, 2016), hechos que pueden comprometer los recursos hídricos de que se dispone actualmente en Baja California por la vía del Río Colorado para múltiples usos, incluyendo la agricultura. En las regiones semiáridas y aquellas dependientes del deshielo de los glaciares en América Central, se incrementa el riesgo de disponibilidad de agua cuanto mayor es el nivel del calentamiento global (IPCC, 2014a). En México, dos terceras partes de su territorio son áridas o semiáridas y además, se encuentra en el lugar número nueve del ranking de los países con mayor porcentaje de extracción de agua en el mundo (CONAGUA, 2014), lo cual indica la necesidad de una gestión integrada de los recursos hídricos. En este sentido, destaca el papel de la infraestructura hidroagrícola

para la administración, conducción y uso eficiente del agua en la agricultura, dado que de la superficie cosechada en el país el 91,4% se realiza por medio de infraestructura hidroagrícola de riego (SEMARNAT, 2015b), con un rendimiento en toneladas por hectárea de 2,2 a 3,3 veces mayor que la superficie que se cultiva bajo el régimen de temporal o secano (CONAGUA, 2014).

México se apoya para la actividad agrícola en Distritos de Riego (DR), los cuales son módulos de irrigación establecidos por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para la administración del recurso hídrico (CONAGUA, 2012). Los DR son operados por pequeños propietarios organizados en unidades llamados módulos de riego y cuentan con infraestructura indispensable para lograr el riego de las parcelas.

El Distrito de Riego 014 "Río Colorado" (DR-014) es

uno de los más importantes y se localiza al noroeste de México, en la frontera con Estados Unidos, entre las coordenadas geográficas 32°43'6"N; 115°40'23,34"O y 32°0'0,86"N; 114°43'44,08"O. El clima de la región de acuerdo con la clasificación Köppen es BW(h') w(x'); es muy seco, desértico y muy cálido, con régimen de lluvias en verano y temperatura media anual mayor a 18°C (INEGI, 2009). En este contexto el DR-014 desarrolla su actividad en una región semiárida gracias a un escurrimiento medio anual de 1.850.234 miles de m³ proveniente del Río Colorado (RC), producto de un acuerdo celebrado entre México y Estados Unidos en 1944 (US Department of State, 1974). El 92% del agua proveniente del RC se utiliza para fines agrícolas (SEFOA, 2015), dependiendo en gran medida de la infraestructura hidroagrícola para su conducción hasta las parcelas. El DR-014 cuenta con una superficie de 208.805ha y está organizado en 22 módulos de riego (Figura 1). En su conjunto representa el 6% del total de hectáreas de los DR del país y contribuyó al 6,22% de la producción nacional durante el año agrícola 2013-2014, el equivalente a 2.948,72×10⁶t (SEMARNAT, 2015b), siendo los principales cultivos trigo y algodón, posicionándose como segundo

productor nacional (INEGI, 2013). La infraestructura hidroagrícola instalada en el DR-014 asciende a 6.591,89km que se desglosan de la siguiente forma: 1.980km de canales revestidos; 473,35km de canales no revestidos; 2.4547km de caminos para acceso, mantenimiento y otros trabajos de conservación; y por último, drenes agrícolas con 1.683,32km de longitud (CONAGUA, 2015).

Los suelos del valle agrícola de Mexicali son de origen aluvial, arrastrados y depositados en una planicie de inundación durante las avenidas del Río Colorado, antes de la construcción de obras de almacenamiento en Estados Unidos, tales como la presa Hoover. De acuerdo con la clasificación FAO/UNESCO, los suelos del Valle de Mexicali son de tipo Regosol (Ayuntamiento de Mexicali, 1995). Los suelos de la Planicie Deltáica del Río Colorado fueron clasificados para evaluar su capacidad agrológica en seis series de suelo: Gila fase ligera, Gila fase pesada, Meloland, Imperial, Holtville y Supertition, los cuales se presentan en la Figura 1. Estos suelos fueron clasificados en tres categorías de acuerdo con su textura; ligeros, medios y pesados, que corresponden en ese orden a suelos con potencial agrológico alto, medio y bajo, respectivamente. Los suelos ligeros ocupan 105.350ha, lo

que corresponde al 34,16% de la superficie total del DR-014, se encuentran sobre la margen del RC y se formaron por la sedimentación de material transportado por su cauce; en esta categoría entran las series de suelo Gila fase ligera y Supertition, los cuales son adecuados para el cultivo trigo y el algodón. Los suelos medios ocupan 143.960ha y corresponden al 46,68% de la superficie del DR, es considerado el tipo de suelo más productivo y se localiza en la parte central del Valle de Mexicali; en esta categoría entran las series de suelo Gila fase pesada y Meloland. Los suelos pesados ocupan 59.090ha (equivalente a 19,16%), son los menos productivos y se localizan principalmente al oeste del Valle de Mexicali; la razón principal de esa condición obedece a su alto contenido de arcilla y grado de compactación; a esta categoría pertenecen los suelos de las series Imperial y Holtville.

La presente investigación tiene como objetivo determinar por medio de modelos matemáticos la infiltración en suelos del DR-014, utilizando datos de pruebas de campo y muestras de suelo analizadas en laboratorio, para cuantificar las pérdidas en canales de tierra del DR-014. Así mismo se evalúa el revestimiento de los canales de los 110,66km de longitud de la red mayor (eje central de conducción del agua) y los 362,68km de la red menor (canales laterales e interparcelarios) utilizando concreto reciclado como medida sustentable para la seguridad alimentaria en el noroeste de México.

Materiales y Métodos

Infiltración

Para la determinación de la infiltración en los suelos del Valle de Mexicali se realizaron muestreos, aforos, y otras determinaciones en campo, en los puntos señalados en la Figura 1 con la leyenda de 'muestreo e infiltración', ubicados dentro de los límites de los módulos de riego 15 y 16, porque en ellos se encuentran todos los tipos de

suelos que existen en el DR-014 bajo la clasificación agrológica mencionada. Las muestras de los suelos Gila fase ligera, Gila fase pesada, Holtville, Imperial, Supertition y Meloland pertenecen a horizontes entre 0,15 y 0,60m de profundidad en el perfil estratigráfico. Las propiedades físicas de los suelos se determinaron utilizando la normativa enlistada a continuación. Para conocer la distribución del tamaño de partículas y textura de los suelos: normas ASTM-C-117, ASTM-D-422 y ASTM-C-136; norma ASTM-D-4318 para límites de consistencia; ASTM-D-854 para gravedad específica y ASTM-D-3385 para infiltración. Las observaciones de infiltración se procesaron para determinar estadísticas descriptivas, realizar el procedimiento de mínimos cuadrados, obtener el coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de determinación, con la finalidad de estimar con nivel de confianza satisfactorio los parámetros de infiltración básica y ajustada para los suelos. Para las mediciones en campo se utilizó el infiltrómetro de doble anillo (ASTM D-3385) y utilizando estas observaciones se determinó la velocidad de infiltración ajustada mediante la Ec. 1:

$$I = kt^n \quad (1)$$

donde I: velocidad de infiltración (cm·h⁻¹), t: tiempo (min), k: parámetro que representa la velocidad de infiltración durante el intervalo inicial (t=1), y n: parámetro que indica la forma en que la velocidad de infiltración se reduce con el tiempo (-1<n<0).

Posteriormente se procedió a estimar la infiltración en canales de tierra sustituyendo la velocidad de infiltración (I) de la Ec. 1 en el factor K de la Ec. 2, así como características de la red de canales del DR-014 (CONAGUA, 2015), utilizando la fórmula

$$P + 1000 K [(b + 2,4y (1 + Z^2))] \quad (2)$$

donde P: pérdidas (m³·s⁻¹·km⁻¹), K: coeficiente de permeabili-

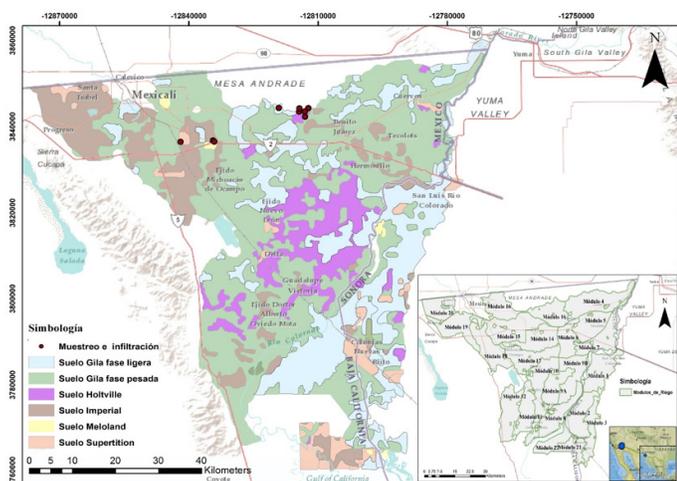


Figura 1. Series de suelo presentes en el área de estudio y módulos de riego del DR-014.

dad ($m \cdot s^{-1}$), b: ancho de la plantilla (m), y: tirante del canal (m), y Z: talud.

Aunque las ecuaciones de Moritz y Davis-Wilson también permiten estimar la infiltración en canales, se decidió no utilizarlas, debido a que se ha reportado que suelen subestimar las pérdidas por infiltración en canales de forma ampliamente variable en relación con las lecturas observadas en campo (Akkuzu, 2012; Leigh, 2014; Mohsen y Mohammed, 2016), y adicionalmente dichos modelos requieren calibración a los parámetros físicos y condiciones existentes del canal. Lo anterior representa un reto en países en desarrollo donde no se cuenta con bases de datos actualizadas de los parámetros solicitados, y donde hacer trabajos de campo periódicamente representa una inversión difícil de costear.

Concreto reciclado para revestimiento

El revestimiento de canales con concreto suele reducir en un 95% la infiltración que se presenta en canales de tierra. En este sentido, y considerando los resultados de las pruebas de infiltración, los suelos Supertition, Holtville e Imperial, que representan 19,25% de la superficie registraron altos niveles de infiltración ($>5,3 \times 10^{-4} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$). El resto de los suelos registró infiltración moderada, pero representan la mayor parte del área de análisis; para dicha problemática identificada se propone el revestimiento de los canales de tierra existentes en DR-014 utilizando agregados reciclados en la producción de concreto, para dos diferentes secciones trapezoidales en la red mayor y otra en la red menor de canales. Los escombros de concreto fueron recuperados de losas de canales del Valle de Mexicali, retiradas tras sufrir daños durante el terremoto de magnitud 7,2 en la escala de Richter en 2010. Los escombros fueron triturados a tamaños gruesos y finos para su empleo en la producción de nuevo concreto con el 100% de agregados reciclados.

La factibilidad técnica del uso de mezclas de concreto con agregados reciclados en diferentes obras civiles ha sido discutida en la literatura y la mayoría de los autores coinciden en reducciones de resistencia y alta absorción (Nixon, 1978; Etxeberria *et al.*, 2007; Pavón *et al.*, 2011; Payá, 2012; Agrela *et al.*, 2013; De Brito y Saikia, 2013; Behera *et al.*, 2014; Gutiérrez-Moreno *et al.*, 2015). En este estudio se emplea la normativa enlistada a continuación para determinar las características de los agregados reciclados: normas ASTM-C-33, ASTM-C-136 y NMX-C-111 para análisis granulométrico de agregados; ASTM-C-127 y ASTM-C-128 para gravedad específica y absorción de gruesos y finos; ASTM-C-566 para contenido de humedad; NMX-C-436 para el coeficiente de forma; ASTM-C-131 para abrasión del agregado grueso; ACI 211.1 y NMX-C-159 para elaboración y curado de mezclas de concreto; ASTM-C-143 para revenimiento del concreto fresco; ASTM-C-231 y ASTM-C-138 para contenido de aire y masa volumétrica del concreto fresco; y ASTM-C-39, ACI 214 para determinación de resistencia a la compresión del concreto.

Beneficios sustentables

Se reconoce que la infiltración es importante y representa una recarga para los mantos

acuíferos, por lo que a este respecto se comenta que se espera siga sucediendo infiltración en las superficies sujetas a irrigación parcelaria. Sin embargo, la presente investigación busca reducir las pérdidas de agua durante su conducción hacia la parcela, de tal forma que cada agricultor cuente con el agua necesaria para su uso y el remanente no infiltrado en el trayecto se considere una ganancia del vital líquido disponible para otros usos. Por otro lado, la evaluación ambiental en este estudio se refiere exclusivamente a la cuantificación del escombros necesario para la producción de agregado y elaboración del concreto reciclado, para lo cual se emplean las características de los materiales determinadas en laboratorio, particularmente la densidad de agregados provenientes de los escombros. Adicionalmente se identificaron lugares fuertemente impactados por la presencia de estos materiales, para su retiro y aprovechamiento como materia prima. La cuantificación de escombros requerido se realizó con base en las cantidades del catálogo de conceptos para las dos secciones tipo de las losas de canales propuestas. La evaluación económica del revestimiento de los canales de tierra en el DR-014 fue a costo directo, para determinar la diferencia del precio construyendo los canales utilizando concreto tradicional y concreto reciclado, destacando que el ahorro al utilizar

concreto reciclado se traduce en una aportación menor por parte del agricultor para la construcción de dicha obra, y adicionalmente permite la posibilidad de la construcción de otras obras hidráulicas o sistemas de riego, así mismo el volumen que deja de infiltrarse representa un ahorro, con importantes aplicaciones.

Resultados y discusión

Infiltración

Las características determinadas en laboratorio a muestras de suelo inalteradas se presentan en la Tabla I. En resumen, el contenido de humedad en promedio fue del 13,92%; el límite líquido promedio 26,37%; límite plástico promedio 14,85%; e índice plástico promedio 11,39%. Con respecto al tamaño de las partículas, entre 64 y 95% eran limos o arcillas de baja compresibilidad de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); la textura predominante fue Franco Arcillosa-Limosa de acuerdo con la clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Los valores para gravedad específica promedio fueron 1,79 y 2,04, seca y húmeda respectivamente. Las propiedades de los suelos identificadas tras el análisis son importantes debido a que la relación entre ellas facilita o

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS AGRÍCOLAS DEL DR-014

Suelo	ω (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Partículas <0,075mm (%)	Clasificación del suelo (SUCS)	Textura (USDA)
Gila fase ligera	11,9	17	14	3	64,6	ML: Limo de baja compresibilidad	Franco Arcillo-Limoso
Holtville	12	22	12,4	9,6	64,98	CL: Arcilla de baja compresibilidad	Franco Arcillo-Limoso
Gila fase pesada	13	29	17,1	11,9	74,08	CL: Arcilla de baja compresibilidad	Franco Arcillo-Limoso
Meloland	9,3	19,3	14,3	5	89,35	ML: Limo de baja compresibilidad	Franco Limoso
Imperial	17,5	35	15	20	93,28	CL: Arcilla de baja compresibilidad	Arcilla-Limosa
Supertition	19,8	35,9	16,3	18,8	95,06	Pt: Turba, suelo altamente orgánico	Limoso-Fibroso

ω : contenido de humedad, LL: límite líquido, LP: límite plástico, IP: índice plástico.

dificulta el paso del agua por los vacíos en el suelo; un contenido de humedad >20% representa infiltraciones altas, y <20% tenderán a conductividad hidráulica más baja. Existe poca diferencia entre las series de suelo analizadas, ya que todas presentaron valores de infiltración en el orden de 10^{-4} , lo que según Guevara Pérez y Márquez Romance (2012) se explica debido a la similitud en la plasticidad del suelo.

Los resultados obtenidos son similares a los referidos por otros autores (Robles Van-Dyck, 1980; Ayuntamiento de Mexicali, 1995); sin embargo, se encontró un cambio en la clase textural para los suelos Meloland y Supertition asociado a uso intensivo agrícola y fenómenos de erosión. Asimismo, al realizar las pruebas de infiltración, se identificó a la serie Holtville como la segunda más filtrante (Figura 2), con textura pesada compuesta principalmente de arcilla en el primer metro de espesor y que posteriormente presenta arena gruesa, lo que le permite a Holtville buen drenaje posibilitando cultivar trigo, alfalfa y algodón. Lo anterior indica que no solo el tipo de material define la productividad y permeabilidad del suelo, sino que influyen de igual forma el acomodo de los estratos, el grado de compactación, la textura, la densidad y la porosidad del suelo, entre otros factores. Existen métodos directos e indirectos para estimar la infiltración en suelos y en el presente trabajo se utiliza modelos matemáticos propuestos por Kostiakov (1932) que son de tipo empírico y se basan en mediciones de campo como las llevadas a cabo con el infiltrómetro de doble anillo (Philips y Kitch, 2011; Fulazzaky *et al.*, 2014). También se aplican a los datos que son producto de experimentación en laboratorio y pruebas de permeabilidad (ASTM-D-5084). Los modelos matemáticos de Kostiakov y sus modificaciones son ampliamente utilizados en México y Latinoamérica con resultados satisfactorios (Manzano y Nívar, 2000; Nívar y Synnott,

2000; Ruiz-Estevez *et al.*, 2004; Rodríguez-Vásquez *et al.*, 2008; Guevara, 2009; Loredó Varela *et al.*, 2010; Orjuela-Matta *et al.*, 2010; Guevara Pérez y Márquez Romance, 2012).

La estimación de este parámetro a partir de los datos del infiltrómetro de doble anillo y las ecuaciones de Kostiakov fue hecha inicialmente con observaciones de campo y posteriormente mediante técnicas de regresión lineal y mínimos cuadrados; se linealizaron los parámetros k y n de la Ec. 1, de tal forma que fueran prácticamente constantes y la velocidad de infiltración estuviera en función del tiempo. El mismo procedimiento se realizó para cada tipo de suelo a fin de graficar el comportamiento de la infiltración ajustada, analizando el punto cuando la infiltración se vuelve prácticamente constante, conocido como la infiltración básica de ese suelo, que es la capacidad que tiene para transmitir el agua a tasa constante una vez que se encuentra saturado. Ese valor estimado se presenta en la Figura 2 por tipo de suelo y se utiliza para determinar las pérdidas en canales no revestidos. La serie de suelo Supertition es la que presentó mayor infiltración. Cabe señalar que se trata de un suelo de textura ligera y capacidad agrológica alta, por lo cual no es de sorprenderse este comportamiento; sin embargo, se ve potenciado por las características del suelo: alto contenido de limo, alta plasticidad y contenido materia orgánica. El área que cubre este suelo en el DR-014 es de apenas 0,14% por lo que siendo el

suelo más permeable, el impacto sobre la eficiencia del sistema de conducción e irrigación es bajo. Con respecto a las series de suelo Gila son las de mayor presencia en el DR-014 con 88% del total de hectáreas, las que han sufrido importantes cambios producto de alta actividad agrícola reciente, fenómenos de erosión y transporte de sedimentos, por lo que han cambiado parte de la composición en su horizonte de suelo desde lo reportado en el año 1976 (Ayuntamiento de Mexicali, 1995). Actualmente ha incrementado la cantidad de arcilla en su estructura, lo cual también fue reportado por Hernández-Saucedo *et al.* (2015) y se ve reflejado en una capacidad de filtración moderada. Finalmente, destaca el suelo Meloland de textura media, que registró el valor más bajo de infiltración, lo que lo convierte en el suelo menos permeable, aunque solo representa el 0,33% del área total del DR-014. El coeficiente de determinación (R^2) para el conjunto de datos del suelo Supertition es 0,61; para Holtville 0,98; Imperial 0,61; Gila fase ligera 0,76; Gila fase pesada 0,83; y para el suelo Meloland 0,86. En el caso de valores de $R^2 > 0,70$ el tiempo explica en gran medida el comportamiento de la velocidad de infiltración con predicciones confiables, mientras en el caso de valores $< 0,70$ aunque existe relación con el tiempo hay otros parámetros de las características de los materiales que influyen en los tiempos de saturación, asociados a alto contenido de humedad inicial, contenido de arcilla, y cantidad de

vacíos, que incrementan por la presencia de microorganismos, sales y nutrientes en el suelo.

A partir de la infiltración básica presentada en la Figura 2 y la distribución por ocupación de suelos (Supertition 0,14%, Holtville 4,31%, Imperial 14,8%, Gila fase ligera 34,02%, Gila fase pesada 46,35% y Meloland 0,33%) se estimaron las pérdidas por infiltración en canales de tierra de la red mayor y menor del DR-014 (Tabla II).

Concreto reciclado para revestimiento

Debido al importante volumen de agua que se filtra por canales de tierra, se evaluó su revestimiento incorporando agregados reciclados a la mezcla de concreto hidráulico. Las características de dichos agregados reciclados incluyen agregados finos y gruesos que se ajustan ligeramente a los límites granulométricos solicitados por la normativa mexicana NMX-C-111 y ASTM-C-33, así como valores de masa volumétrica en grava reciclada de $1453,97\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y $1342,58\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para la arena reciclada, los cuales se encuentran dentro del rango de los agregados de peso normal y no ligeros, como llega a suceder al trabajar con agregados reciclados. Las densidades relativas encontradas son ligeramente más bajas que agregados de peso normal registrando valores para la grava y arena reciclada de 2,7 y 2,04 respectivamente. Se encontraron porcentajes moderados de absorción, con 7,8% para grava reciclada y 8,81% para arena reciclada, el contenido de

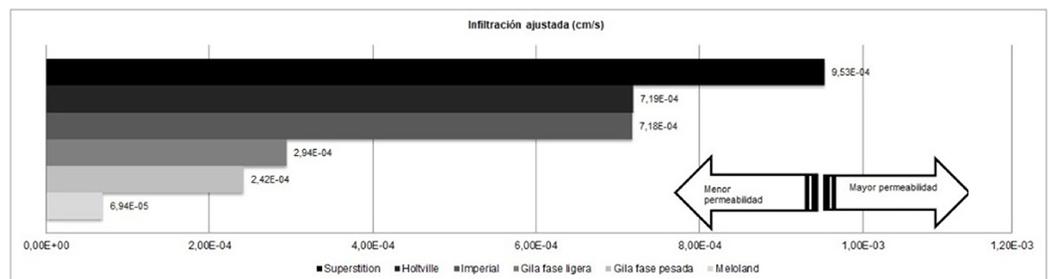


Figura 2. Series de suelo presentes en el área de estudio y módulos de riego del DR-014.

TABLA II
PÉRDIDAS DE AGUA POR INFILTRACIÓN EN SUELOS AGRÍCOLAS DEL DR-014

Suelo	Perdidas (m ³ ·km ⁻¹)	Perdidas (m ³ /año -% 110,66km)	Perdidas (m ³ ·km ⁻¹)	Perdidas (m ³ /año -% 362,68km)
Supertition	4,97E-01	6645,917695	1,25E-01	1673,215017
Holtville	3,75E-01	154365,373	9,43E-02	38863,92701
Imperial	3,74E-01	529059,2854	9,41E-02	133199,0527
Gila fase ligera	1,53E-01	498174,0867	3,86E-02	125423,2149
Gila fase pesada	1,26E-01	558387,257	3,17E-02	140582,834
Meloland	3,61E-02	1140,46849	9,10E-03	287,1310016
Pérdidas anuales (m ³)		1747772,4		440029,4

humedad fue de 0,49% para grava reciclada y 1,57% para arena reciclada y el agregado grueso se caracterizó por presentar caras fracturadas y coeficiente de forma igual a 0,25, lo que es consistente con materiales producto de trituración. Adicionalmente se identificó que el agregado sufre degradación por contacto y fricción, lo que propicia cambios en la distribución de tamaños, cambios volumétricos en la mezcla de concreto y consumos de agua adicionales por tal acción; el agregado grueso registró 46,15% de degradación al ser sometido a ensayo en la máquina de Los Ángeles; sin embargo el límite normativo para concreto es 50% de acuerdo con NMX-C-111 y ASTM-C-33, y siempre que el concreto cuente con adecuada consolidación y un acabado pulido no existe problema para desprendimientos o abrasión por el flujo de corrientes de agua.

Con los resultados de las pruebas de laboratorio se realizó un diseño de mezclas por el método de volumen absoluto del ACI 211.1. El concreto reciclado de $f'c = 220 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$, utilizó una relación agua-cemento de 0,7 y 2% de aire incluido por el tipo de obra a la que estaba destinado, en las siguientes cantidades y porcentajes del total de la mezcla de concreto: 1.041,21kg·m³ de grava reciclada (participación de 47% del total), 627,85kg·m³ de arena reciclada (28% del total), 224 litros de agua por metro cúbico (10%), 320kg·m³ de cemento Portland Compuesto clase resistente 30 (15%). No se consideró necesaria la

incorporación de aditivos para mejorar las propiedades del concreto reciclado. Se elaboraron 12 especímenes de concreto, para realizar un ensayo de control a los siete días y cuatro ensayos a los 28 días de edad y adicionalmente se evaluaron especímenes a los 60 días, sin presentar variaciones significativas. Con respecto a pruebas al concreto fresco y endurecido, destaca que la mezcla sufrió un fraguado rápido inicial asociado a condiciones ambientales y la absorción del material reciclado; la prueba de revenimiento registró 75mm, la masa volumétrica del concreto reciclado fresco fue de 2296kg·m⁻³, la resistencia a la compresión de los cilindros a siete días fue 133,0kg·cm⁻², mientras que a los 28 días fue 194,7kg·cm⁻², lo que representa una desviación estándar de 5,06 en promedio y un coeficiente de variación de 2,58%, que de acuerdo con lo establecido en ACI 214 refiere variaciones aceptables en los estándares de control del concreto. Cabe señalar que ninguno de los ensayos alcanzó la resistencia de diseño de 220kg·cm⁻², por lo que se reporta una disminución en la resistencia de concreto del orden de 11,52% cuando este ha sido elaborado en su totalidad con agregados reciclados y un consumo de cemento de 320kg·m⁻³, respecto al concreto de referencia con agregados naturales.

Beneficios sustentables

El revestimiento de canales con concreto reciclado permite beneficios en las tres

dimensiones del desarrollo sustentable; ambiental, económica y social. Con respecto a la dimensión ambiental, se estimó que se requieren un total de 497.678,17t de escombros (310.443,10t para la producción de grava y 187.235,06t para la producción de arena) para ser usados como agregados reciclados para concreto (RCA) en la producción de los 298.216m³ de concreto hidráulico requeridos para el revestimiento de 110,66km de la red mayor y 362,68km de la red menor de canales de tierra en el DR-014. La cantidad de escombros que pueden ser retirados de tiraderos, rellenos sanitarios y otros sitios permite acceder a beneficios ambientales asociados a la gestión adecuada de residuos sólidos especiales, usos de suelo, disminución de emisiones por explotación de la cantera para conseguir materia prima, entre otros.

En la dimensión económica, considerando precios unitarios en dólares estadounidenses, el costo de producción de 1m³ de grava reciclada es US\$ ~4,88 mientras que el de 1m³ de arena reciclada ronda los US\$ 5,55. Respecto a los precios unitarios de 1m³ de concreto, se tiene como referencia comercial US\$ 89,25 para el tradicional y US\$ 72,84 para el reciclado. Las secciones trapezoidales de los canales de la red mayor requieren un total de 161.121m³ de concreto, mientras que las requeridas para la red menor requieren 137.095m³ de concreto en toda su longitud. El costo directo aproximado de materiales para el revestimiento con concreto

reciclado, en la red mayor de canales (110,66km) equivale a US\$ 106.055 por km, mientras que para la red menor de canales (362,68km) equivale a US\$ 27.534 por km. Esto representa un ahorro del 18,4% respecto al costo de hacer el revestimiento con concreto tradicional. Lo anterior permite al agricultor o a quienes financian este tipo de proyectos tener una referencia paramétrica sobre costo del revestimiento con concreto reciclado. Cabe señalar que los ahorros económicos al utilizar concreto reciclado pueden variar de acuerdo con la proporción de RCA utilizado, las aplicaciones del concreto y los costos asociados a su transporte y procesamiento.

En la dimensión social, destaca el volumen recuperado por acción del revestimiento sustentable propuesto. Las pérdidas por infiltración determinadas en la red de canales de tierra del DR-014 son de 2.187.801m³ anuales, lo cual se vuelve relevante ante la situación de sequía que abate la región sur de California, Arizona y el noroeste de México (Emetec, 2014; NOAA, 2016). Dicho volumen se puede utilizar para ampliar la extensión territorial de hectáreas productivas en el DR-014 (Gutiérrez-Moreno *et al.*, 2015), puede concentrarse en obras de almacenamiento a menor escala por los agricultores locales, puede ser utilizado con fines de restauración ecológica del Delta del Río Colorado como lo representó el Flujo Pulso en el año 2014, o puede emplearse en el suministro de servicios urbanos a la población de Mexicali. La huella hídrica de una persona en México es de 1.441m³ de agua por año (CONAGUA, 2014) la cual es suficiente para todas las actividades personales y productivas de bienes y servicios, es decir que con el volumen infiltrado se pueden cubrir la necesidad de 1.518 personas por todo un año en México o países con huella hídrica similar. Por otro lado, la Organización Mundial de la Salud en el marco de la escasez de agua mundial recomienda 20 litros/día por

habitante para la satisfacción de sus necesidades básicas de higiene y alimentos (SEMARNAT, 2015a), por lo que usar el volumen infiltrado para este propósito puede atender por todo un año, en cualquier parte del mundo, a 299.698 personas, lo que representa el 32% de la población de Mexicali (INEGI, 2016)

Conclusiones

El Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO en su fase VIII es una herramienta que promueve la cooperación internacional para el desarrollo de soluciones flexibles y adaptables a diversos contextos (Jiménez-Cisneros, 2015), incluyendo regiones semiáridas, y organizaciones como *Global Network on Water and Development Information in Arid Lands* ofrecen información valiosa para el manejo y optimización del agua (UNESCO-PHI, 2011). De hecho, las zonas semiáridas suelen poseer suelos con elevados contenidos de nutrientes como P, K y S; resolviendo los problemas de suministro de agua, les permitiría alcanzar un gran potencial agrícola e importante productividad (Anton y Diaz Delgado, 2000).

Esta investigación aporta información sobre las propiedades hidráulicas de los suelos, las cuales indican una capacidad de infiltración que oscila entre $9,53 \times 10^{-4}$ y $6,93 \times 10^{-5} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$, que en conjunto generan pérdidas estimadas en los canales de tierra del DR-014 del orden de $2.187.801 \text{m}^3$ anuales, volumen que reduce la eficiencia del sistema hidroagrícola. La propuesta de revestimiento con concreto reciclado representa una opción que permite la recuperación de 497.678t de escombros para su uso como agregados de concreto reciclado, atendiendo la problemática de infiltración identificada. El concreto sustentable tuvo un desempeño adecuado y la disminución del 11,52% en resistencia no afecta a la aplicación no estructural que tendrá. Finalmente, es una

propuesta económica 18% más baja respecto a requerida si la obra usara concreto sin material reciclado. El revestimiento de canales con concreto reciclado representa una solución que puede contribuir al aprovechamiento del agua en una región semiárida como la del caso de estudio. La infiltración estimada en este estudio también puede ser utilizada para cuantificar las pérdidas por filtración dentro de la zona parcelaria donde están presentes las mismas series de suelos y donde se utilizan grandes volúmenes de agua para diferentes cultivos en las más de 208.805ha activas del DR-014, lo que se abordará en futuros estudios, así como el impacto del cambio climático en la productividad agrícola en regiones semiáridas como en la que se ubica el DR-014.

REFERENCIAS

Agrela F, Alaejos P, De Juan M (2013) Properties of concrete with recycled aggregates. En *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*. Woodhead. Sawston, RU. pp. 304-329. <http://dx.doi.org/10.1533/9780857096906.2.304>.

Akkuzu E (2012) Usefulness of empirical equations in assessing canal losses through seepage in concrete-lined canal. *J. Irrig. Drain Eng.* 138(May): 455-460.

Anton D, Diaz Delgado C (2000) *La Agricultura de Riego. Sequía en un Mundo de Agua*. Pririguazúv / CIRA-UAEM. Costa Rica: s.n., pp. 420 pp.

Ayuntamiento de Mexicali (1995) *Plan de Ordenamiento Ecológico del Municipio de Mexicali*. <http://www.mexicali.gob.mx/transparencia/administracion/ordenamientoecologico/plandordenamientoecologico.pdf>.

Behera M, Bhattacharyya S, Minocha A, Deoliya R, Maiti S (2014) Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Constr. Build. Mats.* 68: 501-516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>.

CONAGUA (2012) *Distritos de Riego. Información General*. <http://www.conagua.gob.mx/atlas/usuariosdelagua32.html>.

CONAGUA (2014) *Estadísticas del Agua en México*. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf>.

CONAGUA (2015) *Anexo 1; Características generales del Distrito de Riego: 014 Río Colorado. 2015*. Mexicali, México.

De Brito J, Saikia N (2012) *Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste*. Springer. Londres, RU. pp. 229-237. <https://www.springer.com/gp/book/9781447145394>.

EMETEC (2014) *Baja California y el Agua para Uso Urbano*. (Cons. 27/04/2016). <http://www.emetec-infraestructura.com/Site/agua.html>.

Ettxeberria M, Mari A, Vázquez E (2007) Recycled aggregate concrete as structural material. *Mats. Struct.* 40: 529-541. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9161-5>.

Exebio-García A, Palacios-Vélez E, Mejía-Saen E, Ruiz-Carmona V (2005) Methodology to estimate losses by infiltration in soil channels. *Terra Latinoamer.* 23: 213-223.

FAO (2011) El Estado de los Recursos de Tierras y Aguas del Mundo para la Alimentación y la Agricultura. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. 23-49. <http://www.fao.org/3/a-i1688s.pdf>.

FAO (2013) *Afrontar la Escasez de Agua un Marco de Acción para la Agricultura y la Seguridad Alimentaria*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. pp. 33-45. <http://www.fao.org/3/a-i3015s.pdf>.

FAO (2016). *AQUASTAT. Sistema de Información sobre el Uso del Agua en la Agricultura de la FAO*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. <http://www.fao.org/aquastat/es/databases/>.

Fulazzaky M, Yusop Z, Ibrahim I, Kassim A (2014) A new technique using the aero-infiltrometer to characterise the natural soils based on the measurements of infiltration rate and soil moisture content. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 11: 2515-2553. <https://doi.org/10.5194/hessd-11-2515-2014>.

Guevara E (2009) Parametrización de modelos de infiltración basada en pruebas de campo en suelos agrícolas de la cuenca del río Chirgua, Venezuela. En *Jornadas de Ingeniería del*

Agua. Madrid, España. ISBN 978-90-78046-09-7.

Guevara Pérez E, Márquez Romance A (2012) Modelación de la infiltración en un campo agrícola de la cuenca del río Chirgua, estado Carabobo, Venezuela. *Rev. Cient. UDO Agríc.* 12: 365-388.

Gutiérrez-Moreno M, Hallack-Alegría M, Mungaray-Moctezuma A, Ruiz-Gibert J, Ramírez-Hernández J (2015) Estimación de infiltración en canales parcelarios del distrito de riego del Valle de Mexicali. En *XVIII Congr. Int. Ciencias Agrícolas*. Universidad Autónoma de Baja California, Mexico. pp. 436-440.

Gutiérrez-Moreno M, Mungaray-Moctezuma A, Hallack-Alegría M (2015). Reuse of hydraulic concrete waste as a new material in construction procedures: A sustainable alternative in Northwest Mexico. *Rev. Construc.* 14: 51-57. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2015000200007>.

Hernández-Saucedo F, Rendón Pimentel L, García Herrera F, Pérez S (2015) Herramientas para la asistencia técnica en riego por gravedad. En *I Congreso Nacional COMEII 2015 Reunión Anual de Riego y Drenaje*. Morelos, México.

INEGI (2009) *Prontuario de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Mexicali, México. <http://www.inegi.org.mx/>.

INEGI (2013) *La Agricultura en Baja California: Censo Agropecuario 2007*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.

INEGI (2016) *México en Cifras: Información Nacional, por Entidad Federativa y Municipios*. Indicadores principales del Banco de Información. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=02> (Cons. 01/06/2016).

IPCC (2014a) Cambio Climático 2014. Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar5_wgII_spm_es-1.pdf.

IPCC (2014b) *Climate Change 2014 Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2014/09/SYR_Full_Report.pdf.

- ipcc.ch/report/ar5/syr/index_es.shtml.
- Jiménez-Cisneros B (2015) Seguridad hídrica: Retos y respuestas, la fase VIII del programa hidrológico internacional de la UNESCO (2014-2021). *Aqua-LAC* 7: 20-27. <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002345/234519m.pdf>.
- Kostiakov A (1932) On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Soc. Soil Sci.* 14: 17-21.
- Leigh E (2014) *Evaluation of Methods for Predicting Seepage Loss Rates for the Hard Lined Irrigation Canals of the Lower Rio Grande Valley of Texas*. Tesis. Texas A&M University. EEUU. 103 pp. <http://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/152484>.
- Loredó Varela R, Sánchez Cohen I, Herrera G, Arreola Ávila J (2010) Uso de un modelo de simulación hidráulico para evaluación y generación de recetas de riego en sistemas de riego superficial en el norte de México. *Ver. Chapingo Ser. Zonas Áridas* 9: 43-50.
- Manzano M, Návar J (2000) Processes of desertification by goats overgrazing in the Tamaulipan thornscrub (matorral) in north-eastern Mexico. *J. Arid Environ.* 44: 1-17.
- Mohsen M, Mohammed O (2016) Compared between the measured seepage losses and estimation and evaluated the conveyance efficiency for part of the Hilla Main Canal and three distributary canals of Hilla-Kifil Irrigation Project. *Civil Environ. Res.* 8(2): 1-10.
- Návar J, Synnott T (2000) Soil infiltration and land use in Linares, N.L., México. *Terra* 18: 255-262.
- Nixon P (1978) Recycled concrete as an aggregate for concrete- a review. *Matér. Constr.* 11: 371-378. <http://doi.org/10.1007/BF02473878>.
- NOAA (2016) *Monitor de Sequía en Estados Unidos*. <http://drought-monitor.unl.edu/Home/RegionalDroughtMonitor.aspx?west>.
- ONU (2015) *Objetivos de Desarrollo del Milenio. Informe de 2015*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Nueva York, EEUU. 72 pp.
- Orjuela-Matta H, Rubiano Sanabria Y, Camacho-Tamayo J (2010) Comportamiento de la infiltración en un oxisol. *Actual. Divulg. Cient.* 13(2): 31-39. <http://doi.org/10.4067/S0718-58392012000300015>.
- Pavón E, Etxeberria M, Martínez I (2011) Propiedades del hormigón de árido reciclado fabricado con adiciones, activa e inerte. *Rev. Constr.* 10(3): 4-15. <http://doi.org/10.4067/S0718-915X2011000300002>.
- Payá J (2012) La «transmutación» sostenible de los residuos para nuevas materias primas en el ámbito del concreto. *Dyna* 79(175): 38-47. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=z49624956007>.
- Pedroza González E, Hinojosa Cuéllar G (2014) *Manejo y Distribución del Agua en Distritos de Riego: Breve Introducción Didáctica*. 2ª ed. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México. pp. 21-26.
- Peinado-Guevara V, Camacho-Castro C, Bernal-Domínguez D, Delgado-Rodríguez O (2012) Conservation program works as an alternative irrigation districts in sustainable water management of agricultural use. *Ra Ximhai* 8: 367-379. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46125172007>.
- Peña Peña E (2007) *La Eficiencia en el Uso del Agua en los Distritos de Riego*. Gaceta del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México. pp. 1-9.
- Philips E, Kitch W (2011) A review of methods for characterization of site infiltration with design recommendations. *43rd Symp Engineering Geology and Geotechnical Engineering* pp. 23-25. http://www.cpp.edu/~wakitch/arts/Philips_&_Kitch_2011.pdf.
- Robles Van-Dyck C (1980) *El Riego en el Cultivo de Trigo, su Influencia y Manifestación en el Rendimiento*. Tesis. Universidad de Guadalajara. México. pp. 22-30.
- Rodríguez-Vásquez A, Aristizábal-Castillo A, Camacho-Tamayo J (2008) Variabilidad espacial de los modelos de infiltración de Philip y Kostiakov en un suelo Ándico. *Eng. Agríc.* 28: 64-75. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162008000100007>.
- Ruiz-Estevéz F (2004) *Infiltración de Agua en el Suelo con Diferentes Usos en el Departamento 9 de Julio (Chaco)*. Universidad Nacional del Nordeste. Argentina. XXX pp.
- SEFOA (2015) *Agua en Baja California*. Secretaría de Fomento Agropecuario. Tlaxcala. México. <http://www.sefoa.gob.mx/agua.html>.
- SEMARNAT (2015a) *Día Mundial del Agua 2015, 22 de Marzo Guía de Promoción*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 8 pp.
- SEMARNAT (2015b) *Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- UNESCO-PHI (2011) *Global Network on Water and Development Information for Arid Lands*. <http://gwadi.org/sites/gwadi.org/files/GWADIBrochure.pdf>.
- World Bank Group (2016a) *Datos de Agricultura por País*. <http://datos.bancomundial.org/indicador/NV.AGR.TOTL.ZS>.
- World Bank Group (2016b) *Datos del Banco Mundial: Tierras Agrícolas*. <http://datos.bancomundial.org/indicador/AG.LND.AGRI.ZS?end=2013&locations=1W&start=1961&view=chart>.
- World Bank Group (2016c) *Environmental, Health, and Safety Guidelines for Annual Crop Production*. http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/c6f002804c3c4596bb44bfd8bd2c3114/Annual+Crop+Production+EHS+Guidelines_2016+FINAL.pdf?MOD=AJPERES (Cons. 01/06/2016).