

## Relación entre indicadores de desempeño y la calidad del riego utilizando pivote central\*

### Relationship between performance indicators and irrigation quality using central pivot

César Arturo Palacios Mondaca<sup>1§</sup>, Tomás Díaz Valdés<sup>2</sup>, Juan Plutarco Munguía López<sup>3</sup>, Leopoldo Partida Ruvalcaba<sup>4</sup>, Teresa de Jesús Velásquez Alcaráz<sup>2</sup> y Blanca Elvira López Valenzuela<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela Superior de Agricultura del Valle del Fuerte-UAS. Calle 16 y ave. Japaraqui S/N. Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa, México, CP. 81110. Tel. 687 8960908. (blancalopezvzla@hotmail.com). <sup>2</sup>Facultad de Agronomía-UAS. Carretera Culiacán-El Dorado, km 17.5. Sinaloa, México. CP. 80000. Tel. 667 846-1084. (tdiaz@hotmail.com; teresadejesus\_v@yahoo.com.mx). <sup>3</sup>Centro de Investigación en Química Aplicada. Enrique Reyna Hermosillo Núm. 140. Saltillo, Coahuila, México, CP. 25294, Tel. (844) 438-9830, ext 1253. (juan.munguia@ciqa.edu.mx). <sup>4</sup>Universidad Tecnológica de Culiacán, Carretera Culiacán-Imala, km 2.0. Culiacán, Sinaloa, México. CP. 80014. Tel. 667 1041599. (parpolo@yahoo.com.mx). <sup>§</sup>Autor para correspondencia: cesar\_palaciosm@hotmail.com.

## Resumen

El uso del agua para la agricultura en regiones bajo condiciones de escasez y bajas eficiencias, requieren de investigación, innovación y una apropiada transferencia tecnológica, para mejorar la calidad del riego. Las herramientas para optimizar el uso del agua incluyen sistemas de riego presurizados, que a pesar de las ventajas tecnológicas, requieren de un mantenimiento y operación adecuados para el correcto funcionamiento agronómico e hidráulico, por que su evaluación debe ser un procedimiento rutinario. El sistema de riego por pivote central presenta ventajas sobre otros sistemas presurizados y es una buena opción para la producción de algunos cultivos. Los índices de desempeño tradicionales son el coeficiente de uniformidad y uniformidad de distribución del agua. El objetivo del estudio fue comparar la calidad del riego a partir de los indicadores de desempeño: coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein (CUh), uniformidad de distribución (UD), área regada adecuadamente (ARA) y eficiencia de aplicación (Ea) y determinar la relación entre ellos. Las evaluaciones pluviométricas se realizaron en el norte de Sinaloa, México, en dos ciclos agrícolas (2013-2015). La pluviometría mostró

## Abstract

The use of water for agriculture in regions under conditions of scarcity and low efficiencies, requires research, innovation and an appropriate technological transfer, to improve the quality of irrigation. The tools to optimize the use of water include pressurized irrigation systems, which despite the technological advantages, require proper maintenance and operation for the correct agronomic and hydraulic operation, so its evaluation must be a routine procedure. The central pivot irrigation system has advantages over other pressurized systems and is a good choice for the production of some crops. The traditional performance indices are the coefficient of uniformity and uniformity of water distribution. The objective of the study was to compare irrigation quality based on performance indicators: the Heermann and Hein (CUh) uniformity coefficient, distribution uniformity (UD), adequately irrigated area (ARA) and application efficiency (Ea) and determine the relationship between them. The rainfall assessments were conducted in northern Sinaloa, Mexico, in two cropping cycles (2013-2015). Rainfall showed a “high quality” irrigation with a “very well-watered” area,

\* Recibido: febrero de 2017  
Aceptado: marzo de 2017

una “alta calidad” del riego con un área “muy bien regada”, el análisis por tramos mostró el menor desempeño en los tramos uno, dos y el colgante. El análisis de la pluviometría total mostró alta relaciones CUh-ARA, CUh-Ea y Ea-ARA ( $R^2=0.9262, 0.8661, 0.9041$ , respectivamente) y por tramos solo en CUh-ARA ( $R^2=0.7648$ ); los indicadores de desempeño CUh y ARA son suficientes para evaluar la calidad del riego.

**Palabras clave:** área regada adecuadamente, eficiencia, riego por aspersión, uniformidad.

## Introducción

El agua es un factor clave en la sociedad humana y su cuidado es un desafío constante (Samian *et al.*, 2015). A escala mundial, la disponibilidad de recursos de agua dulce fácilmente accesible es limitada (Yacoubi *et al.*, 2012; Cisneros *et al.*, 2014). La actividad agrícola es el principal consumidor del agua, por lo que se deben tomar medidas para ser más eficientes en su uso (Castro *et al.*, 2008). La superficie cultivada en el mundo es aproximadamente de 1 527 millones de hectáreas, de las cuales 19.7% corresponde a la agricultura bajo riego (FAO, 2011). Las grandes zonas de riego, en México, se ubican en las zonas áridas y semiáridas, las cuales requieren del riego para asegurar rendimientos comerciales (Flores *et al.*, 2014). El riego un factor limitante en la producción, por lo que un buen riego debe caracterizarse por presentar alta eficiencia y uniformidad para garantizar un uso racional de éste (Ortiz *et al.*, 2012). Los métodos de riego por gravedad son los más comunes para aplicar el agua en los terrenos agrícolas en las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas a nivel mundial y México no es la excepción (Benjamín *et al.*, 1994; González *et al.*, 2006).

En México se destinan alrededor de 22 millones de hectáreas para la agricultura, 6.4 millones se cultivan bajo riego y de ellas, 10% utiliza sistemas de riego presurizados (CONAGUA, 2009), pero con una eficiencia global del uso del agua que no sobrepasa 40% (INIFAP, 2010). Como resultado de las bajas eficiencias de aplicación del riego por gravedad, es necesario estudiar diferentes alternativas de manejo del riego (Flores *et al.*, 2014).

Bajo estas condiciones, el uso eficiente del agua mejora el rendimiento económico a través de la reducción del consumo del agua y la energía (Yacoubi *et al.*, 2012; Samian *et al.*, 2015), además minimiza el impacto ambiental negativo

the analysis by sections showed the lowest performance in sections one, two and the pendant. The analysis of the total rainfall showed high ratios CUh-ARA, CUh-Ea and Ea-ARA ( $R^2=0.9262, 0.8661, 0.9041$ , respectively) and for sections only in CUh-ARA ( $R^2=0.7648$ ); the performance indicators CUh and ARA are sufficient to evaluate the quality of irrigation.

**Keywords:** adequately irrigated area, efficiency, sprinkler irrigation, uniformity.

## Introduction

The water is a key factor in human society and its care is a constant challenge (Samian *et al.*, 2015). At the global level, the availability of readily accessible freshwater resources is limited (Yacoubi *et al.*, 2012; Cisneros *et al.*, 2014). The agricultural activity is the main consumer of water, so measures should be taken to be more efficient in its use (Castro *et al.*, 2008). The area under cultivation in the world is approximately 1 527 million hectares, of which 19.7% corresponds to agriculture under irrigation (FAO, 2011). The large irrigation zones in Mexico are located in the arid and semi-arid zones, which require irrigation to ensure commercial yields (Flores *et al.*, 2014). The irrigation is a limiting factor in production, so a good irrigation should be characterized by high efficiency and uniformity to ensure a rational use of this (Ortiz *et al.*, 2012). The methods used for irrigation by gravity are the most common to apply water to agricultural land in arid, semi-arid and sub-humid areas worldwide and Mexico is no exception (Benjamín *et al.*, 1994; González *et al.*, 2006).

In Mexico, about 22 million hectares are used for agriculture, 6.4 million are cultivated under irrigation and 10% use pressurized irrigation systems (CONAGUA, 2009), but with an overall efficiency of water use that does not exceed 40% (INIFAP, 2010). As a result of the low efficiency of application of gravity irrigation, it is necessary to study different irrigation management alternatives (Flores *et al.*, 2014).

Under these conditions, efficient water use improves economic performance through reduced water and energy consumption (Yacoubi *et al.*, 2012; Samian *et al.*, 2015), and minimizes negative environmental impact (Louis and Selker, 2000). The potential management

(Louis y Selker, 2000). Las herramientas potenciales de manejo, para economizar el uso del agua, incluyen el uso de sistemas eficiente de riego y agricultura de precisión (Levy *et al.*, 2013), aunque la tecnificación del riego no implica que se alcancen altas eficiencias, si estos sistemas no se operan adecuadamente bajo las premisas de su diseño (Tun *et al.*, 2011), ya que aplicaciones insuficientes o excesivas de agua ocasionan pérdidas y limitan su eficiencia (Flórez *et al.*, 2013). Las máquinas de riego por aspersión autopropulsados han experimentado un gran éxito a nivel mundial con respecto a otros sistemas de riego (Ouazaa *et al.*, 2015), sus ventajas incluyen: 1) alto potencial de uniformidad y eficiencia de aplicación; 2) alto grado de automatización; y 3) capacidad para aplicar agua y nutrientes en un amplio rango de suelos, cultivos y condiciones topográficas (Evans y King, 2012).

Las grandes ventajas del pivote central como sistema de riego, han despertado el interés entre los productores agrícolas, no solo por el menor costo de inversión por hectárea regada (a mayor longitud del equipo), sino también por otras características como su versatilidad para ser utilizado en diferentes condiciones de suelo, clima y cultivo, alto grado de automatización, posibilidad de aplicar cargas diferenciadas de agua de acuerdo a las necesidades reales del cultivo, inyección de agroquímicos y la uniformidad de aplicación del agua, la cual será alta cuando el diseño del equipo en fábrica, montaje en el terreno y operación, se ajusten a las características de la explotación y demanda hídrica del cultivo según sea su etapa de desarrollo (Montero *et al.*, 2013).

Los índices de desempeño más comunes son el coeficiente de uniformidad (CU) y la uniformidad de distribución (UD) (Baum *et al.*, 2005; Marjang *et al.*, 2012; Zhang and Merkley, 2012), el coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein es una modificación del coeficiente de Christansen, donde cada pluviómetro representa una corona circular de área creciente a medida que se aleja del punto pivote; es un indicativo del desempeño conjunto de emisores en condiciones de campo, ambiente y presión, donde un valor menor de 80% es caracterizado como malo, entre 80 y 84% regular, 85 y 90% bueno, y, sobre este valor, muy bueno (Cezar *et al.*, 2008). La mayoría de los sistemas de riego por aspersión requieren de un valor mínimo de uniformidad de distribución de agua de 80% (Tun *et al.*, 2011), se debe considerar que bajos valores de uniformidad de distribución pueden deberse a diseños incorrectos de los sistemas de riego lo que limita su desempeño y funcionamiento óptimo (Buendía *et al.*, 2004).

tools to economize water use include the use of efficient irrigation and precision farming systems (Levy *et al.*, 2013), although irrigation technology does not imply that high efficiencies are achieved if these systems they do not operate properly under the design assumptions (Tun *et al.*, 2011), since insufficient or excessive applications of water cause losses and limit their efficiency (Florez *et al.*, 2013). The self-propelled sprinkler irrigation machines have proven to be a worldwide success with respect to other irrigation systems (Ouazaa *et al.*, 2015), their advantages include: 1) high potential for uniformity and application efficiency; 2) high degree of automation; and 3) ability to apply water and nutrients over a wide range of soils, crops and topographic conditions (Evans and King, 2012).

The great advantages of the central pivot as an irrigation system have aroused interest among agricultural producers, not only because of the lower investment cost per hectare irrigated (to a greater length of equipment), but also because of other characteristics such as their versatility to be used In different soil, climate and crop conditions, high degree of automation, the possibility of applying different loads of water according to the actual needs of the crop, injection of agrochemicals and the uniformity of application of the water, which will be high when the design of the equipment in the factory, field assembly and operation, are adjusted to the characteristics of the exploitation and water demand of the crop according to its stage of development (Montero *et al.*, 2013).

The most common performance indices are the uniformity coefficient (CU) and the uniformity of distribution (UD) (Baum *et al.*, 2005; Marjang *et al.*, 2012; Zhang and Merkley, 2012), the Heermann and Hein uniformity coefficient is a modification of the coefficient of Christansen, where each rain gauge represents a circular crown of increasing area as it moves away from the pivot point; is indicative of the joint performance of issuers in conditions of field, environment and pressure, where a value less than 80% is characterized as bad, between 80 and 84% regular, 85 and 90% good, and, on this value, very good (Cezar *et al.*, 2008). Most spray irrigation systems require a minimum water distribution uniformity of 80% (Tun *et al.*, 2011), it must be considered that low values of uniformity of distribution may be due to incorrect designs of the systems of irrigation, which limits its performance and optimum functioning (Buendía *et al.*, 2004).

El objetivo del estudio fue comparar la calidad del riego a partir de los indicadores de desempeño: coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein (CUh), uniformidad de distribución (UD), área regada adecuadamente (ARA) y eficiencia de aplicación (Ea), obtenidos del análisis de la pluviometría total y por “tramos” del pivote central y determinar la relación entre ellos.

## Materiales y métodos

**Localización.** El trabajo se realizó en el Distrito de Riego N° 075 “Río Fuerte”, en el norte de Sinaloa, en dos máquinas de pivote central, compuestas por 9 tramos y un colgante (Cuadro 1), en parcelas de producción comercial de papa, operados de acuerdo al uso y costumbre de los productores de la región, con fuentes de abastecimiento de agua superficial, durante los ciclos agrícolas 2013-2014 y 2014-2015.

**Cuadro 1. Características generales de las máquinas de pivote central evaluadas.**  
**Table 1. General characteristics of the central pivot machines evaluated.**

Año de evaluación	Marca	Núm. tramos	Longitud (m)	Gasto (L s <sup>-1</sup> )	Área regada (ha)	Presión de operación (psi)
2013-2014	Valley	9 + colgante	491.6	75	75.92	28
2014-2015	Valley	9 + colgante	497	82	77.6	31

**Clima.** Las variables de clima fueron medidas en una estación meteorológica automatizada localizada a 100 m de las parcelas de prueba, con lecturas cada cinco minutos durante las pruebas y hasta terminar de medir los volúmenes de los colectores. Las evaluaciones se realizaron en horas tempranas de la mañana en ausencia de viento o a velocidades por debajo de 2 m s<sup>-1</sup>, cuando las velocidades fueron mayores se desecharon las pruebas.

**Evaluación de la pluviometría.** Se realizaron tres evaluaciones pluviométricas en cada máquina de pivote central, con tres láminas de riego diferentes, determinadas por el productor: L<sub>1</sub>=25.4 mm, L<sub>2</sub>=12.7 mm y L<sub>3</sub>=6.35 mm, durante el ciclo 2013-2014 y para L<sub>4</sub>=12.63 mm, L<sub>5</sub>=8.21 mm y L<sub>6</sub>=3.28 mm en el ciclo 2014-2015, de acuerdo con la metodología de Merriam y Keller (1978) y la norma ANSI/ASAE S436.1 (ANSI/ASAE, 2003). Se utilizaron pluviómetros de plástico con un diámetro en el área de captación de 12.7 cm y una altura de 18 cm, colocados en una línea radial con una separación, entre ellos de 3 m, utilizando soportes metálicos para ubicarlos sobre el dosel del cultivo, cuando el follaje

The objective of the study was to compare irrigation quality based on performance indicators: Heermann and Hein (CUh) uniformity coefficient, distribution uniformity (UD), adequately irrigated area (ARA) and application efficiency (Ea) Obtained from the analysis of the total rainfall and by “sections” of the central pivot and to determine the relation between them.

## Materials and methods

**Location.** The work was carried out in Irrigation District No. 075 “Río Fuerte”, in the north of Sinaloa, Mexico, in two central pivot machines, composed of 9 sections and a pendant (Table 1), in plots of commercial potato production, operated according to the use and custom of the producers of the region, with sources of surface water supply, during the agricultural cycles 2013-2014 and 2014-2015.

**Weather.** The climate variables were measured at an automated meteorological station located 100 m from the test plots, with readings every five minutes during the tests and until the collector volumes were finished measuring. Evaluations were performed early in the morning in the absence of wind or at speeds below 2 m s<sup>-1</sup>, when speeds were higher were discarded.

**Evaluation of rainfall.** Three pluviometric evaluations were performed in each central pivot machine, with three different irrigation sheets, determined by the producer: L<sub>1</sub>=25.4 mm, L<sub>2</sub>=12.7 mm and L<sub>3</sub>=6.35 mm, during the cycle 2013-2014 and for L<sub>4</sub>=12.63 mm, L<sub>5</sub>=8.21 mm and L<sub>6</sub>=3.28 mm in the 2014-2015 cycle, according to the methodology of Merriam and Keller (1978) and ANSI/ASAE S436.1 (ANSI/ASAE, 2003). The plastic rain gauges with a diameter in the catchment area of 12.7 cm and a height of 18 cm were placed in a radial line with a separation of 3 m, using metallic supports to place them on the canopy of the crop, when foliage interfered with the uptake of irrigation water. The volumes were measured with 200 and 500 ml graduated test tubes as needed.

interfería en la captación del agua de riego. Los volúmenes fueron medidos con probeta graduada de 200 y 500 ml según fue necesario.

Indicadores de desempeño. Para cada evaluación pluviométrica se determinó el coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein (CUh), uniformidad de distribución (UD), área regada adecuadamente (ARA) y eficiencia de aplicación (Ea), determinados de la siguiente manera.

El coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein (1968) se calculó con la expresión siguiente:

$$CUh = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n Di |Ci - Lmp|}{\sum CiDi} \right] * 100 \quad 1)$$

Donde: n= número de colectores utilizados en el análisis; i= número asignado para identificar un colector (i=1, 2, 3, 4, ... n); Ci= lámina de agua recogida en el colector i (con i variando entre 1 y n); Di= posición del colector i con respecto al punto pivote (con i variando entre 1 y n); Lmp= lámina media ponderada de las láminas de riego colectadas en los "n" pluviómetros (mm) y se calcula:

$$Lmp = \frac{\sum_{i=1}^n CiDi}{\sum_{i=1}^n Di} \quad 2)$$

Uniformidad de distribución (UD). De acuerdo a Keller y Bliesner (1990) se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$UD = \frac{Lmp_{25\% \text{ valores más bajos}}}{Lmp} \quad 3)$$

Donde:  $Lmp_{25\% \text{ valores más bajos}}$  = lámina media ponderada de 25% de los valores más bajos de las láminas de riego colectadas.

Área regada adecuadamente (ARA). Se considera a la lámina de riego que está dentro del rango de  $\pm 15\%$  de la lámina media ponderada (Tarjuelo, 2005).

$$0.85 Lmp \leq ARA \leq 1.15 Lmp \quad 4)$$

Eficiencia de aplicación del pivote central o proporción de agua que llega al suelo. Es la relación que existe entre la lámina media de agua recogida por los pluviómetros entre la lámina media descargada por los emisores, se define como:

Indicators of performance. For each pluviometric evaluation, the uniformity coefficient of Heermann y Hein (CUh), distribution uniformity (UD), adequately irrigated area (ARA) and application efficiency (Ea) were determined as follows.

The coefficient of uniformity of Heermann and Hein (1968) was calculated with the following expression:

$$CUh = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n Di |Ci - Lmp|}{\sum CiDi} \right] * 100 \quad 1)$$

Where: n= number of collectors used in the analysis; i= number assigned to identify a collector (i= 1, 2, 3, 4 ... n); Ci= water sheet collected in the collector i (with i varying between 1 and n); Di= position of the collector i with respect to the pivot point (with i varying between 1 and n); Lmp= weighted average sheet of the irrigation sheets collected in the "n" rain gauges (mm) and calculates:

$$Lmp = \frac{\sum_{i=1}^n CiDi}{\sum_{i=1}^n Di} \quad 2)$$

Uniformity of distribution (UD). According to Keller and Bliesner (1990) it is obtained from the following equation:

$$UD = \frac{Lmp_{25\% \text{ valores más bajos}}}{Lmp} \quad 3)$$

Where:  $Lmp_{25\% \text{ valores más bajos}}$  = are the media weighted 25% of the lowest values of the irrigation sheets collected.

Adequately irrigated area (ARA). The irrigation sheet is considered to be within the range of  $\pm 15\%$  of the weighted average sheet (Tarjuelo, 2005).

$$0.85 Lmp \leq ARA \leq 1.15 Lmp \quad 4)$$

Efficiency of application of the central pivot or proportion of water reaching the ground. It is defined as the relationship between the average water sheets collected by the rain gauges between the average sheets discharged by the emitters, mathematically defined as:

$$Ea = Ln/Lb \quad 5)$$

$$Ea = L_n / L_b \quad 5)$$

Donde: Ea= eficiencia de aplicación del pivote central o proporción de agua que llega al suelo (fracción); Ln= lámina media de agua recogida por los pluviómetros (mm); y Lb= lámina media descargada por los emisores (mm).

Análisis estadístico. La determinación de los indicadores de desempeño se realizó con la pluviometría del pivote central en su conjunto; además se hizo por tramos individuales. Para el análisis estadístico se usó el programa Statistical Analysis System (SAS Institute, Inc. Versión 9.0), aplicando un análisis de varianza y una prueba de Tukey, con un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$  para la comparación de medias de los valores de CUh, ARA y Ea por tramos, para cada lámina de riego; la comparación entre medias de los datos CUh, ARA y Ea, obtenidos de la pluviometría por tramos y de la pluviometría total, se realizó una prueba de T de "student" con un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ , en tanto que para determinar las asociaciones CUh-ARA, CUh-Ea, Ea-ARA, CUh-UD, Ea-UD y ARA-UD, se realizó una regresión lineal.

## Resultados y discusión

### Análisis de la pluviometría total del sistema de riego

Coefficiente de uniformidad de Heermann y Hein. La información obtenida del análisis pluviométrico del total de las láminas precipitadas, de los dos sistemas de riego por pivote central, muestran valores mayores a 85% en el CUh (Cuadro 2) para Lr<sub>1</sub>, Lr<sub>2</sub>, Lr<sub>4</sub>, Lr<sub>5</sub> y Lr<sub>6</sub>, lo cual se clasifica como un "buen riego" según Tarjuelo *et al.* (1999) en tanto que para Lr<sub>3</sub> el valor es de 80.45%, aunque se considera inadecuado para estos sistemas de riego es un valor muy cercano a lo que se clasifica como "buen riego".

Uniformidad de distribución. Los valores de UD (Cuadro 2) fueron muy variables, y van desde 36.27% en Lr<sub>4</sub> hasta el 86.31% en Lr<sub>1</sub>, llegando a considerarse adecuados para Lr<sub>1</sub> y Lr<sub>2</sub> (mayores de 80%), pero inadecuados para el resto (< 80%) de acuerdo a Tun *et al.* (2011). Se debe considerar que la UD se obtiene a partir de 25% de los valores más bajos de las láminas captadas en los pluviómetros, lo que puede deberse a un mal diseño, aunque generalmente se asocia a una falta de mantenimiento o inadecuada operación del sistema (desgaste de boquillas, alteración del diseño hidráulico, deterioro de reguladores de presión, fugas en el

Where: Ea= efficiency of application of the central pivot or proportion of water reaching the soil (fraction); Ln= average water sheet collected by the rain gauges (mm), and Lb= average sheet discharged by the emitters (mm).

Statistical analysis. The determination of performance indicators was performed considering the central pivot pluviometry as a whole; In addition to doing it individually. The statistical analysis was performed using the Statistical Analysis System (SAS Institute, Inc. Version 9.0), applying an analysis of variance and a Tukey test, with a level of significance  $\alpha = 0.05$  for the comparison of means of CUh values, ARA and Ea by sections, for each irrigation sheet; for the comparison between the mean values of the CUh, ARA and Ea data, obtained from the pluviometry by sections and the total rainfall, a student's T test was performed with a significance level  $\alpha = 0.05$ , while to determine the CUh-ARA, CUh-Ea, Ea-ARA, CUh-UD, Ea-UD and ARA-UD associations, a linear regression was performed.

## Results and discussion

### Analysis of the total rainfall of the irrigation system

Coefficient of uniformity of Heermann Hein. The information obtained from the rainfall analysis of the total precipitated leaves of the two irrigation systems by central pivot shows values greater than 85% in the CUh (Table 2) for Lr<sub>1</sub>, Lr<sub>2</sub>, Lr<sub>4</sub>, Lr<sub>5</sub> and Lr<sub>6</sub>, which classified as a "good irrigation" according to Tarjuelo *et al.* (1999), while for Lr<sub>3</sub> the value is 80.45%, which although considered inadequate for these irrigation systems is a value very close to what is classified as "good irrigation".

Uniformity of distribution. The values of UD (Table 2) were very variable, ranging from 36.27% in Lr<sub>4</sub> to 86.31% in Lr<sub>1</sub>, being considered adequate for Lr<sub>1</sub> and Lr<sub>2</sub> (greater than 80%), but unsuitable for the rest (< 80%) According to Tun *et al.* (2011). It should be considered that the UD is obtained from 25% of the lowest values of the sheets captured in the rain gauges, which may be due to poor design, although it is usually associated with a lack of maintenance and inadequate operation of the system (nozzle wear, alteration of the hydraulic design, deterioration of pressure regulators, leaks in the hydraulic system, closure of emitters by system managers, etc), as indicated by Keller *et al.* (1981) that establish that UD values depend more on the management of the irrigation system.

sistema hidráulico, cierre de emisores por los responsables del sistema, etc), tal como lo señalan Keller *et al.* (1981) que establecen que los valores de UD dependen más del manejo del sistema de riego.

Área regada adecuadamente. Con respecto al ARA (Cuadro 2), se muestra que para Lr<sub>1</sub>, Lr<sub>2</sub>, Lr<sub>4</sub>, Lr<sub>5</sub> y Lr<sub>6</sub>, se tiene un área “muy bien regada”, en tanto que para Lr<sub>3</sub> (54.63%) es “inadecuadamente regada”, aunque el valor es muy cercano a 55%, que lo clasifica como bien regada según Tarjuelo (2005) y Jiménez (2010; 2012). Estos resultados muestran una clara correspondencia con los valores obtenidos para el CUh.

Eficiencia de aplicación del sistema de riego. Los valores obtenidos de Ea son adecuados para Lr<sub>1</sub> y Lr<sub>2</sub>, pero no para Lr<sub>3</sub>, por considerarse bajo para pivote central, ni para Lr<sub>4</sub>, Lr<sub>5</sub> y Lr<sub>6</sub>, por exceder 100% lo cual significa que se aplica más agua de la programada. Estos valores muestran una relación con los valores obtenidos para UD, teniendo su mejor desempeño en Lr<sub>1</sub> y Lr<sub>2</sub>, y en el resto son inadecuados.

Pluviometría promedio. Al considerar los valores promedios de los indicadores de desempeño (CUh=88.51%, UD=64.7%, ARA=78.33% y Ea=91.77%), del total de las evaluaciones, se tendría que concluir que los dos sistemas de riego por pivote central proporcionan una “alta calidad” de riego y el área está “muy bien regada”. Los valores más bajos del CUh, ARA y Ea se encuentran en Lr<sub>3</sub>, mientras que el más bajo y los mayores de 100% de Ea, junto con los más bajos de UD, se encuentran Lr<sub>3</sub>, Lr<sub>4</sub>, Lr<sub>5</sub> y Lr<sub>6</sub>, lo que puede ser indicador de falla en el diseño o en la operación y mantenimiento del sistema de riego ya que, aunque baja, se encuentra una relación en la asociación Ea-UD con  $R^2=0.3482$ .

Asociaciones entre los indicadores de desempeño. Al analizar las asociaciones entre los indicadores de desempeño, con la pluviometría total (Figura 1), se encuentra una alta relación entre las asociaciones CUh-ARA, CUh-Ea y Ea-ARA ( $R^2=0.9262$ ,  $0.8661$  y  $0.9041$ , respectivamente), una baja relación Ea-UD ( $R^2=0.3482$ ), y muy baja para las asociaciones CUh-UD y ARA-UD ( $R^2=0.0817$  y  $0.1971$ , respectivamente).

#### Análisis de pluviometría por tramos del sistema de riego

Se realizó un análisis de varianza y una prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para los valores de CUh, ARA y Ea, obtenidos por lámina de riego y por tramos del pivote central, encontrando que no hay diferencia estadística significativa entre láminas

#### Cuadro 2. Indicadores de desempeño calculados con la pluviometría total.

Table 2. Performance indicators calculated with total rainfall.

Año	Lr	Lr (mm)	CUh (%)	UD (%)	ARA (%)	Ea (%)
2014	Lr <sub>1</sub>	25.4	88.96	86.31	80.21	89.24
	Lr <sub>2</sub>	12.7	88.04	80.94	71	79.02
	Lr <sub>3</sub>	6.35	80.45	72.24	54.63	53.35
2015	Lr <sub>4</sub>	12.63	88.21	36.27	82.84	104
	Lr <sub>5</sub>	8.21	92.7	51.26	89.02	117
	Lr <sub>6</sub>	3.28	92.71	61.17	92.28	108
Promedio			88.51	64.7	78.33	91.77

Properly irrigated area. With regard to ARA (Table 2), it is shown that for Lr<sub>1</sub>, Lr<sub>2</sub>, Lr<sub>4</sub>, Lr<sub>5</sub> and Lr<sub>6</sub> there is a “very well-watered” area, while for Lr<sub>3</sub> (54.63%) it is “inadequately watered”, although the value is very close to 55%, which classifies it as irrigated according to Tarjuelo (2005) and Jimenez (2010; 2012). These results show a clear correspondence with the values obtained for the CUh.

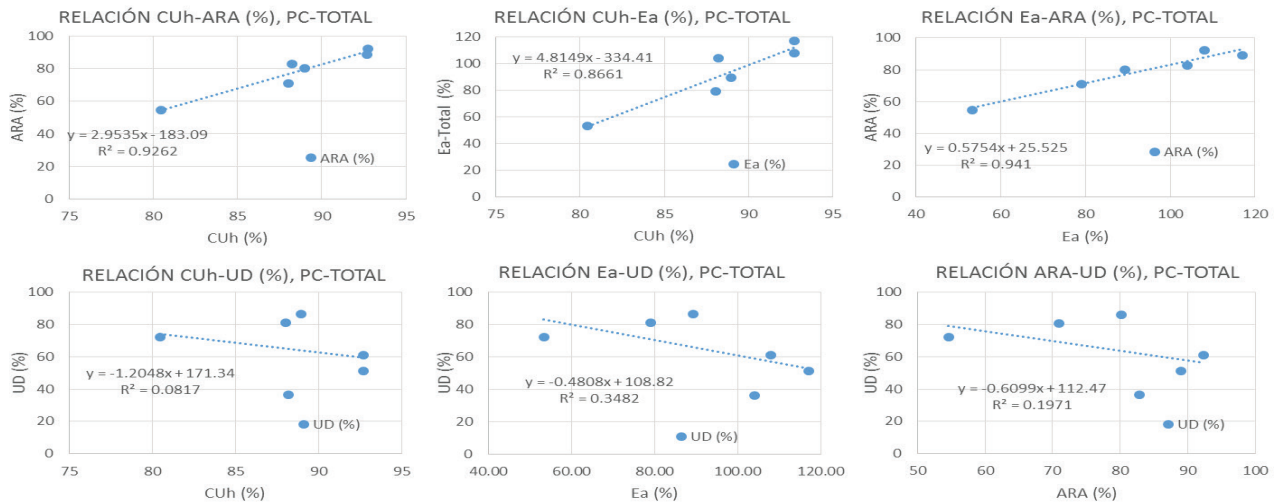
Efficiency of application of the irrigation system. The values obtained from Ea are suitable for Lr<sub>1</sub> and Lr<sub>2</sub>, but not for Lr<sub>3</sub>, since it is considered low for central pivot, nor for Lr<sub>4</sub>, Lr<sub>5</sub> and Lr<sub>6</sub>, since it exceeds 100% which means that more water is applied than the one programmed. These values show a relationship with the values obtained for UD, having their best performance in Lr<sub>1</sub> and Lr<sub>2</sub>, and in the rest are inadequate.

Average rainfall. When considering the average values of the performance indicators (CUh=88.51%, UD=64.7%, ARA=78.33% and Ea=91.77%), it should be concluded that the two pivot irrigation systems central provide a “high quality” irrigation and the area is “very well-watered”. The lowest values of CUh, ARA and Ea are found in Lr<sub>3</sub>, while the lowest values and the highest values of Ea, together with the lowest values of UD, are Lr<sub>3</sub>, Lr<sub>4</sub>, Lr<sub>5</sub> and Lr<sub>6</sub>, which may be an indicator of failure in the design or operation and maintenance of the irrigation system since, although low, there is a relation in the association Ea-UD with  $R^2=0.3482$ .

Associations between performance indicators. When analyzing the associations between performance indicators and total rainfall (Figure 1), there is a high relation between

de riego para el CUh (Cuadro 3), ni para ARA (Cuadro 4), en tanto que para Ea (Cuadro 5), no se encuentran diferencias significativa entre Lr<sub>1</sub>, Lr<sub>2</sub>, Lr<sub>4</sub>, Lr<sub>5</sub> y Lr<sub>6</sub>, pero si con Lr<sub>3</sub>, tampoco se encuentran diferencias entre Lr<sub>2</sub>, Lr<sub>3</sub> y Lr<sub>4</sub>.

the associations CUh-ARA, CUh-Ea and Ea-ARA ( $R^2=0.9262, 0.8661$  and  $0.9041$ , respectively). A low Ea-UD ratio ( $R^2=0.3482$ ), and very low for the CUh-UD and ARA-UD ( $R^2=0.0817$  and  $0.1971$ , respectively) associations.



**Figura 1. Relación entre indicadores de desempeño para valores totales de CUh, UD, ARA y Ea.**  
**Figure 1. Relationship between performance indicators for total values of CUh, UD, ARA and Ea.**

**Cuadro 3. Coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein (CUh, %) por lámina de riego y tramos.**  
**Table 3. Heermann and Hein coefficient of uniformity (CUh, %) per irrigation sheet and sections.**

Tramo	CUh (Lr <sub>1</sub> )	CUh (Lr <sub>2</sub> )	CUh (Lr <sub>3</sub> )	CUh (Lr <sub>4</sub> )	CUh (Lr <sub>5</sub> )	CUh (Lr <sub>6</sub> )	Promedio
1	71.37	76.5	41.57	86.31	60.9	72.34	68.17
2	89.11	85.81	81.51	93.58	95.34	93.36	89.79
3	94.01	93.67	92.23	94.4	94.77	93.96	93.84
4	89.38	96.34	93.69	93.24	92.51	94.54	93.28
5	96.94	92.55	92.34	93	96.06	95.01	94.32
6	92.94	86.5	91.49	92.91	93.75	92.86	91.74
7	94.1	95.06	92.58	96.17	87.83	88.41	92.36
8	95.64	94.3	91.28	97.98	91.79	95.52	94.42
9	92.56	89.71	83.56	96.56	95.85	95.48	92.29
Colgante	87.6	79.92	79.68	78.44	93.47	90.38	84.92
Promedio	90.37 a	89.04 a	83.99 a	92.26 a	90.23 a	91.19 a	89.51

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey,  $\alpha=0.05$ ).

Coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein. Para el CUh se encontraron valores más bajos en el tramo uno y el colgante (68.17 y 84.92% en promedio, respectivamente), en tanto que en el resto del pivote central presentaron valores que fluctúan del 89.79 a 94.42%, con un valor promedio de 89.51%, en todo el sistema, lo que significó

**Analysis of the pluviometry by sections of the irrigation system**

An analysis of variance and a Tukey test ( $\alpha=0.05$ ) were performed for the values of CUh, ARA and Ea, obtained by irrigation and central pivot sections, finding that there is no



que el riego presenta una muy buena uniformidad al considerar que el tramo uno cubre solo 0.95% de la superficie total irrigada y el colgante 8.93%, pero con un valor muy cercano a 85% considerado como “bueno” por Tarjuelo *et al.* (1999).

significant statistical difference between irrigation sheets for (Table 3), or for ARA (Table 4), while for Ea (Table 5), there are no statistically significant differences between Lr<sub>1</sub>, Lr<sub>2</sub>, Lr<sub>4</sub>, Lr<sub>5</sub> and Lr<sub>6</sub>, but with Lr<sub>3</sub>, neither Found statistically significant differences between Lr<sub>2</sub>, Lr<sub>3</sub> and Lr<sub>4</sub>.

**Cuadro 4. Área adecuadamente regada (ARA, %) por lámina de riego y tramos.**

**Table 4. Properly irrigated area (ARA, %) per irrigation sheet and sections.**

Tramo	ARA (Lr <sub>1</sub> )	ARA (Lr <sub>2</sub> )	ARA (Lr <sub>3</sub> )	ARA (Lr <sub>4</sub> )	ARA (Lr <sub>5</sub> )	ARA (Lr <sub>6</sub> )	Promedio
1	27.03	46.28	11.02	66.85	30.85	19.83	33.64
2	65.52	50.51	43.62	93.88	93.62	93.88	73.51
3	100	100	94.91	100	94.6	94.75	97.38
4	79.13	100	100	93.58	93.47	93.92	93.35
5	100	94.31	89.33	88.83	100	100	95.41
6	91.56	77.60	89.37	94.95	100	100	92.25
7	90.23	94.87	83.21	100	88.34	94.57	91.87
8	90.33	100	94.53	100	94.49	100	96.56
9	81.31	77.36	54.27	100	94.5	100	84.57
Colgante	74.61	12.23	49.77	37.77	87.23	62.31	53.99
Promedio	79.97 a	75.32 a	71 a	87.59 a	87.71 a	85.93 a	81.25

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey,  $\alpha=0.05$ ).

**Cuadro 5. Eficiencia de aplicación (Ea, %) por lámina de riego y tramos.**

**Table 5. Efficiency of application (Ea, %) per irrigation sheet and sections.**

Tramo	Ea (Lr <sub>1</sub> )	Ea (Lr <sub>2</sub> )	Ea (Lr <sub>3</sub> )	Ea (Lr <sub>4</sub> )	Ea (Lr <sub>5</sub> )	Ea (Lr <sub>6</sub> )	Promedio
1	159.45	127	184	87	95	133	130.91
2	126.77	109	90	86	117	113	106.96
3	102.76	90	64	95	117	115	97.29
4	94.88	83	60	99	110	115	93.65
5	81.5	85	56	100	119	114	92.58
6	83.46	75	48	99	113	100	86.41
7	81.89	77	49	110	125	116	93.15
8	83.86	75	45	114	118	104	89.98
9	91.73	73	47	111	119	105	91.12
Colgante	90.16	77	59	58	98	94	79.36
Promedio	99.65 a	87.1 ab	70.2 b	95.9 ab	113.1 a	110.9 a	96.14

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes, (Tukey,  $\alpha=0.05$ ).

Área regada adecuadamente. Para el ARA, el comportamiento es similar al del CUh, los valores más bajos se encontraron en el tramo uno y el colgante (33.64 y 53.99% en promedio, respectivamente), en tanto que en el resto del pivote central

Coefficient of uniformity of Heermann Hein. For the CUh, lower values were found in section one and pendant (68.17 and 84.92% on average, respectively), while in the rest of the central pivot they presented values ranging from 89.79

se tienen valores entre 73.51 y 97.38% con un promedio de 81.25%, para todo el sistema, lo que significó que el área estuvo “muy bien regada”, sobre todo si se considera que el valor del ARA para el colgante es muy cercano a 55% que sugiere Tarjuelo (2005) para considerar un área “bien regada”, coincidiendo con Alfonso (2005) quien realizó estudios similares encontrando que todos los tramos en máquinas de pivote central recibían cantidades de agua comprendidas en 85% y 115% de la lámina media ponderada.

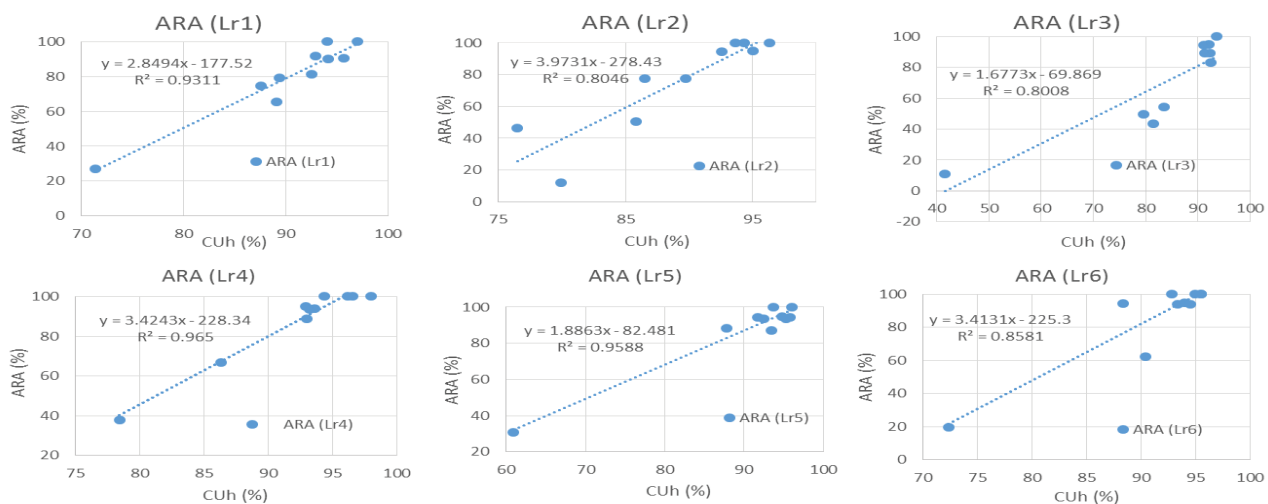
**Eficiencia de aplicación del sistema de riego.** De acuerdo a los valores encontrados de  $E_a$ , el tramo uno está aplicando una lámina de riego mayor a la programada (30.91%) aunque solo cubre 0.95% de la superficie irrigada, en tanto que el tramo dos cubre 2.93% de la superficie, pero con un sobre riego de solo 6.96% de la lámina programada, el resto del pivote central presentó valores entre 79.36 y 97.29%, con un promedio de 90.44% para el resto del sistema, lo cual es un valor mayor del esperado en estos sistemas de riego sobre todo considerando que el valor más pequeño fue de 79.36% (en el colgante) el cual está muy cercano al 80% usualmente utilizado para el diseño de estos sistemas de riego.

**Asociaciones entre los indicadores de desempeño.** Al analizar las asociaciones CUh-ARA, por tramos (Figura 2), se presentaron valores de  $R^2$  entre 0.8012 y 0.965, con una ecuación general:  $ARA = 2.2764 CUh - 122.51$  y un  $R^2 = 0.7648$ , lo que indica una alta relación entre los valores del CUh y el ARA.

to 94.42%, with an average value of 89.51%, throughout the system, which meant that the irrigation presents a very good uniformity considering that section one covers only 0.95% of the total irrigated area and the pendant 8.93%, but with a value close to 85% considered As “good” by Tarjuelo *et al.* (1999).

**Properly irrigated area.** For the ARA, the behavior is similar to that of the CUh, the lowest values were found in section one and pendant (33.64 and 53.99% on average, respectively), while in the rest of the central pivot are values between 73.51 and 97.38% with an average of 81.25%, for the whole system, which meant that the area was “very well-watered”, especially considering that the ARA value for the pendant is very close to 55% suggested by Tarjuelo (2005) to consider a “well-watered” area, coinciding with Alfonso (2005) who carried out similar studies finding that all sections in central pivot machines received water amounts comprised in 85% and 115% of the weighted average sheet.

**Efficiency of application of the irrigation system.** According to the  $E_a$  values found, section one is applying a larger than planned irrigation sheet (30.91%), although it only covers 0.95% of the irrigated area, while the two section covers 2.93% of the area, but with an over watering of only 6.96% of the programmed blade, the rest of the central pivot presented values between 79.36 and 97.29%, with an average of 90.44% for the rest of the system, which is a higher value than expected in these systems, which is a higher value than expected in these irrigation systems especially considering that the smallest value was 79.36% (in the pendant) which is very close to the 80% usually used for the design of these irrigation systems.



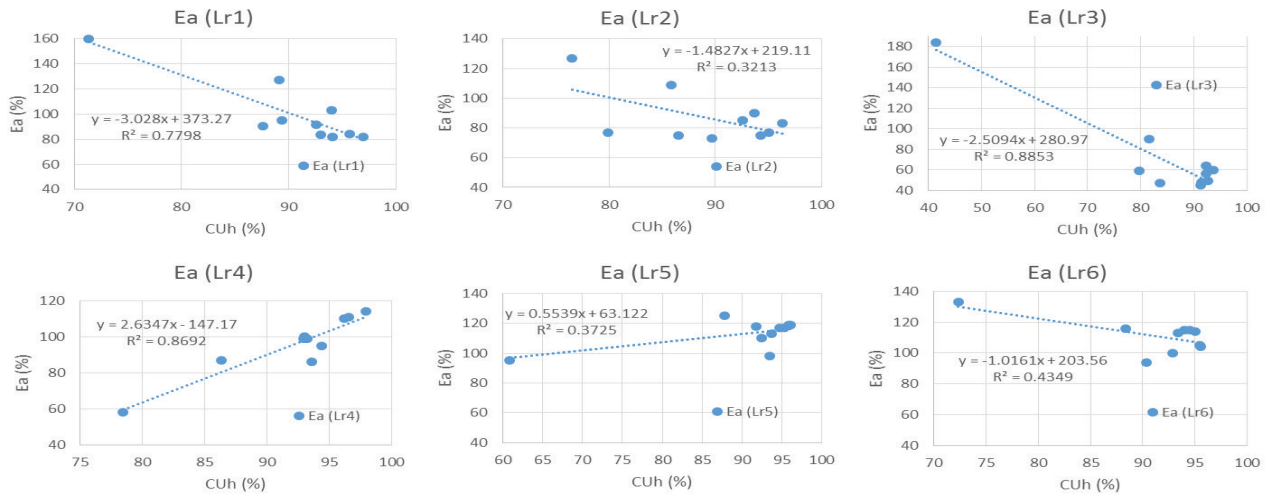
**Figura 2. Relación CUh-ARA por lámina de riego y tramos del pivote central.**  
**Figure 2. CUh-ARA ratio per irrigation sheet and central pivot sections.**

Para el caso de la asociación CUh-Ea (Figura 3), el resultado fue diferente, se tuvieron valores de  $R^2$  entre 0.3213 y 0.8848, con pendientes negativas en Lr<sub>1</sub>, Lr<sub>2</sub>, Lr<sub>3</sub> y Lr<sub>6</sub> y positivas en Lr<sub>4</sub>, Lr<sub>5</sub> con valores de  $R^2$  de 0.3725 y 0.8692, respectivamente, con una ecuación general:  $Ea = -0.9261 CUh + 179.04$  y un  $R^2 = 0.1099$ . Para la relación Ea-ARA se encontró una ecuación general:  $ARA = -0.1737 Ea + 97.955$  y un  $R^2 = 0.0348$ .

Para realizar una comparación entre los resultados obtenidos de los indicadores de desempeño CUh, ARA y Ea, del análisis de la pluviometría total y por tramos (Cuadro 6), se utilizó una prueba de T de "student" con un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ , encontrando que no hay diferencia estadísticamente significativa entre medias.

Associations between performance indicators. When analyzing the CUh-ARA associations, in sections (Figure 2),  $R^2$  values between 0.8012 and 0.965 were presented, with a general equation:  $ARA = 2.2764 CUh - 122.51$  and an  $R^2 = 0.7648$ , indicating a high relation between values of CUh and ARA.

For the case of the association CUh-Ea (Figure 3), the result was different, values of  $R^2$  were between 0.3213 and 0.8848, with negative slopes in Lr<sub>1</sub>, Lr<sub>2</sub>, Lr<sub>3</sub> and Lr<sub>6</sub> and positive in Lr<sub>4</sub>, Lr<sub>5</sub> with values of  $R^2$  of 0.3725 and 0.8692, respectively, with a general equation:  $Ea = -0.9261 CUh + 179.04$  and an  $R^2 = 0.1099$ . For the Ea-ARA relation, a general equation was found:  $ARA = -0.1737 Ea + 97.955$  and an  $R^2 = 0.0348$ .



**Figura 3. Relación CUh-Ea por lámina de riego y tramos del pivote central.**  
**Figure 3. CUh-Ea Ratio per irrigation sheet and sections of the central pivot.**

**Cuadro 3. Coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein (CUh, %) por lámina de riego y tramos.**  
**Table 3. Heermann and Hein coefficient of uniformity (CUh, %) per irrigation sheet and sections.**

Lámina de riego	Pluviometría total			Pluviometría por tramos		
	CUh	ARA	Ea	CUh	ARA	Ea
Lr1	88.96 a	80.21b	89.24 c	90.37 a	79.97 b	99.65 c
Lr2	88.04 a	71 b	79.02 c	89.04 a	75.32 b	87.1 c
Lr3	80.45 a	54.63 b	53.35 c	83.99 a	71 b	70.2 c
Lr4	88.2 a	82.84 b	104 c	92.26 a	87.59 b	95.9 c
Lr5	92.7 a	89.02 b	117 c	90.23 a	87.71 b	113.1 c
Lr6	92.71 a	92.28 b	108 c	91.19 a	85.93 b	110.9 c

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (T "Student",  $\alpha = 0.05$ ).

## Conclusiones

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los indicadores de desempeño obtenidos del análisis de la pluviometría total y el promedio del análisis por tramos. El análisis pluviométrico por tramos muestra las variaciones de estos indicadores a lo largo del sistema de riego por pivote central y permite detectar el desempeño por cada tramo individual.

En el análisis pluviométrico total se encontró una alta asociación entre los indicadores CUh, ARA y Ea, en tanto que las asociaciones con UD resultaron ser muy baja con Ea y casi nulas con CUh y ARA. Al realizar el análisis pluviométrico por tramos, solo se encontró una alta relación para la asociación CUh-ARA.

Es recomendable realizar el análisis pluviométrico por tramos, nos permite determinar la calidad del riego con los parámetros CUh y ARA, en tanto que las determinaciones de UD y Ea contribuyen a detectar los tramos con el desempeño más bajo y sus posibles causas.

## Literatura citada

- Alfonso, M. L. 2005. Evaluación de máquinas de riego en empresas de cultivos varios en la provincia de Matanzas. Congreso internacional de riego y drenaje. La Habana, Cuba. 417-427 pp.
- ANSI (American National Standards Institute). ASAE (American society of agricultural engineers), 2003. (ANSI/ASAE) standards S436.1. Test for determining the uniformity of water distribution of center pivot and lateral move irrigation machines equipped with spray or sprinkler nozzles. In ASAE Standards. St. Joseph, MI. USA. Asae standar. 931-938 pp.
- Baum, M. C.; Dukes, P. E. M. D. and Miller, G. L. 2005. Analysis of residential irrigation distribution uniformity. *J. Irrig. Drainage Eng.* 131(4):336-341.
- Benjamín, J. G.; Havis, H. R.; Ahuja, L. R. and Alonso, C. V. 1994. Leaching and water flow patterns in every-furrow and alternate-furrow irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58(5):1511-1517.
- Buendía, J. C. E.; Palacios, V. E.; Chávez, M. J. y Rojas, M. B. 2004. Impacto del funcionamiento de los sistemas de riego presurizados en la productividad de ocho cultivos, en Guanajuato, México. *Agrociencia.* 34(5):477-486.
- Castro, P. M.; Águila, M. F. M.; Quevedo, N. A.; Kleisinger, S.; Tijerina, C. L. y Mejía, S. E. 2008. Sistemas de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro. *Agríc. Téc. Méx.* 34(4):459-470.

To perform a comparison between the results obtained from the performance indicators CUh, ARA and Ea, from the analysis of total rainfall and by sections (Table 6), a student's T test was used with a significance level  $\alpha=0.05$ , finding that there is no statistically significant difference between means.

## Conclusions

No statistically significant differences were found between the performance indicators obtained from the analysis of total rainfall and the average of the analysis by sections. The pluviometric analysis by sections shows the variations of these indicators along the irrigation system by central pivot and allows to detect the performance for each individual section.

In the total rainfall analysis, a high association between the CUh, ARA and Ea indicators was found, while the associations with UD were very low with Ea and almost nil with CUh and ARA. When performing the pluviometric analysis by sections, only a high relation was found for the association CUh-ARA.

It is advisable to perform the pluviometric analysis by sections, allows us to determine the quality of the irrigation with the parameters CUh and ARA, while the determinations of UD and Ea contribute to detect the sections with the lowest performance and its possible causes.

*End of the English version*



- Cisneros, Z. E.; González, A. A.; García, L. A.; Placeres, M. Z. y Jiménez, E. E. 2014. Evaluación y propuesta de medidas en diferentes técnicas de riego por aspersión para un uso eficiente del agua. *Ing. Agríc.* 4(1):22-28.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2009. Estadísticas agrícolas de los Distritos de Riego, "Año agrícola 2007-2008". México, D. F. 34 p.
- Evans, R. G. and King, B. A. 2012. Site-specific sprinkler irrigation in water limited future. *Trans. ASABE* 55(2):493-504.
- FAO (Food and Agricultural Organization). 2011. The state of the world's land and water resources for food and agricultural (SOLAW) managing systems at risk. Food an agricultural Organization of the United Nations, Roma and Earthscan, London. 294 p.

- Flores, G. H.; Sifuentes, I. E.; Flores, M. H.; Ojeda, B. W. y Ramos, G. C. R. 2014. Técnicas de conservación del agua en riego por gravedad a nivel parcelario. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 5(2):241-252.
- Flórez, T. N.; Zution, G. I.; Rodrigues, C. D.; Agnellos, B. E. A.; Ponciano, de D. F.; Diego, R. M. y Eiji, M. E. 2013. Eficiencia de aplicación de agua en la superficie y en el perfil del suelo en un sistema de riego por aspersión. *Agrociencia.* 47:107-119.
- González, C. J. M.; Muñoz, H. B.; Acosta, H. R. y Mailhol, J. C. 2006. Modelo de la onda cinemática adaptado al riego por surcos cerrados. *Agrociencia.* 40(6):731-740.
- Heermann, D. F. and Hein, P. R. 1968. Performance characteristics of self-propelled center-pivot sprinkler irrigation system. *Trans. ASAE* 11(1):11-15.
- INIFAP. 2010. Reporte anual 2009. Ciencia y tecnología para el campo mexicana. México, D. F.: Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. Publicación Núm. 5. 76 p.
- Jiménez, E. E. R.; Domínguez, G. M.; Pérez, H. R.; Montero, S. J. L. y Cun, G. R. 2010. Estudio de la uniformidad de riego, en una máquina de pivote central. *Rev. Cienc. Téc. Agrop.* 19(1):73-78.
- Keller, J.; Corey, W. R. and Vavra, M. E. 1981. Evaluation of irrigation systems. Irrigation challenges on the 80's. St. Joseph, Michigan, USA. ASAE 95-105.
- Keller, J. and Bliesner, R. D. 1990. Sprinkle and tickle irrigation. A VI book. Van Nostrand Reinhold. New York. 652 p.
- Levy, A.; Coleman, W. K. and Veilleux, R. E. 2013. Adaptation of potato to water shortage: irrigation management and enhancement of tolerance to drought and salinity. *Am. J. Potato Res.* (90):186-206.
- Louis M. and, Selker J. 2000. Sprinkler head maintenance effects on water application uniformity. *J. Irrig. Drainage Eng. ASCE.* 126(3):142-148.
- Merriam, J. L. and Keller, J. 1978. Farm irrigation system evaluation: a guide for management. Utah State University. Logan UT. 87 p.
- Montero, J.; Martínez, A.; Valiente, M.; Moreno, M. A. and Tarjuelo, J. M. 2013. Analysis of water application cost a center pivot system for irrigation of crops in Spain. *Irrig. Sci.* 31:507-521.
- Ouazaa, S.; Latorre, B.; Burguete, J.; Serreta, A.; Playán, E.; Salvador, R.; Paniagua, P. and Zapata, N. 2015. Effect of the start-stop cycle of center-pivot towers on irrigation performance: experiments and simulations. *Agric. Water Manag.* 147:163-174
- Samian M.; Mahdei, K. N.; Saadi H. and Movahedi R. 2015. Identifying factors affecting optimal management of agricultural water. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* 14:11-18.
- Tarjuelo, M. B. J. M. 2005. El riego por aspersión y su tecnología. Edición Mundi Prensa, Madrid, España. 3ª Edición. 569 p.
- Tarjuelo, J. M.; Montero, J.; Honrubia, F. T.; Ortiz, J. J. and Ortega, J. F. 1999. Analysis of uniformity of sprinkle irrigation in a semi-arid area. *Agric. Water Manag.* 40:315-331.
- Tun, D. J. de la C.; Ramírez, J. G.; Sánchez, C. I.; Lomas, B. T. L. y Cano, G. A. de J. 2011. Diagnóstico y evaluación de sistemas de riego en el Distrito 048 Ticul, Yucatán. *Rev. Mex. Cienc. Agríc. Pub. Esp.* 1:5-18.
- Yacoubi S.; Zayani K.; Slatni A. and Playán, E. 2012. Assessing sprinkler irrigation performance using field evaluations at the medjerda lower valley of tunisia. *Engineering.* 4:682-691.
- Zhang, L. and Merkle, G. P. 2012. Relationships between common irrigation application uniformity indicators. *Irrig. Sci.* 30:83-88.