

EFICIENCIA DE APLICACIÓN DE AGUA EN LA SUPERFICIE Y EN EL PERFIL DEL SUELO EN UN SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSIÓN

EFFICIENT WATER APPLICATION ON SOIL SURFACE AND IN THE SOIL PROFILE IN A SPRINKLER IRRIGATION SYSTEM

Natalia Flórez-Tuta*, Ivo Zution-Gonçalves, Daniel Rodrigues-Calvacante Feitosa, E. Augusto Agnellos-Barbosa, Fabio Ponciano-de Deus, Maycon Diego-Ribeiro, Edson Eiji-Matsura

Universidad Estadual de Campinas, Facultad de Ingeniería Agrícola, Departamento de Agua y suelo, Av. Candido Rondon, 501, Barão Geraldo-Campinas /SP, Cidade Universitária Zeferino Vaz, CEP 13083-875. (natalia1_t@yahoo.es)

RESUMEN

Aplicaciones insuficientes o excesivas de agua se deben a dimensionamientos inadecuados de sistemas de riego, ocasionando pérdidas de agua y limitan su eficiencia. Así, la agricultura irrigada se debe realizar eficientemente adoptando prácticas para racionalizar el uso del agua, haciéndola ambiental y económicamente sostenible. El objetivo del presente estudio fue evaluar la calidad de aplicación de agua en la superficie y en el perfil de un Oxisol, después del riego por aspersión convencional, utilizando la técnica de la TDR para monitorear el contenido de agua en el suelo. En campo se instalaron 196 colectores con espaciamiento de 2 m entre ellos y formando una malla con formato cuadrado. Con los datos recolectados se simuló superposiciones con diversos espaciamientos entre aspersores, determinando para cada espaciamiento la uniformidad y eficiencia de aplicación de agua; para esta última se usó un modelo matemático lineal. La uniformidad de distribución de agua fue mayor para los menores espaciamientos entre aspersores en la superficie y en el perfil del suelo. El coeficiente de uniformidad de distribución del agua en el perfil del suelo fue mayor que el obtenido para las láminas precipitadas en los colectores, en los espaciamientos 6x6 m y 6x12 m y menor en los demás espaciamientos. El análisis de los coeficientes de uniformidad y de las eficiencias de aplicación y almacenamiento de agua en el suelo, para diferentes simulaciones de espaciamientos entre aspersores, permite tomar decisiones en relación a la disposición de los aspersores en campo y en el uso del agua para riego de forma más confiable.

Palabras clave: uniformidad, modelo lineal, lámina infiltrada.

ABSTRACT

Insufficient or excessive water applications are due to inadequate measurements of irrigation systems, causing water losses and limiting their efficiency. Thus, irrigated agriculture must be performed efficiently, adopting practices to rationalize the use of water, making it environmentally and economically sustainable. The objective of this study was to evaluate the quality of water application on the surface and profile of an Oxisol, after irrigation through conventional sprinkler, using the TDR technique to monitor the water content in the soil. In the field 196 collectors were installed with 2 m of space between them and forming a mesh with a square format. With the data collected, superpositions were simulated with various spacings between sprinklers, determining for each spacing the uniformity and efficiency of water application; for the latter, a linear mathematical model was used. The uniformity of water distribution was greater for the smaller spacing between sprinklers on the soil surface and profile. The coefficient of uniformity of water distribution in the soil profile was higher than that obtained for sheets precipitated in the collectors, in the 6x6 and 6x12 spacings and lower in the other spacings. The analysis of uniformity coefficients and efficiencies of water application and storage in the soil, for different simulations of spacings between sprinklers, allows making decisions with regards to the disposition of sprinklers in the field and for the more reliable use of water for irrigation.

Keywords: uniformity, linear model, infiltration sheet.

INTRODUCTION

The agricultural sector carries out the greatest consumption of water in the world and, therefore, irrigated agriculture must be

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: agosto, 2012. Aprobado: enero, 2013.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 47: 107-119. 2013.

INTRODUCCIÓN

El sector agrícola realiza el mayor consumo de agua en el mundo y por tanto la agricultura irrigada debe ser eficiente para tener sostenibilidad ambiental y económica. Un parámetro principal para evaluar sistemas de riego es la uniformidad de aplicación de agua en la superficie del área irrigada, reflejándose directamente en el manejo y desempeño del cultivo, en la calidad y cantidad de los productos, en la eficiencia del uso del agua, en el costo del riego y por tanto de la producción (Bernardo *et al.*, 2009).

Una baja uniformidad de aplicación de agua causa crecimiento desigual de las plantas y en algunos casos contaminación del suelo con sales, lo cual repercute en la degradación del suelo (Cunha *et al.*, 2008). Esto se relaciona con el exceso de agua en el suelo que causa lixiviación de nutrientes, reducción en la concentración de oxígeno disponible para las raíces y aumento en la incidencia de plagas y enfermedades; además, la escasez de agua aumenta los riesgos de salinización del suelo e inhibe el potencial productivo de las plantas (Paulino *et al.*, 2009). El movimiento del agua a través de los poros del suelo aumenta la humedad en profundidad, a expensas de las profundidades más superficiales humedecidas inicialmente y mejora la calidad del riego, lo que puede estar en disonancia con la evaluada en la superficie (Reichardt, 1996).

El primer coeficiente de uniformidad propuesto por Christiansen (1942) adoptó la desviación media como medida de dispersión (CUC), mientras que el coeficiente de uniformidad de distribución (CUD; Criddle *et al.*, 1956) considera la razón entre la media del 25 % de los menores valores de las láminas de irrigación y la lámina media recolectada. Bajos valores de CUC y CUD pueden deberse a diseños incorrectos de los sistemas de riego que limitan su desempeño y funcionamiento óptimo (Buendía *et al.*, 2004.)

La eficiencia de riego es un concepto usado en proyectos y en el manejo de sistemas de riego. La calidad del riego se evalúa con base en indicadores de desempeño como eficiencia y uniformidad y mediante índices de productividad de agua que relacionan el rendimiento de los cultivos y el valor económico de la producción por unidad de lámina de agua aplicada o consumida (Lorite *et al.*, 2004; Bos *et al.*, 2005). De esta forma, durante la operación del sistema de riego los valores de uniformidad de aplicación y de

eficiente to have environmental and economic sustainability. A principal parameter to evaluate irrigation systems is uniformity in water application on the surface of the area irrigated, reflecting directly in the management and performance of the crop, in the quality and quantity of the products, in the efficiency of water use, in the cost of irrigation and thus of production (Bernardo *et al.*, 2009).

A low uniformity of water application causes an irregular growth of plants and in some cases pollution of the soil with salts, which has an impact on the soil degradation (Cunha *et al.*, 2008). This is related with water excess in the soil that causes lixiviation of nutrients, reduction in the concentration of oxygen available for roots, and an increase in the incidence of plagues and diseases; in addition, water scarcity increases the risks of soil salinization and inhibits the productive potential of plants (Paulino *et al.*, 2009). The movement of water through pores in the soil increases in-depth humidity, at the expense of more superficial depths that are initially dampened, and improves irrigation quality, which can be in dissonance with the one evaluated on the surface (Reichardt, 1996).

The first coefficient of uniformity proposed by Christiansen (1942) adopted the average deviation as a dispersion measure (CUC), while the coefficient of uniformity of distribution (CUD; Criddle *et al.*, 1956) takes the rate between the average of 25 % of the lowest values of the irrigation depth and the average depth collected. Lower values of CUC and CUD can be due to incorrect designs of the irrigation systems that limit their performance and optimal functioning (Buendía *et al.*, 2004).

Irrigation efficiency is a concept used in projects and in the management of irrigation systems. Quality of irrigation is evaluated based on performance indicators such as efficiency and uniformity and through water productivity indexes that relate the yield of crops and the economic value of production per unit of water depth applied or consumed (Lorite *et al.*, 2004; Bos *et al.*, 2005). Therefore, during the operation of irrigation systems, the values of uniformity of application and distribution must be high and the losses low in order to obtain high efficiency values.

The efficiency of irrigated water application is a parameter that quantifies how much the water applied is truly used. This parameter is subdivided

distribución deben ser altos y las pérdidas bajas para obtener altos valores de eficiencia.

La eficiencia de aplicación de agua irrigada es un parámetro que cuantifica cuanto del agua aplicada es realmente utilizada. Este parámetro es subdividido en eficiencia de aplicación (E_a), eficiencia de almacenamiento (E_s), pérdida por percolación debajo de la zona radicular (P_p) y déficit de agua en el suelo (D). La E_a indica la cantidad de agua incorporada al suelo hasta la profundidad de estudio, en relación con la cantidad total de agua aplicada por el sistema de riego; así, la diferencia entre éstas indica el volumen de agua perdido por percolación o por evaporación. La E_s muestra la relación entre el volumen de agua almacenado y el requerido para una determinada profundidad del suelo, y la diferencia de estos volúmenes es un indicador de déficit (Zocoler *et al.*, 2004).

Para evaluar la calidad del riego a partir del análisis de distribución de agua en el suelo, se realizan ajustes de la relación entre la lámina de agua infiltrada y el área irrigada usando modelos matemáticos que permiten la simulación del desempeño de un sistema con otro tipo de manejo de irrigación (Fietz *et al.*, 1999). El modelo lineal sugerido por Karmeli (1978) es usado en el estudio de padrones de precipitación de aspersores en función de la eficiencia, uniformidad de distribución, percolación profunda y otros parámetros de riego, relacionando la curva de frecuencia acumulada adimensional de la lámina de infiltración con la fracción del área irrigada, mediante regresión lineal.

La técnica de TDR (Time Domain Reflectometry) es adecuada para medir la humedad del suelo porque permite realizar mayor número de lecturas en menos tiempo, proporciona repeticiones de las lecturas, no es destructivo, es portátil y de fácil acoplamiento a dispositivos recolectores de datos, permite automatización y las mediciones se realizan en tiempo real, en condiciones de laboratorio o de campo en cualquier dirección o perfil del suelo (Topp *et al.*, 1980; Coelho y Arruda, 2001; Souza *et al.*, 2004).

De acuerdo con lo expuesto, el objetivo del presente estudio fue evaluar la calidad del riego para diferentes simulaciones de ubicaciones entre aspersores, por medio de la uniformidad y eficiencia de aplicación de agua, en la superficie y en el perfil de un Oxisol, después del riego por aspersión, utilizando la técnica de la TDR para monitorear la humedad.

into application efficiency (A_e), storage efficiency (S_e), loss through percolation under the radicular zone (L_p) and water deficit in the soil (D). The A_e indicates the amount of water incorporated into the soil up to the depth of study, in relation to the total amount of water applied by the irrigation system; thus, the difference between these indicates the volume of water lost through percolation or through evaporation. The S_e shows the relationship between the volume of water stored and that required for a specific depth of the soil, and the difference in these volumes is an indicator of deficit (Zocoler *et al.*, 2004).

In order to evaluate the quality of irrigation from the analysis of water distribution in the soil, adjustments are carried out to the relationship between the infiltrated water depth and the area irrigated, by using mathematical models that allow the simulation of the performance of a system with another type of irrigation management (Fietz *et al.*, 1999). The linear model suggested by Karmeli (1978) is used in the study of patterns of precipitation from sprinklers in function of the efficiency, uniformity of distribution, deep percolation and other irrigation parameters, relating the curve of adimensional accumulated frequency of the infiltration depth with the fraction of the area irrigated, through linear regression.

The TDR technique (Time Domain Reflectometry) is adequate to measure humidity in the soil because it allows carrying out a higher number of readings in less time, it provides repetitions of the readings, is not destructive, is portable and of easy fitting to data-collecting devices, it allows automatization and the measurements are carried out in real time, under laboratory or field conditions in any direction or soil profile (Topp *et al.*, 1980; Coelho and Arruda, 2001; Souza *et al.*, 2004).

Based on what has been stated, the objective of this study was to evaluate the quality of irrigation for different simulations of placings between sprinklers, through uniformity and efficiency in water application, on the surface and profile of an Oxisol, after sprinkler irrigation, using the TDR technique to monitor the humidity.

MATERIALS AND METHODS

The experiment was carried out in October 2011, in the experimental field of the Agricultural Engineering School at

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en octubre del 2011 en el campo experimental de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Estadual de Campinas, en Campinas, SP, Brasil, 22° 53' S, 47° 05' O y altitud media de 620 m. Según la clasificación de Köppen el clima de la región es Cwa/Cfa (subtropical/tropical de altitud), con temperatura media anual de 22.3 C, humedad relativa y precipitación media anual de 62 % y 1425 mm. El suelo del área experimental, de topografía homogénea y sin cobertura vegetal, fue clasificado como Oxisol (Soil Survey Staff, 2010) de acuerdo con las características físico-hídricas descritas en el Cuadro 1.

Antes de realizar el presente experimento se hicieron análisis para determinar el tiempo máximo de riego (sin percolación de agua abajo de 0.15 m, profundidad establecida para evaluar la humedad del suelo), área mojada (para el aspersor instalado a 0.6 m de altura), número de colectores necesarios para cubrir el área mojada y presión de servicio para las condiciones establecidas.

Para el experimento se usó un aspersor de ½ pulgada, boquilla azul de 3.5×2.5 mm, con las características de operación dadas por el fabricante: caudal 1115 a 1,430 m³ h⁻¹, diámetro de mojado 23 a 26 m, presión de servicio 200 a 400 Kpa. La presión de operación del aspersor seleccionada fue 300 kPa.

La línea lateral tenía tubos PVC DN 50 con 6 m de largo. Al final de la línea de lateral se instaló un tubo de elevación de PVC (½ pulgada), con 0.6 m de altura, que conducía el agua hasta el emisor en el centro de la malla de colectores. Para controlar la presión y el caudal de entrada al emisor se instalaron un registro de cortina, un regulador de presión y un manómetro tipo Bourdon.

En campo se instalaron 196 colectores (0.08 m diámetro cada uno) para captar el agua rociada por el aspersor en la superficie del suelo, con espacio de 2 m entre ellos y formando una malla cuadrada (26×26 m). Los colectores fueron fijados en campo usando varillas metálicas instaladas a 0.40 m del suelo. Durante el experimento la velocidad del viento se midió cada 15 min con un anemómetro en el área experimental a 2 m de altura del suelo. A

Universidad Estadual de Campinas, in Campinas, SP, Brazil, 22° 53' S, 47° 05' W and average altitude of 620 m. According to the Köppen classification, climate in the region is Cwa/Cfa (subtropical/altitude tropical), with an annual mean temperature of 22.3 °C, relative humidity and annual mean precipitation of 62 % and 1425 mm. The soil in the experimental area, of homogeneous topography and without plant coverage, was classified as Oxisol (Soil Survey Staff, 2010) according to the physical-hydric characteristics described in Table 1.

Before carrying out this experiment, analyses were performed to determine the maximum irrigation time (without water percolation under 0.15 m, depth established to evaluate soil humidity), damp area (for the sprinkler installed at 0.6 m height), number of collectors necessary to cover the damp area and service pressure for the conditions established.

For the experiment a ½ inch sprinkler was used, blue nozzle of 3.5×2.5 mm, with the operation characteristics given by the manufacturer: flow of 1,115 to 1,430 m³ h⁻¹, diameter of dampness of 23 to 26 m, service pressure of 200 to 400 Kpa. The operation pressure for the sprinkler selected was 300 kPa.

The lateral line had PVC DN 50 pipes of 6 m length. At the end of the lateral line a PVC (½ inch) elevation pipe was installed, with 0.6 m height, which led water to the emitter at the center of the collector mesh. In order to control pressure and flow to the entrance of the emitter, a curtain record, a pressure regulator and a Bourdon type manometer were installed.

In the field, 196 collectors were installed (0.08 m of diameter each) to capture water sprayed by the sprinkler on the soil surface, with spacing of 2 m between them and forming a square mesh (26×26 m). The collectors were fixed on the field using metallic spokes installed at 0.40 m height from the soil. During the experiment the wind speed was measured every 15 min with an anemometer in the experimental area at 2 m height from the soil. At 1 m of distance from the experimental area, a collector with 100 mL of water was placed, to quantify losses from evaporation.

With the depths collected at each point of the mesh and the time of the trial, the intensity of water application from the sprinkler was calculated (Equation 1), under conditions

Cuadro 1. Características físico-hídricas del suelo del área experimental.
Table 1. Physical-hydric characteristics of the soil in the experimental area.

Profundidad (m)	Ds (kg m ⁻³)	Pt (%)	Arcilla	Limo (g kg ⁻¹)	Arena	CC (m ³ m ⁻³)	PMP	Ks (m h ⁻¹)
0.0 - 0.20	1306	51	580	170	250	0.40	0.27	0.032

Ds: densidad del suelo; Pt: porosidad total; CC: humedad en capacidad de campo; PMP: humedad en punto de marchitez permanente; Ks: conductividad saturada ♦ Ds: soil density; Pt: total porosity; CC: humidity in field capacity; PMP: humidity at permanent point of withering; Ks: saturated conductivity.

1 m de distancia del área experimental se colocó un colector con 100 mL de agua para cuantificar las pérdidas por evaporación.

Con las láminas colectadas en cada punto de la malla y el tiempo del ensayo, se calculó la intensidad de aplicación de agua del aspersor (ecuación 1), en condiciones mínimas de viento ($<2\text{ m s}^{-1}$), obteniendo 6.6 mm h^{-1} como valor máximo de la intensidad ($I_{\text{máx}}$):

$$I = \frac{L}{t} \quad (1)$$

donde I es la intensidad de aplicación de agua (mm h^{-1}), L es la lámina colectada (mm), t es el tiempo de duración del ensayo preliminar.

Para monitorear la humedad del suelo se usó la técnica TDR (Topp *et al.*, 1980) con un equipo TDR 100 portátil con interfaz RS232 y recolector de datos (CR1000) para realizar automáticamente la lectura de la constante dieléctrica aparente (K_a). La sonda usada en el experimento tenía tres varillas de acero inoxidable (cada una 0.15 m de largo útil) según la profundidad de estudio (Figura 1). Bizari *et al.* (2011) describen los detalles del equipo.

El dispositivo TDR y consecuentemente el valor de la constante dieléctrica fueron calibrados en función de los límites de humedad establecidos, que en el presente experimento está entre la humedad en capacidad de campo y punto de marchitez permanente (0.47 y $0.27\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$) para la profundidad de estudio que es 0.15 m, conforme a la ecuación (2):

$$\theta = -0.003428 K_a^3 + 0.2204 K_a^2 - 2.864 K_a + 34.49 \quad (2)$$

donde θ es la humedad volumétrica del suelo y K_a es la constante dieléctrica aparente.

La capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo se calculó para la profundidad de evaluación establecida, de acuerdo con la ecuación (3) (Bernardo *et al.*, 2009):

$$A_{\text{máx}} = (\theta_{cc} - \theta_i) - z \quad (3)$$

donde $A_{\text{máx}}$ es la capacidad de almacenamiento máximo de agua en el suelo (mm), θ_{cc} es la humedad del suelo en capacidad de campo ($\text{m}^3\text{ m}^{-3}$), θ_i es la humedad inicial del suelo ($\text{m}^3\text{ m}^{-3}$), z es la profundidad de evaluación (mm).

La recolección de los datos con el TDR portátil se realizó antes y después del riego en 64 puntos distribuidos uniformemente (cada punto representaba 4 m^2). Mediante geoestadística realizada a través de interpolación con la técnica de Kriging, usando

of minimum wind ($<2\text{ m s}^{-1}$), obtaining 6.6 mm h^{-1} as the maximum value of intensity (I_{max}):

$$I = \frac{L}{t} \quad (1)$$

where I is the intensity of water application (mm h^{-1}), L is the sheet collected (mm), t is the time of duration of the preliminary trial.

In order to monitor the soil humidity, the TDR technique was used (Topp *et al.*, 1980) with a portable TDR 100 equipment with RS232 interface and data collector (CR1000) to carry out the reading automatically of the apparent dielectric constant (K_a). The probe used in the experiment had three stainless steel pokes (each one of 0.15 m useful length), according to the depth in study (Figure 1). Bizari *et al.* (2011) described the details of the equipment.

The TDR device and consequently the value of the dielectric constant were calibrated in function of the humidity limits established, which in this experiment is between the humidity in the field capacity and the point of permanent wilting (0.47 and $0.27\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$) for the depth of the study, which is 0.15 based on Equation (2):

$$\theta = -0.003428 K_a^3 + 0.2204 K_a^2 - 2.864 K_a + 34.49 \quad (2)$$

where θ is the volumetric humidity of the soil and K_a is the apparent dielectric constant.

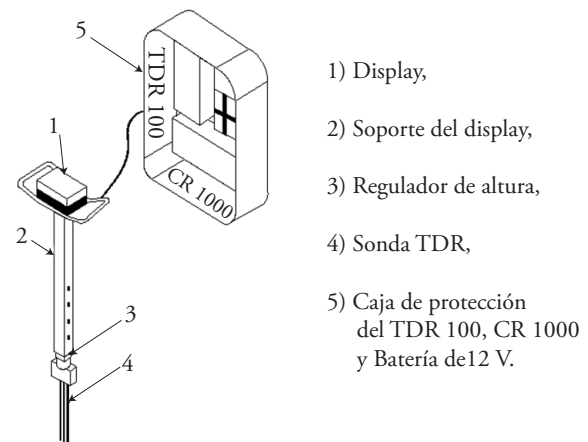


Figura 1. Equipo TDR 100 portátil para la medición del contenido de agua en el suelo. Adaptado de Bizari *et al.* (2011).

Figure 1. Portable TDR 100 equipment for measuring the water content in the soil. Adapted from Bizari *et al.* (2011).

el software SURFER® (Golden Software, Inc.), se calculó la humedad del suelo en otros puntos de la malla, donde no se midió con el TDR, a través de la construcción de un semivariograma experimental. Al calcular la semivarianza de cada punto en relación a los demás, se estimó el modelo de variograma que mejor se aproximó a la curva obtenida, y se usó el modelo matemático esférico (Ecuación 4);

$$\vartheta = C_0 + C \left[1.5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]; 0 < h < a \quad (4)$$

donde ϑ es la varianza, C_0 es el nugget, a es el silo, $C_0 + C$ es la variancia asintótica y h es la distancia de separación.

El tiempo de aplicación de agua por el aspersor fue calculado con la ecuación (5) (Bernardo *et al.*, 2009):

$$Ti = \frac{A_{m\acute{a}x}}{I_{m\acute{a}x}} \quad (5)$$

donde Ti es el tiempo de aplicación de agua o riego (h), $A_{m\acute{a}x}$ es la capacidad de almacenamiento máximo de agua en el suelo (mm), $I_{m\acute{a}x}$ es la intensidad máxima de aplicación de agua ($mm\ h^{-1}$).

Transcurrido el tiempo total de aplicación de agua se suspendió el riego, iniciando las lecturas del volumen de agua de los colectores (lámina precipitada) utilizando una probeta graduada en mL. El contenido de agua del suelo en la profundidad de 0.15 m se midió usando el TDR portátil descrito anteriormente. Esta profundidad se estableció considerando la longitud de la sonda TDR la cual no podía ser mayor debido a la dificultad para introducir la sonda en el suelo y recolectar datos.

Con una probeta se midió el volumen de agua del colector para medir el agua evaporada. La lámina infiltrada en cada cuadrante se calculó como la diferencia entre los valores de humedad obtenidos antes y después del riego.

Con las láminas precipitadas e infiltradas se simularon sobrepuestas en escenarios con diferentes espaciamientos entre aspersores (6×6 m, 6×12 m, 12×12 m, 12×18 m, 18×18 m, 18×24 m, 24×24 m, 24×30 m y 30×30 m) usando el software Catch 3D. Éste es un modelo matemático que analiza estadísticamente el desempeño de aspersores con base en los cálculos de uniformidad de distribución y eficiencia de aplicación de agua. Para cada espaciamiento se calculó CUC y CUD, expresados por las ecuaciones (6) y (7):

$$CUC = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - X_m|}{n \cdot X_m} \right] \cdot 100 \quad (6)$$

The maximum capacity of water storage in the soil was calculated for the depth of evaluation established, based on Equation (3) (Bernardo *et al.*, 2009):

$$A_{m\acute{a}x} = (\theta_{cc} - \theta_i) - z \quad (3)$$

where $A_{m\acute{a}x}$ is the maximum water storage capacity in the soil (mm), θ_{cc} is the soil humidity at field capacity ($m^3\ m^{-3}$), θ_i is the initial soil humidity ($m^3\ m^{-3}$), z is the depth of evaluation (mm).

Data collection with the portable TDR was carried out before and after irrigation at 64 points uniformly distributed (each point represented 4 m²). Through geostatistics performed by interpolation with the Kriging technique, using the SURFER® software (Golden Software, Inc.), the soil humidity was calculated in other points of the mesh, where it was not measured with the TDR, through the construction of an experimental semi-variogram. When calculating the semi-variance of each point in relation to the others, the variogram model that best approached the curve obtained was estimated, and the spherical mathematical model was used (Equation 4):

$$\vartheta = C_0 + C \left[1.5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]; 0 < h < a \quad (4)$$

where ϑ is the variance, C_0 is the nugget, a is the silo, $C_0 + C$ is the asymptotic variance and h is the separation distance.

The water application time by the sprinkler was calculated according to Equation (5) (Bernardo *et al.*, 2009):

$$Ti = \frac{A_{m\acute{a}x}}{I_{m\acute{a}x}} \quad (5)$$

where Ti is the time of water application or irrigation (h), $A_{m\acute{a}x}$ is the maximum water storage capacity in the soil (mm), $I_{m\acute{a}x}$ is the maximum intensity for water application ($mm\ h^{-1}$).

After the total time of water application had passed, irrigation was suspended, and the water volume readings from collectors (precipitated depth) began, using a graduated pipette in mL. The water content in the soil at a depth of 0.15 m was measured with the portable TDR described before. This depth was established by considering the length of the TDR probe which could not be longer due to the difficulty for introducing the probe into the soil and collecting the data.

With a test tube, the water volume from the collector was measured, to measure the water evaporated. The infiltrated depth

donde CUC es el coeficiente de uniformidad de Christiansen (%), n es el número de colectores, X_i es la lámina precipitada en el i -ésimo colector (mm), X_m es el valor medio de las láminas precipitadas (mm).

$$CUD = \frac{X_{25}}{X_m} \cdot 100 \quad (7)$$

donde CUD es el coeficiente de uniformidad de distribución (%), X_{25} es la media de 25 % del total de colectores con las menores láminas (mm).

Para interpretar los valores obtenidos de CUC y CUD se usaron los parámetros de clasificación presentados en el Cuadro 2 (Bernardo *et al.*, 2006).

La eficiencia de aplicación (E_a) y de almacenamiento (E_s), pérdidas por percolación (P_p) y déficit (D), se calcularon usando el modelo matemático lineal descrito por Karmeli *et al.* (1978). La lámina requerida para cada sobreposición, la lámina bruta y el tiempo de riego se calcularon con las ecuaciones (8), (9) e (10):

$$Y_r = \frac{LB}{L} \quad (8)$$

donde Y_r es lámina requerida (adimensional), LB es lámina bruta (mm) e, L es lámina media infiltrada o precipitada para cada una de las sobreposiciones (mm).

$$LB = \frac{LLR}{\varepsilon} \quad (9)$$

donde LB es lámina bruta (mm), LLR es lámina líquida de riego (mm), ε es eficiencia de aplicación adoptada correspondiente a 80 % para riego por aspersión (Bernardo *et al.*, 2009).

in each quadrant was calculated as the difference between the humidity values obtained before and after the irrigation.

With the precipitated and infiltrated depth, superpositions were simulated in scenarios with different spacings between sprinklers (6×6 m, 6×12 m, 12×12 m, 12×18 m, 18×18 m, 18×24 m, 24×24 m, 24×30 m and 30×30 m) using the Catch 3D software. This is a mathematical model that analyzes statistically the performance of sprinklers based on calculations of uniformity of distribution and efficiency of water application. For each spacing, CUC and CUD were calculated, expressed by Equations (6) and (7):

$$CUC = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - X_m|}{n \cdot X_m} \right] \cdot 100 \quad (6)$$

where CUC is the Christiansen uniformity coefficient (%), n is the number of collectors, X_i is the precipitated depth in the i -th collector (mm), X_m is the average value of the precipitated depth (mm).

$$CUD = \frac{X_{25}}{X_m} \cdot 100 \quad (7)$$

where CUD is the distribution uniformity coefficient (%), X_{25} is the mean of 25 % of the total collectors with the lower depth (mm).

To interpret the values obtained by CUC and CUD , the parameters of classification presented in Table 2 were used (Bernardo *et al.*, 2006).

The efficiency of application (E_a) and of storage (E_s), the losses from percolation (P_p) and the deficit (D), were calculated using the linear mathematical model described by Karmeli *et al.* (1978). The depth required for each superposition, the gross

Cuadro 2. Parámetros de clasificación del desempeño de sistemas de riego por aspersión, con base en los coeficientes de uniformidad de Christiansen (CUC) y de distribución (CUD).

Table 2. Parameters of classification of the performance of irrigation systems by sprinklers, based on the Christianse (CUC) and distribution (CUD) coefficients of uniformity.

	Excelente	Bueno	Razonable	Malo	Inaceptable
CUC (%)	> 90	80 – 90	70 - 80	60 - 70	< 60
CUD (%)	> 84	68 – 84	52 - 68	36 - 52	< 36

Bernardo *et al.* (2006).

$$TR = \frac{LB}{I_{m\acute{a}x}} \tag{10}$$

donde *TR* es tiempo de riego (h), *LB* es lámina bruta (mm), *I_{máx}* es intensidad máxima de aplicación de agua (mm h⁻¹).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores obtenidos de los parámetros de riego se presentan en el Cuadro 3. El volumen de agua evaporada, medida en el colector dispuesto cerca del experimento fue nula, lo cual puede estar en función de la hora en que se realizó el ensayo.

Los resultados obtenidos de *Yr*, *CUC*, *CUD*, *Ea*, *Es*, *Pp* y *D*, a partir de las láminas precipitadas e infiltradas, para los diferentes espaciamientos entre aspersores, se presentan en los Cuadro 4 y Cuadro 5. El comportamiento de los valores de *CUC* y *CUD* fue inversamente proporcional al espaciamiento entre aspersores, tanto para la lámina precipitada como para la infiltrada, es decir, a mayor espaciamiento los valores de los coeficientes son menores. Esto se debe a que con mayor espaciamiento entre aspersores el área irrigada aumenta, pero el radio de alcance del aspersor se mantiene constante dejando partes sin irrigar. Estos resultados son similares a los reportados por Rezende *et al.* (2002) al evaluar el *CUC* en la superficie y en el perfil del suelo hasta una profundidad de 0.40 m, usando tensiómetros para medir el contenido de agua en el suelo y simulando diferentes espaciamientos.

De acuerdo con los parámetros de clasificación presentados en el Cuadro 2 (Bernardo *et al.*, 2006), las uniformidades de aplicación fueron: 1) excelentes en 6×6 y 6×12 m para la lámina precipitada y para la infiltrada; 2) en 12×12 m bueno para la lámina

depth and the time of irrigation were calculated with Equations (8), (9) and (10):

$$Yr = \frac{LB}{\bar{L}} \tag{8}$$

where *Yr* is the depth required (adimensional), *LB* is the gross depth (mm), \bar{L} and is the average infiltrated or precipitated depth, for each one of the superpositions (mm).

$$LB = \frac{LLR}{\epsilon} \tag{9}$$

where *LB* is the gross depth (mm), *LLr* is the liquid irrigation depth (mm), ϵ is the efficiency of application adopted corresponding to 80 % for irrigation by sprinkler (Bernardo *et al.*, 2009).

$$TR = \frac{LB}{I_{m\acute{a}x}} \tag{10}$$

where *TR* is the irrigation time (h), *LB* is the gross depth (mm), *I_{máx}* is the maximum intensity of water application (mm h⁻¹).

RESULTS AND DISCUSSION

The values obtained from the irrigation parameters are presented in Table 3. The volume of water evaporated, measured in the collector placed near the experiment was void, which can be in function of the time when the trial was performed.

The results obtained for *Yr*, *CUC*, *CUD*, *Ea*, *Es*, *Pp* and *D*, from the perecipitated depth, for different

Cuadro 3. Parámetros de riego obtenidos para las condiciones del experimento.

Table 3. Irrigation parameters obtained for the experiment conditions.

θ_i (%)	θ_{cc} (%)	Efa (%)	ATD	LLR (mm)	LB	<i>I_{máx}</i> (mm/h)	Tr (h)	Vv (Km/h)	Hr	Ac (m ²)
31.84	40	80	12.24	12.24	0.15	6.6	2:32	0	4:00 - 6:30 a.m.	0.00503

θ_i : humedad inicial; θ_{cc} : humedad en capacidad de campo (0 a 15 cm); Efa: eficiencia adoptada (Bernardo *et al.*, 2009); ATD: agua total disponible; LLR: lámina líquida de riego; LB: lámina bruta, *I_{máx}*: intensidad máxima de aplicación de agua; Tr: tiempo de riego; Vv: velocidad del viento; Hr: horario de riego; Ac: área del colector ♦ θ_i : initial humidity; θ_{cc} : humidity at field capacity (0 to 15 cm); Efa: adopted efficiency (Bernardo *et al.*, 2009); ATD: total water available; LLR: liquid irrigation depth; LB: gross depth; *I_{máx}*: maximum intensity of water application; Tr: time of irrigation; Vv: wind velocity; Hr: irrigation schedule; Ac: area of collector.

Cuadro 4. Resultados de la lámina requerida, coeficientes de uniformidad, eficiencias de aplicación y almacenamiento, pérdidas por percolación y déficit, de la lámina precipitada en los diferentes espaciamientos entre aspersores.

Table 4. Results from depth required, coefficients of uniformity, efficiencies of application and storage, losses from percolation and deficit, from the precipitated depth in different spacings between sprinklers.

Espaciamiento (m)	Yr	CUC	CUD	Ea	Es	Pp	D
		(%)					
6x6	0.2	94	91	20	100	81	0
6x12	0.4	92	87	39	100	62	0
12x12	0.8	89	82	78	100	22	0
12x18	1.2	76	68	95	82	5	18
18x18	1.8	72	52	100	57	0	43
18x24	2.4	45	16	100	43	0	57
24x24	3.1	31	4	100	33	0	67
24x30	3.9	11	0	100	28	0	72
30x30	5.0	0	0	100	30	0	70

Yr: lámina requerida; CUC: coeficiente de uniformidad de Christiansen; CUD: coeficiente de uniformidad de distribución; Ea: eficiencia de aplicación; Es: eficiencia de almacenamiento; Pp: pérdidas por percolación; D: déficit. ♦ Yr: depth required; CUC: Christiansen coefficient of uniformity; CUD: distribution coefficient of uniformity; Ea: efficiency of application; Es: efficiency of storage; Pp: losses from percolation; D: deficit.

precipitada y regular para la infiltrada; 3) en 12x18 m, regular para la lámina precipitada e insuficiente para la infiltrada; 4) en 18x18 m, regular para la lámina precipitada y malo para la infiltrada; 5) en las demás sobreposiciones fue insuficiente para las dos láminas.

De la misma forma, los valores obtenidos del CUD fueron clasificados como: 1) excelentes para la lámina precipitada y para la infiltrada, en 6x6 y 6x12 m; 2) razonables para la lámina infiltrada, en 12x12; 3) insuficientes en las demás sobreposiciones. Para la lámina precipitada en las sobreposiciones 12x12 y 12x18 m el CUD fue clasificado como bueno, para 18x18 m como razonable y a partir de ésta los demás valores fueron insuficientes.

Al comparar los coeficientes calculados se verifica que el CUD es sensible a las variaciones en la distribución de agua de un sistema de riego por aspersión porque considera apenas la media del menor cuartil del total de datos. Paulino *et al.* (2009) muestran una observación similar al evaluar sistemas de riego por aspersión en cultivo de solanáceas irrigadas y usando varios coeficientes de uniformidad de agua en el suelo.

Cuadro 5. Resultados de la lámina requerida, coeficientes de uniformidad, eficiencias de aplicación y almacenamiento, pérdidas por percolación y déficit, de la lámina infiltrada en los diferentes espaciamientos entre aspersores.

Table 5. Results from depth required, coefficients of uniformity, efficiencies of application and storage, losses from percolation and deficit, from the infiltrated depth in different spacings between sprinklers.

Espaciamiento (m)	Yr	CUC	CUD	Ea	Es	Pp	D
		(%)					
6x6	0.2	98	97	15	100	86	0
6x12	0.3	96	95	29	100	71	0
12x12	0.6	73	59	57	99	44	1
12x18	0.9	57	32	70	81	30	19
18x18	1.3	62	32	92	71	8	29
18x24	1.8	32	5	94	55	6	45
24x24	2.4	20	0	99	45	1	55
24x30	2.9	1	0	100	37	0	63
30x30	3.6	0	0	100	31	0	69

Yr: lámina requerida; CUC: coeficiente de uniformidad de Christiansen; CUD: coeficiente de uniformidad de distribución; Ea: eficiencia de aplicación; Es: eficiencia de almacenamiento; Pp: pérdidas por percolación; D: déficit ♦ Yr: depth required; CUC: Christiansen coefficient of uniformity; CUD: distribution coefficient of uniformity; Ea: efficiency of application; Es: efficiency of storage; Pp: losses from percolation; D: deficit.

spacings between sprinklers, are presented in Table 4 and Table 5. The behavior of CUC and CUD values was inversely proportional to spacing between sprinklers, both for the precipitated depth and for the infiltrated one, that is, the greater the spacing the coefficient values are lower. This is because with greater spacing between sprinklers the irrigated area increases, but the radius of reach for the sprinkler is kept constant leaving parts without irrigating. These results are similar to those reported by Rezende *et al.* (2002) when evaluating the CUC on the soil surface and profile to a depth of 0.40 m, using tensiometers to measure the water content in the soil and simulating different spacings.

According to the parameters of classification presented in Table 2 (Bernardo *et al.*, 2006), the uniformities in application were: 1) excellent in 6x6 and 6x12 m for the precipitated and infiltrated depth; 2) in 12x12 m good for the precipitated depth and fair for the infiltrated; 3) in 12x18 m, fair for the precipitated depth and insufficient for the infiltrated; 4) in 18x18 m, fair for the precipitated depth and

Para las condiciones del presente estudio y con el fin de obtener valores adecuados de CUC para sistema de riego por aspersión (> 80 %), los espaciamientos máximos que se podrían usar son 12×12 (lámina precipitada) y 6×12 m (lámina infiltrada). De acuerdo con lo anterior, la distribución de agua en el suelo es diferente de la observada en la superficie por lo cual se debe considerar los valores de la lámina infiltrada para el dimensionamiento y manejo del sistema de riego.

Los coeficientes de uniformidad Christiansen (CUC) y de distribución (CUD) para las láminas precipitadas e infiltradas se presentan en la Figura 2 (A y B). La correlación fue alta entre los valores CUC (Figura 2A) para las láminas precipitadas e infiltradas ($r=0.97$), así como la de CUD (Figura 2B) para las mismas láminas ($r = 0.93$). Pero con la lámina precipitada se sobrestiman los valores de los coeficientes, lo cual puede generar errores al evaluar un sistema de irrigación por aspersión. Según Bernardo *et al.* (2009), para una buena distribución de agua sobre el área irrigada, los aspersores se deben espaciar para obtener una superposición entre los perfiles de distribución de agua de los aspersores a lo largo de la línea lateral y entre líneas laterales a lo largo de la línea principal, lo cual dependerá del tipo de aspersor y de la intensidad del viento.

Los resultados obtenidos de la estimación de las eficiencias de aplicación (E_a) y almacenamiento (E_s), pérdidas por percolación (P_p) y déficit (D), en función de la diferenciación de las áreas entre aspersores para las láminas precipitada e infiltrada, se presentan en la Figura 3.

Para los menores espaciamientos, la E_a para lámina infiltrada es menor que la obtenida para la precipitada; y para mayores espaciamientos, la E_s es mayor para la lámina infiltrada en relación a la precipitada. La E_a de agua es baja en los menores espaciamientos, considerando su relación con la pérdida por percolación; así, en condiciones de espaciamientos reducidos entre aspersores existe una alta superposición entre las láminas de agua y por tanto pérdidas por percolación altas. Adicionalmente, en algunos casos el acúmulo de agua en la superficie del suelo aumenta las posibilidades de pérdidas por evaporación directa del suelo, reduciendo la E_a . Según Zocoler *et al.* (2001), por medio de la E_a es posible verificar la cantidad de agua incorporada en el suelo hasta la profundidad efectiva del sistema radicular de cualquier cultivo, en

bad for the infiltrated; 5) in the other superpositions it was insufficient for the two depth.

In the same manner, the values obtained from CUD were classified as: 1) excellent for the precipitated depth and for the infiltrated, in 6×6 and 6×12 m; 2) reasonable for the infiltrated depth, in 12×12; 3) insufficient in the other superpositions. For the precipitated depth in the superpositions 12×12 and 12×18 m the CUD was classified as good, for 18×18 as reasonable and from these, the other values were insufficient.

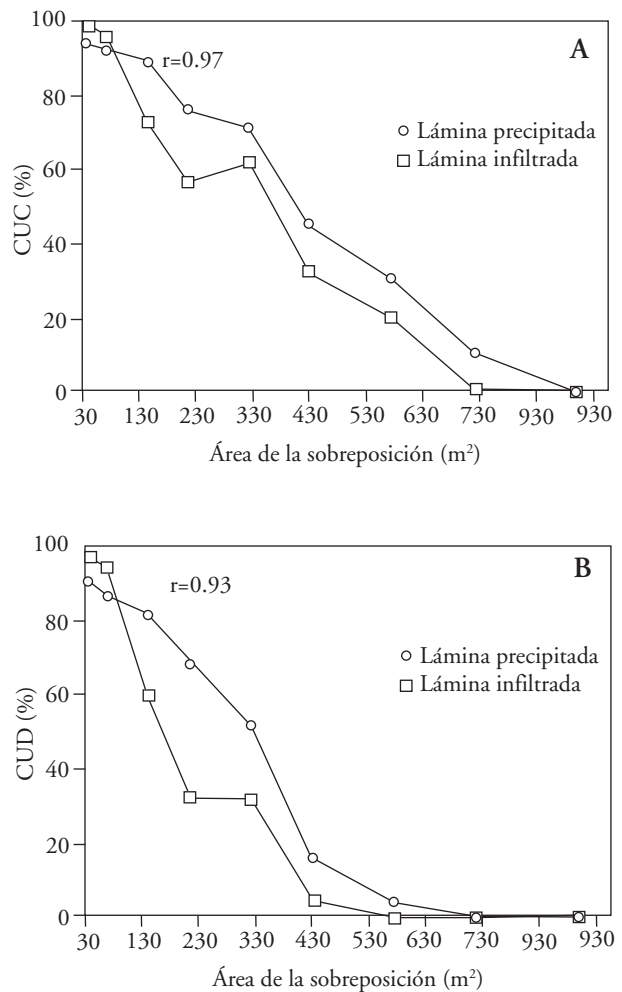


Figura 2. Coeficientes de uniformidad de Christiansen (CUC) (A) y de distribución (CUD) (B) para las láminas precipitada e infiltrada, en función del área comprendida por el espaciamiento entre aspersores.

Figure 2. Christiansen coefficient of uniformity, (CUC) (A) and coefficient of distribution (CUD) (B) for the precipitated and infiltrated depths, in function of the area covered by the spacing between sprinklers.

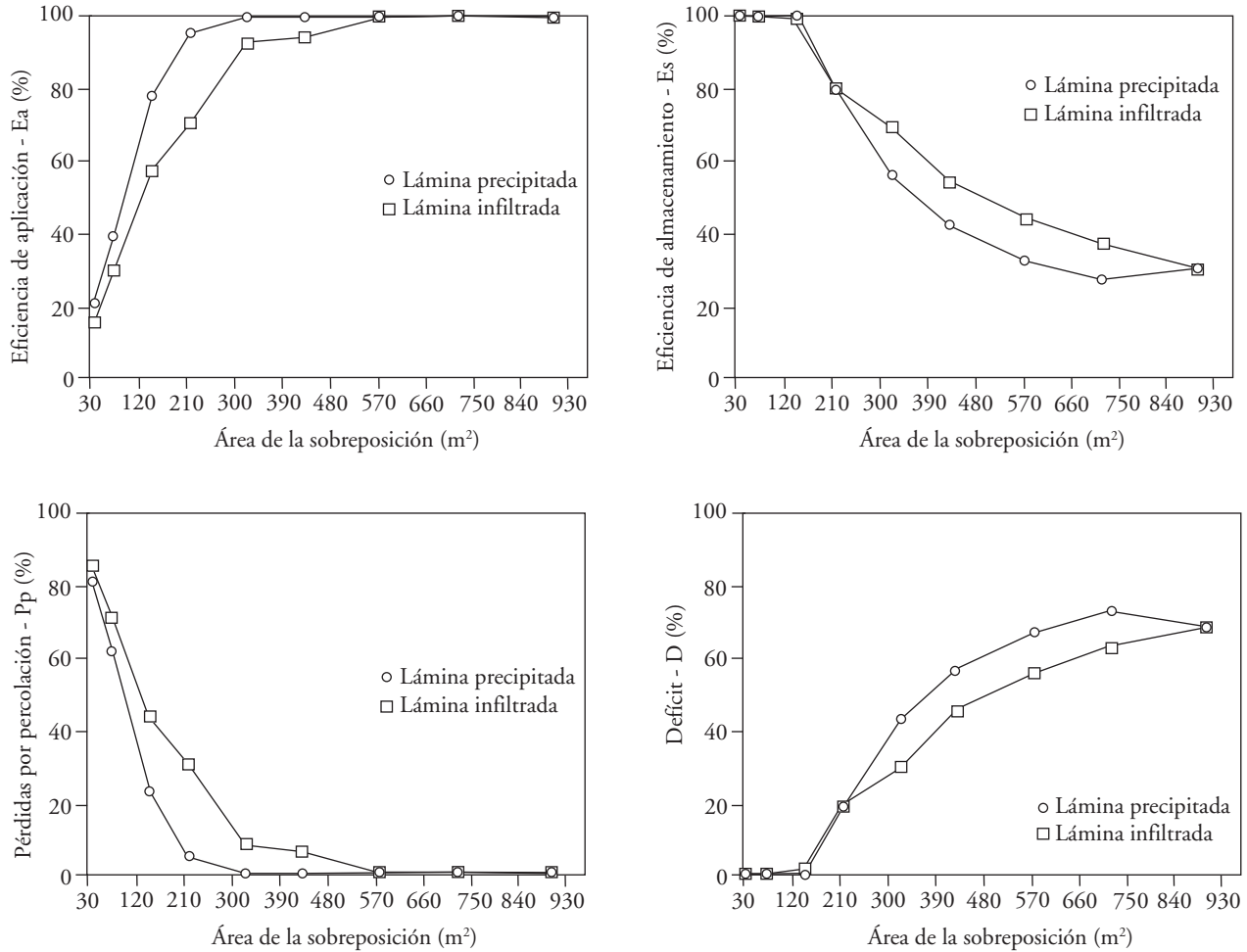


Figura 3. Comportamiento de las eficiencias de aplicación (A) y almacenamiento (B), pérdidas por percolación (C) y déficit (D), en función de las áreas entre aspersores, para las láminas precipitada e infiltrada.

Figura 3. Behavior of efficiencies of application (A) and storage (B), losses from percolation (C) and deficit (D), in function of the areas between sprinklers, for precipitated and infiltrated depth.

relación a la cantidad de agua total aplicada por riego, y de esta forma verificar las pérdidas por percolación y evaporación directa del suelo.

Los valores obtenidos de D y Pp presentaron diferencia para los espaciamentos simulados en relación a la lámina precipitada e infiltrada en el suelo, mostrando que la respuesta de la aplicación de agua evaluada en la superficie del suelo difiere de la realizada en el perfil del suelo. Las Pp presentan un comportamiento inversamente proporcional al CUC; así, cuando la uniformidad disminuye, la cantidad de agua percolada es mayor. Este resultado es similar al obtenido por Ben-Asher y Ayars (1990) en un estudio realizado para pronosticar el impacto de la desuniformidad en las pérdidas de agua por percolación.

When comparing the coefficients calculated, it is verified that CUD is sensitive to variations in water distribution in an irrigation system by sprinklers because it takes into account only the average of the lower quartile of the total of data. Paulino *et al.* (2009) show a similar observation when evaluating irrigation systems by sprinklers in irrigated Solanaceae crops and using several coefficients of uniformity for water in the soil.

For the conditions of the present study and with the goal of obtaining adequate values for CUC for a sprinkler irrigation system (> 80 %), the maximum spacings that could be used are 12×12 (precipitated depth) and 6×12 m (infiltrated depth). According to this, water distribution in the soil is different than

Además, la evaluación en la superficie subestima los valores de eficiencia de riego comparado al sub-superficial en un sistema por aspersión, lo que se refleja en un manejo menos económico del riego (Rocha *et al.*, 1999).

CONCLUSIONES

El coeficiente de uniformidad de distribución del agua en el perfil del suelo fue mayor que el obtenido para las láminas precipitadas en los colectores en los menores espaciamientos 6×6 m y 6×12 m, y fue menor en los demás espaciamientos.

Las altas sobreposiciones entre láminas de agua, generadas por los menores espaciamientos entre aspersores, tienen una influencia negativa en la calidad del riego por el aumento de las pérdidas por percolación y consecuentemente por la disminución de la eficiencia de riego.

El análisis de los coeficientes de uniformidad y de las eficiencias de aplicación y almacenamiento de agua en el suelo, para el diseño y manejo de sistemas de riego por aspersión, proporciona mayor confiabilidad cuando se utilizan las informaciones de humedad obtenidas en el perfil del suelo.

LITERATURA CITADA

- Ben-Asher, J., and J. E. Ayars. 1990. Deep seepage under nonuniform sprinkler irrigation: I. Theory. *J. Irrigation Drainage Eng.* 116: 354-362.
- Bizari, D. R., E. E. Matsura, C. Souza F., e M. W. Roque. 2011. Haste portátil para utilização de sonda de TDR em ensaios de Campo. *Revista Irriga* 16: 31-41.
- Bernardo, S., A.A. Soares, e E. C. Mantovani. 2009. *Manual de Irrigação*. 8ª. ed. Imprensa Universitária. Viçosa/MG, 355 p.
- Bos, M. G., M. A. Burton, and D. J. Molden. 2005. *Irrigation and Drainage Performance Assessment: Practical Guidelines*. CABI International. Wallingford. 158 p.
- Buendía, J. C. E., E. Palacios V., J. Chávez M., y B. Rojas M. 2004. Impacto del funcionamiento de los sistemas de riego presurizados en la productividad de ocho cultivos, en Guanajuato, México. *Agrociencia* 34(5): 477-486.
- Christiansen, J. E. 1942. *Irrigation by Sprinkling*. Bulletin 670. University of California. Agricultural Experimental Station. Berkeley, California. 124 p.
- Coelho, E. F., e F. B. Arruda. 2001. Aplicações da técnica de TDR: Manejo da água no solo. *In: Matsura, E. E., A. Tavares-Junior, E. Gomes P., e C. Souza F. (eds). Aplicações da Técnica da TDR na Agricultura*. Feagri/Unicamp. Campinas. pp: 129-145.
- Criddle, W. D., S. Davis, C., H. Pair, and D. G. Shuckely. 1956. *Methods for evaluation irrigation systems*. Agricultural Handbook 82. USDA. Washington. 24 p.

what is observed on the surface, which is why the values of the infiltrated depth should be considered for the sizing and management of the irrigation system.

The Christiansen coefficient of uniformity (CUC) and coefficient of distribution, for precipitated and infiltrated depths are presented in Figure 2 (A and B). The correlation was high among the CUC values (Figure 2A) for the precipitated and infiltrated depths ($r=0.97$), as well as in CUD (Figure 2B) for the same depths ($r=0.93$). However, with the precipitated depth the coefficient values were overestimated, which can generate errors when evaluating an irrigation system by sprinklers. According to Bernardo *et al.* (2009), for a good water distribution over the irrigated area, sprinklers should be spaced to obtain a superposition among the water distribution profiles of sprinklers along the lateral line and between lateral lines along the main line, which would depend on the type of sprinkler and the wind intensity.

The results obtained from estimating the efficiencies of application (E_a) and storage (E_s), losses from percolation (P_p) and deficit (D), in function of the differentiation of the areas between sprinklers for the precipitated and infiltrated depths, are presented in Figure 3.

For smaller spacings, the E_a for the infiltrated depth is lower than the one obtained for the precipitated; and for greater spacings, the E_s is greater for the infiltrated depth in comparison to the precipitated. The water E_a is low in the smaller spacings, taking into account their relation with the loss from percolation; thus, under conditions of reduced spacings between sprinklers there is a high superposition between the water depths and, therefore, losses from high percolations. In addition, in some cases the water accumulation on the soil surface increases the possibilities of losses from direct evaporation from the soil, reducing the E_a . According to Zocoler *et al.* (2001), through E_a it is possible to verify the amount of water incorporated into the soil up to the effective depth of the root system of any crop, with regards to the total amount of water applied per irrigation, and in this manner, verifying the losses from percolation and direct evaporation from the soil.

The values obtained for D and P_p presented differences for the spacings simulated with regards to the precipitated and infiltrated depth in the soil, showing that the response of the water application

- Cunha, F., P. R. Vieira, M. P. Borges, F. R. Silva, e L. X. Mesquita. 2008. Manejo de microirrigação baseado em avaliação do sistema na cultura do meloeiro. *Rev. Caatinga* 21: 147-155.
- Fietz, C., M. Folegatti, S. Vieira, e J. Frizzone. 1999. Efeito da variabilidade do armazenamento de água no solo na qualidade da irrigação por aspersão. *Rev. Bras. Eng. Agríc. e Ambiental* 3: 150-153.
- Karmeli, D. 1978. Estimating sprinkler distribution patterns using linear regression. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng. Special Ed.* 21(4): 682-686.
- Lorite, I. J., L. Mateos, and E. Fereres. 2004. Evaluating irrigation performance in a Mediterranean environment: I. model and general assessment of an irrigation scheme. *Irrigation Sci.* 23: 77-84.
- Paulino, M. de O., F. Figueiredo P., R. Fernandes C., J. T. Maia, D. Guilherme de O., e F. Barbosa S. 2009. Avaliação da uniformidade e eficiência de aplicação de água em sistemas de irrigação por aspersão convencional. *Rev. Bras. Agric. Irrigada* 3(2): 48-54.
- Reichardt, K. 1996. Dinâmica da Matéria e da Energia em Ecossistemas. USP/ESALQ. São Paulo. 513 p.
- Rezende, R., A. C. Gonçalves A., P. S. Freitas L., J. A. Frizzone, C. A. Tormena, e A. Bertonha, A. 2002. Influência da aplicação de água na uniformidade da umidade no perfil do solo. *Acta Scientiarum* 24:1553-1559.
- Rocha, E. M. de M., R. N. Costa T., S. M. Mapurunga da S., e P. Castro T. de. 1999. Uniformidade de distribuição de água por aspersão convencional na superfície e no perfil do solo. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental* 3: 154-160.
- Soil Survey Staff. 2010. Keys to Soil Taxonomy. 11th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service. Washington, DC. 338 p.
- Souza, C. F., E. E. Matura, e R. Testezlaf. 2001. Experiência de laboratório de hidráulica, irrigação e drenagem da Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP no uso da técnica da TDR. *In: Matura, E. E., A. Tavares-Junior, E. Gomes P., e C. Souza F. (eds). Aplicações da Técnica da TDR na Agricultura. Feagri/Unicamp. Campinas. pp: 147 – 176.*
- Topp, G., J. L. Davis, and A. P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Res.* 16: 574 – 582.
- Zocoler, J. L., L. E. V. Cesar, e L. S. Vanzela. 2004. Efeito da posição relativa da linha lateral de um equipamento de irrigação do tipo pivô central na uniformidade de distribuição de água e eficiência de irrigação. *Eng. Agríc.* 2 (4): 290-297.

evaluated on the soil surface differs from the one carried out on the soil profile. The Pp present an inversely proportional behavior to the CUC; thus, when the uniformity decreases, the amount of water percolated is greater. This result is similar to the one obtained by Ben-Asher and Ayars (1990) in a study carried out to predict the impact of lack of uniformity on the water losses from percolation. Also, the evaluation on the surface underestimates the efficiency values for irrigation, compared to the sub-superficial in a sprinkler system, which is reflected in a less economic management of irrigation (Rocha *et al.*, 1999).

CONCLUSIONS

The coefficient of uniformity of water distribution on the soil profile was greater than the one obtained for precipitated depths in the collectors of less spacings, 6×6 and 6×12, and was lower in the other spacings.

The high superpositions between water depths, generated by smaller spacings between sprinklers, have a negative influence on the quality of irrigation, because of the increase in losses from percolation and consequently because of the decrease in irrigation efficiency.

The analysis of the coefficients of uniformity and the efficiencies of water application and storage in the soil, for the design and management of irrigation systems by sprinklers, provide greater reliability when information regarding humidity obtained in the soil profile are used.

—End of the English version—

