



INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES
FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA
EN RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA

CENID-RASPA

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADO



M. C. Abel Román López

Ing. S. Felipe Mendoza Moreno

Dr. Marco A. Inzunza Ibarra

Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Ing. Arturo Rodríguez Carranza

ISBN: 968-800-607-6

Folleto Científico 17

Gómez Palacio, Durango

Junio del 2005

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADO

M.C. Abel Román López
Ing. Felipe Segundo Mendoza Moreno
Dr. Marco Antonio Inzunza Ibarra
Dr. Ignacio Sanchez Cohen
Ing. Arturo Rodríguez Carranza

CENID-RASPA

-

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria
en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera.

Km 6.5 margen derecha Canal Sacramento
Gómez Palacio, Durango. MÉXICO.

Apdo. Postal 41

35150 Cd. Lerdo, Dgo.

Teléfonos y Fax: 01 (871) 719-10-76, 719-10-77 y 719-11-34

e-mail: cenid.raspa@inifap.gob.mx

El contenido de esta publicación podrá reproducirse total o parcialmente con fines específicos de divulgación, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a los autores, al CENID-RASPA y al INIFAP.

ISBN: 968-800-607-6

Contenido

	Pág.
Introducción	1
Uniformidad de riego o Distribución	2
Eficiencia de aplicación relativa y absoluta	5
Eficiencia de almacenamiento o requerimiento	6
Eficiencia de captación	6
Precolación	6
Déficit	7
Procedimiento de campo para la evaluación	8
Ejemplos de evaluación de sistemas de riego presurizado	13
Literatura citada	21

Presentación

La variabilidad climática ha impactado de manera notable a la agricultura dado que las reservas de agua que se utilizan para fines de producción de bienes de consumo han mermado considerablemente, ubicando al sector agropecuario del país en la categoría de riesgo. Ante este panorama, la agricultura moderna reclama de una alta tecnificación en el aprovisionamiento del riego donde los sistemas de riego presurizados adquieren relevancia.

Sin embargo, el hecho de tecnificar el riego no implica, de manera directa, que se alcancen altas eficiencias si estos sistemas no se operan adecuadamente bajo las premisas de su diseño. Por lo tanto, la evaluación de sistemas de riego debe ser un procedimiento rutinario con la finalidad de detectar fallas de manera oportuna para su solución.

Este documento tiene el objetivo de proveer los conocimientos básicos necesarios a investigadores, prestadores de servicio, productores y técnicos para realizar dicho cometido; asimismo, como detallar los procedimientos de evaluación de los sistemas de riego presurizado. Cabe mencionar que la metodología aquí expuesta es la versión actualizada de aquella emanada de la Reunión Nacional titulada "Metodología de Investigación y Diagnóstico en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, realizada en el CENID-RASPA, INIFAP en 1990.

Dr. Ignacio Sánchez Cohen
Director del CENID RASPA

Introducción

Los sistemas de riego superficial son los más comunes en México, pero funcionan con más bajas eficiencias que los presurizados. En estos casos debe mencionarse que las pérdidas en canales abiertos para la distribución son altas. Huerta (1987) reporta eficiencias del 65 por ciento en los distritos de riego del país, así como eficiencias de aplicación del 61.5 por ciento, obteniendo una eficiencia global del 40 por ciento. Autores como Etcheverry y Harding (1933); Israelsen (1950); Hout (1951); Bistrain (1959); Grassi (1967); Hernández (1987), muestran datos inquietantes y similares para riego superficial.

A diferencia de los sistemas de riego por superficie, donde el agua fluye sobre el terreno produciendo patrones de humedecimiento que están determinados por el tiempo en el que una lámina de agua está en movimiento vertical, en los sistemas presurizados el patrón de mojado depende de la cantidad de agua aplicada la que a su vez depende de la presión con que se aplica, siempre y cuando no ocurra flujo superficial por exceso de aplicación (Luna, 1990). El flujo superficial se produce cuando la tasa de aplicación es superior a la velocidad de infiltración del agua en el suelo. La variabilidad del patrón de mojado se puede cuantificar de diferentes maneras, generando índices de calidad del proceso del riego o eficiencia del mismo. Esto permite tomar decisiones para mejorar la operación del sistema incrementando su rentabilidad, ya sea por mayores rendimientos, mejor calidad de cosecha, ahorro de volúmenes de agua o cualquier combinación de lo anterior.

Una vez que se instala un sistema de riego, se deben evaluar las características hidráulicas conforme al diseño, como presión de operación (H_o), que contemple las pérdidas de carga hidráulica permisibles no mayores a un 20 por ciento, que corresponden a un decremento de caudales en la emisión del 10 por ciento, y que ambos valores porcentuales permitan que el sistema hidráulico proporcione una uniformidad de aplicación del agua del 90 por ciento de las unidades de riego (Merriam y Keller, 1978). Esto es válido para todo sistema de riego presurizado (goteo, micro aspersión o aspersión en todas sus variantes).

Desde un punto de vista más relacionado con la productividad del recurso, los parámetros indicadores del desempeño del riego son: Uniformidad de riego o distribución, eficiencia de aplicación, tanto relativa (E_a) como absoluta (E_{aa}), eficiencia de almacenamiento o requerimiento (E_r), eficiencia de captación (E_c), cantidad de agua perdida por percolación (P) y déficit de aportación de riego (D).

El objetivo de la presente publicación es proporcionar técnicas de evaluación de un sistema de riego presurizado para su diagnóstico y mejoramiento, buscando niveles aceptables de productividad del agua sin demérito en la calidad de las cosechas.

Uniformidad de riego o distribución

Uniformidad de riego o distribución

Este parámetro se refiere a las especificaciones técnicas, y se relaciona con la diferencia de presiones. Todo sistema de riego a presión se proyecta para que la diferencia de volúmenes o láminas de riego en dos puntos extremos en una línea de aplicación tengan una diferencia no mayor de 10 por ciento, para una diferencia de presiones no mayores al 20 por ciento. En términos prácticos, esto garantiza que el agua suministrada tenga al menos un 90 por ciento de uniformidad.

De acuerdo al tipo de sistema se aplica distinta metodología de evaluación en campo, por tal razón cambia de nombre. Por ejemplo, en riego por goteo se denomina uniformidad de emisión y se evalúan los volúmenes de agua suministrados gota a gota directamente al suelo, mientras que en aspersión, donde el agua se aplica en forma de lluvia que pasa por el medio ambiente y la cubierta vegetal antes de llegar el suelo, se conoce como coeficiente de uniformidad; dentro de los sistemas de riego por aspersión existen sistemas con movimiento, que es otro factor que puede afectar la eficiencia y se conoce como uniformidad de distribución. A continuación se expone la forma de evaluación para cada caso.

Uniformidad de emisión en riego por goteo

Indica el porcentaje de variación en la lámina o volumen de agua aplicado a la superficie del suelo de una unidad de riego. Se obtiene mediante el aforo de 50 goteros igualmente espaciados en una unidad de riego. Para el cálculo se utiliza la Ecuación 1 (Keller y Karmelli, 1975; Burt y Styles, 1994):

$$UR = (1 - 1.27 CV) \frac{Y}{X} \quad 1$$

Donde UR es la **uniformidad de riego o emisión** en por ciento; CV es el coeficiente de variación que es el cociente entre la desviación estándar y la media (X): Cuando la emisión del caudal a un cultivo se conforma por un conjunto de goteros, que es lo más común en árboles, el coeficiente se expresa por $V_s = CV/np$, sustituyendo dicho valor por CV en la Ecuación 1, np es el número de emisores por planta; Y es la descarga media del 25 por ciento de valores con menor aforo (12 goteros) en $L h^{-1}$; X es la descarga media del sistema (50 goteros).

El valor resultante del coeficiente de variación se utiliza para clasificar los emisores como excelente, bueno, marginal, pobre e inaceptable (Keller, 1987) según la forma de emisión. El Cuadro 1 indica los valores para establecer el nivel de desempeño del sistema de acuerdo a este criterio. Por otro lado, algunos fabricantes proporcionan el CV de su emisor certificado expresamente por un laboratorio, el cual da una idea de la confiabilidad del gotero.

Cuadro 1. Clasificación de emisores de acuerdo al coeficiente de variación (CV) (Merriam and Keller, 1978; Burt y Styles, 1994; Peña, 1997).

Clasificación (calidad)	Goteo y Microaspersión	Cintas Goteadoras
Excelente	$CV < 0.04$	$CV < 0.1$
Bueno	$0.04 < CV < 0.07$	$0.1 < CV < 0.2$
Marginal	$0.07 < CV < 0.11$	
Pobre	$0.11 < CV < 0.15$	$0.2 < CV < 0.3$
Inaceptable	$0.15 < CV$	$0.3 < CV$

Algunos factores topográficos locales limitan el funcionamiento de los emisores que se refleja en valores relativamente bajos de uniformidad de emisión. Dichos factores no se pueden modificar o resulta muy costoso hacerlo; por lo tanto, la uniformidad de riego (*UR*) que se recomienda bajo determinadas condiciones locales se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Rangos recomendados de la uniformidad de emisión (*UR*) para propósitos de diseño, considerando características topográficas del lote (Merriam and Keller, 1978;).

Para emisores con espaciamientos amplios y cultivos permanentes con	
Topografía uniforme	$90 < UR. < 94\%$
Topografía ondulante o excesiva	$88 < UR. < 92\%$
Para emisores de espaciamientos cerrados < 1.8 m en cultivos permanentes y no permanentes	
Topografía uniforme	$86 < UR. < 90\%$
Topografía ondulante o excesiva	$84 < UR. < 90\%$
Para cintas goteadoras con cultivos anuales	
Topografía uniforme	$80 < UR. < 90\%$
Topografía ondulante o excesiva	$70 < UR. < 85\%$

Coefficiente de uniformidad en sistemas de riego por aspersión

La uniformidad de distribución en los sistemas de riego fijo, portátil manual, lateral con ruedas y microaspersión, según Chen y Wallender (1984), se puede estimar por varios procedimientos. La técnica de Christiansen (1942) es la más aceptada mundialmente para evaluar la eficiencia en patrones traslapados de aspersores. La Ecuación 2 ilustra este procedimiento.

$$UCC = \left[1 - \left(\frac{\sum |X_i - \bar{X}|}{\sum X_i} \right) \right] * 100 \% \quad 2 \quad \bar{X}$$

Donde: UCC es el coeficiente de uniformidad de Christiansen en por ciento, X_i son las lecturas u observaciones del volumen de agua captado en un recipiente (ml), \bar{X} es el promedio de todas las lecturas, $\sum |X_i - \bar{X}|$ es la suma de las desviaciones absolutas de las lecturas con respecto al promedio de las mismas. En forma práctica, el valor mínimo aceptable de UCC es de 80 por ciento (Rodríguez *et al.*, 1982; Chávez, 1978).

En el sistema de cañón portátil manual la uniformidad de distribución (UD_{cp}) se determina en forma práctica con la Ecuación 3 (Rodríguez y Mendoza, 1990):

$$UD_{CP} = \frac{R_{25}}{R_x} 100\% \quad 3$$

Donde R_{25} es el volumen medio del 25 por ciento de valores con menor aforo y R_x representa la recolección media del sistema. Las muestras se obtienen de tres hileras de colectores distribuidos transversalmente en el riego del cañón portátil entre traslapes, los datos se pueden expresar en lámina, volumen o en intensidad de lluvia, siendo más práctico utilizar volumen, ya que por lo general así se hacen las mediciones en campo. Se sugiere que en estos sistemas el coeficiente de uniformidad sea de al menos el 67 por ciento (Pair *et al.*, 1977; Rodríguez *et al.*, 1982).

En los sistemas de cañón viajero y lateral móvil se evalúa la uniformidad de distribución bajo el mismo concepto que en el de cañón portátil, sólo que como estos ya tienen movimiento o avance frontal se utiliza una hilera de colectores que capturen el volumen proporcionado por la máquina en su recorrido; por lo tanto, la Ecuación 3 se aplica en estos sistemas.

Cuando se evalúa un sistema de pivote central, la medición se realiza a lo largo de la línea regante, dado que ésta va montada en torres de hasta 4 m de altura

y un extremo queda sujeto, el riego se aplica en una superficie circular, lo que significa que a mayor distancia de la torre fija los emisores hacen mayor recorrido. Por consiguiente, se requiere mayor volumen de agua por unidad de tiempo, aunque el diseño contemple cantidades iguales de agua en cualquier punto. Basándose en lo anterior, la uniformidad de distribución (UD_{pc}) considera datos ponderados de acuerdo a la posición con respecto a su radio de ubicación. La UD_{ep} se obtiene con base en los parámetros de la Ecuación 4.

$$UD_{PC} = \frac{M_{25}}{M_{pp}} 100 \% \quad 4$$

Donde M_{25} es la media ponderada del 25 por ciento de los valores con menor *aforo* y M_{pp} representa la media ponderada de la prueba.

En el caso de los sistemas lateral móvil y pivote central es necesario elaborar una gráfica de los volúmenes colectados contra la distancia de los colectores en toda la línea regante; esta gráfica es útil para localizar áreas problema (escurrimientos) y boquillas o aspersores con mal funcionamiento.

Eficiencia de aplicación relativa (Ea)

Este parámetro cuantifica la cantidad de agua aplicada en el riego que se almacena en la profundidad radicular deseada. Para cuantificarla, el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos utiliza la Ecuación 5 de Hansen citada por Luna en 1988.

$$Ea = \frac{Za}{Z} * 100 \% \quad 5$$

Donde: Za es la lámina de agua promedio almacenada en la zona de raíces por efecto del riego en mm y Z la lámina total de agua aplicada en el riego (mm).

Eficiencia de aplicación absoluta (Eaa)

Indica la eficiencia real del uso del agua y se utiliza la Ecuación 6 propuesta por Merriam y Keller (1978).

$$Eaa = Ea * UD \quad 6$$

Donde UD es la uniformidad de riego que conforme al sistema de riego evaluado pueden ser los de las Ecuaciones 1, 2, 3 ó 4, respectivamente.

Este parámetro de eficiencia es similar a la eficiencia de aplicación global que se proporciona en los sistemas de riego por superficie a nivel parcelario, ya que es el producto de las eficiencias en conducción, distribución y aplicación conforme lo señala Flores (1989). En el caso de sistemas de riego presurizados, la eficiencia de conducción se asume que es el 100 por ciento o la unidad por conducirse en tuberías. Solomon (1990) reporta los valores de eficiencia global o reales que se pueden tener en los distintos sistemas de riego presurizado, como se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Eficiencia de riego real o global en diferentes sistemas de riego presurizados. Solomon, 1990.

Tipo de sistema	Eficiencia (%)
Portátil	65-75
Lateral con ruedas "power roll"	65-75
Cañón viajero	60-70
Pivote central	75-90
Avance frontal	75-90
Fijo	70-80
Lateral móvil de bajo volumen "LEPA"	80-95
Goteo	90-95
Microaspersión	90-95

Eficiencia de almacenamiento o requerimiento (E_r)

Hansen, citado por Luna (1988) indica que esta eficiencia cuantifica los excesos (percolación) o deficiencias (déficit) del agua aplicada en el riego con relación a la cantidad de agua requerida por la profundidad de raíces; para su evaluación dicho parámetro se calcula con la siguiente ecuación:

$$E_r = \frac{Z_a}{Z_r} * 100\% \quad 7$$

Donde Z_a ya fue definida en la ecuación 5, Z_r es la lámina de agua requerida en la zona de raíces también en mm.

Eficiencia de captación (E_c)

Este parámetro es un indicador de la cantidad real del agua que se aplica sobre la superficie del suelo con un sistema de riego presurizado con relación a la bombeada, y se calcula como (Allen, 1991):

$$E_c = \frac{V_i}{V_s} * 100\% \quad 8$$

Donde V_i es el volumen captado en el área irrigada en m^3 y V_s el volumen descargado por el sistema también en m^3 .

Percolación (P)

Este término se define como la proporción de lámina infiltrada más allá de la profundidad de raíces, que no utilizan los cultivos; esto no sólo se considera como pérdida de agua, sino también como fuente de contaminación del acuífero por la lixiviación de fertilizantes. Lo anterior se expresa como un porcentaje de la cantidad total del agua aplicada por el riego sobre el campo. Anyoji y Wu (1994) proponen la siguiente ecuación:

$$P = (100 - E_a)$$

9

Donde E_a es la eficiencia de aplicación como se definió anteriormente.

Déficit (D)

Se denomina déficit cuando la profundidad de raíces no es irrigada por completo, y corresponde al porcentaje de déficit (en por ciento) con respecto a la cantidad total requerida. Para su estimación se usa la siguiente ecuación (Anyoji y Wu, 1994):

$$D = (100 - E_r)$$

10

Donde E_r es la eficiencia de requerimientos

La Figura 1 ilustra los índices de eficiencia E_a , E_r y UCC , nótese que en el esquema (C) el índice de percolación (P) es excesivo, y corresponde al área achurada por debajo de la línea horizontal punteada, que es el límite de la profundidad de raíces; caso contrario se muestra en (A) el déficit (D) por encima de dicha línea. En cambio el esquema B se considera que los índices de eficiencia son aceptables.

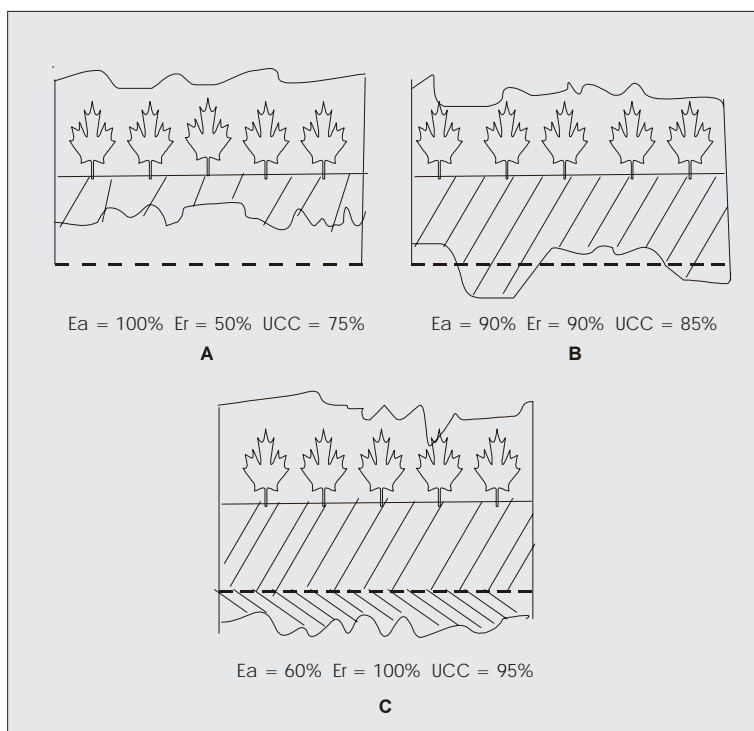


Figura 1. Índices de eficiencia de aplicación y requerimientos relacionados con la uniformidad de riego (Hansen, 1960; Luna, 1988).

Procedimiento de campo para la evaluación

Sistemas de riego fijos (goteo, microaspersión y aspersión)

Los componentes fundamentales de un sistema de riego presurizado fijo son: 1. Unidades de riego, 2. Tuberías de conducción y 3. Cabezal de control (Figura 2). El proceso de evaluación hace necesario que primeramente se verifique la presión de operación (H_o) al centro de la unidad (Figura 2B) y el diferencial de presión entre el gotero o micro aspersor cercano a dicho punto (I) y el más alejado (F). Posteriormente, en dicha subunidad se procede a recolectar el volumen de 50 goteros como se muestra en la parte superior izquierda de la Figura 3 usando una probeta de 100 cm^3 y un cronómetro. El volumen (cm^3) captado en un tiempo de 36 seg, se divide entre 10 para obtener el gasto (L h^{-1}). Con estos datos se obtiene el índice de la Ecuación 1.

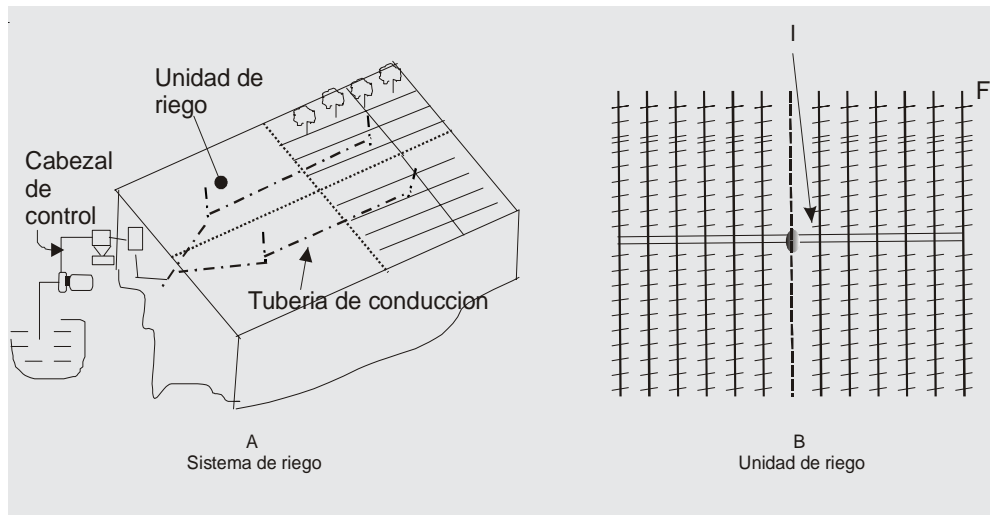


Figura 2. Sistema fijo de riego presurizado y su unidad de riego.

Riego por Goteo

Para realizar la evaluación de un riego por goteo, se procede de la siguiente manera:

- En la subunidad se selecciona la primera y última línea de riego. Se aforan el primer y último gotero. Posteriormente se aforan 11 goteros adicionales igualmente espaciados entre ellos en cada línea regante, para hacer un total de 26 goteros en las dos líneas.
- Con el mismo procedimiento se seleccionan otras dos líneas intermedias para aforar 12 goteros en cada línea regante, para un total de 24 goteros.

C. Con el total de la muestra de 50 goteros se procedera a realizar la estimación de la uniformidad de emisión para concluir con la evaluación.

Riego por microaspersión

Para la evaluación de los sistemas de micro aspersión, el aforo del emisor se realiza directamente en un recipiente de volumen conocido midiendo el tiempo de llenado con cronómetro (Figura 3), y así obtener el gasto. Este aforo se realiza en cuatro emisores por línea de riego (primera, última y dos líneas intermedias) para muestrear un total de 16. Con los datos obtenidos se procede a determinar su uniformidad de riego y CV usando la Ecuación 1. Posteriormente se evalúa el coeficiente de uniformidad mediante la Ecuación 2. El resultado de la Ecuación 1 se coteja con los valores reportados en los Cuadros 1 y 2 para establecer un diagnóstico sobre las uniformidades de emisión y distribución del agua de riego. Los niveles recomendados se comentan en el ejemplo de evaluación de microaspersión.

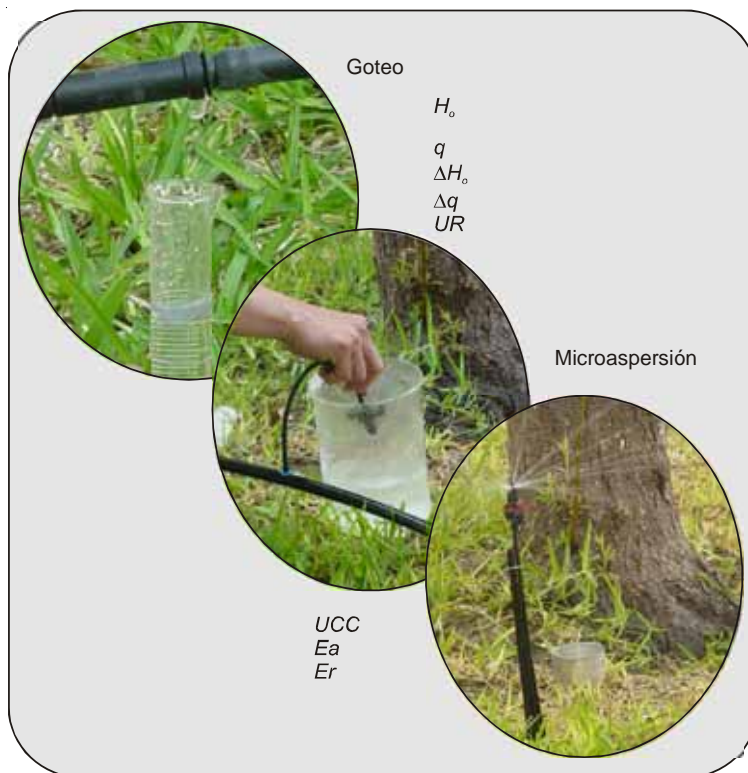


Figura 3. Índices de eficiencia a evaluar en goteo y micro aspersión dentro de sistemas de riego presurizado fijo.

Riego por Aspersión Fijo

En la evaluación de un sistema de riego por aspersión fijo formado generalmente por partes similares a un sistema de riego por goteo (Figura 2), se escogen dos líneas de riego, de preferencia las del centro de la subunidad de riego; posteriormente se ubican de 16 a 25 recipientes de un litro de capacidad y nivelados. Se opera el sistema para una lámina planeada y se recolecta el agua en forma de lluvia en el área delimitada por cuatro aspersores contiguos (Figura 4). Durante la evaluación se determina el coeficiente de uniformidad de Christiansen con la Ecuación 2, luego se mide la velocidad y dirección del viento para constatar que esté operando en los límites de diseño.

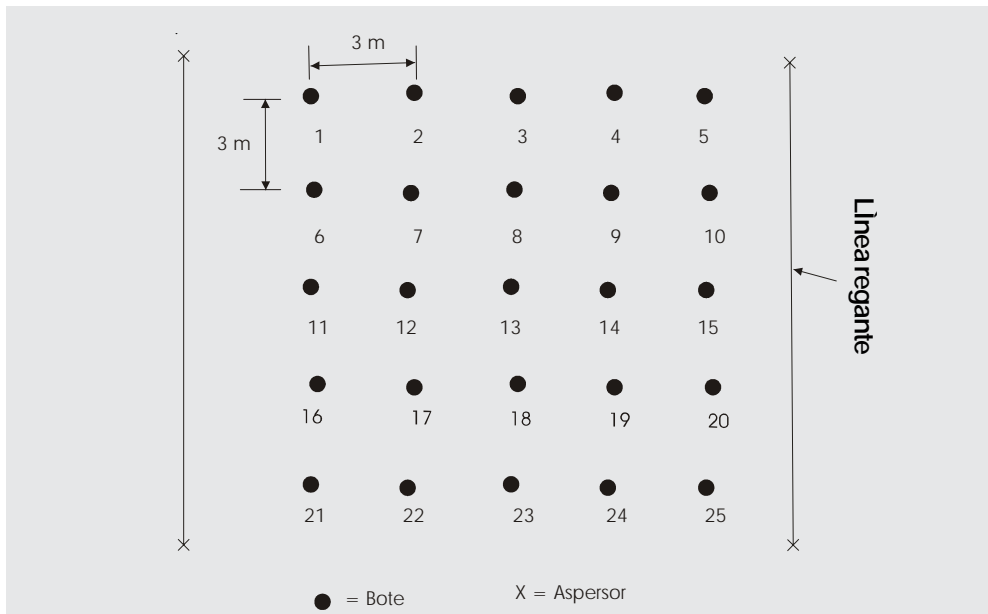


Figura 4. Distribución de 25 recipientes para evaluar un sistema de riego por aspersión fijo (Rodríguez y Mendoza, 1990).

Tanto para el sistema de microaspersión como para el de aspersión fijo, se obtienen las especificaciones técnicas de presión de operación y diferencia de presiones. El gasto promedio de los aspersores del sistema se obtiene al aforar cuatro aspersores; esto se realiza al conectar mangueras de conexión rápida en las boquillas y al cronometrar el tiempo de llenado de un recipiente de volumen conocido, o mediante un manómetro de Bourdon con tubo de pitot.

En los tres casos que se mencionan, para establecer los valores de E_a y E_r de las Ecuaciones 5 y 7, se procede a determinar el contenido de humedad antes y después del riego. Con los datos de capacidad de campo, densidad aparente y humedad residual se obtiene la lámina de agua a aplicar por el sistema, la lámina almacenada en el perfil de interés del suelo después del riego y la que requiere el

cultivo. Una vez que se obtienen las eficiencias E_a y E_r , de ellas se derivan E_{aa} , percolación (P) y déficit (D) del riego. Finalmente, la eficiencia de captación (E_c) puede obtenerse con datos de los análisis anteriores previa auscultación minuciosa de las mediciones hechas, como se explicará más adelante.

Sistemas de riego por aspersión portátil, manual y mecanizado

Estos sistemas comprenden los sistemas de riego por aspersión de línea lateral portátil manual, la línea lateral de aspersión movidas por ruedas metálicas y un carro motriz al centro, y el sistema de cañón con desplazamiento manual recto (Rodríguez y Mendoza, 1990). En la Figura 5 se ilustra el perímetro de aspersión en una línea de riego que es común para los dos primeros sistemas referidos. El muestreo se realiza al centro de la línea regante del sistema de irrigación, se da un tiempo de funcionamiento registrando la velocidad y la dirección del viento dominante con un anemómetro portátil. Para utilizar la expresión de Christiansen se suman los datos de la parte izquierda con los de la parte derecha en su posición de traslape con el fin de obtener los valores de los volúmenes recolectados. Por ejemplo, 1+4, 2+5, 3+6, ..., etc.

En la Figura 6 se ilustra la forma de proceder para evaluar un sistema de riego de cañón portátil. En dicha figura se observa cómo se colocan tres hileras de recipientes perpendiculares a la línea de desplazamiento del emisor, separados a cada tres metros. El diámetro de cobertura puede oscilar de 30 a 80 m, por lo que la separación entre hileras se hace de la siguiente manera: En la hilera central se colocan recipientes alineados perpendicularmente a uno y otro lado de la línea de riego, las otras dos hileras (Ha_1 , Ha_2) al 50 por ciento del radio de aplicación. Se recomienda registrar la velocidad y dirección del viento durante la prueba, así como la presión de operación inicial y final; en este caso, es preferible que la duración de la prueba sea igual a la duración de la aplicación del riego para posteriormente proceder a tomar los datos del volumen colectado y estimar su uniformidad de distribución conforme a la Ecuación 3. Para evaluar las eficiencias de aplicación y de riego se sugiere determinar el contenido de humedad en el suelo a lo largo de la hilera central de los recipientes y de otra adyacente en los siguientes puntos: cerca de la lateral, a una cuarta parte y a la mitad de la separación de la posición de la lateral.

Sistemas de riego por aspersión de movimiento continuo

Este grupo incluye los sistemas de cañón viajero, la línea lateral móvil y pivote central, ambos con su línea regante sobre torres. La evaluación de la uniformidad del primer sistema se realiza con un procedimiento similar al del cañón portátil, con la diferencia de que se utiliza una sola hilera de recipientes colectores, y el tiempo de la prueba está definido por el tiempo de residencia o lo que dura en pasar el patrón de aplicación sobre un punto determinado. La Ecuación 3 se usa para determinar el coeficiente de uniformidad.

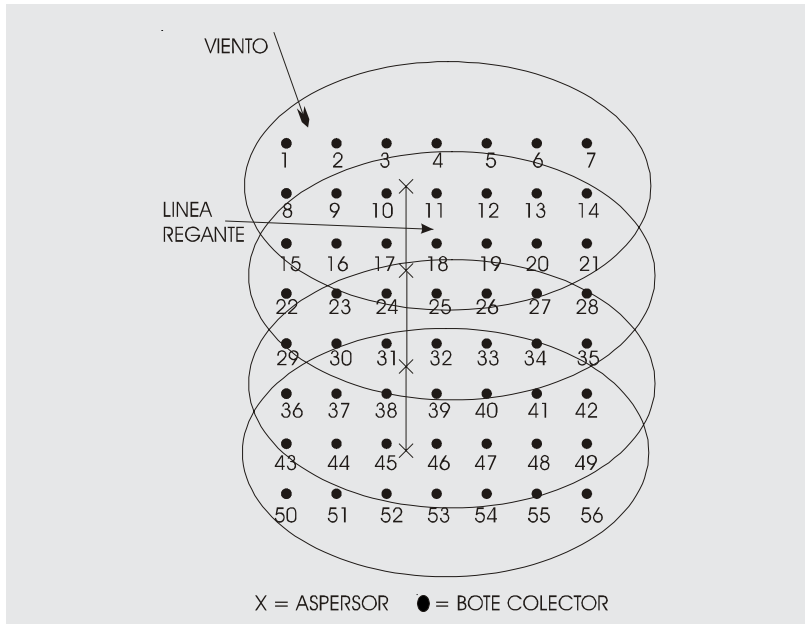


Figura 5. Distribución de recipientes (●) para evaluación de una línea lateral con ruedas o portátil manual. Los puntos indican la posición de los recipientes para colectar el agua durante la aplicación.

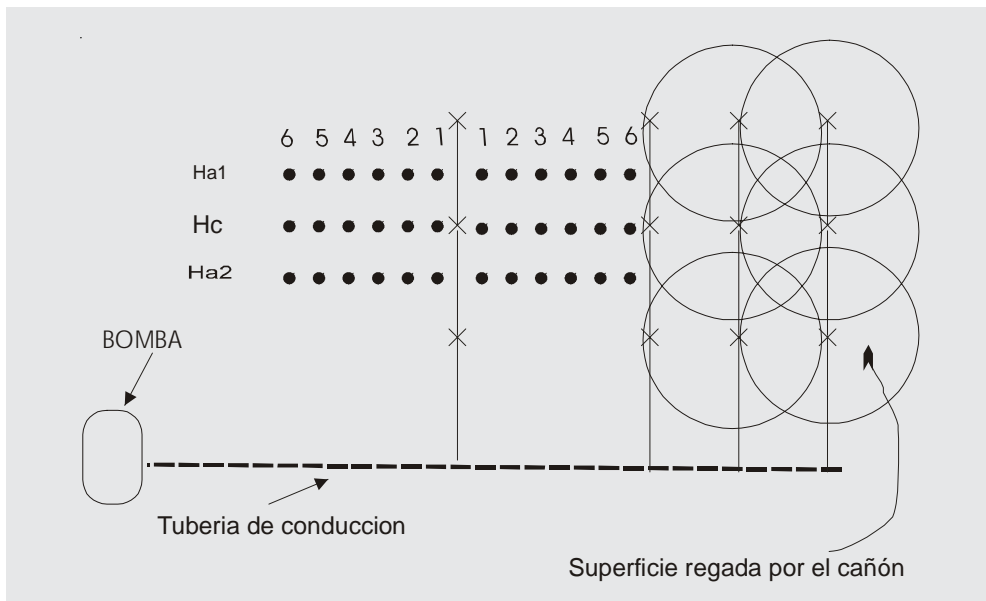


Figura 6. Sistema de riego por aspersión con cañones portátiles presentando la localización de las hileras de recipientes para una evaluación de la uniformidad de distribución (Rodríguez y Mendoza, 1990).

Para coleccionar el volumen de agua aplicado en los sistemas de pivote central y lateral móvil, que constan de una línea regante montada en torres, se coloca una hilera de recipientes a lo largo de toda la línea; la separación entre estos será: $S = L/N$, donde S es la separación entre recipientes, L la longitud del pivote central, N número de recipientes, con la consigna de que S sea menor o igual a 10 m; la separación entre el primero y último con respecto a su extremo será de $\frac{1}{2} \cdot S$. La evaluación de la uniformidad se realiza en el primer caso aplicando la Ecuación 4, y en el segundo la 3. En el sistema de pivote central los volúmenes colectados deben ponderarse por el área que representan, ya que esta superficie se incrementa con la distancia desde el centro. En la Figura 7 se muestra un esquema de instalación de estos receptáculos.

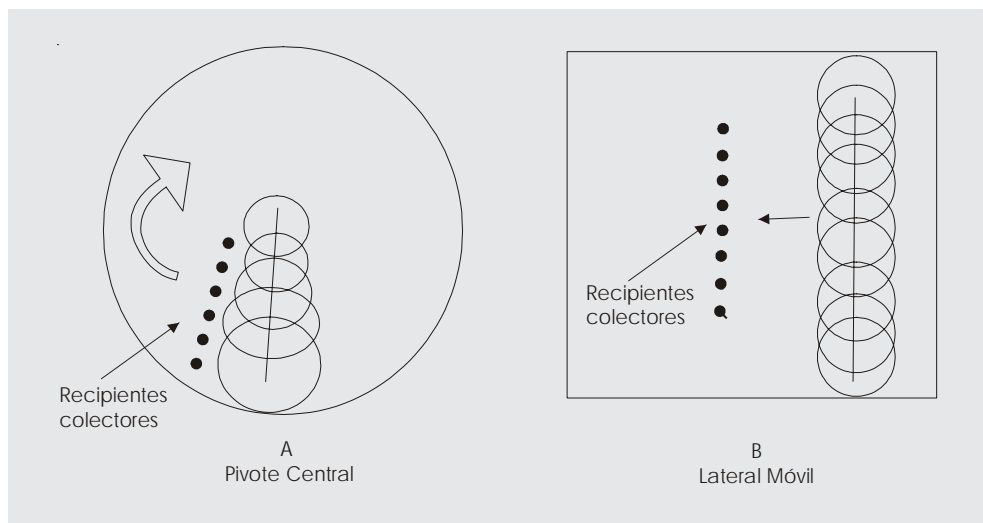


Figura 7. Procedimiento de muestreo para sistemas de riego por aspersión de movimiento continuo.

Ejemplos de evaluación de sistemas de riego presurizados

Sistema de goteo-cintilla. El Cuadro 4 muestra valores de aforo (Q , en litros por hora, $L h^{-1}$) en 50 puntos de emisión en un sistema de riego instalado en el CENID RASPA en un módulo demostrativo con el cultivo de chile jalapeño; el procedimiento de recolección de muestras se explicó en el tema Procedimiento de Campo para la Evaluación. De esta información se desprende que el gasto medio del 25 por ciento de valores con menor aforo es $0.52 L h^{-1}$, el gasto medio del muestreo es $0.59 L h^{-1}$, la desviación estándar $0.06 L h^{-1}$. El coeficiente de variación que resulta es de 10 por ciento y la uniformidad de emisión 76.95 por ciento (Ecuación 1). De acuerdo al valor del coeficiente de variación, el funcionamiento del sistema se clasifica como BUENO (Cuadro 1). Sin embargo, la uniformidad de riego es ligeramente inferior a lo deseable. Estos resultados se debieron a fugas que se observaron en la conexión de las líneas regantes, por lo que se debe realizar otra evaluación una vez corregido este problema.

Cuadro 4. Valores de aforo (Q, L h⁻¹) de 50 emisores en un sistema de riego por goteo-cintilla. Burt y Styles, 1994.

Emisor	Q	Emisor	Q	Emisor	Q	Emisor	Q	Emisor	Q
1	0.6	11	0.74	21	0.52	31	0.58	41	0.6
2	0.6	12	0.65	22	0.55	32	0.65	42	0.52
3	0.56	13	0.75	23	0.5	33	0.58	43	0.6
4	0.55	14	0.55	24	0.5	34	0.6	44	0.7
5	0.65	15	0.58	25	0.6	35	0.6	45	0.5
6	0.65	16	0.6	26	0.6	36	0.6	46	0.55
7	0.5	17	0.55	27	0.6	37	0.58	47	0.58
8	0.74	18	0.58	28	0.55	38	0.53	48	0.55
9	0.65	19	0.57	29	0.6	39	0.56	49	0.5
10	0.75	20	0.6	30	0.58	40	0.64	50	0.55

Sistema de microaspersión. En este caso se trata de evaluar la aplicación del agua de riego con un microaspersor por medio del coeficiente de uniformidad de Christiansen (Ecuación 2). Las características hidráulicas de funcionamiento son las siguientes: presión hidráulica 0.21 MPa, caudal 129 L h⁻¹, lámina proyectada promedio a aplicar 4.8 mm, velocidad y dirección del viento al momento de la prueba 7.2 km h⁻¹ NE (la dirección es NE-SE). La Figura 8 muestra los valores de volumen de agua colectada en 144 recipientes de 5.2 cm de diámetro (21.2372 cm²) distribuidos en cuatro cuadrantes alrededor del emisor (al centro, representado con una X), separados 0.5 m entre hileras verticales y horizontales. De acuerdo a estos datos, la media es de 4.6 cm³ (2.166 mm); las lecturas totalizan 662.4 cm³ y la suma de las desviaciones absolutas es 386.2 cm³. Con estos datos, al aplicar la Ecuación 2 se obtiene un valor del coeficiente de uniformidad de Christiansen de 41.7 por ciento (Valor aceptable para un solo microaspersor, según estudios de Román, 2002). Cabe mencionar que este valor relativamente bajo obedece a que se evalúa sólo un emisor. Al evaluar un sistema donde se presenta traslape, las láminas aplicadas muestran una uniformidad mayor entre sí que se refleja en un valor del coeficiente de uniformidad de Christiansen considerablemente mayor del 80 por ciento.

Para la estimación de la eficiencia de captación (E_c) con la ecuación 8, es necesario determinar el volumen captado mediante:

$$V_c = \frac{\left[\frac{\sum X_i}{A_p} * A_{dp} \right]}{1000} \quad 11$$

Donde: $\sum X_i$ es el total del volumen captado en los recipientes 662.4 cm³, A_p es el área del recipiente 21.2372 cm² y A_{dp} el área de influencia del pluviómetro, 2,500 cm².

Al sustituir estos valores en la expresión previa, el volumen captado en la superficie es de 77.98 litros. De acuerdo al aforo que se realiza en el microaspersor directamente, su descarga durante una hora fue de 129 litros, por lo que el cociente entre ambos valores es 0.6047 ó 60.47 por ciento de eficiencia de captación. Es necesario señalar que este valor relativamente bajo obedece al hecho de que el muestreo de aplicación se realiza sobre una superficie cuadrada, cuyos lados miden un 80 por ciento del diámetro de cobertura del dispositivo. Además, bajo las condiciones de viento el patrón de aplicación está ligeramente distorsionado en el sentido de la dirección del viento. Se puede apreciar fácilmente que los valores del extremo superior derecho son cero, mientras que en el extremo opuesto se observan valores aproximados a la media. Estos factores hacen que no se colecte agua en toda el área de dominio, por lo que el valor de eficiencia de captación se afecta considerablemente.

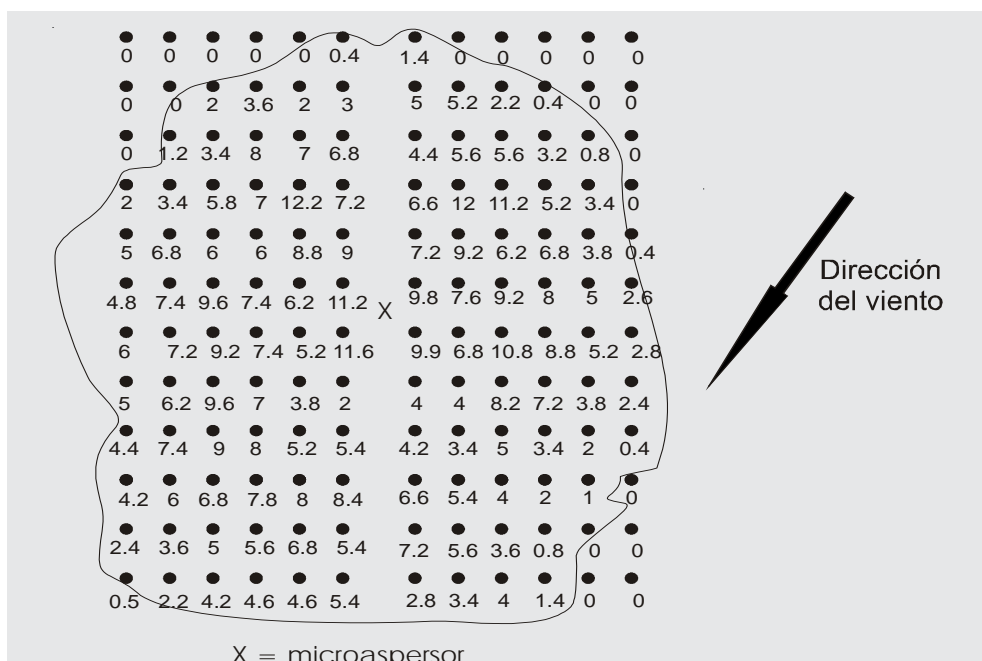


Figura 8. Volumen de agua (cm³) captado en recipientes en torno a un microaspersor durante una hora de riego.

Sistema de riego por aspersión fijo. Considerando un muestreo de 16 puntos como se describe en una sección precedente, el volumen captado (cm³) por recipiente es el que se muestra a continuación (Rodríguez y Mendoza, 1990).

Cuadro 5. Datos de evaluación de volúmenes de agua de un sistema de riego por aspersión fijo.

Nº de recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Vol (cm³)	70	65	65	75	40	80	75	55	50	65	70	75	75	70	65	80

$$\bar{X} = \frac{\sum Xi}{N} = \frac{1070}{16} = 66.8 = 67 \text{ cm}^3$$

Utilizando la Ecuación 2 se tiene:

$$UCC = \left[1 - \left[\frac{\sum |Xi - \bar{X}|}{\sum Xi} \right] \right] * 100\% = \left[1 - \frac{136}{1070} \right] * 100 = 87.2\%$$

El valor que se alcanza es aceptable y refleja el efecto combinado del viento, la variabilidad propia de emisión y el traslape entre aspersores. Mientras los dos primeros factores reducen la uniformidad, el traslape la mejora pero sin lograr alcanzar el valor potencial.

Sistema de riego por aspersión portátil o mecanizado. Rodríguez (1988) evaluó la uniformidad del riego de una lateral con ruedas (power roll) en un cultivo de alfalfa. Los datos del volumen de agua colectado en mililitros o cm^3 se muestran en el Cuadro 6, con los cuales el usuario puede hacer uso de la ecuación de Christiansen; para Ea y Er se requieren las láminas aplicadas con dichos volúmenes y las encontradas en la profundidad del suelo.

Cuadro 6. Datos que se recolectaron en la evaluación de una lateral con ruedas de riego por aspersión. Rodríguez, 1988.

N	Vol	N	Vol
1	978.7	8	679.7
2	897.1	9	679.7
3	652.5	10	1495.2
4	706.8	11	1549.6
5	1141.8	12	1604.0
6	761.2	13	1114.6
7	679.7		

Según los datos del Cuadro 6 transformados a lámina de agua y con los de lámina de agua encontrada a la profundidad del suelo requerida, el coeficiente de uniformidad de Christiansen fue de 77.6, la eficiencia de aplicación de 84 y la eficiencia de requerimientos de 48.5, todo expresado en por ciento. La eficiencia de aplicación potencial de 65.2 por ciento, conforme a la Ecuación 6, sugiere que se está desperdiciando casi un 35 por ciento del agua de riego debido al diseño inadecuado del sistema. Lo anterior se debe a que los traslapos ocurridos y/o a las boquillas de los aspersores no son los correctos para el tipo de suelo y la influencia del viento. Aún cuando la Eaa está dentro de valores permisibles según Cuadro 3, existen deficiencias de humedad en el 50 por ciento de la profundidad radicular, como lo indica la Er . Se sugieren algunas acciones para mejorar dicho sistema como son:

- Modificación de traslapes de aspersión y/o boquillas de aspersores.
- Modificación del tiempo de riego.

Lo anterior se inicia con el estudio del patrón simple de un solo aspersor (PSA) bajo las condiciones operativas del sitio (tipo de suelo y viento). Posteriormente, se infieren los patrones generales traslapados de aspersión (PTGA) que operen con los mejores índices de eficiencia. Esto se logra utilizando modelos de simulación. Por ejemplo, el modelo de Allen (1991) genera la UCC y Ec partiendo de un aspersor o micro aspersor, su patrón de distribución de agua (PSA) en tres dimensiones mediante una gráfica de su pluviometría proporcionada en su entorno y afectada por la velocidad y dirección del viento; a partir de esta información se infieren los patrones de traslapes de aspersión (PTGA) que proporcionen las mejores eficiencias y, por supuesto, se obtiene el mejor traslape de aspersión (separación entre aspersores y líneas de riego).

Evaluación de un sistema de riego por aspersión de cañón portátil.

Como se citó anteriormente, la Figura 6 muestra la forma como fueron colectados los volúmenes de agua en tres hileras de recipientes para un sistema de riego tipo cañón portátil y la información se muestra en el Cuadro 7. Los valores para HA_1 y HA_2 tanto del lado izquierdo como del derecho totalizan un dato ($HA_1 + HA_2$), mientras que los de las columnas HC de ambos lados totalizan otro igual a ΣHC . La resultante de los 36 puntos de muestreo generan doce números, los cuales se utilizan en la evaluación del sistema y se encuentran dentro de «traslape de datos» del cuadro mencionado. La media de los tres valores más bajos (25%) y marcados con asterisco es igual a 108.33 cm^3 , mientras que la media del volumen captado en los 12 valores compuestos es de 117.16 cm^3 . La eficiencia de distribución de 92.44 por ciento es el resultado del cociente de estos dos valores.

Cuadro 7. Volumen captado (cm^3) de agua aplicado por un sistema de riego por aspersión de cañón portátil (Rodríguez y Mendoza, 1990).

Distancia desde la lateral m	N° de recipiente y volumen captado				Distancia desde la lateral m	N° de recipiente y volumen captado				Traslape de			
	Lado Izq. de la lateral					Lado Der. de la lateral				HA_1+ HA_2	ΣHC	HA_1+ HA_2+ HC	
	Recip. N°	HA_1	HA_2	HC		Recip. N°	HA_1	HA_2	HC				
5	1	30	30	60	30	6	25	25	55	110*	115	225	
10	2	33	35	65	25	5	28	30	65	126	130	256	
15	3	30	35	70	20	4	32	30	60	127	110*	237	
20	4	35	30	60	15	3	28	25	55	118	115	233	
25	5	25	30	55	10	2	35	30	60	120	115	235	
30	6	20	25	50	5	1	25	35	65	105*	115	220	
Suma del total de los valores obtenidos													1406
Suma de la cuarta parte de los valores más bajos (*)													325

Evaluación de un sistema de riego por aspersión de cañón viajero. El procedimiento de evaluación es similar al del cañón portátil manual. Se utiliza una hilera de recipientes colectores perpendicular al desplazamiento del sistema. En el Cuadro 8 se proporciona información de una evaluación para este sistema el cual irriga una franja de 100 m de ancho y toma como referencia el centro del sistema. A partir de ese punto, se ubican los recipientes de un lado y otro (derecho e izquierdo) espaciados a 3 m. En esta situación, los primeros están más próximos al emisor lo que hace que capten un volumen mayor de agua. La media de los ocho valores compuestos más bajos (25 %) es de 321.9 cm^3 , mientras que la media del volumen captado en los 33 valores compuestos es de 454.8 cm^3 . La eficiencia de distribución es el cociente de estos dos valores expresado en por ciento y es de 70.8.

Evaluación de un sistema de riego por aspersión de pivote central. Para determinar la uniformidad de distribución de un sistema con tres torres de impulsión eléctrica de acuerdo a la Ecuación (4), la forma de colocar los recipientes es similar al que se ilustra en la Figura 7 (A). Los datos de volumen colectados se muestran en el Cuadro 9. La posición 1 se inicia cercana a la torre fija y la 12 en el extremo más alejado del mismo. La separación entre recipientes en la hilera es de 10 m colocándose cuatro recipientes entre torres denominados como tramos 1, 2 y 3. Una vez colectadas las muestras se calcula el volumen ponderado al multiplicar el volumen captado por la posición designada. Se identifican los valores observados del 25 por ciento más bajos, sumándose tanto sus correspondientes valores ponderados como los de sus posiciones. En este caso 785 y 18, respectivamente. De forma similar se obtienen los valores totales. La uniformidad de distribución es el cociente expresado en porcentaje, entre la media ponderada de los valores más bajos y la del total de los datos. La primera es el cociente de 785 y 18, y la segunda el cociente de 4,465 entre 78, resultando 43.61 y 57.4 cm^3 , respectivamente. Finalmente, la eficiencia de distribución al relacionar 43.61 y 57.37 es 76.0 por ciento. Este valor es inferior a un valor aceptable según Plocher (1989), que recomienda al menos 85 por ciento de uniformidad de distribución.

Cuadro 8. Volumen captado (cm³) de agua aplicado por un sistema de riego por aspersión de cañón viajero (Rodríguez y Mendoza, 1990).

Espacia - miento entre recipientes (m)	Volumen colectado en los recipientes		Espacia - miento entre recipientes (m)	Volumen colectado en los recipientes		Vol. Total
	Lado izquierdo del camino			Lado derecho del camino		
	Recip. N°	Volumen		Recip. N°	Volumen	
3	1	560	99	33	-	560
6	2	540	96	32	-	540
9	3	510	93	31	-	510
12	4	490	90	30	-	490
15	5	505	87	29	-	505
18	6	475	84	28	-	475
21	7	480	81	27	-	480
24	8	460	78	26	-	460
27	9	430	75	25	-	430
30	10	410	72	24	-	410
33	11	370	69	23	-	370
36	12	325	66	22	-	325*
39	13	305	63	21	-	305*
42	14	345	60	20	-	345*
45	15	335	57	19	-	335*
48	16	310	54	18	-	310*
51	17	305	51	17	-	305*
54	18	290	48	16	35	325*
57	19	250	45	15	75	325*
60	20	230	42	14	120	350
63	21	215	39	13	215	430
66	22	165	36	12	365	530
69	23	95	33	11	410	505
72	24	65	30	10	515	580
75	25	-	27	9	540	565
78	26	-	24	8	525	525
81	27	-	21	7	500	500
84	28	-	18	6	490	490
87	29	-	15	5	470	470
90	30	-	12	4	490	490
93	31	-	9	3	540	540
96	32	-	6	2	605	605
99	33	-	3	1	625	625
Suma del total de los valores					15010	
Suma del cuarto bajo (*)					2575	

Cuadro 9. Volumen captado (cm³) de agua aplicado por un sistema de riego por aspersión de pivote central (Rodríguez y Mendoza, 1990).

N° de tramo	N° posición	R e c i p i e n t e s	
		Volumen Recolectado	Volumen Ponderado
1	1*	45 *	45
1	2 *	50 *	100
1	3	55	165
1	4	50	200
2	5	65	325
2	6	75	450
2	7*	40 *	280
2	8*	45 *	360
3	9	55	495
3	10	60	600
3	11	55	605
3	12	70	840
Suma = 78 total		Suma total =	4465
Suma del cuarto bajo (*) =		Suma del cuarto bajo (*) =	785

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G. 1991. Sprinkler Pattern Overlap Program Software Catch 3D Version 4-41 Dept. of Agricultural and Irrigation Engineering, Utah State University, Logan, UT.
- Anyoji, H. and I. P. Wu. 1994. Normal Distribution Water Application for Drip Irrigation Schedules. Transactions of the ASAE. Jan-Feb. Vol. 37 N° 1, pp 159–164.
- Bistrain, P. 1959. Pérdida de conducción de canales. Memorandum Técnico No. 155. SRH. México.
- Burt, Ch. M. and S. W. Styles 1994. Irrigation Efficiency and Uniformity. Drip and Microirrigation for Trees, Vines, and Row Crops. ITRC. Department of Agricultural Engineering, California Polytechnic State University. San Luis Obispo, California.
- Centro Nacional de Métodos Avanzados de Riego (CENAMAR). 1982. Memorias del VII Curso de Riego por Goteo. SARH-DGUR, Gómez Palacio, Dgo.
- Contreras de la R., F. J., A. Román L. y S. F. Mendoza M. 1982. Generalidades del Riego por Goteo. Memorias del VII Curso de Riego por Goteo. CENAMAR, SARH. Gómez Palacio, Dgo.
- Chávez M., J. 1978. Advances of irrigation engineering uniformity distribution in sprinkler irrigation. Trad. Lect. 14, pp. 182-190.
- Chen, D. and W.W. Wallender. 1984. Economic Sprinkler, Spacing and Orientation. Transactions of the ASAE, Vol. 27 N° 3 May–Jun pp. 737–743.
- Christiansen, H. E. 1942. Irrigation by Sprinkling. Vol. 670 Berkeley, California. EUA. University of California. P. 93-110.
- Etcheverry, B. A. and S. T. Harding. 1933. Irrigation practice and engineering. Vol. 1 Mc Graw Hill Book Company Inc., New York.
- Flores L., L. F. 1989. Avances en Tecnología de Riego. Memorias del Seminario Internacional sobre Tecnificación del Riego y Uso Racional de la Energía. FIRA-Banco de México, SARH, CFE pp. 1–10.
- Grassi, C. J. 1967. Factors affecting irrigation efficiency and the contribution of agricultural engineering in the Improvement of Water Use in Latin America Irrigation Projects International Conference on Water for Peace Mag. Washington. D. C.
- Hernández Y., C. 1987. Evaluación del uso del agua a nivel parcelario en riego superficial para la Comarca Lagunera. Informe de Investigación PRONAPA, Vol, 1, Cap. 2. Pags. 171-194.
- Hout, I. 1951. Irrigation Engineering Vol. 1, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Huerta M., J. 1987. Programa Nacional de Uso Eficiente de la Infraestructura Hidroagrícola. III Congreso Nacional de Irrigación, Los Mochis, Sin.
- Israelsen, O. W. 1950. Irrigation principles and practices. John Wiley and sons Inc. New York.

- Keller, J. y D. Karmelli. 1975. *Trickle Irrigation Design*. Edited and Published by Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation. Glendora, California. USA
- Luna D., E. 1988. Aplicación de un modelo lineal para la evaluación de riego por superficie. Informe de Investigación INIFAP- CENID-RASPA.
- _____. 1990. Evaluación del riego superficial. Metodología de investigación y diagnóstico en relación agua-suelo-planta-atmósfera. SARH-INIFAP-CENID RASPA.
- Merriam, J. L. and J. Keller. 1978. *Farm irrigation system evaluation: a guide for Management*. Agric. Irrig. Eng. Dept. Logan, Utah State University. P. 11, 81-124.
- Pair, H. C., W. Hainz, R. Crawford and R. Kenneth. 1977. *Sprinkler Irrigation* Silver Spring Maryland United State of America. Published by: The Irrigation Association, P. 209-219, 452-456.
- Peña P., E. 1997. *Tecnificación del riego presurizado. Manual para diseño de zonas de riego pequeñas*. IMTA. P. 92.
- Plocher, A., 1989. Diseño, manejo y productividad del sistema Lateral sobre Ruedas y por Pivote Central. Memorias sobre el Seminario Internacional sobre Tecnificación del Riego y Uso Racional de la Energía, FIRA–Banco de México, SARH–CFE, pp. 289–306.
- Rodríguez C., A., V. M. Delgado M. y L. Moreno D. 1982. Evaluación de sistemas de riego por aspersión. Memorias del VII curso de riego por aspersión. CENAMAR-SARH. Gómez Palacio, Dgo. P. 172-248.
- Rodríguez C., A. 1988. Evaluación de Sistemas de Riego Presurizado (goteo y aspersión) en la Región Lagunera, Informe de investigación PRONAPA Vol. 1 (Cap. 2) 1987, pp. 121–137, SARH–INIFAP, Gómez Palacio, Dgo. Méx.
- Rodríguez C., A. y S. F. Mendoza. M. 1990 Evaluación de sistemas de riego presurizados, Metodología de Investigación y Diagnóstico en relación Agua–Suelo–Planta–Atmósfera, SARH–INIFAP, CENID–RASPA, Gómez Palacio, Dgo., Méx. pp. 302 – 337.
- Román L., A. 2002. Patrones de humedad y eficiencias en microaspersión AGROFAZ, publicación semestral de investigación científica. Universidad Juárez del Edo. de Durango, Facultad de Agricultura y Zootecnia, Venecia, Dgo., México. pp 143-151
- Solomon, K. H. 1990. *Selecting The Appropriate Irrigation System. Characteristic of Sprinkler and Trickle Systems Examined*, Special Report Agribusiness Worldwide Sep-Oct, 1990. P. 28-40.

Comité Editorial del **CENID-RASPA**

Presidente: Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Secretario: Ing. Raquel Anguiano Gallegos

Editor Técnico: M.C. Leopoldo Moreno Díaz

Esta publicación se terminó de imprimir en el mes de
junio del 2005 en los talleres del Grupo Colorama
de Torreón, Coahuila.
Su tiraje consta de 500 ejemplares



CENID-RASPA

**Km 6.5 margen derecha canal Sacramento
Gómez Palacio. Durango. MÉXICO.**

Apdo. Postal 41, Cd. Lerdo, Dgo.

Tels. y Fax: 01 (871) 719-10-76, 719-10-77 y 719-11-34

e-mail: roman.abel@inifap.gob.mx