

ANÁLISIS INTEGRAL Y OPTIMIZACIÓN DEL DESEMPEÑO DE EQUIPOS DE RIEGO POR GOTEO EN MENDOZA-SAN JUAN, ARGENTINA

Schilardi C.^{1,2}, Ciancaglini N. C.³, Meneghelli M.¹, Cúneo G¹

(1) Facultad de Ciencias Agrarias-UNCuyo. Almirante Brown (5507), Mendoza – Argentina. E-Mail: eschila@irrigacion.gov.ar

(2) Departamento General de Irrigación

(3) Prosap - San Juan - Argentina

RESUMEN

La Argentina cuenta con 127.499 ha sistematizadas con riego por goteo, Mendoza y San Juan cuentan con aproximadamente 44.624,65 ha, representando el 35% de la superficie total sistematizada en el país con riego por goteo (INDEC, 2006). El riego por goteo permite controlar el manejo del estado hídrico de las plantas y su inversión se justifica en aquellos cultivos que, como los perennes de alto valor, necesitan mantener una buena eficiencia de riego en el mediano y largo plazo de manera tal de no afectar la productividad y calidad de las cosechas (Miranda, 2002). Sin embargo, es bien sabido que en una zona árida con precipitaciones escasas como en las provincias de Mendoza-San Juan si el riego localizado no es manejado racionalmente puede provocar una brusca salinización del suelo dentro del bulbo húmedo que afecte seriamente el rendimiento del cultivo (Fontella et al, 2009), además de comprometer la vida útil de las instalaciones, como así también realizar un uso poco eficiente del recurso hídrico y la energía. El objeto del presente trabajo es la caracterización integral del desempeño de los sistemas de riego por goteo en Mendoza-San Juan, de forma tal de determinar las principales causas que limitan la optimización de la uniformidad de distribución en las instalaciones, proponiendo alternativas para su optimización. Se utilizaron las metodologías propuestas por Merriam y Keller (1978), citada por Fernando Pizarro (1996), la metodología propuesta por ASAE, a través de sus estándares ASAE EP-438 (2001), la metodología propuesta por FAO (1998, 1986) y las metodologías propuestas por Keller y Bliesner, (1990); Rodrigo López et al, (1992); y Burt, (2007). Se evaluaron 1470 has sistematizadas con riego por goteo, de la superficie total evaluada el 36% presenta problemas en el diseño agronómico, el 40% en el diseño hidráulico, el 52% en la operación de las instalaciones, el 68% en el mantenimiento de los equipos de riego y el 84% de las subunidades de riego mostraron falta de regulación de válvulas. De todas las subunidades evaluadas el 50% se halla por debajo del rango recomendado en la uniformidad de distribución. La evaluación de desempeño se sistematizó en sistemas de información geográfico (Arc View 3,2^a 2001, GV SIG, 2011) para su análisis espacial. Finalmente se analizan las principales causas que limitan el desempeño de los equipos de riego y se describen las tareas o pasos a seguir para su optimización.

Palabras clave: uniformidad, riego por goteo, operación, mantenimiento

ANÁLISIS INTEGRAL Y OPTIMIZACIÓN DEL DESEMPEÑO DE EQUIPOS DE RIEGO POR GOTEO EN MENDOZA-SAN JUAN, ARGENTINA

Schilardi C.^{1,2}, Ciancaglini N. C.³, Meneghelli M.¹, Cúneo G¹

(1) Facultad de Ciencias Agrarias-UNCuyo. Almirante Brown (5507), Mendoza – Argentina. E-Mail: eschila@irrigacion.gov.ar

(2) Departamento General de Irrigación

(3) Prosap - San Juan - Argentina

INTRODUCCIÓN

La Argentina cuenta con 127.499 ha sistematizadas con riego por goteo, Mendoza y San Juan cuentan con aproximadamente 44624,65 ha, representando el 35% de la superficie total sistematizada en el país con riego por goteo (INDEC, 2006). El riego por goteo permite controlar el manejo del estado hídrico de las plantas y su inversión se justifica en aquellos cultivos que, como los perennes de alto valor, necesitan mantener una buena eficiencia de riego en el mediano y largo plazo de manera tal de no afectar la productividad y calidad de las cosechas (Miranda, 2002). Sin embargo, es bien sabido que en una zona árida con precipitaciones escasas como en las provincias de Mendoza-San Juan si el riego localizado no es manejado racionalmente puede provocar una brusca salinización del suelo dentro del bulbo húmedo que afecte seriamente el rendimiento del cultivo (Fontella et al, 2009), además de comprometer la vida útil de las instalaciones, como así también realizar un uso poco eficiente del recurso hídrico y la energía.

El desempeño del cualquier sistema de riego localizado es altamente dependiente de la calidad del diseño hidráulico y agronómico, de la calidad de los materiales que componen el sistema y de la adecuada operación y mantenimiento del sistema, en función del cultivo a regar. La uniformidad de distribución de las láminas aplicadas, se determina por una combinación de parámetros de diseño que pueden expresarse de la siguiente manera (Pereira, 1999):

$$\text{Uniformidad (DU)} = f(P, \Delta P, Ec, CV_m, Fl) \quad (1)$$

Donde:

P: presión nominal del emisor

ΔP : variación del presión admisible dentro del sistema

Ec: características de descarga del emisor seleccionado (caudal vs presión)

CV_m : coeficiente de variación de fabricación del emisor seleccionado

Fl: capacidad y desempeño del sistema de filtrado

Por lo tanto la uniformidad de un sistema de riego depende fundamentalmente de un adecuado diseño y mantenimiento del sistema. La eficiencia de aplicación resulta de la combinación de variables de diseño y manejo, pudiéndose expresarse de la siguiente manera (Pereira, 1999):

$$\text{Eficiencia de aplicación (EAP)} = f(P, \Delta P, Ec, Cv, Fl, Ks, Wa, Tap, IR) \quad (2)$$

Donde:

Ks: conductividad hidráulica del suelo

Wa: humedad actual de suelo antes del riego

Tap: tiempo de aplicación o riego

IR: intervalo de riego

Por lo tanto la eficiencia de aplicación de un sistema de riego localizado depende fundamentalmente de la uniformidad como de la programación de los riegos (Pereira, 1999):

$$EAP = f(\text{DU}, \text{programación de riegos}) \quad (3)$$

Por lo tanto el indicador más útil para la evaluación de la uniformidad de los sistemas de riego localizados es: la uniformidad de distribución. Merriam et al. (1973) desarrolló las primeras técnicas para la evaluación de equipos de riego por goteo, determinando la "Uniformidad de Emisión" (EU), concepto que hoy se denomina como DUql (Uniformidad de distribución del cuarto más perjudicado) y para ello empleó el promedio de los 16 caudales mas bajos, sobre un total de 64 valores de caudal. Realizó un ajuste por el número de emisores por planta (n). No fue incorporada la medición de presiones dentro del cálculo.

$$DUql = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{n}} + \frac{1}{\sqrt{n}} \frac{q_{\min lq}}{q_{prom}}\right) \cdot 100 \quad (4)$$

Karmeli y Keller (1974) consideraron dos componentes en sus cálculos: la variación de la fabricación y las diferencias presión. Recomendaron la siguiente fórmula para diseño:

$$DUql = \left(1 - 1,27 \frac{CV_m}{\sqrt{n}}\right) \cdot \left(\frac{q_{\min lq}}{q_{prom}}\right) \cdot 100 \quad (5)$$

Donde CV_m es el Coeficiente de Variación de Fabricación dado por la desviación estandar de los caudales dividida por el caudal promedio de los emisores, y el $q_{\min lq}$ y q_{prom} es la relación de "mínima" del promedio de caudales debido a la diferencia de presión.

Bliesner (1977) reconoció la importancia de aislar causas de no uniformidad con evaluaciones de campo. Determinó que la presión debe ser elevada a su exponente de descarga, puntualizando el concepto de "uniformidad de presiones":

$$DUql \cdot \text{diferencias} \cdot \text{presión} = \left(\frac{\bar{P}_{1/4}}{\bar{P}}\right)^x \times 100 \quad (6)$$

Merriam & Keller (1978) revisan su procedimiento original de 1973 e incorporan las medidas de presión y el exponente de descarga para estimar un DUql final:

$$DU_{lq} = DU_{lq_{Caudales}} \times \left(\frac{P_{\min.ingreso.lateral.terciaria.seleccionada}}{P_{\min - media.ingreso.lateral.terciaria.seleccionada}} \right)^x \quad (7)$$

Posteriormente surgieron varios trabajos de autores que trataron estos temas y fueron incorporando nuevos conocimientos, tales como Solomon & Keller (1978) quienes determinaron que considerar el coeficiente de variación de fabricación es tan importante como analizar las variaciones de presiones, Nakayama et al. (1979), quienes destacan la importancia de tener técnicas de evaluación para proveer de valores comparables de **DU (Uniformidad de Distribución)** independientemente del método de riego, su trabajo asume una distribución normal de caudales y analizan el impacto del número de emisores por planta y del coeficiente de variación de fabricación sobre la uniformidad de distribución (DU). Bralts y Kesner (1983) también asumen una distribución normal para los caudales de los emisores y recomiendan que con la medición de 18 caudales en una subunidad, se puede asegurar una estimación adecuada del coeficiente de uniformidad. Posteriormente ASAE (2001), propone la metodología de “Evaluación a campo de sistemas de microirrigación, EP-458” (Field Evaluation of Microirrigation Systems, EP-458). Lamm et al (1997), realiza un fuerte trabajo estadístico sobre esta metodología. Nakayama y Bucks (1981) mencionan que es necesario desarrollar metodologías para tomar en cuenta a emisores tapados. Burt et al, 1985; publican el manual “Irrigation System Evaluation Manual”; estandarizando procedimientos y resultados de técnicas para la evaluación de métodos de riego. Dahlgren (1987) determina los procedimientos de evaluación rápidos propuestos por ITRC (Irrigation Training and Research Center, California Polytechnic State University, San Luis Obispo). ASCE (Burt et al, 1997) revisa y redefine los términos de uniformidad, mejorando las enunciaciones de los parámetros de desempeño con el objetivo de evitar confusiones y errores de cálculo, actualizado los estándares internacionales; el trabajo mencionado se acompaña con dos trabajos anexos que dan más información respecto a las expresiones estadísticas de la uniformidad y a la exactitud de las estimaciones de los parámetros de desempeño. Inicialmente Clemmens y Solomon (1997) recomendaron la siguiente ecuación para el cálculo de la uniformidad de distribución global o del sistema el cual incorpora los principales componentes que afectan a DU:

$$DU_{lq} = 1 - \sqrt{(1 - DU_{lq1})^2 + (1 - DU_{lq2})^2 + \frac{(1 - DU_{lq1})^2 (1 - DU_{lq2})^2}{K_a^2}} \quad (8)$$

Finalmente en 2003 se realizan procedimientos de actualización sobre los procedimientos mencionados por Dahlgren (1987). Burt et al (2004, 2007) menciona la aplicación del concepto de “**Uniformidad de Distribución Global o del Sistema**” (DU), que es ampliamente utilizado en sistemas de riego por goteo y microaspersión. El DU es estimado mediante combinaciones matemáticas de componentes del DU, tales como diferencias de presión, “otras causas” (tales como la variación en su fabricación, taponamiento, etc), drenaje desigual y tasa de aplicación desigual de la siguiente manera para goteo y microaspersión:

$$DU_{lq} = DU_{lq\Delta P} \times DU_{lqOther} \times uneven \cdot spacing \cdot DU \times unequal \cdot drainage \cdot DU \quad (9)$$

En zonas de Estados Unidos en Cachuma RCD (1994), se evaluaron 174 equipos de riego obteniendo una DU promedio para goteo del 0,64 y para microaspersión del 0,65. Hanson et al 1996, reporta evaluaciones en 481 equipos de riego localizado utilizando el programa de evaluación del ITRC; donde se obtiene una DU promedio para goteo de 0,73 y para microaspersión de 0,63. ITRC (2003, mencionado por Burt 2004), obtuvo resultados sobre 329 evaluaciones de campo que dieron un valor promedio de DU de 0,85 para goteo y 0,80 para microaspersión. Aproximadamente el 45% de la falta de uniformidad se debió a diferencias de presión, 52% fue debida a “Otras causas”, 1% a drenaje desigual y 2% a una desigual tasa de aplicación del caudal. Asimismo, el autor sostiene que con un buen diseño y manejo de las instalaciones, pueden obtenerse valores elevados de DU por lo menos en 20 años de la vida útil del equipo.

Ortega et al (2002) mediante el Servicio Integral de Asesoramiento al Regante de Castilla-La Mancha-España obtuvo en 100 evaluaciones de campo, según metodología propuesta por Merriam y Keller (1978) - con las recomendaciones propuestas por Keller y Bliesner (1990); Rodrigo et al (1992); Tarjuelo (1993) y Ortega (1999) – un coeficiente de uniformidad promedio, de la secuencia u operación evaluada, del 82,2%; determinando que los problemas principales observados se deben a problemas de presión cuyas causas se deben a diferentes razones como la baja eficiencia de los equipos de bombeo, pobre diseño de la red de distribución, problemas de limpieza en filtros y pérdidas de carga.

Localmente, Chambouleyron y otros (1993) mostraron los resultados de una evaluación general sobre sistemas presurizados, en diferentes cultivos, en el oeste semiárido del país. Aunque se evaluaron diferentes parámetros llamó la atención el relativo bajo coeficiente de uniformidad (en varios casos inferiores al 70%) de los distintos sistemas así como los elevados consumos energéticos expresados como HP/ha (1,6 a 4,6 HP/ha). Por último, se evidenció una tendencia general al subuso del potencial tecnológico de la herramienta “riego presurizado”. Fontella, et al (2009) mencionan un trabajo realizado en Mendoza sobre 17 propiedades, a fin de determinar coeficientes uniformidad, láminas máximas, salinidad del agua de riego y del suelo, utilizando las metodologías propuestas por Merriam y Keller, (1978); y Bralts y Kesner (1983). Las conclusiones muestran que en el 44% de las subunidades de riego evaluadas el CU se encuentra por debajo del rango recomendado. En el 94% de las fincas evaluadas hay diferencias significativas entre caudales medios registrados en unidades y subunidades de una propiedad. Los autores resumen los problemas más frecuentemente encontrados como: Problemas de diseño, problemas de mal manejo del equipo, problemas agronómicos. En el 24% de los casos analizados (4/17) se ha observado sub-dimensionamiento de equipos, que obligan a estrategias de riego diferenciales, como regar anticipadamente al inicio del ciclo agrícola (durante el invierno) para almacenar suficiente agua en el perfil del suelo y asegurar una reserva de agua disponible en el suelo, en los momentos de máximo requerimiento por parte del cultivo-

El objetivo principal del presente estudio es la evaluación del desempeño de los métodos de riego localizados en Mendoza, San Juan – Argentina, considerando la uniformidad de distribución global o del sistema con el objetivo de dar mayor entendimiento a los componentes que la afectan, detectando los principales problemas que limitan la optimización del método de riego, detallando alternativas para su solución

práctica a campo. Como objetivo secundario se plantea comparar los diferentes procedimientos para el cálculo de la uniformidad de distribución global o del sistema.

MATERIAL Y MÉTODO

Se realizaron evaluaciones sobre una superficie de 1.470,36 ha en 25 propiedades, todas con cultivos de vid y/o frutales en las provincias de Mendoza y San Juan, Argentina. La muestra realizada incorporó equipos de riego con problemas de diseño, operación y mantenimiento, equipos recientemente instalados, equipos recientemente optimizados, como así también equipos donde se había concluido con la vida útil de los laterales de riego, lo cual permite tener una situación promedio de funcionamiento del riego localizado bajo la zona de estudio. En cada equipo de riego se realizó la evaluación de su desempeño en todas sus válvulas y en todas sus secuencias y operaciones.

Para los procedimientos de campo dirigidos a la evaluación de los métodos de riego y para la cuantificación de los parámetros desempeño, que califican los métodos de riego se han utilizado las metodologías propuestas por los estándares de Merriam y Keller (1978), citada por Fernando Pizarro (1996), la metodología propuesta por ASAE, a través de sus estándares ASAE EP-438 (2001), la metodología propuesta por FAO (1998, 1986) y las metodologías propuestas por Keller y Bliesner, (1990); Rodrigo López et al, (1992); y Burt, (2004, 2007). La evaluación de desempeño, posteriormente se sistematizó en sistemas de información geográfica (Arc View 3,2^a 2001, GV SIG, 2011).

Las variables respuesta bajo estudio para las distintas evaluaciones a campo fueron: coeficiente de uniformidad de caudales, CU (Merriam y Keller, 1978); coeficiente de variación total de caudales CVq (Bralts y Kesner, 1983); coeficiente de variación total de presiones CVp (Bralts y Kesner, 1983); uniformidad de distribución global o del sistema, $DU_{lqglobal}$ (Burt, 2004, 2007) y la uniformidad de distribución del sistema $DU_{lqsistema}$ (Clemmens y Solomon 1997). Las variables explicativas fueron: provincia, método de riego, cultivo y modelo de emisores. Dentro de cada variable explicativa se consideraron los siguientes factores o categorías: provincia (Mendoza, San Juan); método de riego (goteo, microaspersión); cultivo (vid, frutales); modelo de emisores (no autocompensado, autocompensado).

Para todos los análisis de las variables respuesta en función de sus variables explicativas se aplicó para cada caso, análisis de la varianza unifactorial, por lo cual el modelo general planteado fue:

$$\gamma_{ij} = \mu + \tau_j + \varepsilon_{ij} \quad (10)$$

Donde:

γ_{ij} : es la respuesta de la i-ésima repetición del j-ésimo tratamiento

μ : es la media general

τ_j : es el efecto del j-ésimo tratamiento

ε_{ij} : es el error de la i-ésima repetición del j-ésimo tratamiento

Las hipótesis estadísticas para cada caso son:

Hipótesis nulas $H_0: \tau_j = 0$

Hipótesis alternativa $H_1: \tau_j \neq 0$

Para cada caso cuando el estadístico F fue significativo se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Scheffé para un nivel de significancia del 5%, los test de rangos múltiples permitieron identificar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. En caso de falta de normalidad de los datos analizados se procedió al análisis de los mismos mediante el test de Kruskal-Wallis que compara las medianas en lugar de las medias. Finalmente para estudiar la relación existente en los procedimientos de cálculo para obtener la uniformidad de distribución global o del sistema se realizó un análisis de la varianza y se estableció una regresión lineal; entre las metodologías propuestas por Burt (2004, 2007) y la propuesta por Clemmens y Solomon (1997). Se utilizó la aplicación STATGRAPHICS Plus 5.1 (Statistical Graphics Corp., 2000).

Cálculo de DU Global o del Sistema (DU_{lq})

Cada método de riego tiene numerosos componentes de DU o factores que influyen sobre todo el sistema de riego. Cada componente contribuye a la falta de uniformidad de todo el sistema. Por consiguiente, si un componente es ignorado en un procedimiento de evaluación, el sistema de DU puede ser sobre-estimado. Los componentes específicos, que generalmente son considerados en sistemas de riego presurizados para los procedimientos de cálculo, según las metodologías utilizadas son:

Uniformidad de distribución según Clemmens y Solomon (1987):

$$DU_{lq} = 1 - \sqrt{(1 - DU_{lq1})^2 + (1 - DU_{lq2})^2 + \frac{(1 - DU_{lq1})^2 (1 - DU_{lq2})^2}{K_a^2}} \quad (8)$$

Donde:

DU_{lq} : uniformidad de distribución del sistema

DU_{lq1} : uniformidad de distribución debido a diferencias de presión

DU_{lq2} : uniformidad de distribución debido a "otras causas"

K_a : factor, constante = 1,27

Uniformidad de distribución según Burt (2004, 2007):

$$DU_{lq} = DU_{lq\Delta P} \times DU_{lqOther} \times uneven \cdot spacing \cdot DU \times unequal \cdot drainage \cdot DU \quad (9)$$

Para el cálculo de cada componente que afecta a DU se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$DU_{lq\Delta P} = \left(\frac{caudal.promedio.del.cuarto.más.perjudicado}{promedio.todos.emisores} \right) \quad (11)$$

$$DU_{lqOther} = 1 - \frac{1}{\sqrt{n}} \left(1 - \text{promedio} \frac{q_{\min}}{q_{\text{promedio}}} \right) \quad (12)$$

$$\text{promedio} \frac{q_{\min}}{q_{\text{promedio}}} = \left(\sum_1^3 \frac{q_{\min}}{q_{\text{promedio}}} \right) / 3 \quad (13)$$

$$\text{uneven.spacing.DU} = \frac{\text{menor.lá min a.semanal.aplicada}}{\text{lá min a.promedio.ponderada.semanal.aplicada}} \quad (14)$$

$$\text{unequal.drainage.DU} = 1 - \left(\frac{\text{min utos.extras.operación.a lgunos.emisores}}{\text{duración.operación.min utos}} \right) \quad (15)$$

Donde:

$DU_{lqglobal}$: uniformidad de distribución global o del sistema

$DU_{lq\Delta P}$: uniformidad de distribución relacionada a diferencias de presión (ídem DU_{lq1})

$DU_{lqother}$: uniformidad de distribución relacionada a “otras causas”, incluye a la variación de fabricación de los emisores, taponamiento y obturación de los emisores, situaciones difíciles de aislar a campo (ídem DU_{lq2})

$Uneven.spacing.DU$: uniformidad de distribución relacionada a diferente espaciamiento, se refiere a la falta de uniformidad causada por tener diferente número de emisores por unidad de área en el terreno. Esto ocurre cuando hay varios marcos de plantación pero con el mismo número de emisores por planta.

$Unven.drainage.DU$: uniformidad de distribución debido a drenaje desigual, sólo es importante en terrenos con mucha pendiente, donde algunos emisores luego de apagar los equipos de riego siguen drenando agua cuando la mayoría de los emisores ha dejado de drenar o gotear.

n : número de emisores por planta

q_{\min} : caudal del cuarto más perjudicado de válvula ($=q_{\min lq}$)

q_{promedio} : caudal promedio de válvula

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se evaluaron 1.470,36 ha de riego localizado en 25 propiedades ubicadas en las provincias de Mendoza y San Juan. La superficie promedio evaluada fue de 60,34 ha. Sin embargo, en la provincia de Mendoza se encuestó el 55% del total (805,22 ha) con un total de 19 parcelas, dando una superficie promedio de finca de 42,38 ha, mientras que en la provincia de San Juan, con el 45% del total (665,14 ha), se contó con 6 predios, dando una superficie promedio de 110,85 ha. Es interesante marcar esta diferencia, que se debe fundamentalmente a que en San Juan, los predios donde se realizaron las evaluaciones son preponderantemente diferimientos impositivos. Por otra parte, la superficie con frutales representó el 21,25% del total (307,7 ha) con un total de 7 explotaciones, dando una superficie promedio de 43,96 ha. El 100% de las mismas se encontraron en Mendoza. La superficie con viñedos representó el 67,09% del total,

siendo en Mendoza 475,34 ha con 11 explotaciones que dan una parcela promedio de 43,21 ha, mientras que en San Juan contó con 665,14 ha con 6 explotaciones que dan una parcela promedio de 110,86 ha. La Tabla 1 detalla las propiedades evaluadas donde se describe: cultivo, provincia, ha regadas, sistema de riego (sistema); secuencias de riego (sec), válvulas medidas a campo (Vál.), número de emisores medidos a campo (N° E), número de presiones medidas a campo (N° P) y tipo de emisor (emisor).

Tabla 1: Principales características de las propiedades evaluadas

ID	Cultivo	Provincia	Ha	Sistema	Sec	Vál.	N° E	N° P	Emisor
1	Vid	Mendoza	45	Goteo	9	27	432	108	autocompensado
2	Vid	Mendoza	42	Goteo	2	16	256	64	no autocompensado
3	Vid	San Juan	102	Goteo	3	18	375	152	no autocompensado
4	Vid	San Juan	28	Goteo	3	7	164	70	no autocompensado
5	Vid	Mendoza	74	Goteo	4	18	390	100	no autocompensado
6	Vid	San Juan	167	Goteo	3	48	769	193	autocompensado
7	Vid	San Juan	180	Goteo	3	38	720	252	autocompensado
8	Vid	Mendoza	15	Goteo	2	7	120	32	no autocompensado
9	Frutales	Mendoza	5	Goteo	2	4	80	32	no autocompensado
10	Frutales	Mendoza	54	Goteo	3	23	736	184	no autocompensado
11	Vid	Mendoza	36.36	Goteo	2	19	304	76	no autocompensado
12	Vid	Mendoza	24	Microaspersión	3	12	236	92	no autocompensado
13	Frutales	Mendoza	15.82	Goteo	4	11	220	88	autocompensado
14	Vid	Mendoza	24	Goteo	3	11	196	60	autocompensado
15	Vid	Mendoza	60	Goteo	6	24	424	154	no autocompensado
16	Frutales	Mendoza	26	Goteo	3	6	240	96	no autocompensado
17	Vid	San Juan	77.89	Goteo	4	20	320	80	autocompensado
18	Vid	San Juan	110.25	Goteo	6	25	400	100	autocompensado
19	Frutales	Mendoza	30.34	Goteo	3	11	488	160	no autocompensado
20	Vid	Mendoza	59	Goteo	3	17	272	68	no autocompensado
21	Frutales	Mendoza	64	Goteo	3	15	688	188	autocompensado
22	Frutales	Mendoza	61	Microaspersión	6	22	473	184	autocompensado
23	Frutales	Mendoza	61	Microaspersión	4	19	452	152	autocompensado
24	Vid	Mendoza	50	Goteo	2	12	192	60	no autocompensado
25	Frutales	Mendoza	58.7	Goteo	2	10	320	80	no autocompensado
1470.36					88	440	9267	2825	

La Tabla 2 detalla los principales indicadores de desempeño por provincia, si bien se observa que existe una mayor uniformidad de caudales y presiones en Mendoza, las diferencias observadas no son significativas; las causas de este comportamiento se deben a los emisores autocompensados de la provincia de San Juan que han cumplido su vida útil (diferimientos impositivos). El resto de los indicadores analizados no presentan diferencias significativas. Las tablas siguientes detallan para cada indicador: media (M), desviación estándar (SD) y error de muestreo (E) para un $\alpha = 0,05$.

Tabla 2: Indicadores de riego localizado según provincia

Indicadores	Provincia					
	Mendoza (n = 19) 805 ha			San Juan (n = 6) 665 ha		
	M	SD	±E	M	SD	±E
CU	87.18 a	6.71	3.02	78.02 a	21.48	17.19
CVq	16.51 a	5.34	2.40	25.33 a	16.20	12.96
CVp	33.02 a	20.87	9.38	50.01 a	30.29	24.23
DUIqΔP	0.89 a	0.12	0.05	0.96 a	0.07	0.05
DUIq _{other}	0.91 a	0.15	0.07	0.87 a	0.17	0.13
Uneven Spacing DU	0.98 a	0.03	0.01	0.92 a	0.12	0.10
Uneven Drainage DU	0.99 a	0.02	0.01	1.00 a	0.00	0.00
DUIq _{global}	0.79 a	0.17	0.07	0.76 a	0.12	0.10
DUIq _{sistema}	0.84 a	0.16	0.07	0.84 a	0.14	0.11

La Tabla 3 enumera los indicadores de desempeño de riego localizado según el método de riego bajo estudio; aunque no presentan diferencias estadísticamente significativa la microaspersión presenta los valores más altos en cuanto a variación de caudales y presiones. Si bien el número de muestras del método de riego microaspersión en bajo, resulta interesante analizar que la uniformidad global o del sistema es similar a la del método riego por goteo, ello se explicaría por la menor gravedad de obturación de emisores en microaspersión y por la falta de uniformidad observada en los emisores autocompensados en el método riego por goteo.

Tabla 3: Indicadores de riego localizado según método de riego

Indicadores	Método de riego					
	Goteo (n = 22)			Microaspersión (n = 3)		
	M	SD	±E	M	SD	±E
CU	85.72 a	12.62	5.27	79.55 a	5.20	5.88
CVq	18.18 a	10.05	4.20	21.91 a	3.47	3.93
CVp	36.42 a	25.08	10.48	37.58 a	5.86	6.63
DUIqΔP	0.90 a	0.11	0.05	0.95 a	0.06	0.07
DUIq _{other}	0.91 a	0.08	0.03	0.80 a	0.25	0.28
Uneven Spacing DU	0.96 a	0.07	0.03	1.00 a	0.00	0.00
Uneven Drainage DU	0.99 a	0.02	0.01	0.99 a	0.02	0.03
DUIq _{global}	0.78 a	0.12	0.05	0.75 a	0.09	0.10
DUIq _{sistema}	0.85 a	0.11	0.05	0.78 a	0.06	0.07

La Tabla 4 resume los principales indicadores de desempeño para riego por goteo según el cultivo regado; si bien no se observan diferencias estadísticamente significativas, los frutales presentan una mayor uniformidad global o del sistema; tal comportamiento se explica porque estos cultivos tienen un mayor número de emisores por planta, por lo tanto hay una menor probabilidad de encontrar variaciones de presiones, caudales y falta de uniformidad por “otras causas” en el área correspondiente a una planta. Se observa poca variación en los diferentes indicadores de uniformidad global en los frutales, tal comportamiento se debe a la menor obturación de los emisores en el área de acción de una planta según lo explicado anteriormente.

Tabla 4: Indicadores para riego por goteo según cultivo

Indicadores	Goteo					
	Vid (n = 15)			Frutales (n = 7)		
	M	SD	±E	M	SD	±E
CU	85.18 a	14.24	7.21	86.87 a	7.55	5.59
CVq	19.99 a	10.81	5.47	14.29 a	6.37	4.72
CVp	39.05 a	23.39	11.84	31.15 a	24.44	18.10
DUIqΔP	0.89 a	0.12	0.06	0.92 a	0.09	0.06
DUIq _{other}	0.90 a	0.08	0.04	0.94 a	0.08	0.06
Uneven Spacing DU	0.95 a	0.08	0.04	0.99 a	0.02	0.01
Uneven Drainage DU	0.99 a	0.02	0.01	0.99 a	0.02	0.01
DU _{iqglobal}	0.75 a	0.12	0.06	0.85 a	0.09	0.07
DU _{iqsistema}	0.83 a	0.82	0.42	0.88 a	0.86	0.64

La Tabla 5 lista los indicadores de desempeño para riego por goteo según el tipo de emisor; se observa un menor coeficiente de uniformidad de caudales en los goteros autocompensados, este comportamiento es opuesto a lo que deberíamos esperar observar según el modelo de emisor, pero ello se explica porque es un gran porcentaje de propiedades evaluadas con goteros autocompensados, estos han cumplido con la vida útil de los mismos y necesitan comenzar con un plan de recambio. Esta situación y el tipo de emisor considerado explican las diferencias significativas encontradas en la variación de caudales, en la variación de presiones y en la uniformidad de distribución relacionada con las diferencias de presión.

Tabla 5: Indicadores para riego por goteo según tipo de emisores

Indicadores	Tipo de emisores (Goteo)					
	No Autocompensado (n = 14)			Autocompensado (n = 8)		
	M	SD	±E	M	SD	±E
CU	90.79 a	4.44	2.32	76.84 b	17.31	12.00
CVq	13.42 b	4.63	2.43	26.50 a	11.77	8.16
CVp	22.59 b	12.31	6.45	64.06 a	20.74	14.37
DUIqΔP	0.85 b	0.11	0.06	1.00 a	0.01	0.00
DUIq _{other}	0.94 a	0.11	0.06	0.86 a	0.13	0.09
Uneven Spacing DU	0.98 a	0.03	0.02	0.94 a	0.11	0.08
Uneven Drainage DU	0.99 a	0.01	0.01	0.99 a	0.02	0.02
DU _{iqglobal}	0.78 a	0.16	0.09	0.79 a	0.12	0.09
DU _{iqsistema}	0.83 a	0.15	0.08	0.86 a	0.13	0.09

La Tabla 6 muestra los resultados respectivos a análisis de la varianza para las diferentes metodologías de cálculo de la uniformidad de distribución global o del sistema. Según los datos obtenidos se observa una diferencia estadísticamente significativa entre ambas metodologías. Se puede concluir que la metodología propuesta por Clemmens y Solomon (1987), sobrestima la uniformidad global o del sistema; ya que no considera en la misma los efectos que en la uniformidad de distribución ocasionan la variación de fabricación de los emisores, el taponamiento y/u obturación de emisores, el diferente drenaje de los emisores y diferente número de emisores por unidad de área en el terreno.

Tabla 6: Análisis de la varianza para la uniformidad global o del sistema

DU Sistema	Evaluación Presurizado (n=25)		
	M	SD	±E
DU _{Iqglobal}	0.78 b	0.12	0.05
DU _{Iqsistema}	0.84 a	0.10	0.04

La Figura 1 grafica la regresión lineal obtenida entre las metodologías propuestas para el cálculo de la uniformidad de distribución global o del sistema. Según los resultados obtenidos la relación entre ambas metodologías en la siguiente:

$$DU_{Iqglobal} = 0,9238 \times DU_{Iqsistema} \quad R^2 = 0,87 \quad (16)$$

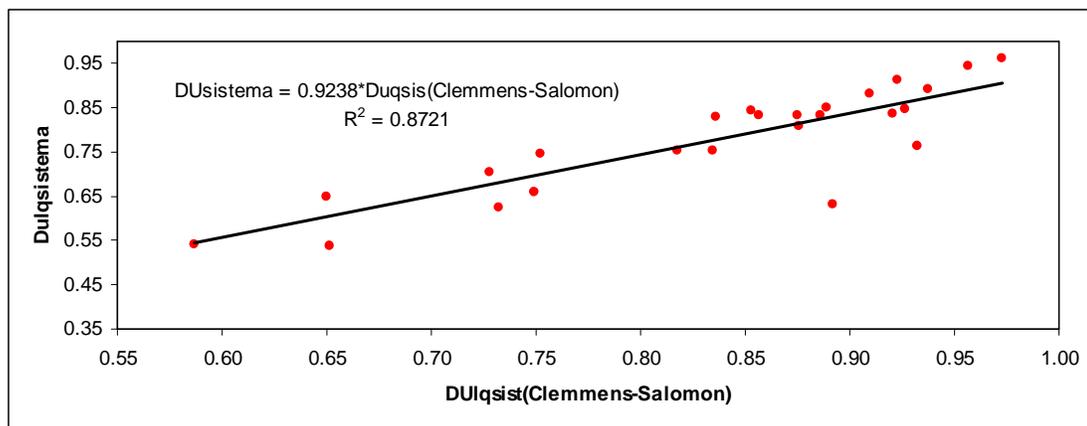


Figura 1: Relación de DU_{Iqsistema} vs DU_{Iqglobal}

Finalmente mediante un análisis profundo en cada una de las propiedades analizadas con las metodologías propuestas por los estándares de Merriam y Keller (1978), citada por Fernando Pizarro (1996), la metodología propuesta por ASAE, a través de sus estándares ASAE EP-438 (2001), la metodología propuesta por FAO (1998, 1986) y las metodologías propuestas por Keller y Bliesner, (1990); Rodrigo López et al, (1992); y Burt, (2004, 2007); se observa que el 36% de las propiedades evaluadas poseen puntos de atención en el diseño agronómico, el 40% en el diseño hidráulico (en gran parte problemas de diseño del sistema de filtrado e inyección de fertilizantes), el 52% presente problemas en la operación del método de riego (ausencia de un plan o calendarios de riego ajustado), el 68% presenta problemas de mantenimiento en las instalaciones y el 84% presenta falta de regulación de válvulas a campo. Todas las situaciones observadas y detalladas en el presente estudio son las causas del bajo desempeño de los métodos de riego localizado observados en las provincias de Mendoza y San Juan.

CONSLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para la zona bajo estudio la tecnología de riego pro goteo presenta en promedio una uniformidad de distribución global o del sistema del 0,78 considerada baja, por lo que podemos afirmar que se evidencia una tendencia general al sub-uso del potencial tecnológico de la herramienta “riego por goteo”, conclusiones similares en la zona con otras metodologías de cálculo se han alcanzado por Chambouleyron y otros (1993) y Fontella et al (2009). Similar comportamiento se observó en los años 90 en las zonas de California (E.E.UU), estudios realizados por ITRC (2003, mencionado por Burt 2004) mostraron un avance positivo en los indicadores de desempeño ($DU_{lqglobal} = 0,86$) principalmente debido a mejoras en las técnicas de diseño, mejor calidad de emisores y equipos de filtrado conjuntamente con mejores técnicas de inyección de fertilizantes (Burt et al, 2004). En cuanto a los métodos de riego por microaspersión se observa una uniformidad de distribución global o del sistema con valores medios o aceptables en mejores situaciones a lo observado en California en los años 90, sin embargo la muestra analizada es pequeña y sólo analiza equipos de riego por microaspersión de Mendoza, por lo tanto para su correcto análisis de situación habrá que ampliar la cantidad de casos evaluados. La falta de uniformidad observada se debe a: en un 44% a causas de presión, en un 50% a “otras causas”, en un 4% a tasas de aplicación diferentes y en un 2% al diferente drenaje de los emisores, valores similares reporta Burt (2004) para zonas de California (USA).

Respecto a las metodologías utilizadas para la evaluación de la uniformidad de distribución global o del sistema, se puede concluir que la metodología propuesta por Clemmens y Solomon (1997), sobrestima la uniformidad global o del sistema; ya que no considera en la misma los efectos que en la uniformidad de distribución ocasionan la variación de fabricación de los emisores, el taponamiento y/u obturación de emisores, el diferente drenaje de los emisores y diferente número de emisores por unidad de área en el terreno.

Respecto a los indicadores de desempeño para riego por goteo según el tipo de emisor; se observa un menor coeficiente de uniformidad de caudales en los goteros autocompensados, este comportamiento es opuesto a lo que deberíamos esperar observar según el modelo de emisor, ello se explica porque en un gran porcentaje de propiedades evaluadas con goteros autocompensados, estos han cumplido su vida útil y se necesita comenzar con un plan de recambio. Esta situación explica también las diferencias significativas encontradas en la variación de caudales, en la variación de presiones y en la uniformidad de distribución relacionada con las diferencias de presión respecto a los emisores no autocompensados. En primera instancia salvo situaciones de grandes pendientes y ondulaciones del terreno que lo justifiquen se recomiendan para las situaciones de terrenos con pendientes medias a bajas, que son las más frecuencias en Mendoza y San Juan, el diseño con emisores no autocompensados, dando todos los cuidados respectivos al diseño del sistema. Si se seleccionara el diseño con gotero autocompensados en necesario plantear desde la etapa de diseño del mismo un plan de reinversión de las líneas laterales para que el vencimiento de su vida útil ni produzca un impacto importante en la calidad y cantidad de la producción, evitando la reconfiguración de secuencias y agregado de bombas al sistema para intentar resolver este problema ya que se incurrirá en mayores gastos energéticos y mayor peligrosidad de roturas de partes componentes del sistema.

Se observa que el 36% de las propiedades evaluadas poseen puntos de atención en el diseño agronómico, el 40% en el diseño hidráulico (en gran parte problemas de diseño del sistema de filtrado e inyección de fertilizantes), el 52% presenta problemas en la operación del método de riego (ausencia de un plan o calendarios de riego ajustado y control del mismo), el 68% presenta problemas de mantenimiento en las instalaciones y el 84% presenta falta de regulación de válvulas a campo. Todas las situaciones observadas y detalladas en el presente estudio son las causas del bajo desempeño de los métodos de riego localizado observados en las provincias de Mendoza y San Juan. Los sistemas de información geográficos han sido una herramienta muy útil, ya que la espacialización de las mediciones efectuadas en las evaluaciones de desempeño han permitido integrar geográficamente todas las variables analizadas, ello ha sido una herramienta muy útil para detectar y sectorizar causas de baja uniformidad como así también para plantear una estrategia racional para la regulación de válvulas a campo.

Como recomendaciones fundamentales para la optimización del desempeño del riego localizado se mencionan: 1) Comenzar un adecuado mantenimiento de las instalaciones desde el diseño del mismo, para ello se deberá revisar el diseño presentado por la empresa instaladora por un profesional idóneo en el tema para su ajuste agronómico y/o hidráulico, como así también para su optimización desde el punto de vista del consumo de energía a largo plazo; 2) Luego de la instalación de un equipo de riego, certificar las instalaciones mediante una adecuada evaluación a campo; 3) No descuidar la automatización del equipo de filtrado; 4) Definir, planificar y controlar en su ejecución a los programas de operación, mantenimiento y control de los equipos de riego, de debiendo adaptarlos a las particularidades de la propiedad agrícola y a sus objetivos productivos; 4) Asignar una persona responsable en finca del equipos de riego; capacitarla y entrenarla para ejecutar buenas prácticas de manejo de las mismas; 5) Tener la costumbre y protocolos adecuados para realizar en cada ciclo agrícola como mínimo dos evaluaciones de desempeño del equipo de riego, la primera la inicio de la temporada de riego y la restante al momento de máxima demanda del cultivo bajo riego, como así también cada vez que se sospeche de problemas en las instalaciones; 6) En equipos de riego con emisores autocompensados desde el inicio del funcionamiento del mismo, se deberá elaborar un plan de reinversiones a largo plazo para el recambio de laterales de riego un vez concluida la vida útil de las mismas, para evitar tener impactos negativos sobre la producción y enfrentar procesos de reinversión inviables a corto plazo.

Finalmente resulta interesante en aquellas propiedades que lo permitan, la incorporación de sistemas de monitoreo de riego en tiempo real para el control y ajuste del plan de riegos; la automatización de válvulas mediante señales de radio, para la re-automatización de equipos viejos o para la re-adaptación de la operación de los equipos de riego según variedades y tipos de suelos; como así también la incorporación de sistemas de telecontrol de las instalaciones para realizar un adecuado control de gestión de las mismas. Si bien esta tecnología recién comienza a desarrollarse y a aplicarse en nuestra región, adecuadamente diseñada y operada podría contribuir enormemente a la optimización del desempeño de los métodos de riego localizados.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen R., Pereira L., Raes D., Smith M. 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO, Irrigation and Drainage paper 56. Rome, Italy.
- ASAE EP-458 2001. Field evaluation Of Microirrigation Systems. St. Joseph: ASAE Standars Engineering Practices data: EP 458 p792-797.
- Bliesner, RD. 1977. Field evaluation of trickle irrigation efficiency. Proceedings of the ASCE 1& D Specialty Conference on Water Managementfor Irrigation and Drainage (pp 382393), Reno, NY.
- Bralts, Y.E & Kesner C.D. 1983. Drip irrigation field uniformity estimation. Transactions of ASAE26(5): 1369-1374.
- Burt, C.; Styles S., 2007. Drip and Micro Irrigation Desing and Management for Trees, Vines and Field Crops. Irrigation Training and Research Center (ITRC). Bioresource and Agricultural Engineering (BRAE) dep. California Polytechnic State University (Cal Poly). San Luis Obispo, California. 396 p.
- Burt, C.M. 2004. Rapid field evaluation of drip and microspray distribution uniformity. Irrig Drain Syst 18(4):275–297
- Burt, C.M., Clemmens, A.J., Strelkoff, TS., Solomon, KH., Bliesner, R.D., Hardy, L.A., Howell, TA. & Eisenhauer, D.E. 1997. Irrigation performance measures-efficiency and uniformity. Journal ofIrrigation and Drainage Engineering ASCE 123(6): 423-442.
- Burt, C.M., Walker, RE. & Styles, S.w. 1985. Irrigation System Evaluation Manual. Department of Agricultural Engineering, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA.
- Cachuma Resource Conservation District. 1994. Final Report. Irrigation Water Management Program Santa Barbara and San Luis Obispo Counties. Cachuma RCD. Santa Maria, California.
- Chambouleyron J., Rearte E., Mármol P., Salatino S., Maffei J., Del Toro S., y Castellanos S. (1993). Desempeño del riego presurizado en la evolución de la salinidad y los nemátodes del suelo. XVII Congreso Nacional del Agua y II Simposio de Recursos Hídricos del Conosur, Tomo 3, pp. 287-289. Santa Fe, Argentina.
- Clemmens, AJ. & Solomon, KH. 1997. Estimation of global irrigation distribution uniformity. Journal ofIrrigation and Drainage Engineering ASCE 123(6): 454-461.
- Dahlgren, KM. 1987. Estimating Emission Uniformity in Drip Irrigation. M.S. Thesis, Agricultural Engineering Department California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California.
- FAO, 1986. Riego Localizado (Vermeieren, L. y Jobling G.). Manual de riego y Drenaje N° 36. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 203p.
- Fontella C., J.; Morabito, J.; Maffei, S.; Salatino, C.; Mirabile Y L. Mastroantonio. 2009. Riego por goteo en Mendoza, Argentina: evaluación de la uniformidad del riego y del incremento de salinidad, sodicidad e iones cloruro en el suelo. Rev. FCA UNCuyo. Tomo XLI, n° 1, 2009. Pp. 135-154. Mendoza – Argentina.

- INDEC (2006): Censo Nacional Agropecuario 2002, edición electrónica. Buenos Aires, www.indec.gov.ar.
- Keller, J y Bliesner Ron 1990. Sprinkle and Trickle irrigation. Chapman & Hall Editorial.
- Lamm, ER, Storlie, C.A. & Pitts, DJ. 1997. Revision of EP-458: Field Evaluation of microirrigation systems. ASAE Paper 972070, p. 20.
- Merriam, J.L. & Keller, J. 1978. Farm Irrigation System Evaluation: A Guide for Management (p. 271). Agricultural and Irrigation Engineering Department, Utah State University, Logan, UT
- Merriam, J.L., Keller, J. & Alfaro, J.E 1973. Irrigation Systems Evaluation and Improvement. Agricultural and Irrigation Engineering Department, Utah State University, Logan, UT
- Miranda, O. 2002. "Difusión de tecnología de riego en el oeste argentino". *Revista Argentina de Economía Agraria* V(1), 3-14
- Nakayama, ES. & Bucks, D.A. 1981. Emitter clogging effects on trickle irrigation Uniformity. Transactions of ASAE 24(1): 77-80.
- Nakayama, ES., Bucks, D.A. & Clemmens, A.I. 1979. Assessing trickle emitter application uniformity. ASAE Paper, pp. 78-2017.
- Ortega, J.F.; Abadía, R.; Ruiz, A.; García, T (1999). Evaluación de instalaciones de riego localizado: análisis de procesos de mejora y modernización en la Vega Baja del Segura. XVII Congreso Nacional de Tecnología del Riego, Junio, Murcia, España.
- Pereira, L. 1999. "Higher performance through combined improvements in irrigation methods and scheduling: a discussion". *Agricultural Water Management* 40 (1999) 153-169.
- Pizarro Fernando 1996. Riegos localizados de alta frecuencia. Goteo Microaspersión y exudación. Ediciones Mundi Prensa.
- Rodrigo López, J.; Hernández Abreiu, J; Pérez Regalado, A.; Gonzales Hernández J., 1992. Riego Localizado. Centro Nacional de Tecnología de los regadíos, España. 405 p.
- Solomon, K. & Keller, I. 1978. Trickle irrigation uniformity and efficiency. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 104(IR3): 293-306. USDA. 1956. Methods for Evaluating Irrigation Systems. Agriculture Handbook 82. Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, p. 24
- Tarjuelo, J.M. 1993. La aplicación del agua con el riego y su evaluación. En: Martín de Santa Olalla F.J. y de Juan J.A (Coordinadores), *Agronomía del riego*. Mundi-Prensa y Universidad de Castilla-La Mancha. Madrid, España.

GLOSARIO DE SÍMBOLOS:

P: presión nominal del emisor
 ΔP : variación de la presión admisible dentro del sistema
Ec: características de descarga del emisor seleccionado (caudal vs presión)
CVm: coeficiente de variación de fabricación del emisor seleccionado
Fl: capacidad y desempeño del sistema de filtrado
Ks: conductividad hidráulica del suelo
Wa: humedad actual de suelo antes del riego
Tap: tiempo de aplicación o riego
IR: intervalo de riego
 γ_{ij} : es la respuesta de la i-ésima repetición del j-ésimo tratamiento
 μ : es la media general
 τ_j : es el efecto del j-ésimo tratamiento
 ϵ_{ij} : es el error de la i-ésima repetición del j-ésimo tratamiento
DU_{lq}: uniformidad de distribución global o del sistema
DU_{lq1}: uniformidad de distribución debido a diferencias de presión
DU_{lq2}: uniformidad de distribución debido a “otras causas”
K_a: factor, constante = 1,27
DU_{lqglobal}: uniformidad de distribución global o del sistema (Burt, 2007)
DU_{lqsistema}: uniformidad de distribución global o del sistema (Clemmens y Solomon, 1997)
DU_{lq ΔP} : uniformidad de distribución relacionada a diferencias de presión (ídem DU_{lq1})
DU_{lqother}: uniformidad de distribución relacionada a “otras causas”, incluye a la variación de fabricación de los emisores, taponamiento y obturación de los emisores, situaciones difíciles de aislar a campo (ídem DU_{lq2})
Uneven.spacing.DU: uniformidad de distribución relacionada a diferente espaciamiento, se refiere a la falta de uniformidad causada por tener diferente número de emisores por unidad de área en el terreno. Esto ocurre cuando hay varios marcos de plantación pero con el mismo número de emisores por planta.
Unven.drainage.DU: uniformidad de distribución debido a drenaje desigual, sólo es importante en terrenos con mucha pendiente, donde algunos emisores luego de apagar los equipos de riego siguen drenando agua cuando la mayoría de los emisores ha dejado de drenar o gotear.
n: número de emisores por planta
q_{min}: caudal del cuarto más perjudicado de válvula (ídem q_{minlq})
q_{promedio}: caudal promedio de válvula
CVq: coeficiente de variación de caudales
CVp: coeficiente de variación de presiones
CU: coeficiente de uniformidad de caudales
x: exponente de descarga del emisor
CV_m: coeficiente de variación de fabricación de emisores