

## EVALUACIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE UN SISTEMA PRESURIZADO DE RIEGO POR GOTEO PARA CULTIVOS DE ZONAS ALTO-ANDINAS DE BOLIVIA

**Evaluation of the uniformity of a pressurized drip irrigation system for crops in the high regions in the Andes of Bolivia**

Gabriela Laura Apaza<sup>1</sup>, Carlos López Blanco<sup>1</sup>

### RESUMEN

El riego tecnificado por goteo es de interés debido a su alta eficiencia de aplicación del agua. Todo el sistema requiere de un manejo adecuado que garantice el retorno de la inversión, y mucho más en zonas que no tienen tradición de riego como es el caso del Altiplano boliviano. Por tanto, es conveniente evaluar la instalación de este sistema para comprobar los criterios de diseño y monitorear las obturaciones de los emisores. El objetivo del trabajo fue evaluar la uniformidad de aplicación de un sistema presurizado de riego por goteo en la Estación Experimental de Choquenaira del departamento de La Paz. La evaluación de la uniformidad del sistema de riego se basó en la metodología de Merriam y Keller, (1978) y la determinación del aforo del caudal fue por método de Centro Agua de la UMSS, en un área de 1.400 m<sup>2</sup>. Las variables de respuesta estudiadas fueron: comportamiento hidráulico del emisor, análisis del desempeño de riego, indicadores de uniformidad del caudal y presión. La relación presión-caudal determinó que el flujo de circulación fue turbulento, lo que significa que no se tendrá problemas de obstrucción en los emisores. El coeficiente de uniformidad más desfavorable fue de 69,61% con coeficiente de variación de 13,68%. La velocidad de infiltración básica del suelo franco arcillo limoso fue de 6,54 mm h<sup>-1</sup>. Las dimensiones del diámetro de mojado fue de 14 cm de ancho y 18 cm de largo, con profundidad de bulbo húmedo de 10 cm h<sup>-1</sup>, con descarga de caudal de emisor de 1,4 l h<sup>-1</sup>. Estos resultados indican que la implementación de este sistema permite la obtención de muchos beneficios en la producción agrícola, que sumado al aprovechamiento de las aguas subterráneas, la producción y el rendimiento se incrementaría permitiendo la mejora del sistema productivo familiar.

**Palabras clave:** Riego presurizado por goteo, eficiencia y uniformidad de aplicación, caudal, turbulento.

### ABSTRACT

The drip irrigation technology is of interest due to the high efficiency in the application of irrigation. The entire system requires proper management to ensure returns on investments, and even more in areas with no irrigation tradition as is the case of the Bolivian Altiplano. It is therefore appropriate to assess the installation of this system to check the design criteria. The objective was to evaluate the uniformity of application of a pressurized drip irrigation system at the Experimental Station of Choquenaira in La Paz. The evaluation of the uniformity of the irrigation system was based on the methodology of Merriam and Keller (1978) and determining of the flow monitoring, was conducted using the UMSS Water Center method, in an area of 1,400 m<sup>2</sup>. The evaluated variables were: hydraulic behaviour of the emitter, irrigation performance analysis, indicators of uniformity of flow and pressure. The pressure-flow relationship determined that the water flow was turbulent, meaning that no obstruction problems will be observed on emitters. The lowest uniformity coefficient was of 69,61% with a coefficient of variation of 13,68%. The basic infiltration rate of silty clay loam soil was of 6,54 mm h<sup>-1</sup>. The diameter of the wetted zone was 14 cm wide and 18 cm long, with depth of the wet bulb 10 cm h<sup>-1</sup>, with a discharge of the flow transmitter of 1,4l h<sup>-1</sup>. These results indicate that the implementation of this system allows to obtain many benefits in agricultural production, which added to the use of groundwater, would increase the production and yield allowing the improvement of the production system.

**Keywords:** Pressurized irrigation drip, efficiency and uniformity of application, flow, turbulent.

<sup>1</sup> Facultad de Agronomía - UMSA, gablauapa@gmail.com

<sup>2</sup> Docente Investigador Facultad de Agronomía - UMSA

## INTRODUCCIÓN

El riego es un componente en el desarrollo de la agricultura que proporciona un equilibrio en la producción, en ése sentido, el rendimiento de un cultivo se relaciona directamente con la satisfacción de las necesidades hídricas que requiere, por consiguiente, el riego necesita ser altamente uniforme para un uso consultivo de su aplicación.

Un sistema de riego presurizado se compone por un cabezal, sistema de filtrado, laterales y unidades de riego divididas en subunidades, se adiciona “energía” al sistema mediante una bomba. Caso contrario al sistema de riego de baja carga que se caracteriza por aprovechar la energía del desnivel de la fuente de agua hasta el punto de riego, por lo demás, es similar al primero.

El interés del riego por goteo se debe a que reduce la exigencia de agua y los costos de operación. Este método de riego constituye una mejora en la aplicación del agua a la planta. Como toda innovación requiere de un manejo adecuado que garantice el retorno de la inversión, por tanto, es conveniente evaluar una instalación para comprobar los criterios de diseño y monitoreo de obturación en emisores mediante pruebas de Evaluación de Uniformidad, bajo una metodología desarrollada para las zonas alto-andinas de Bolivia donde generalmente se efectúa el riego tradicional por surcos que a pesar de contar con aguas subterráneas estas no son aprovechadas por los

productores resultando en un riego ineficiente con la obtención de bajos rendimientos. El objetivo del trabajo fue evaluar la uniformidad de aplicación de agua bajo un sistema de riego presurizado por goteo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema presurizado de riego por goteo fue instalado en la Estación Experimental de Choquenaira dependiente de la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), situada en la comunidad de Choquenaira, a 8 km de la ciudad de Viacha, Provincia Ingavi del departamento de La Paz, geográficamente se halla a 16°41'39,25" de Latitud Sur y a 68°17'14,31" de Longitud Oeste a una altitud de 3870 m.s.n.m. El sistema de riego se instaló en un área de 1.400 m<sup>2</sup>, cuya fuente de agua fue de un reservorio con capacidad de 280 m<sup>3</sup>, asimismo, se contó con una unidad de bombeo y una unidad de riego con cuatro subunidades, compuesta por las subunidades 1 y 2 de cañahua (*Chenopodium pallidicaule*) y las subunidades 3 y 4 de cebolla (*Allium cepa*). Para la prueba de evaluación de uniformidad del sistema de riego se tomó la metodología de Merriam y Keller (1978), y para los puntos de aforo del caudal se empleó el método de Centro Agua, de la Universidad Mayor de San Simón (UMSS) diseñado por Peñarrieta (2006). Las etapas de trabajos realizados en la implementación y evaluación de uniformidad del sistema de riego presurizado por goteo, se detallan en la Tabla 1, y los puntos de muestreo en las sub unidades de riego Figura 1.

Tabla 1. Etapas de implementación y evaluación de la uniformidad del sistema presurizado de riego por goteo.

Etapa de implementación del sistema de riego presurizado por goteo	Etapa de evaluación de uniformidad del sistema de riego (metodología Merriam y Keller, 1978)
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Estudio topográfico (determinación de cotas, perfil longitudinal).</li> <li>2. Estudio de suelos (físico y químico en el laboratorio de suelos de la UMSS). <ul style="list-style-type: none"> <li>- Clase textural (porcentaje de arena, limo y arcilla).</li> <li>- Parámetros de CE, Porosidad, pH, etc.</li> <li>- Infiltración básica.</li> <li>- Humedad (CC, PMP, HDA).</li> </ul> </li> <li>3. Estudio de calidad de agua (pH, CE, SAR, STD).</li> <li>4. Diseño del sistema de riego.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Identificación de la Unidad de Evaluación: Coef. Uniformidad de descarga de caudal (CUC), Coef. Uniformidad de presión (CUp), Ec. Emisor, Coef. Variación de campo (CVc), Coef. Uniformidad del sistema (CUS), en base a la Figura 1.</li> <li>2. Toma de datos de partida (tipo y marca del emisor, distancia entre emisores, longitud y distancia entre laterales).</li> <li>3. Elección de los puntos de muestreo (puntos de aforo en lateral, matriz 4x4 según norma).</li> </ol>

- Diseño agronómico (balance hídrico).
- Diseño hidráulico (caudal, presión, altura dinámica, pérdidas de carga, potencia de bomba, longitud de laterales).
- 5. Instalación del sistema de riego en terreno (Instalación de componentes del sistema de riego: redes de conducción, bomba).
- 4. Identificación de puntos de aforo.
- 5. Puesta en operación del sistema (funcionamiento del sistema sin evaluación de caudal).
- 6. Medición de volúmenes (registro en planillas).
- 7. Determinación campo del CU. (Identificación de CUD, mediante ecuaciones).
- 8. Medición de presión(es) en la subunidad(es).
- 9. Cálculo en Gabinete.

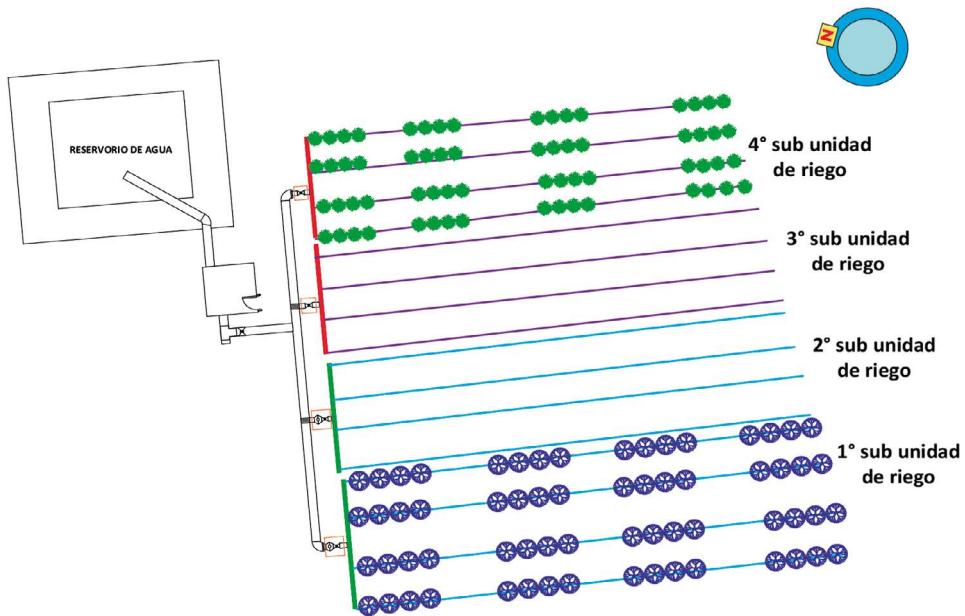


Figura 1. Esquema de puntos de muestreo en las sub unidades de riego.

## RESULTADOS

### Determinación del balance hídrico

A partir de los parámetros climáticos del área de influencia (Tabla 1), se determinó el balance hídrico (Tabla 2) de oferta y demanda de agua de

cultivos (cañahua y cebolla). Con los siguientes resultados: una precipitación de  $485,0 \text{ mm año}^{-1}$ , una Evapotranspiración de Referencia (ET<sub>0</sub>) calculada (Penman-Monteith, 1963) de  $1196,7 \text{ mm año}^{-1}$ , una Evapotranspiración Real (ETR) del cultivo de  $436 \text{ mm año}^{-1}$ , con un déficit y exceso de agua de  $760,7$  y  $49,0 \text{ mm año}^{-1}$  respectivamente (Tabla 3).

Tabla 2. Datos climáticos del área de influencia de estudio.

Mediciones meteorológicas	Meses												Total
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Precip. (mmmes-1)	131,4	56,2	73,4	5,2	0,2	0,2	8,4	28,2	6,8	29,2	34,6	111,2	485,0
Temp. máxima (°C)	11,8	12,0	11,6	10,5	8,6	9,4	8,7	9,5	10,5	11,2	12,7	11,9	10,7
Temp. mínima (°C)	6,4	6,5	6,3	5,4	5,0	-2,1	-1,0	2,3	4,8	7,4	8,2	7,3	4,7
Temp. media (°C)	9,1	9,3	9,0	8,0	6,8	3,7	3,9	5,9	7,7	9,3	10,4	9,6	7,7
Hum. relativa (%)	82,1	79,0	75,3	69,0	54,0	55,0	61,0	52,9	54,1	64,5	61,3	74,0	65,2
Velocidad del viento (m.s <sup>-1</sup> )	1,9	1,5	1,5	1,6	1,9	2,3	1,7	1,8	2,2	2,2	2,1	2,3	1,9

Fuente: Estación Experimental Choquenaira (2005 – 2013).

Tabla 3. Balance hídrico para la zona de estudio (método de Penman-Monteith).

	Meses												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
ET <sub>0</sub> (mm mes <sup>-1</sup> )	90,8	91,3	104,4	91,2	75,0	54,9	67,9	113,8	143,8	127,3	133,5	102,8	1196,7
ETR (mm mes <sup>-1</sup> )	90,8	56,2	73,4	5,2	0,2	0,2	8,4	28,2	6,8	29,2	34,6	102,8	436,0
Déficit	0,0	35,1	31,0	86,0	74,8	54,7	59,5	85,6	136,9	98,1	98,9	0,0	760,7
Exceso	40,6	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,4	49,0

Fuente: Estación Experimental Choquenaira (2005 – 2013).

## Análisis del suelo

Del análisis del suelo (Tabla 4), destaca la clase textural (franco arcillo limoso - FYL), moderadamente fina (Rucks, 2004), la Conductividad Eléctrica del extracto de saturación

(CEe) inferior a 0,75 dS m<sup>-1</sup>, considerado suelo no salino (FAO, 2009). Callisaya (1994), caracterizó los suelos de la Estación Experimental Choquenaira, cuyos resultados presentan proximidad con los obtenidos en la actualidad.

Tabla 4. Análisis físico del suelo del área de riego por goteo.

Profundidad (cm)	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Textura	Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> )	Densidad real (g cm <sup>-3</sup> )	Porosidad (%)	pH	CEe (dSm <sup>-1</sup> )
0 - 30	16	31	53	FYL	1,2	2,6	53,9	7,0	0,18

Fuente: Laboratorio, Universidad Mayor de San Simón - UMSS (2014).

## Análisis del agua

Los parámetros del agua obtenidos (Tabla 5), indican un pH de 7,6 el cual está dentro del rango

aceptable (6,0 a 8,5). Según su Conductividad Eléctrica (CE), es clasificada como agua de salinidad media (C2) apta para riego (CE 0,25 a 2,75 dS m<sup>-1</sup>).

Tabla 5. Análisis físico químico del agua para riego agrícola.

Parámetros	Resultados	Unidad	Parámetros	Resultados	Unidad
pH	7,61	-	Sodio	1,65	Mg l <sup>-1</sup>
Conductividad Eléctrica	0,353	dS m <sup>-1</sup>	Hierro	0,08	mg l <sup>-1</sup>
Sólidos totales	0,295	g l <sup>-1</sup>	Dureza	78,00	mg l <sup>-1</sup>
Sólidos suspendidos totales	7,00	Mg l <sup>-1</sup>	Sulfatos	36,50	mg l <sup>-1</sup>
Sólidos disueltos	152,0	Mg l <sup>-1</sup>	Cloruros	0,009	mg l <sup>-1</sup>

Fuente: Instituto de Investigaciones de Procesos Químicos (IIDEPROQ).

Mendoza (2013), indica los rangos de concentración de algunos elementos, los cuales son considerados valores normales en el agua de riego: sólidos en disolución de 0 – 2000 mg l<sup>-1</sup>, sodio 0 – 920 mg l<sup>-1</sup>, sulfatos 0 – 960 mg l<sup>-1</sup> y hierro de 0 – 0,5 mg l<sup>-1</sup>, todos estos parámetros se encuentran dentro del rango permisible.

## Diseño hidráulico del método de riego por goteo

La Tabla 6 muestra el resumen de datos obtenidos del diseño hidráulico realizado para el riego de los cultivos de cañahua y cebolla.

Tabla 6. Resumen del diseño hidráulico para riego por goteo.

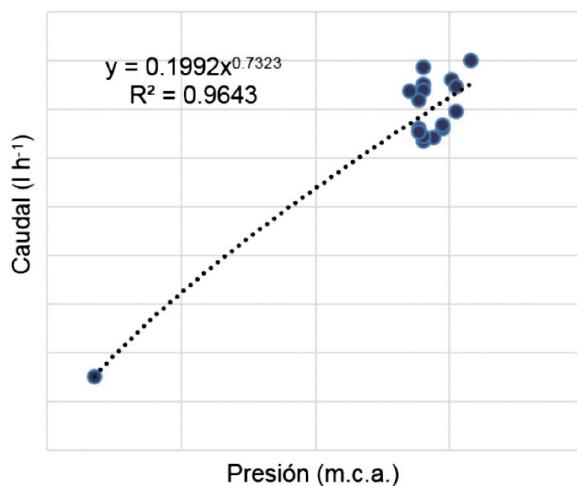
Concepto		Resultado
Superficie instalada		1.400 m <sup>2</sup>
Área de la sub unidad de riego		350 m <sup>2</sup>
Potencia del motor		2 HP
Altura dinámica total		56,32 m.c.a.
Tubería principal	Largo	3,75 m
	Diámetro	1 ½"
Tubería secundaria	Largo	30 m
	Diámetro	1 ½"
Sub unidades de riego		4
Tubería terciaria	Largo	9,50 m
c/sub unidad	Diámetro	1"
	Largo	35 m
Porta emisores	Diámetro	16 mm
	Nº de porta emisores	20
	Goteros por porta emisor	116

La bomba seleccionada de 2 HP de potencia emite un caudal de 1,67 a 8,33 l s<sup>-1</sup>, con una presión de carga de 10 a 20,5 m.c.a. (presión estática de 20,37 m.c.a., y presión dinámica de 14,40 m.c.a.).

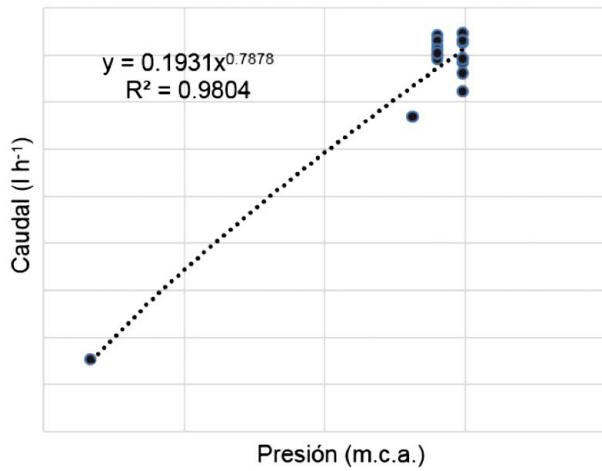
### Variables de respuesta hidráulicas del sistema de riego

#### Comportamiento del emisor

Se tomó en cuenta los aspectos de presión y caudal en los puntos de aforo y su correspondiente exponente de descarga, evaluados en las cuatro subunidades de riego (1 y 2 cañahua; 3 y 4 cebolla). En las evaluaciones realizadas en las subunidades de riego se obtuvieron caudales que oscilaron en el rango de 1,27 a 1,77 l h<sup>-1</sup> con presiones de 13 a 16 m.c.a. La Figura 2, muestra un ejemplo de las curvas de gasto de las subunidades 1 y 3.



Curva de gasto en la subunidad 1



Curva de gasto en la subunidad 3

Figura 2. Curvas de gasto de las subunidades de riego 1 y 3 (cañahua y cebolla).

Asimismo, a través de la regresión potencial se obtuvo los coeficientes de descarga de las subunidades de riego con valores inferiores a 1,0 lo

que se enmarca dentro del régimen de circulación turbulento, y en consecuencia no existe el riesgo de obstrucción de emisores (Tabla 7).

Tabla 7. Ecuaciones y régimen de circulación de goteros en subunidades.

Cultivo	Fecha de evaluación	Nro. subunidades	Ecuación Q vs H	R <sup>2</sup>
Cañahua	08/10/2013	1	$Q = 0,1992 * h^{0,7323}$	0,9643
		2	$Q = 0,2587 * h^{0,7359}$	0,9528
	14/01/2014	1	$Q = 0,1962 * h^{0,8369}$	0,9418
		2	$Q = 0,2011 * h^{0,7138}$	0,9441
	22/01/2014	1	$Q = 0,2084 * h^{0,8385}$	0,8540
		2	$Q = 0,1900 * h^{0,8512}$	0,9140
	Cebolla	1	$Q = 0,1931 * h^{0,7878}$	0,9804
		2	$Q = 0,1897 * h^{0,8227}$	0,9844
	22/02/2014	1	$Q = 0,1957 * h^{0,7660}$	0,8821
		2	$Q = 0,1889 * h^{0,8287}$	0,9714

En evaluaciones realizadas en campo tanto la variación de caudal ( $\pm 0,3 \text{ l h}^{-1}$ ) y la presión que trabajo (10 a 15 m.c.a.) coinciden con la curva de gasto del emisor.

### Indicadores de uniformidad

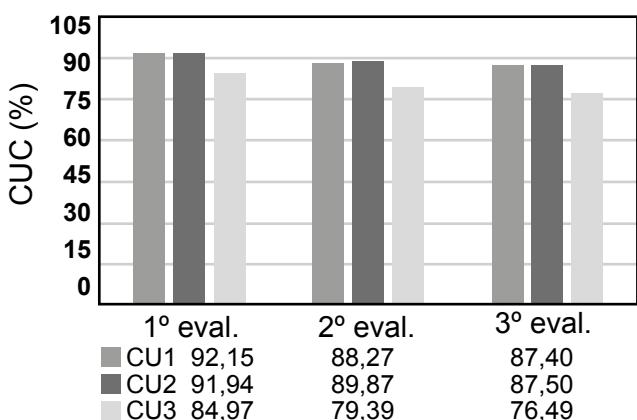
El coeficiente de uniformidad del caudal y la presión son los parámetros hidráulicos de gran importancia, ya que a través de ellos se puede identificar la uniformidad de distribución del agua aplicado al cultivo reflejado en su rendimiento.

#### - Coeficiente de uniformidad del caudal

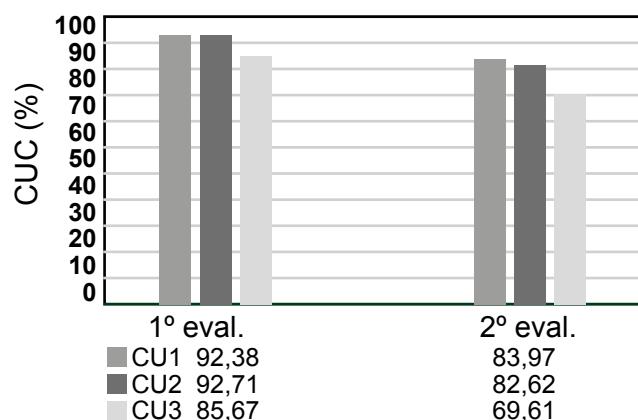
La comparación de distintos valores del Coeficiente de Uniformidad-CU (%) obtenido a través de tres ecuaciones, son producto de las evaluaciones realizadas en las subunidades de cañahua y cebolla. El primer coeficiente CU1, descrito por

Keller y Karmeli (1975) y Hoffman (1992), relaciona la media de la cuarta parte de datos más bajo dividida entre la media general, el CU2 descrito por López (1992) adiciona el coeficiente de variación de fabricación y el número de emisores, y el CU3 es el resultado de la fusión de las dos anteriores propuestas, que toma en cuenta el caudal mínimo y el caudal medio.

La Figura 3, muestra la comparación de los valores del CU de la subunidad 2 y 3 (cañahua y cebolla), con diferencias en la aplicación de ecuaciones y evaluaciones, disminuyendo los valores de mayor a menor en los CU1, CU2 y CU3 identificándose la diferencia en el Coeficiente de Variación. Esto se debe a la adición de uno o más variables en las ecuaciones del CU2 y CU3; obteniendo así valores de CU adecuándose a las condiciones del momento de haber realizado la evaluación hidráulica.



Número de evaluaciones de la subunidad 2



Número de evaluaciones de la subunidad 3

Figura 3. Representación de CUC de las subunidades 2 y 3 (cañahua y cebolla).

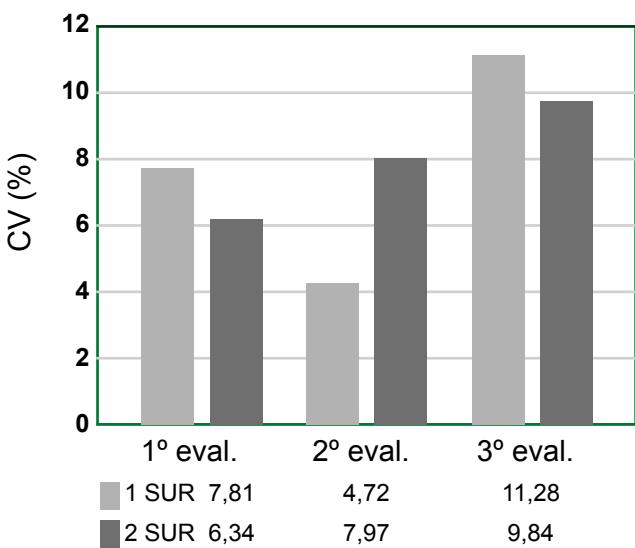
Según Merriam y Keller (1978), la clasificación de los valores de CU entre el rango de 80 a 90% se consideran buenos. Para la clasificación según la American Society of Agricultural Engineers-ASAE (1988), se encuentra entre el grado de aceptabilidad de normal y bueno. López et al. (1992), reportan valores inferiores a 70% clasifican como inaceptables (caso CU3, subunidad 3, debido a problemas de fuga en mangueras de goteo).

#### - Coeficiente de variación del caudal

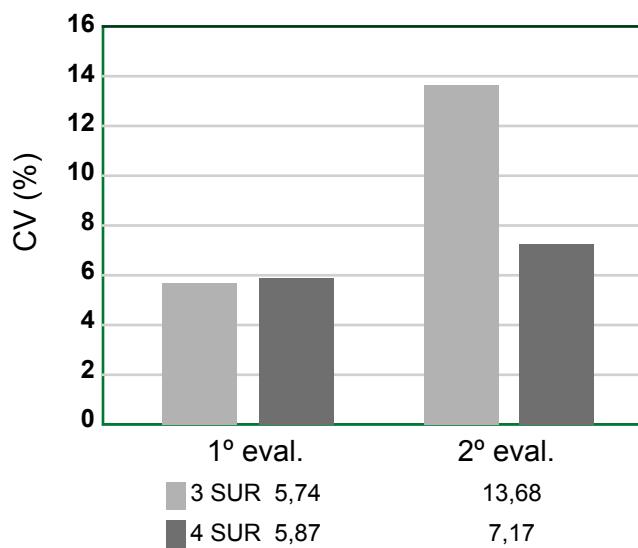
El Coeficiente de Variación (CV), se determinó utilizando la ecuación de Da Silva *et al.* (2005), a partir de la relación de desviación estándar sobre el valor de caudal medio. La Figura 4 muestra las evaluaciones realizadas en las subunidades de riego, con resultados de CV variables. Esta variabilidad se debe a ciertos factores como la

técnica de recolección del volumen emitido por los emisores. El CV es directamente proporcional al CU, es decir si el CV es alto (13,68%, subunidad 3) este influirá en se CU, reflejándose en la distribución de agua hacia las plantas. El incremento de la variación en subunidades, se atribuye al incremento de caudal, ya que algunos datos obtenidos en las subunidades fueron por encima del caudal nominal de 1,4 l h<sup>-1</sup>.

A través de la ficha técnica de estos goteros integrados se encontró que su CV es 7%, en tal sentido valores de CV menores o igual a este rango son aceptables. Según ASAE, las evaluaciones con valores inferiores a 7% no presentan problemas y se encuentran en condiciones buenas, para los CV hasta 13,68% se consideran valores normales y si se compara respecto a las categorías, este último valor no tiene clasificación.



Número de evaluaciones en las subunidades de riego (SUR) 1 y 2



Número de evaluaciones en las subunidades de riego (SUR) 3 y 4

Figura 4. Representación del CV en las cuatro subunidades de riego (cañahua y cebolla).

#### - Coeficiente de uniformidad de presión

La Figura 5, presenta la relación que existe entre la descarga de caudal y la presión a la entrada de los emisores. Se manifiesta la uniformidad de

presión en las subunidades de riego, por encima del 90%. El valor del gasto del emisor influye en el aumento de la presión, ya que existe una relación directa entre el gasto y la carga.

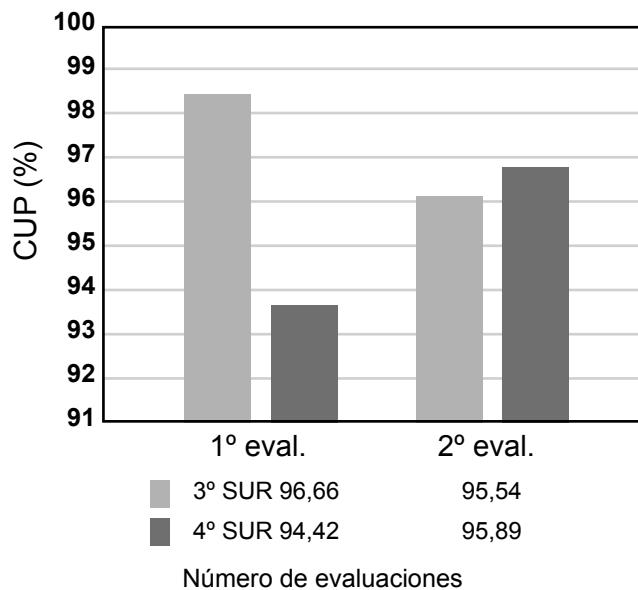
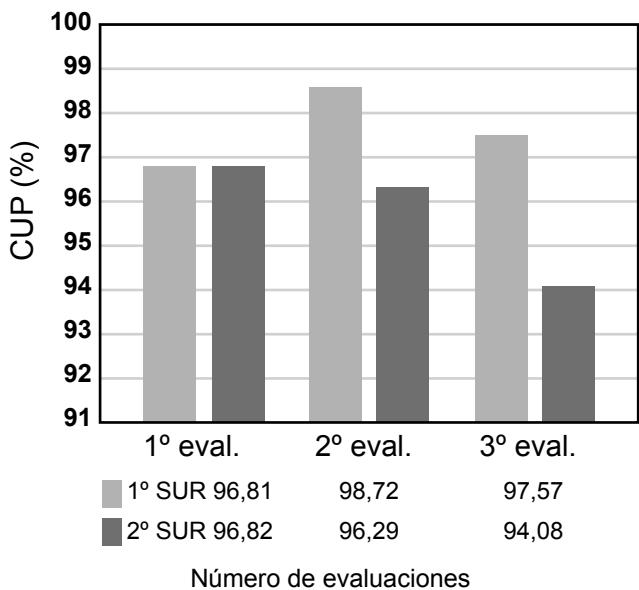


Figura 5. Representación de CUP de las evaluaciones dentro de las cuatro subunidades de riego.

Martínez (2004), indica que la determinación del Coeficiente de Uniformidad de Presión (CUP) permite detectar las posibles diferencias de presiones que se puedan producir a lo largo de la red de riego, esta es imprescindible en la evaluación que debe realizarse que las dimensiones, tanto de la red como de los elementos de regulación sean las correctas.

Tabla 8. Determinación de la uniformidad del sistema de riego.

Subunidades de riego	Factor de corrección (Fc)	Coeficiente de Uniformidad del Sistema (CUS)
1 y 2 subunidad	0,98	79,54
3 y 4 subunidad	0,98	79,60

El promedio los valores de uniformidad de las subunidades de riego, ha sido 79,57%, clasificado de bueno (Bralts Kesner, 1983).

### Análisis del comportamiento del riego

#### - Humedad disponible en el suelo

La Tabla 9, detalla los valores de humedad del

### Coeficiente de uniformidad del sistema

Después de analizar los indicadores de uniformidad en subunidades se calculó el Coeficiente de Uniformidad del Sistema (CUS) (Tabla 8). Para ello se determinó el factor de corrección de descarga, con valores de presión medidos en los emisores.

suelo a distintas presiones, representado como curva de retención de humedad (humedad del suelo y potencial matricial) (Figura 6). El agua disponible de 11,5% en el suelo se obtiene de la diferencia de la Capacidad de Campo-CC (26,0%) y el Punto de Marchitez Permanente-PMP, dentro de ese rango, no toda esa cantidad de agua es aprovechada por la planta que toma lo que está a su alcance por las raíces sin esfuerzo.

Tabla 9. Humedad del suelo a distintas presiones (parcela de riego).

Capacidad de Campo (%) (0,33 bar)	Humedad Equivalente (%) (1 bar)	Punto de Ruptura Capilar (%) (5 bar)	Punto de Marchitez Reversible (%) (10 bar)	Punto de Marchitez Permanente (%) (15 bar)
26,00	20,11	16,30	15,00	14,50

Fuente: Laboratorio de suelos UMSS (2014).

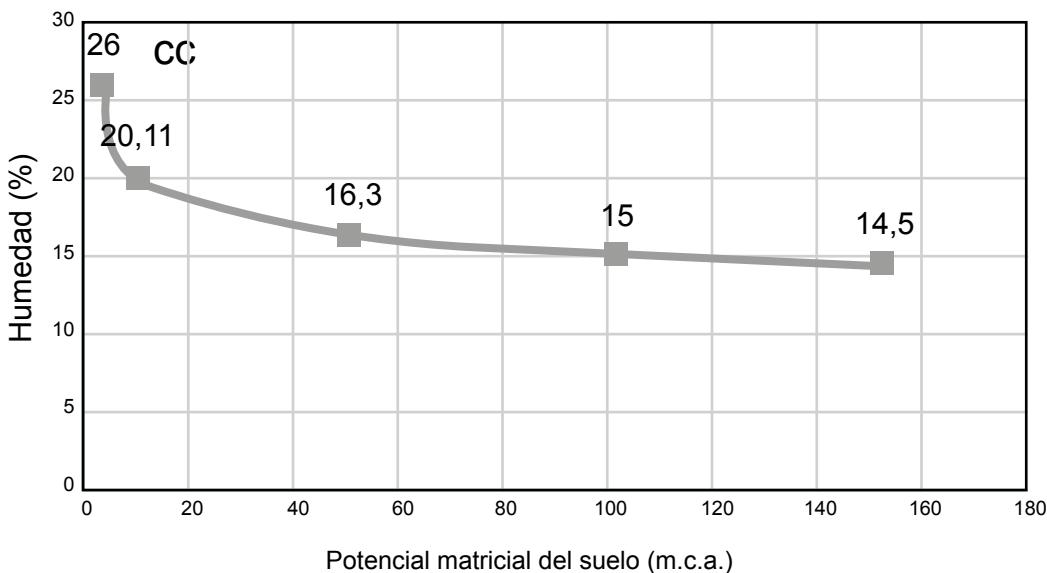


Figura 6. Curva de retención de humedad para el suelo FYL.

#### - Velocidad de infiltración

Los resultados de infiltración determinados en base a Kostiakov – Lewis, se muestran en la Figura 7,

reflejando que para el suelo FYL la velocidad de infiltración básica es de 6,54 mm h<sup>-1</sup>, la cual se considera alta.

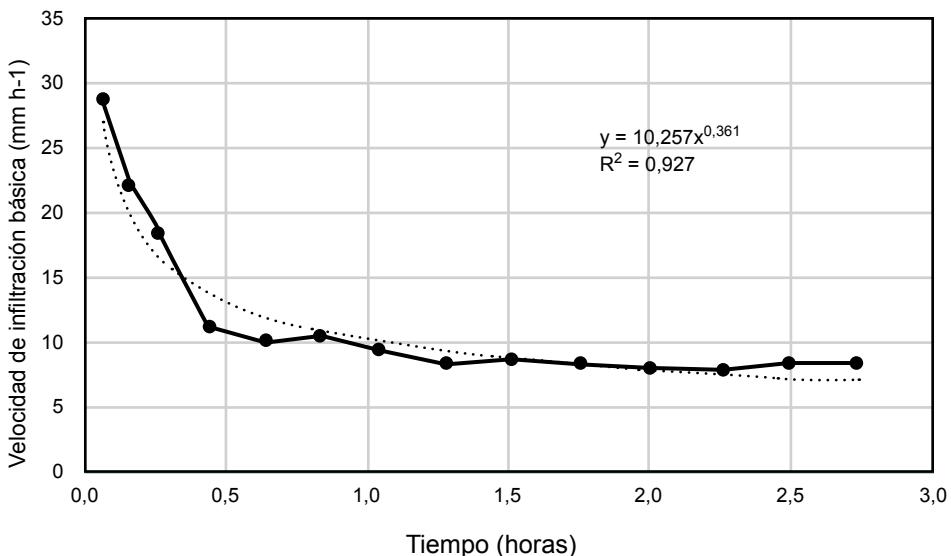


Figura 7. Curva de la velocidad de infiltración básica del suelo.

Según Berlijn (1982); citado por Paredes (2008), la velocidad de infiltración depende de la porosidad, permeabilidad y estructura del suelo, es decir de la textura, materia orgánica y condición de labranza.

#### - Diámetro de mojado y profundidad

Con un tiempo de riego de 1 hora, con caudal

de 1,4 l h<sup>-1</sup>, se determinó un diámetro de mojado de 18 cm de longitud por 14 cm de ancho y un bulbo húmedo de 10 cm de profundidad de forma parcialmente horizontal (Figura 8). Arragan (2014), en este tipo de suelo determinó la extensión horizontal de 16 cm y una profundidad de bulbo húmedo de 12 cm con un caudal de 1,5 l.h<sup>-1</sup>.



Figura 8. Formación del diámetro de mojado y bulbo húmedo.

Cisneros (2003), señala que el bulbo húmedo está condicionado en gran parte por el tipo de suelo. En los suelos pesados, la velocidad de infiltración es menor que en los suelos ligeros, lo que hace que el charco sea mayor y el bulbo se extienda más en la parte horizontal que en profundidad. El humedecimiento varía dentro del bulbo desde el punto más elevado de humedad que se presenta en el sitio de aplicación de la gota de agua y disminuye hacia el perímetro del bulbo.

#### - Eficiencia de aplicación

La eficiencia de aplicación determinada para el sistema de riego por goteo fue de 81,95%, valor no muy alejado de lo teórico del riego por goteo que va de 90% - 95%. Valor que se obtendría en condiciones muy óptimas donde el escurrimiento y la percolación sea mínima. Se considera eficiente un método de riego cuando el agua aplicada al cultivo se usa en un porcentaje superior al 70% (Antúnez et al., 2010).

#### CONCLUSIONES

En la zona de estudio la precipitación llega a  $485 \text{ mm año}^{-1}$ , con una ETo de  $1196,74 \text{ mm año}^{-1}$ , los cultivos dependen del riego complementario o suplementario de acuerdo a los requerimientos de agua. El agua de riego de la región tiene un pH

de 7,61 y una CE de  $0,35 \text{ dS.m}^{-1}$  (C2), clasificada como agua de salinidad media apta para riego, no presenta problemas en la obstrucción de goteros, ya que la concentración de elementos se encuentra en menor proporción.

Los rangos obtenidos de los indicadores de uniformidad están dentro de lo aceptable. Asimismo, el Coeficiente de Uniformidad del Sistema es 79,57% clasificado como bueno. La curva de retención de humedad del suelo determinó un valor de 11,5% de humedad disponible para cultivos. Por otra parte, la eficiencia de aplicación del sistema de riego fue de 81,95%, valor no muy lejano de la eficiencia teórica, donde el escurrimiento y percolación son mínimos.

Todos estos resultados indican que la implementación de un sistema presurizado de riego por goteo permite la obtención de muchos beneficios en la producción agrícola de la región y de otras regiones alto-andinas de Bolivia, teniéndose que si se aprovecha la disponibilidad de agua subterránea, la producción y el rendimiento se incrementaría en función de la eficiencia de aplicación y de uniformidad del agua de riego, que para este sistema es bueno y aconsejable, permitiendo consecuentemente la mejora del sistema productivo familiar.

## BIBLIOGRAFÍA

- Antúnez A. 2010. Región de O'higgins: Eficiencia en sistemas de riego por goteo en el secano. INIA Tierra Adentro.
- American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 1988. Field Evaluation of Microirrigation Systems. Engineering Practice: ASAE EP458. St. Joseph, Michigan, U.S.A.
- Arragan F. 2014. Modelación matemática del bulbo húmedo bajo riego por goteo superficial para suelos de la Estación Experimental de Choquenaira. Tesis de Maestría, Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. La Paz – Bolivia.
- Bralts, Y.E. y Kesner C.D. 1983. Drip irrigation field uniformity estimation. Transactions of ASAE26 (5): 1369 – 1374.
- Callizaya I. 1994. Caracterización de las tierras de la Estación Experimental Choquenaira, según su capacidad de uso aptitud para riego. Tesis de Grado, Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. La Paz - Bolivia, Pág. 40, 42,51-52.
- Cisneros, R. 2003. Sistemas de riego. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería. México.
- Da Silva, N., J. De Medeiros y M. Batista. 2005. Avaliação de diferentes modelos, vazões e espaçamentos de gotejadores na irrigação do meloeiro. Irriga. Botucatu 10 (3):263 – 271.
- Hoffman G. 1992. Management of Farm Irrigation Systems. Monograph No. 9 de la American Society of Agricultural Engineers (ASAE). Segunda Reimpresión. St. Joseph, MI. USA.
- Keller J. y Karmeli D. 1975. Trickle irrigation design Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, Glendora, California, USA. 132 p.
- López, Hernández, Pérez, González. 1992. Riego localizado. Ediciones Mundi – Prensa. Centro Nacional de Tecnología de Regadíos. España. 403 p.
- Martínez R. 2004. Diseño agronómico del riego. X Curso Internacional de Sistemas de Riego. Departamento de Irrigación, UACh. Texcoco, Estado de México, México.
- Mendoza A. 2013. Riego por goteo. CENTA (Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal). El Salvador. (en línea). Disponible en:<http://centa.gob.sv/docs/guias/riego/Riego%20por%20Goteo%202013>.
- Merrian, J. y Keller, J. 1978. Farm irrigation system evaluation a guide for managements. Utah State University. Logan, Utah (U.S.A.).
- Paredes M. 2008. Efecto de tres niveles de fertilización orgánica en bokashi y dos tratamientos pre germinativos en ciprés (*Cupressus sempervirens L.*) en vivero. Tesis de grado. Licenciatura en Ingeniería Agronómica. UMSA. Facultad de agrónoma; La Paz Bolivia. 120p.
- Penman, H. 1963. Vegetation and Hydrology. Tech. Comm. Nº 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, U.K.
- Rucks L. 2004. Propiedades físicas del suelo. Universidad de la República, Facultad de Agronomía. Montevideo – Uruguay. 68 p.

Artículo recibido en: 4 diciembre 2015  
Manejado por: Comité Editorial  
Aceptado en: 8 de marzo de 2016