

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO RELACIONADO A LA UNIFORMIDAD DE APLICACIÓN, MEDIANTE EL MÉTODO DE RIEGO POR ASPERSIÓN EN LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL CHOQUENAIRA

Study of the hydraulic behaviour related to uniformity of application, by the method of sprinkler irrigation in the Experimental Station Choquenaira

Ilver Baltazar Poma Poma¹, Gladys Chipana Mendoza²

RESUMEN

El riego es un componente tecnológico importante para el desarrollo agropecuario, sin embargo, es limitado para la producción agrícola en el Altiplano de Bolivia debido a las escasas precipitaciones pluviales y al no uso de aguas subterráneas. Ante esta situación, se instaló un sistema de riego por aspersión en la Estación Experimental Choquenaira del departamento de La Paz a fin evaluar el comportamiento hidráulico relacionado a la uniformidad de aplicación, para de esta forma mejorar la producción agrícola de la región. La metodología consistió en la determinación de la velocidad de infiltración, diseño hidráulico, determinación de características hidráulicas y análisis de los principales parámetros de evaluación como la uniformidad de la instalación, lámina de agua aplicada por los aspersores, lámina recogida en pluviómetros, pérdidas por evaporación y arrastre del viento y grado de pulverización del agua. El sistema se instaló en una superficie de 3.500 m², se tomó dos líneas laterales con seis aspersores. Los resultados muestran que los aspersores empleados tienen una variabilidad de comportamiento referente a la descarga de los emisores, obteniéndose valores que varían de 723,52 l h⁻¹ (presión de 14,30 m.c.a) a 735,80 l h⁻¹ (presión de 14,72 m.c.a.) alcanzando un radio mojado de 11 m. Asimismo, el coeficiente de uniformidad fue de 71,25 % entre el solapamiento o traslape de seis aspersores, el coeficiente de variabilidad fue de 37,47%, la uniformidad de distribución del cuarto inferior de 64,62% con una eficiencia de aplicación de 45,55%. Los resultados de muestran que es posible tener una adecuada instalación de riego por aspersión en zonas altas como el Altiplano Boliviano, aunque es necesario poner mucho cuidado en los tiempos y horas de aplicación. Estos resultados muestran que la implementación del sistema de riego permite mejorar la producción agrícola, sin embargo, debido a su baja eficiencia de aplicación se debe continuar con los estudios de investigación.

Palabras clave: Riego por aspersión, eficiencia y uniformidad de aplicación.

ABSTRACT

Irrigation is an important technology component for agricultural development, however, its use is limited in the agricultural production in the Altiplano of Bolivia, due to poor rainfall and no use of groundwater. In this situation, a sprinkler irrigation system was installed at the Choquenaira Experimental Station in La Paz, Bolivia to evaluate the hydraulic behaviour related to uniformity of application, and thereby improve agricultural production in the region. The methodology involved determining the infiltration rate, hydraulic design, determination of hydraulic characteristics and analysis of the main evaluation parameters as the uniformity of the installation, depth of water applied by the sprinklers, depth of water collected in rain gauges evaporation and wind drag losses, and degree of water spraying. The system was installed on an area of 3,500 m², and two lateral lines with six sprinklers were taken. The results show that the employed sprinklers have a variability of behaviour concerning discharge of emitters, obtaining values ranging from 723,52 l h⁻¹ (pressure of 14,30 m.c.a.) to 735,80 l h⁻¹ (pressure of 14,72 m.c.a.) reaching a wet radius of 11 m. Also, the uniformity coefficient was 71,25%, between the overlap of six sprinklers, the coefficient of variation was 37,47%, and the uniformity of distribution of the lower quarter was of 64, 62% with an application efficiency of 45, 55%. These results show that the implementation of the irrigation system allows improvement of agricultural production, however, due to its low application efficiency, of 45,55%. These result show that the implementation of the irrigation system allows improvement of agricultural production, however, due to its low application efficiency, research studies must continue.

Keywords: sprinkler irrigation, efficiency and uniformity of application.

² Investigador, Estación Experimental Choquenaira, Facultad de Agronomía-UMSA. pomapomailver@gmail.com

³ Docente Investigador, Facultad de Agronomía-UMSA.

INTRODUCCIÓN

El riego se constituye en un factor decisivo en la agricultura para obtener un adecuado rendimiento, por tanto se requiere incidir en una buena producción que contribuya a la seguridad y soberanía alimentaria de la población. En este entendido, es importante hacer conciencia sobre la necesidad de un manejo apropiado del recurso agua, utilizándolo con mayor eficiencia y eficacia al momento de aplicar el riego a nivel parcelario, lo cual debería ser el resultado de una planificación acorde con las realidades, sociales, técnicas y productivas de las diferentes regiones de nuestro país.

El riego por aspersión es una alternativa tecnológica accesible para el productor y para que este sistema de riego tenga un buen desempeño es necesario realizar un control de la eficiencia y la distribución espacial de la lámina de agua a nivel de la parcela. Asimismo, la dirección y velocidad del viento también son factores que influyen en la adecuada distribución de la lámina del agua de riego.

Por otro lado, cualquiera sea el método de riego, una uniformidad elevada de la lámina de agua aplicada permite hacer un uso eficiente de este recurso que a su vez maximiza la producción, controlando las pérdidas por percolación profunda. Asimismo, las evaluaciones que se realizan a nivel de campo se constituyen en el mecanismo

para establecer la distribución del agua de riego a nivel de parcela, lo que permite diagnosticar el grado de uniformidad del riego para mejorar el comportamiento global del sistema.

El método de riego por aspersión requiere un valor mínimo de uniformidad para ser considerado aceptable, considerándose baja la uniformidad de riego cuando el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen en (CU) es inferior al 84 %. En este contexto el presente estudio está orientado a evaluar el comportamiento hidráulico relacionado a la uniformidad de aplicación de láminas de riego mediante el método de riego por aspersión en condiciones del Altiplano Boliviano.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en la Estación Experimental Choquenaira, dependiente de la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés, localizada en el municipio de Viacha, provincia Ingavi del departamento de La Paz a una altitud de 3.870 m.s.n.m., con 16,69° de latitud sud y 68,29° de longitud oeste. La temperatura media registrada fue de 7,72 °C, precipitación promedio anual de 485 mm, humedad relativa de 65,19% y velocidad del viento de 1,91 m s⁻¹. La evapotranspiración de referencia estimada para la zona se muestra en la Figura 1.

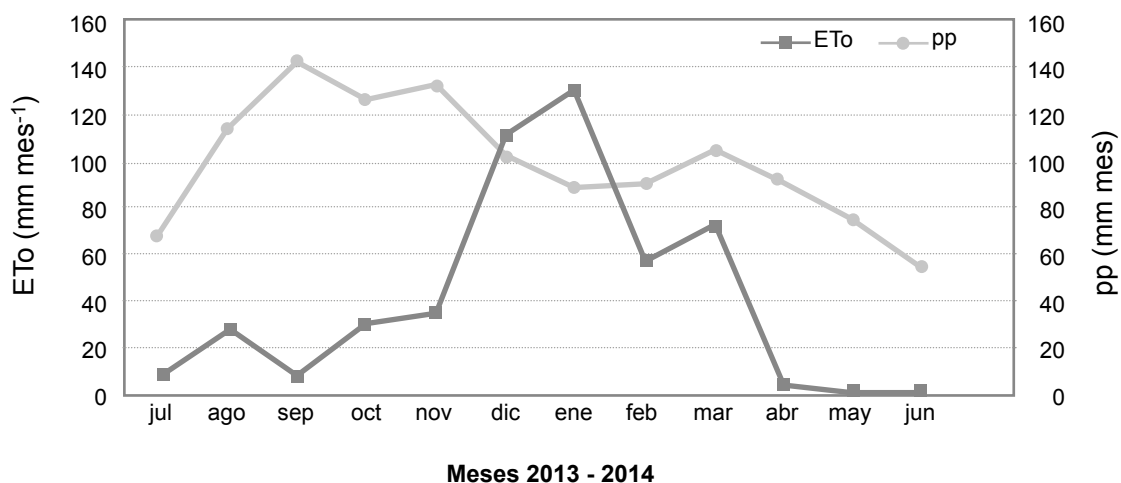


Figura 1. Evapotranspiración de referencia (ETo) y precipitación media mensual (pp) en la zona de estudio de las gestiones 2013 a 2014.

Según el método de Penman Monteith el periodo húmedo abarca sólo los meses de diciembre a enero, en tal sentido, se puede indicar que debido a los cambios de las condiciones climáticas se reducen a dos épocas marcadas, que es la época seca a mediados del mes de marzo a noviembre y la época húmeda que se reduce a diciembre, enero y parte de febrero.

De acuerdo al balance hídrico realizado (Tabla 1), se tiene un déficit hídrico de 760,71 mm y un excedente de 48,97 mm acumulados en los meses de diciembre y enero, se almacena en el suelo de acuerdo a sus características edafológicas, pero como la evapotranspiración es mayor en el mes de febrero esta reserva es utilizada.

Tabla 1. Resultados del balance hídrico.

Variables	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Total
pp (mm)	8,40	28,20	6,80	29,20	34,60	111,20	131,40	56,20	73,40	5,20	0,20	0,20	485,00
ET (mm/mes)	67,89	113,81	143,75	127,3	133,53	102,80	90,83	91,30	104,41	91,2	75,02	54,9	1196,74
ETR (mm/mes)	8,4	28,20	6,80	29,20	34,60	102,80	90,83	56,20	73,40	5,20	0,20	0,20	436,03
Déficit hidrico	59,49	85,61	136,95	98,10	98,93	0,00	0,00	35,10	31,01	86,00	74,82	54,70	760,71
Exceso	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,40	40,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	48,97

La investigación se realizó desde septiembre de 2013 a febrero de 2014 con las siguientes labores: a) levantamiento de planimetría, b) determinación de la velocidad de infiltración, c) evaluación del análisis físico-químico del suelo y agua d) diseño hidráulico, e) evaluación técnica del sistema de riego por aspersión f) diagnóstico de campo g) determinación de características hidráulicas y h) análisis de los parámetros de evaluación (uniformidad de la zona evaluada, uniformidad de la instalación, lámina de agua aplicada por los aspersores, lámina recogida en 72 lecturas de pluviómetros (Red pluviométrica de un marco de 2x2 m, centrados en un área de 288 m²), pérdidas por evaporación, arrastre del viento y grado de pulverización del agua). Estas variables se evaluaron en varios eventos de riego de las cuales solamente se tomaron 3, (valores inferiores, media y superiores de los parámetros evaluados de cada evento) debido a la variabilidad dinámica del clima altiplánica en los cuales se adaptó el diseño hidráulico con el que debía aplicarse.

El módulo de riego por aspersión, tuvo un marco de riego de 12 x 12 m, 8 laterales fijos con sus respectivos hidrantes, 21 tomas de punto para el acople de porta aspersores con sus trípodes, de los cuales se tomaron 2 laterales cada una con 3 tomas para los porta aspersores para la evaluación, caseta de bombeo y reservorio de agua. Para calcular los indicadores del sistema de riego por aspersión, se utilizaron las ecuaciones planteadas por Merriam (1983), que son las siguientes:

Deficiencia de la humedad del suelo (DHS). Es la lámina de agua requerida para llevar una lámina específica de agua medida en el suelo a capacidad de campo en un tiempo particular.

Eficiencia de aplicación (EA). Es la proporción entre la lámina promedio de agua de riego en el cuarto inferior infiltrada y almacenada en la zona radicular y la lámina promedio del agua de riego aplicada.

$$EA = \frac{\text{Lámina promedio de agua infiltrada en el cuarto inferior}}{\text{Lámina promedio de agua aplicada}} \times 100 \quad (1)$$

Eficiencia de almacenamiento (Es). Se define como la relación entre la Deficiencia de Humedad

en el Suelo y la lámina promedio almacenada en el cuarto inferior.

$$ES = \frac{\text{Lámina promedio en el cuarto inferior}}{DHS} \times 100 \quad (2)$$

Coefficiente de Uniformidad de Christiansen (CU). Parámetro utilizado para evaluar la

uniformidad de riego por aspersión (Ecuación 3).

$$CU = 100 \times \left(1.0 - \frac{\sum |z - m|}{\sum z} \right) \quad (3)$$

Dónde:

z = lámina individual recogida de las observaciones de prueba de uniformidad (mm);

m = desviación absoluta de las observaciones individuales con relación a la media (mm).

Perdida por evaporación y arrastre por el viento (Pe)

$$Pe = 0.976 + 0.005ETP - 0.00017ETP^2 + 0.0012V - IG * (0.00043ETP + 0.00018V + 0.000016ETP * V) \quad (4)$$

Esta expresión es válida para: $7 < IG < 17$

Si $IG < 7$ (gota gruesa), tomar $IG = 7$, y si $IG > 17$ (gota fina), tomar $IG = 17$

Dónde:

Pe = Proporción efectiva del agua emitida por los aspersores que llega a la superficial del suelo, como decimal. ($Pe = H_{ba}/H_b^{-1}$)

ETP = Evaporación potencial, $mm\text{día}^{-1}$

V = Velocidad del viento, kmh^{-1}

$IG = 0.032P^{1.3}/B$, índice de grosor de gota

P = Presión de funcionamiento de la boquilla, kPa

B = Diámetro de boquilla, mm

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Planimetría

Resultado de la planimetría realizada en el área

de trabajo (Figura 2), el sistema de riego por aspersión, se estableció una superficie de 3.500 m^2 , la cota mínima de 3.878 m y la máxima de 3.876 m con una pendiente de la parcela del 2,2 %.

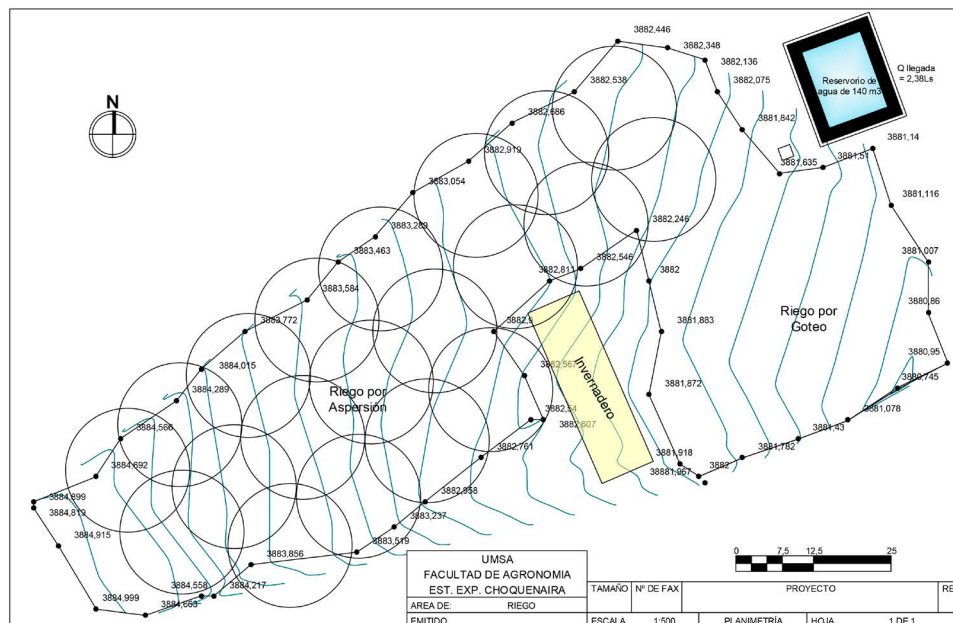


Figura 2. Planimetría del área o parcela de estudio.

Infiltración del agua en el suelo

La tasa de infiltración constante o velocidad de infiltración básica (VIB), en condiciones de saturación tiene un valor de la conductividad

hidráulica. El resultado de la prueba de infiltración para el suelo franco arenoso fue de 8,76 $cm\ h^{-1}$, (Figura 3). Al respecto Martínez (2004) indica que

se considera que la velocidad de infiltración básica es alta con datos a partir de 4,0 cm h⁻¹, por lo que bajo las condiciones de Choquenaira el método de

riego por aspersión permitiría obtener fácilmente alta eficiencia.

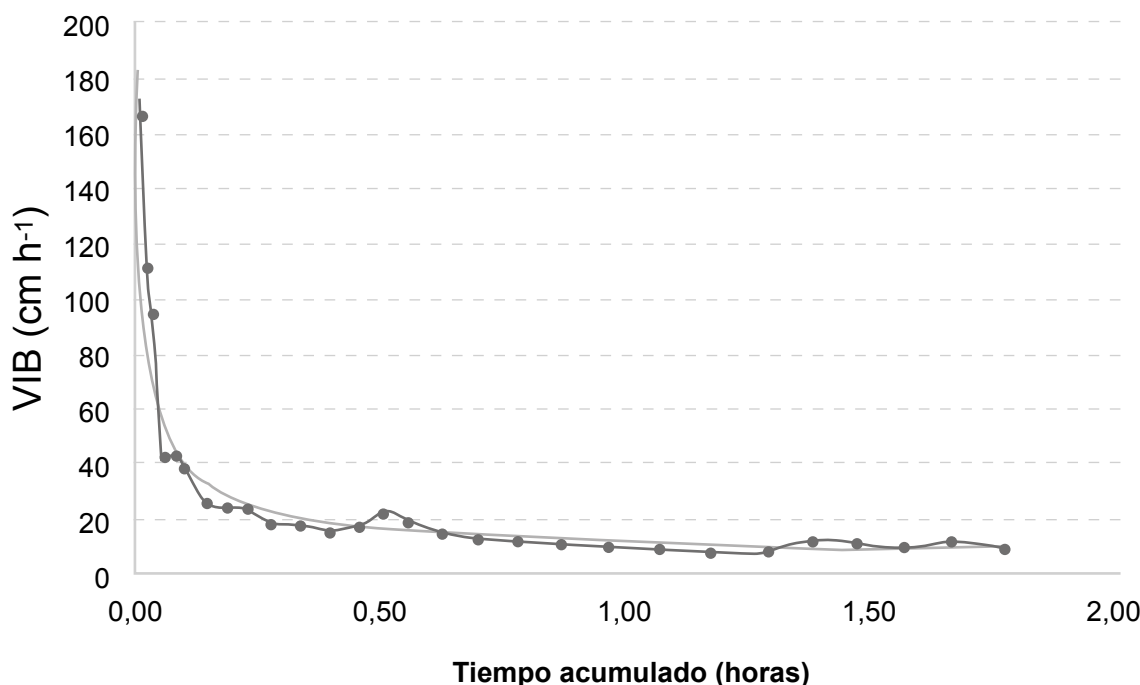


Figura 3. Curva de la velocidad de las pruebas de infiltración.

Los resultados del análisis físico de suelos muestran la composición de 55 % de arena, 18 % de arcilla y 27 % de limo constituyéndose en un suelo franco arenoso, que desde el punto de vista agronómico es adecuado para el desarrollo de toda clase de plantas y pueden constituirse en productivas si tienen el manejo adecuado. El pH del suelo es 6,7 considerado como neutro. El análisis de agua de riego, presenta un pH de 7,14 catalogándolo como débilmente alcalino, apto para uso en riego y tolerable por las plantas.

En la determinación del comportamiento hidráulico del aspersor, se consideró la presencia de dos laterales fijos, cada una de ellas con tres aspersores, estos a su vez accionados por un cabezal de bombeo. El caudal expulsado por cada aspersor depende de la presión de trabajo, el número de boquillas y el diámetro de las boquillas de salida que posee el aspersor. Por lo general, el caudal se incrementa al aumentar el diámetro

de boquilla, sin embargo, la relación entre estas variables dependerá del modelo y marca del aspersor especificada por cada fabricante.

El emisor analizado en el estudio mostró un comportamiento diferente al señalado por el fabricante, debido a la variación de presiones al inicio y al final de cada riego. En la evaluación hidráulica se emplearon aspersores del modelo VYR 50 de origen español con una boquilla de salida de 4 mm de diámetro.

Evaluación del primer evento de riego

Se realizó al finalizar la valoración de pluviometría de los aspersores, es decir una vez apagado el sistema, tomándose datos de los volúmenes recibidos por los recipientes, posteriormente se activó el sistema para tomar datos de caudal y presión de salida en los aspersores en las mismas condiciones. (Figura 4)

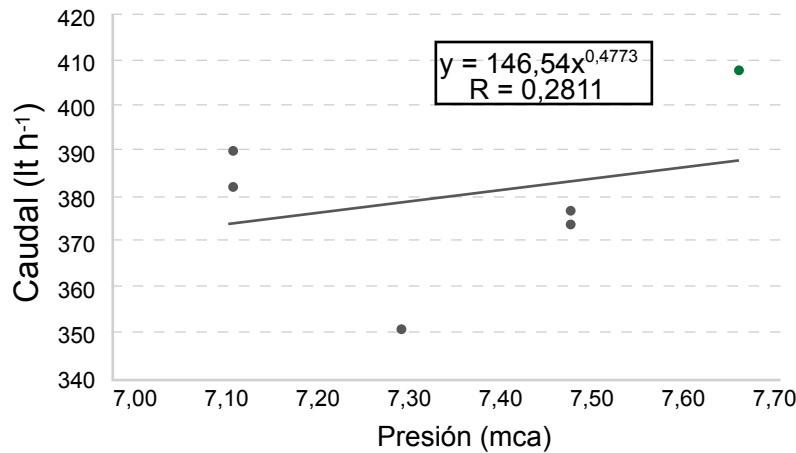


Figura 4. Curva de gasto de agua al finalizar la evaluación.

La relación del caudal con la presión del emisor, tuvo valores que variaron de 351 l h⁻¹ (7,30 m.c.a. de presión) a 408 l h⁻¹ (7,66 m.c.a. de presión). La curva del caudal con relación a la presión del emisor, se ajusta a la ecuación $Q = 146,54 h^{0,4773}$ con un exponente de descarga de 0,48 indicando su sensibilidad a los cambios de presión ya que depende del tipo de flujo que se establezca en el mismo y de su grado de autocompensación, Tarjuelo (2005), señala que el exponente de descarga del emisor “x” varía entre 0 y 1, tomando el valor x=1 para flujo laminar y x=0 en emisores autocompensantes. Por otra parte, se encontró una interacción positiva entre los parámetros mencionados con un coeficiente de correlación de

0,2811 que indica que el 28,11 % de la variación en el caudal se debe a la inclusión de la presión en el modelo de aspersor de estudio.

Evaluación del segundo evento riego

El comportamiento es distinto a la evaluación del primer evento. Tomando datos de presión y volumen en un determinado tiempo en condiciones iniciales, es decir, que una vez revisado el filtro y válvula de retención del sistema de bombeo se procedió al funcionamiento del motor de bombeo para tomar los datos de presión de servicio lateral y las presiones de salida de cada aspersor, para el aforo del volumen de agua en un determinado tiempo y establecer el caudal de salida (Figura 5).

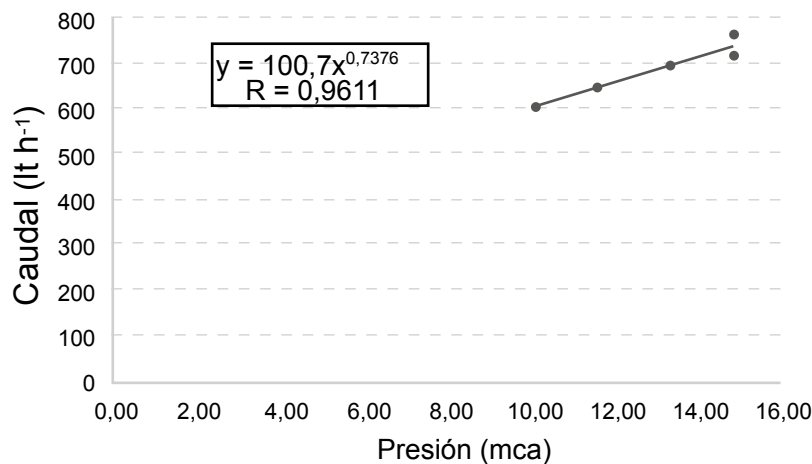


Figura 5. Curva de gasto de agua al inicio de la evaluación.

En la Figura 5, también se observa la variación del caudal debido a la presión con valores que fluctúan desde 612 l h⁻¹ (presión de 11,58 m.c.a.) hasta 702 l h⁻¹ (presión de 14,25 m.c.a.). Esto permite observar la variación del caudal a medida que la presión aumenta. ya que el caudal aumenta

proporcionalmente con el incremento de la presión, existe una correlación altamente significativa entre las variables, con un coeficiente de correlación de $r = 0,9611$ es decir el 96.11 % de la variación del caudal se debe a la influencia de la presión en el modelo.

La ecuación del incremento del caudal por efecto de un aumento de la presión se da con la siguiente ecuación $Q = 100,7 h^{0.7376}$ donde el valor del exponente de descarga para el aspersor muestra una sensibilidad del modelo a las variaciones de la presión.

Evaluación del tercer evento riego

Fue realizado en similares condiciones a los anteriores, con la única diferencia de la anulación del filtro de anillas en el cabezal de bombeo, debido a la alta suspensión de materiales

biológicos (ovoposiciones de agentes acuáticos) y plantas acuáticas existentes en el reservorio, las cuales al ser succionados por la bomba eléctrica son disgregados ocasionando la obstrucción en el paso del agua por el filtro de anilla. Como se vio que las partículas atascadas en el filtro no sobrepasan el milímetro, la velocidad en la red de tuberías instaladas está en los límites permitidos para que no exista la sedimentación de partículas y además de tener un emisor de 4 mm. Bajo estas condiciones se anuló el filtro de anillas de 120 mesh. (Figura 6).

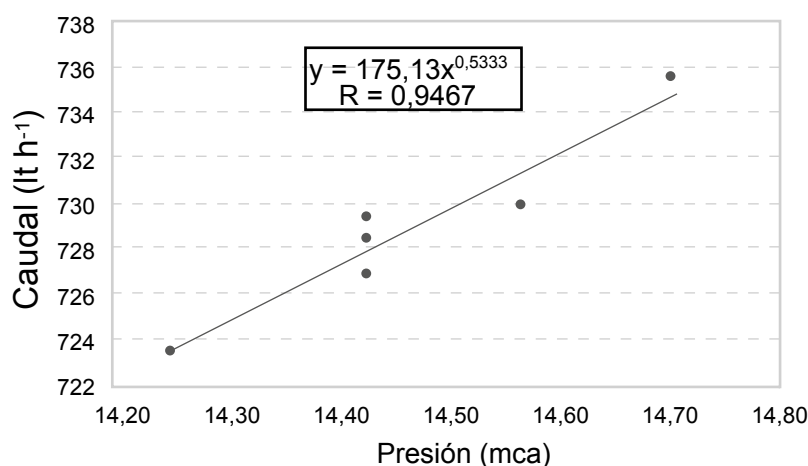


Figura 6. Curva de gasto de agua sin filtro, evaluación al inicio.

Los caudales oscilaron de $723,52 \text{ l h}^{-1}$ (presión de $14,30 \text{ m.c.a.}$) a $735,80 \text{ l h}^{-1}$ (presión de $14,72 \text{ m.c.a.}$) Existe una correlación significativa entre dichas variables, con un coeficiente de correlación de $r=0,9467$ es decir el 94,67 % de la variación del caudal, se deben a la influencia de la presión en el modelo del aspersor VYR 50, ajustándose a la ecuación $Q = 175,13 h^{0.5333}$.

El valor para el coeficiente de variación por fabricación del aspersor VYR50 es de 6,5 %, a la norma ASAE EP405.1 basada en la del US Soil Conservation Service clasifica los emisores de acuerdo a los valores de CV, en este caso recae en $0,05 \text{ CV} \leq 0,07$ catalogándolo como Normales (López et al 1997), así mismo en las normas UNE e ISO clasifica únicamente en dos grupos categoría

de uniformidad A ($\text{CV} \leq 5 \%$) y B ($\text{CV} \leq 10 \%$), por lo tanto el aspersor se la clasifica dentro de los emisores de categoría B.

Con relación al índice de radio mojado (m), realizando la comparación entre la ficha técnica del aspersor (Alcance 9-14 m; presión de trabajo 1-4 bares) solamente no se llegó a alcanzar la presión mínima de 1,40 bares como máximo, esto debido a la potencia del motor con la que se trabajó en dicha parcela.

Por otro lado, la evaluación del índice de grosor de la gota generada por el aspersor, fue realizada mediante la fórmula de IG descrita en la formula desarrollada por Fisher y Allen en 1998, para determinar la proporción efectiva de agua que llega al suelo (P_e) (Tabla 2).

Tabla 2. Índice de grosor IG de aspersor VYR50 de diámetro de 4 mm.

Presión de trabajo (kPa)	IG para una boquilla de 4 mm
120,66	4,06
129,28	4,45
140,0	4,93

Según Fernández, et al. (2010), el índice de grosor de gota (IG) recomendable está entre 7 y 17. Valores menores a 7 indican gotas demasiado gruesas y valores mayores a 17 indican gotas demasiado finas, por tanto, los valores obtenidos estiman una distribución del agua baja, de acuerdo a las observaciones se pudo notar que el agua desfogado por la boquilla del aspersor es fragmentada en gotas de gran tamaño

obteniéndose así una distribución deficiente e inadecuada.

Evaluación técnica del sistema de riego por aspersión

La Tabla 3 muestra las láminas colectadas por 72 lecturas de pluviómetros, con un valor mínimo de 0,27 mm y máximo de 3,36 mm en una superficie de 113 cm² del pluviómetro.

Tabla 3. Láminas de agua recogidas en los pluviómetros (mm).

	Número de pluviómetro											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cantidades	2,30	1,15	0,27	1,06	2,52	3,27	2,70	1,81	0,80	0,75	1,77	2,61
recogidas	1,33	0,62	0,27	0,27	1,41	2,39	2,43	1,55	0,62	0,33	1,06	1,68
	0,62	0,44	0,44	0,93	0,80	0,75	0,75	0,53	0,49	0,44	0,71	0,97
	0,93	0,57	1,19	1,24	0,53	0,88	1,02	0,57	0,71	0,80	0,93	0,97
	2,52	1,59	1,24	1,33	1,02	2,59	2,21	1,24	1,02	0,97	1,11	2,21
	3,36	2,08	1,06	1,15	1,50	2,34	2,30	1,41	1,11	1,06	1,59	3,36

El reparto o distribución del agua en los 288 m² evaluados, se muestra en la Figura 7.

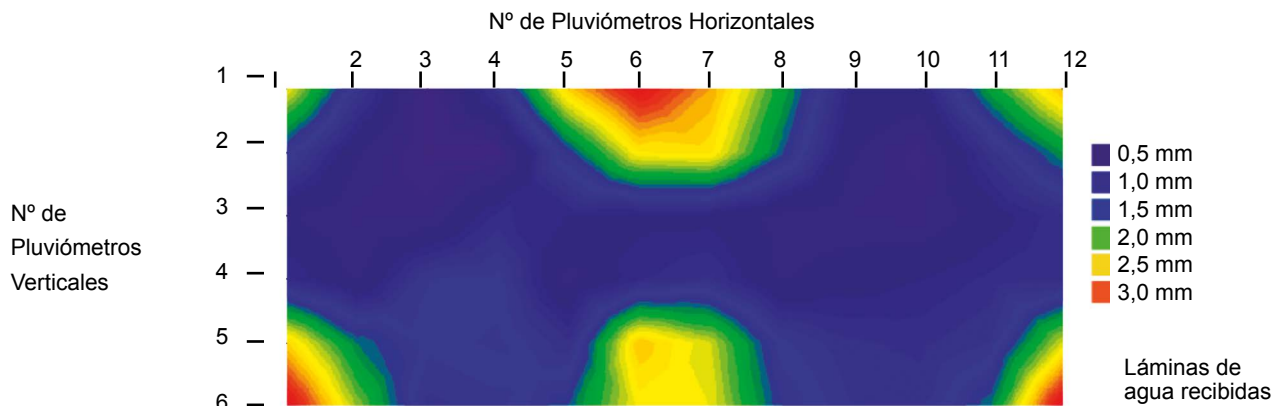


Figura 7. Comportamiento de la lámina de agua en la superficie de evaluación.

Los 72 datos de láminas de agua recogidas por los pluviómetros muestran un comportamiento variado en el sistema, se observa una distribución distinta entre los emisores, en función a estos, el

promedio de la lámina aplicada fue de 1.31 mm y el promedio de la lámina del cuarto inferior fue 0.51 mm. A partir de los datos hallados, se evaluó los parámetros de uniformidad (Tabla 4).

Tabla 4. Cálculos de evaluación del método de riego por aspersión.

Cálculo de parámetros de evaluación				
Coefficiente de Uniformidad - CU (%)	Coefficiente de Variación - CV (%)	Uniformidad de Distribución ^{25%} - UD (%)	Uniformidad de Distribución (instalación) (%)	Eficiencia de descarga-ED (%)
51,94	60	38.82	38.11	50.3

La Uniformidad de Distribución tiene un valor bajo de 38,82 % inferior al recomendado por Keller y Bliesner (1990) que tiene como umbral mínimo (80%) reportado como aceptable. Esta situación se debe a la gran cantidad de partículas biológicas en suspensión que se encuentran en el reservorio de agua, sumado a las pérdidas por la evapotranspiración y arrastre del viento. Asimismo, el valor del coeficiente de Uniformidad

de Christiansen (CU) es 51.94% catalogado como inaceptable. Los resultados tienen relación con la variación de los valores de la media geométrica, y no con los valores más bajos de la altura media de agua recogida en el 25% del área menos regada entre la altura media del agua recogida en los pluviómetros. La pérdida por evaporación, efecto del viento y obstrucciones de vegetales son del 49,70%.

Tabla 5. Cálculos de evaluación del método de riego por aspersión del segundo y tercer evento de riego respectivamente

	Cálculo de parámetros de evaluación				
	Coeficiente de Uniformidad - CU (%)	Coeficiente de Variación - CV (%)	Uniformidad de Distribución ^{25%} - UD (%)	Uniformidad de Distribución ^(instalación) (%)	Eficiencia de descarga-ED (%)
2 evento	71,25	37,47	64,62	61,10	3,88
3 evento	73,94	31,29	61,04	51,73	85,67

En la tabla 5 muestra la mejora del CU en el tercer evento de riego respecto al primer y segundo evento de riego, según Keller y Bliesner (2000), los datos de prueba para un CU>70% usualmente forma una distribución normal y es razonablemente simétrico en torno a la media, sin embargo el valor de CU muestra un valor de 73,94 % catalogándolo como pobre según Ávila, et al (s.f.). La Uniformidad de distribución muestra relativamente bueno con 61,04 % que sigue siendo un valor inferior al recomendado por Keller y Bliesner (1990) que tiene como umbral mínimo de 80 % reportado como aceptable. La pérdida por evaporación, efecto del viento y obstrucciones de vegetales es del 14,32 %, cuyo factores externo no influyeron en la evaluación.

La segunda y tercera evaluación, mostraron mejoras en los indicadores de uniformidad de la

distribución del agua, por tanto en la eficiencia del mismo, estas mejoras se deben al buen uso y manejo hidráulico, y principalmente al cuidado en tiempos y horas de aplicación.

En una cuarta evaluación realizada a través de la técnica radial el sistema presenta un comportamiento diferente en cada aspersor de los dos laterales evaluados referente a la pluviometría de cada una de ellas, cabe mencionar que esta evaluación se realizó fuera de la área de 288 m² en la que se encuentra la red pluviométrica de 2x2 m (72 pluviómetros) cuya área existe el solapamiento entre aspersores y laterales, en este caso la técnica radial me permite evaluar independientemente de cada aspersor en un mismo tiempo y sin solapamiento (parte externa del área de evaluación) (Tabla 6).

Tabla 6. Pluviometría radial de los aspersores en volumen de agua (ml).

Distancia de pluviómetros	Lateral 6			Lateral 7		
	Asp.1	Asp.2	Asp.3	Asp.1	Asp.2	Asp.3
1m	85	72	87	67	90	64
2m	59	58.5	45	50	56.5	60
3m	39.5	39.5	31.5	43	37	40.5
4m	22	22	25	34	19	35
5m	11	13	14.5	20.5	12	20
6m	7	7	8	16	10	15
7m	4.64	3.4	7	6.58	7	8.5
8m	3.64	1.7	4.7	2.52	5	7.5
9m	2	1	2.5	1.5	2.8	5
10m	1	0.26	0.78	1.5	0.7	1.5
Volúmen total (ml)	234.78	218.36	225.98	242.6	240	257

A cada metro, de distancia entre los pluviómetros, que forma un radio respecto del emisor de cada aspersor, el volumen de agua se reduce en un porcentaje variado y no así gradualmente. El máximo volumen recogido fue por el segundo aspersor de la línea lateral 7, al primer metro de distancia del pluviómetro se tiene un volumen de 90 ml y en el décimo metro un volumen recogido de 0.7 ml. El mínimo volumen recibido por el pluviómetro al primer metro de distancia es en el aspersor 3 de la línea lateral 7 con un volumen de 64 ml y al final de la misma presentó un volumen de 1,5 ml. Esto debido a que existe una mayor descarga en los primeros metros más cercanos hacia el aspersor, mientras que vaya conforme alejándose del punto, esta tiende a disminuir la descarga de agua. Por lo tanto es importante tener un buen solapamiento entre sí para recompensar y tener una buena uniformidad respecto a la distribución del agua.

En lo que respecta al volumen total recibido en las líneas de muestreo de volumen de agua, el aspersor 2 de la línea lateral 6 es el más mínimo con 218.36 ml, mientras el volumen total de 257 ml es el mayor volumen del aspersor 3 de la línea lateral 7.

Indicadores de calidad del sistema de riego

Humedad disponible en el suelo

La capacidad de campo (CC) en porcentaje de humedad es de 16.55% a una presión de 0.33 bar y punto de marchitez permanente (PMP) de 8,50 % de humedad a una presión de 15 bares, estos resultados muestran el límite superior e inferior del agua disponible para las plantas y la tensión a la cual es retenida en el área de estudio (Tabla 7).

Tabla 7. Humedad del suelo presiones de CC y PMP.

% Capacidad de Campo (0,33 bar)	16,55
% Humedad equivalente (1 Bar)	13,15
% Punto de Ruptura Capilar (5 Bar).	10,05
% Punto Marchitez Reversible (10 Bar)	8,88
% Pto. de Marchitez Permanente (15 bar)	8,50

Fuente: Laboratorio de la Universidad Mayor de San Simón - UMSS

Mediante datos obtenidos en campo y laboratorio, como la humedad antes del riego fue 12,57 %, profundidad 30 cm. densidad aparente de 1,39 gr cc-1, lámina promedio aplicada de 4,72 mm y tiempo de riego de 60 min. se obtuvo la deficiencia de la humedad del suelo (DHS) fue de 16,60 mm, con eficiencia de aplicación (EA) de 45,55 %, este último valor, muestra que el sistema presenta baja eficiencia, deduciéndose que al menos que tres cuartas partes del cultivo ha recibido solamente el 45,55 % del agua aplicada a través del riego por aspersión en el tercer evento de riego.

Eficiencia de distribución (EDa)

Se trabajó principalmente con los coeficientes de uniformidad (CU) y la fracción de área adecuadamente regada, al respecto, Tarjuelo (1999) recomienda que el 90% del área quede bien regada para cultivos de valor medio y alto, y de 80% para cultivos de menor valor y forrajeros. Tomando en cuenta esta escala de valores y los resultados de coeficiente de uniformidad, en la evaluación se consideró un valor de 85 % para determinar el EDa en el cultivo de cebada cuyos resultados se muestran en la Tabla 8.

Cuadro 8. Eficiencia de distribución de agua (Eda) en cultivo de cebada.

Coeficiente de uniformidad (%CU)	Fracción de área adecuadamente regada (f)	EDa %
51,94	85	36,92
71,25	85	62,27
75,40	85	65,80

El sistema de aspersión tiene un coeficiente de uniformidad de 75,4% y debe ser regada a un coeficiente f de 85% y una eficiencia de 65,80 %, implicando que para aplicar al menos la altura de 1 mm de agua en el 85 % del área regada, la altura media infiltrada debe ser de 1,52 mm. Por otro lado, el método de aspersión con un CU de 51,94 da como resultado un Eda de 36,92 %, necesitándose aplicar una altura media de 2,71 mm de agua para conseguir al menos una altura neta de 1 mm en el 85 % del área regada. Por tanto, esto justifica que a un menor CU, menor será la EDa; asimismo para conseguir el mismo objetivo de 1 mm se necesita aproximadamente de un 75% más de agua con un CU de 51,94 que con uno del 75,25%, provocando una mayor pérdida de agua.

Pérdidas por evaporación y arrastre del viento (Pe)

Para Tarjuelo (1999), son condicionadas principalmente por el viento, señalando al mismo como el principal distorsionador de la uniformidad de reparto; también se suma a estos factores el tamaño de gotas y la longitud de su trayectoria de caída. La velocidad de viento fue de 16,2 km h⁻¹ cuyas lecturas fueron obtenidas de la consola de la estación, dio como resultado las pérdidas por evaporación y arrastre del viento mayores a 20 % sobre el volumen aplicado.

Durante las primeras horas de la mañana la incidencia de la temperatura al igual que el viento es mucho menor de 1,44 km h⁻¹ (0,4 m s⁻¹) conduciendo a una baja pérdida del agua entre

CONCLUSIONES

El viento, humedad, variación de presión y un diseño agronómico e hidráulico inadecuado, ocasionan bajas uniformidades en la aplicación de un sistema de riego por aspersión y esto resulta ser peor en condiciones del Altiplano Boliviano, cuya consecuencia es la mala distribución y reparto del agua originada por la influencia de la presión, meteorología, etc.

El índice de uniformidad de distribución fue de 61,04% y el coeficiente de uniformidad de 73,94% con una eficiencia de aplicación del 45,55%, que al no controlar adecuadamente con la frecuencia

2 y 4% sobre el volumen aplicado, por tanto, se deduce que para evitar el efecto negativo del viento y la temperatura sobre el reparto de agua por los aspersores durante el riego, es recomendable la aplicación del riego a primeras horas del día y no así en horarios cercanos y posteriores a medio día.

Keller (1990) citado por Tarjuelo (1999), sostiene que en condiciones normales, estas pérdidas varían entre el 5 y 10%, sin embargo, en condiciones severas (bajo humedad relativa, alta temperatura, tamaño de gota muy pequeño, alta velocidad del viento, etc.) pueden ser considerablemente mayores.

Pérdidas por fugas en conducciones y Eficiencia de almacenamiento (Es)

Estas pérdidas se deben a la existencia de fugas desde el punto de suministro hasta la parcela de riego. Tarjuelo (1999) señala que en sistemas con un adecuado mantenimiento, estas pérdidas pueden ser menores al 1% del caudal transportado, por tanto, la proporción entre el agua que descargan los aspersores y la bombeada (Pd) será comprendida entre valores de (0,99 a 1,00), es por ello que una vez instalado el sistema de riego se realizaron inspecciones con la finalidad de hallar posibles fugas en las tuberías y acoples.

La eficiencia de almacenamiento (Es) fue de 12,95% este porcentaje es de la deficiencia de humedad del suelo que ha sido repuesta con la aplicación de riego, restando un 87,05% a reponerse.

y tiempo de riego se afecta directamente a la humedad del suelo, causando limitación del agua de riego, llegando a ocasionar un mayor déficit hídrico del suelo.

Los resultados muestran que el método de riego por aspersión es una de las alternativas que permite alcanzar la eficiencia adecuada del agua siempre y cuando cuidando los tiempos y horas de riego, ya que el recurso hídrico en el Altiplano Boliviano son escasas y necesarias para mejorar la producción agrícola, sin embargo, debido a la baja eficiencia de aplicación hallada en el estudio, se

debe continuar con los estudios de investigación a fin de lograr incrementos en este indicador para de

esta forma lograr el uso adecuado y eficiente del agua de riego.

BIBLIOGRAFÍA

Fernández, R., Oyonarte, N., García, J, Yruela, M. 2010. Manual de Riego para Agricultores Módulo 3: Riego por Aspersión. Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca. Ediciones de Andalucía, S.L. Sevilla Pp 19 – 48.

Keller, J., Bliesner, R. 2000. Sprinkle and Trickle irrigation. Blackburn Press. New York. 652 p.

Merriam, J. 1983. Evaluating irrigation systems and practices. In: JENSEN, M.E. 1983. Design and operation of farm irrigation systems. The American Society of Agricultural Engineers. p. 721-760.

Tarjuelo, M. 1999. Riego por Aspersión y su Tecnología. Edit. Mundi-Prensa 2da edición Barcelona, España 570 p.

Artículo recibido en: 4 diciembre 2015

Manejado por: Comité Editorial

Aceptado en: 10 de marzo de 2016