



Efecto del riego por goteo de bajo volumen en el rendimiento del cultivo de fréjol variedad “Rojo del Valle” en los andes ecuatorianos

Effect of the low volume drip irrigation in the yield of the beans crop variety “Rojo del Valle” in the Ecuadorian Andes

Randon Ortiz-Calle^{1,*}; Maritza Chile-Asimbaya¹; Yamil Cartagena-Ayala²; Rodrigo Morillo-Velarde³; Christian Vásquez-Mejía¹; Mabel Romero-Anchapanta¹; Diego Erique-Agila¹; Wladimir Alomoto-Panoluisa¹; Patricia Torres-Fierro¹

1 Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Central del Ecuador. Ciudadela Universitaria, Jerónimo Leiton S/N y Av. La Gasca, Quito, Ecuador.

2 Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Quito, Ecuador.

3 Universidad Internacional del Riego, Madrid, España.

*Autor correspondiente: rsortiz@uce.edu.ec (R. Ortiz-Calle).

ID ORCID de los autores

R. Ortiz-Calle:  <http://orcid.org/0000-0001-6172-4932>

M. Chile-Asimbaya:  <http://orcid.org/0000-0002-4496-2653>

Y. Cartagena-Ayala:  <http://orcid.org/0000-0003-2447-2769>

RESUMEN

La aplicación del agua de riego por goteo en bajos volúmenes con alta frecuencia es una técnica de manejo del agua que permite maximizar la disponibilidad de oxígeno, agua y nutrientes en la solución del suelo para mejorar la actividad fisiológica de la planta. La investigación se realizó en el Valle de Tumbaco (provincia de Pichincha) para evaluar el efecto integral de esta técnica en la relación suelo - agua - planta. Se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas con dos factores en estudio (métodos de aplicación del agua y dosis de fertilizantes). Goteo se denomina al manejo del agua convencional (riego continuo con dosis de fertilizantes 100%) y RPro el riego de bajo volumen de alta frecuencia (riego intermitente con dosis de fertilizantes 50%). Los resultados promedio (2018-2019) fueron: i) rendimiento: Goteo 3,11 t ha⁻¹ y RPro 4,38 t ha⁻¹; ii) lámina de agua aplicada: Goteo 368,15 mm y RPro 236,40 mm; iii) altura de la planta: Goteo 67,39 cm y RPro 62,13 cm; iv) vainas por planta: Goteo 20,17 y RPro 25,24; v) granos por vaina: Goteo 3,67 y RPro 4,04. En conclusión, el riego por goteo de bajo volumen de alta frecuencia en comparación con el goteo continuo permitió obtener un incremento en el rendimiento del 40,84%, un ahorro de agua del 55,73%, un ahorro de fertilizantes del 50% y el ciclo vegetativo se redujo en dos semanas.

Palabras clave: riego por pulsos; riego intermitente; riego continuo; fertirrigación; dosis de fertilizantes.

ABSTRACT

The application of drip irrigation water in low volumes with high frequency is a water management technique that allows to maximize the availability of oxygen, water and nutrients in the soil solution to improve the physiological activity of the plant. The research was carried out in the Tumbaco Valley (Pichincha province) to evaluate the integral effect of this technique on the soil - water - plant relationship. An experimental design of divided plots was used with two factors under study (water application methods and fertilizer doses). Drip is called conventional water management (continuous irrigation with 100% fertilizer doses) and RPro the high-frequency low-volume irrigation (intermittent irrigation with 50% fertilizer doses). The average results (2018-2019) were: i) yield: Drip 3.11 t ha⁻¹ and RPro 4.38 t ha⁻¹; ii) sheet of water applied: Drip 368.15 mm and RPro 236.40 mm; iii) plant height: 67.39 cm drip and 62.13 cm RPro; iv) pods per plant: Drip 20.17 and RPro 25.24; v) grains per pod: Drip 3.67 and RPro 4.04. In conclusion, high frequency low volume drip irrigation compared to continuous drip allowed to obtain an increase in yield of 40.84%, a water saving of 55.73%, a fertilizer saving of 50% and the vegetative cycle was shortened by two weeks.

Keywords: pulse irrigation; intermittent irrigation; continuous irrigation; fertirrigation; fertilizer dose.

Recibido: 15-04-2021.

Aceptado: 10-07-2021.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUCCIÓN

El reto actual del sector agrícola es producir más alimentos con menos agua y menos fertilizantes, para cubrir la demanda de alimentos de una población en constante crecimiento, con una disminución paulatina del área agrícola por la urbanización y con una incertidumbre en la disponibilidad del agua por la variación del clima. En Ecuador, el sector agrícola con riego utiliza alrededor del 81% del agua dulce (World Bank, 2020), necesiéndose reducir este porcentaje con métodos de riego eficientes (Perry & Steduto, 2017). Una forma de optimizar este recurso es reducir la evaporación del agua desde el suelo, sin incrementar la transpiración y sin afectar el rendimiento del cultivo (Perry & Steduto, 2017), siendo el riego por goteo el que se ajusta a este objetivo. La necesidad hídrica del cultivo de fréjol para el Valle de Tumbaco varía entre 400 y 500 mm (Ortiz, 2019); considerando el valor de 400 mm, el volumen de agua a aplicarse en riego por goteo sería de 4 400 m³ ha⁻¹, en riego por aspersión de 6 200 m³ ha⁻¹ y en riego por surcos de 8 800 m³ ha⁻¹. El ahorro de agua considerando el riego por goteo con relación a aspersión es del 40,9% y respecto a surcos del 100,0%. En el riego por goteo, la aplicación del agua en bajos volúmenes con una alta frecuencia reduce el agua entre un 30 y 60% en comparación con la aplicación continua del agua (Ortiz, 2008).

El método de aplicación del agua influye en la relación oxígeno - agua en la solución del suelo. En el riego por surcos y aspersión se humedece toda el área y perfil, durante la aplicación, el agua ocupa el espacio poroso desplazando el oxígeno, con saturación al final y una disponibilidad mínima de oxígeno. Por efecto de la evapotranspiración, la humedad disminuye permitiendo el ingreso del aire (oxígeno) hasta que, en el momento del próximo riego, la disponibilidad de agua es baja y el oxígeno alcanza su máximo contenido, con una relación oxígeno - agua pobre entre dos riegos consecutivos. En estos métodos se suministra una lámina semanal entre 30 y 70 mm (300 - 700 m³ ha⁻¹). En riego por goteo, la aplicación diaria garantiza una mejor relación oxígeno - agua,

debido a que las láminas que se aplican varían entre 3 y 7 mm (30 - 70 m³ ha⁻¹). La aplicación del agua en bajos volúmenes con tiempos de riego entre 2 y 5 minutos, para suministrar láminas de 0,1 a 0,5 mm (1,0 - 5,0 m³ ha⁻¹) distribuidos durante el día (RPro), garantiza una relación oxígeno - agua balanceada, óptima para el desarrollo de los cultivos.

RPro permite: humedecer la parte superior del perfil del suelo en donde la estructura es mejor, la densidad aparente menor y es la zona en donde se produce el intercambio de gases entre el suelo y la atmósfera; mantener contenidos de humedad entre capacidad de campo y saturación; mantener en el suelo potenciales y conductividades hidráulicas altas; producir el movimiento de los nutrientes por difusión y reducir la dosis de fertilizantes aplicados convencionalmente; mejorar la aireación del suelo y la disponibilidad de oxígeno; evitar la pérdida del agua por percolación profunda, y mejorar la actividad fisiológica de la planta (Segal, Ben-gal & Shani, 2000; El-abadin, 2006; Ortiz, 2008; Skaggs et al., 2010; Eid et al., 2013; Zamora et al., 2019; Kilic, 2020).

El fréjol es uno de los principales productos agrícolas en la dieta de los ecuatorianos por su alto contenido en proteínas, carbohidratos, minerales y fibra. La superficie cosechada en el año 2018 fue de 17683 hectáreas y el rendimiento promedio nacional es de 0,62 t ha⁻¹ (ESPAC, 2018). En Ecuador (Loja), el rendimiento varió de 2,4 a 3,2 t ha⁻¹ con riego por goteo para frecuencias de aplicación de 3 y 1 día, respectivamente (Sivisaca, 2013). En México (San Luis Potosí), se obtuvo un rendimiento de 5,1 t ha⁻¹ con fertirriego (Jasso, Martínez, & Huerta, 2004). En Egipto, el cultivo de fréjol (fresco) con riego por goteo (4 riegos), presentó un rendimiento de 11,0 t ha⁻¹ y para un solo riego 9,0 t ha⁻¹ (El-Mogy et al., 2012).

El objetivo de la presente investigación fue evaluar en forma integral el efecto del riego por goteo de bajo volumen de alta frecuencia de aplicación (RPro) en el desarrollo del cultivo de fréjol para optimizar el uso del agua y de los fertilizantes.

MATERIAL Y MÉTODOS

Ubicación y características ambientales del área de investigación. La presente investigación se desarrolló en el Centro Académico Docente Experimental la Tola (CADET), Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Central del Ecuador, Valle de Tumbaco (callejón interandino y cuenca alta del río Esmeraldas), Pichincha (Ecuador), a una altura de 2480 msnm, latitud sur: 0°13'46" y longitud oeste: 78°22'0" (Figura 1). El Valle de Tumbaco se caracteriza por tener dos estaciones climáticas bien diferenciadas, la lluviosa de octubre a mayo y verano de junio a septiembre; la temperatura máxima varía entre 25,4 °C y 26,6 °C; la temperatura mínima varía entre 4,7 °C y 7,2 °C; el mes con el máximo número de horas de luz es agosto con 7,40 h d⁻¹ y el mes con el mínimo número de horas de luz

es abril con 4,3 h d⁻¹. El tipo de suelo en donde se realizó el experimento es una Cangahua, suelo duro y estéril (Palacios et al., 2018), clasificado como Durustoll (Custode & Trujillo, 2000), de textura Franco. La profundidad efectiva del suelo es de 0,2 m, con un contenido de nitrógeno de 55,0 mg kg⁻¹ (medio), fósforo de 79,1 mg kg⁻¹ (alto), potasio de 0,6 meq 100 mg⁻¹ (alto), pH ligeramente ácido con 6,67 unidades y materia orgánica del 3,5% (medio). El contenido de humedad en términos de volumen a saturación fue del 46,8%, capacidad de campo del 41,82% y marchitez permanente del 19,68%. Previo al primer ciclo, el área de experimentación estuvo ocupada por pastos (más de 20 años), y la pendiente promedio del terreno es del 3,0%.

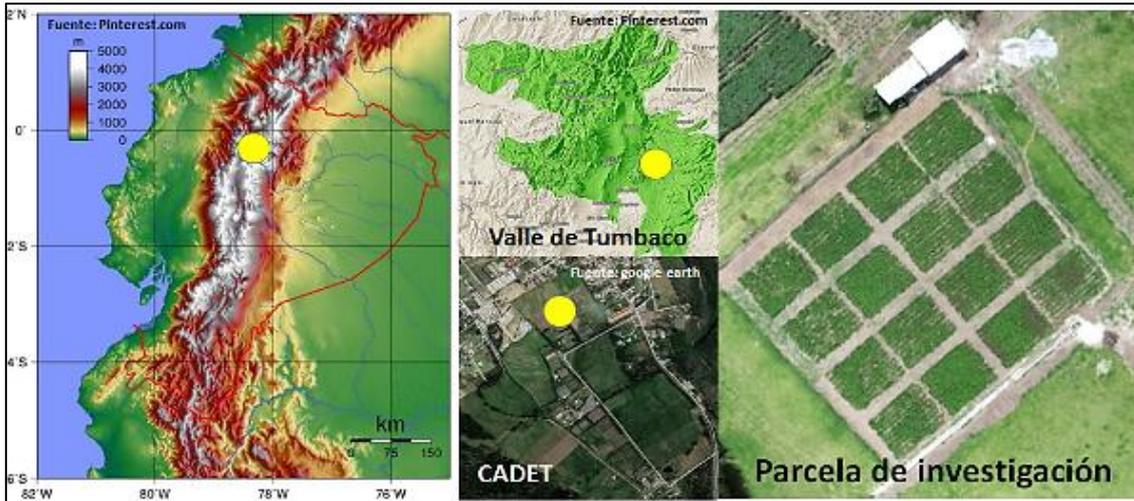


Figura 1. Ubicación del área de investigación.

Equipo de riego y monitoreo. El proyecto contó con un sistema de riego por goteo automatizado. Para el monitoreo de la tensión de humedad del suelo se utilizó tensiómetros analógicos. El gotero fue auto compensado de $1,0 \text{ l h}^{-1}$, separación entre emisores de 0,2 m, separación entre laterales de 0,8 m y longitud del lateral de 10,0 m. La temperatura y la humedad relativa bajo el cultivo se registraron a través de medidores portátiles. Las variables químicas de la solución del suelo se midieron con medidores portátiles (calibrados).

Variación de cultivo y ciclos. Se evaluó el fréjol arbustivo INIAP-481 (Rojo del Valle), el cual se sembró a una densidad de 100 mil plantas por hectárea. Este cultivo presenta un rendimiento promedio de $1,4 \text{ t ha}^{-1}$, altura de la planta máxima de 50 cm, número de vainas por planta máxima de 12 y 5 granos por vaina (Peralta et al., 2009). La investigación se realizó en dos ciclos (2018-2019).

Variación de cultivo y ciclos. Riego por goteo continuo: tiempo de riego de 32 min; tensión de humedad umbral de 15 centibares. La cápsula porosa del tensiómetro se instaló a 20 cm de profundidad. Riego por goteo de bajo volumen de alta frecuencia de aplicación: tiempo de riego de 2 min; tensión de humedad umbral de 10,0 centibares. La capsula porosa del tensiómetro se instaló a 10 cm de profundidad. Fertilización: dosis 100%, 80-40-60 (NPK); dosis 50%, 40-20-30 (NPK).

Diseño Experimental. El diseño experimental fue parcelas divididas con dos factores en estudio (métodos de aplicación del agua y dosis de fertilizantes), con cuatro repeticiones; el área de la unidad experimental fue de 80 m^2 y el área total de la investigación de 1280 m^2 . El factor riego tuvo dos métodos de aplicación: aplicación del agua en una

sola aplicación y aplicación en bajos volúmenes con alta frecuencia. El factor fertilización tuvo dos niveles: F100, aplicación completa de nutrientes en base al análisis de suelos y necesidad del cultivo y F50, la mitad de F100. El tratamiento 1 (T_1), se denomina Goteo y se refiere al manejo tradicional del riego por goteo (riego continuo y 100% de fertilizantes); tratamiento 2 (T_2), Goteo continuo con el 50% de fertilizantes; tratamiento 3 (T_3), riego de bajo volumen de alta frecuencia con 100% de fertilizantes y tratamiento 4 (T_4) se denomina RPro, riego de bajo volumen de alta frecuencia con el 50% de la dosis de fertilizantes. Se midieron las siguientes variables:

- Clima: temperatura (T , $^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (HR, %) a la sombra (a 2.0 metros de altura) y bajo el follaje del cultivo (a 20 cm sobre el suelo) en la fase de maduración de las vainas.
 - Física de suelos: la tensión de humedad (centibares) se midió a través de un tensiómetro analógico con una frecuencia de 3 minutos. El contenido de humedad (%) se determinó a partir de la curva humedad tensión. Se midió el contenido de oxígeno disuelto (O_2 , %), tres veces por semana. Se midió el diámetro (D, cm) y la profundidad (P, cm) de la zona humedecida.
 - Química de suelos: la conductividad eléctrica (CE, dS m^{-1}) y el contenido de nitratos (N, ppm) se midieron tres veces por semana. Al inicio y final de cada ciclo se realizó análisis de fertilidad del suelo.
 - Agua: al final de cada ciclo se determinó la lámina de agua aplicada (L, mm) en cada tratamiento.
 - Planta: altura de la planta (AP, cm), número de vainas por planta (NVP), número de granos por vaina (NGV) y rendimiento (R, t ha^{-1} , contenido de humedad del 12%).
- Se realizó un análisis estadístico de la media para T, HR, D, P, O_2 , y volumen de aireación. Se utilizó el método de Mann Kendall para determinar la tendencia de los nutrientes en la solución del suelo. Se realizó el análisis de la Varianza para los factores en estudio (métodos de aplicación del agua y dosis de nutrientes). El nivel de significancia fue el 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A pesar de que el efecto del riego por pulsos en el rendimiento de algunos cultivos ha sido reportado en varios artículos científicos (El- Abedin, 2006; Skaggs et al., 2010; Eid et al., 2013; Zamora et al.,

2019), no existe una información integral del efecto del riego de bajo volumen de alta frecuencia en la relación suelo-agua-planta. Las diferencias fundamentales entre el riego de bajo volumen y el riego

por pulsos son: i) en RPro, el agua se aplica durante el día en láminas de 0,2 a 0,5 mm para cubrir la evapotranspiración real, mientras que en el riego por pulsos, el agua se suministra en varios riegos consecutivos con intervalos de 5 a 10 minutos entre ellos para cubrir la evapotranspiración diaria del cultivo, y ii) en RPro se requiere la mitad de la dosis convencional de fertilizantes utilizados en la producción de los cultivos.

Parámetros climáticos en los dos ciclos. En el Valle de Tumbaco, el clima fue más caluroso en el segundo ciclo (2019), con mayores tasas de evaporación, horas de luz y temperatura, los cuales influyeron en una mayor evapotranspiración real del cultivo en los dos regímenes de riego (Tabla 1).

Tabla 1

Parámetros climatológicos promedio registrados en la estación La Tola

Ciclos	Tmax °C	Tmin °C	HR %	Horas luz h d ⁻¹	Eo mm d ⁻¹
2018	22,47	9,58	69,34	6,09	4,34
2019	22,97	10,17	61,82	6,71	5,74

Fuente: INAMHI (2019).

Temperatura y humedad relativa bajo el follaje del cultivo. Se determinó una diferencia estadística significativa para la temperatura y la humedad relativa entre RPro y Goteo. En RPro, la temperatura fue la más fría en la mañana y la más calurosa en la tarde (Figura 2a), y la humedad relativa fue alta al mediodía y la más baja en la tarde (Figura 2b); al mediodía, la combinación de bajas temperaturas con altas humedades relativas, indican una mejor regulación de la transpiración de las plantas, mientras que en la tarde, las altas temperaturas con humedades bajas, reducen las condiciones ambientales para el desarrollo de enfermedades fungosas. El calor acumulado en el follaje del cultivo fue disipado entre las 18H00 y 19H30 a temperaturas promedio de 33.4 oC, siete grados mayor a la del aire y a la registrada en Goteo, observándose una mejor actividad fisiológica de la planta y como resultado de ello, mejores rendimientos y un ciclo vegetativo menor en dos semanas. No hay estudios similares en la región para contrastar los resultados encontrados en la investigación.

Aireación y concentración de oxígeno en la solución del suelo. Se determinaron diferencias estadísticas significativas en el volumen de aireación y concentración de oxígeno en la solución del suelo entre RPro y Goteo. En RPro, la variación de la aireación en la solución del suelo fue del 61,7% y la concentración del oxígeno disuelto del 16,0% mayor a Goteo, respectivamente (Figura 3). La aplicación del agua en forma intermitente distribuida a lo largo del día incrementa el volumen de aireación en la macro porosidad del suelo, considerando que la humedad varía entre capacidad de campo y saturación. El suministro del agua en bajos volúmenes reduce la tasa de aplicación de los goteros, en este caso de 6,25 mm h⁻¹ a 0,21 mm h⁻¹, lográndose mantener una concentración estable de oxígeno en el suelo debido a que durante el riego no se produce el desplazamiento del aire, maximizando su disponibilidad para las raíces. Los resultados

encontrados son consistentes con los reportados por Fraisse, Duke & Herman (1995) y Rank et al. (2019), quienes encontraron que el riego por pulsos incrementa la aireación del suelo, así como, Karmeli & Peri (1974) y Ortiz (2008), reportan que el riego por pulsos reduce la tasa de aplicación del agua aun cuando los caudales de los goteros sean altos.

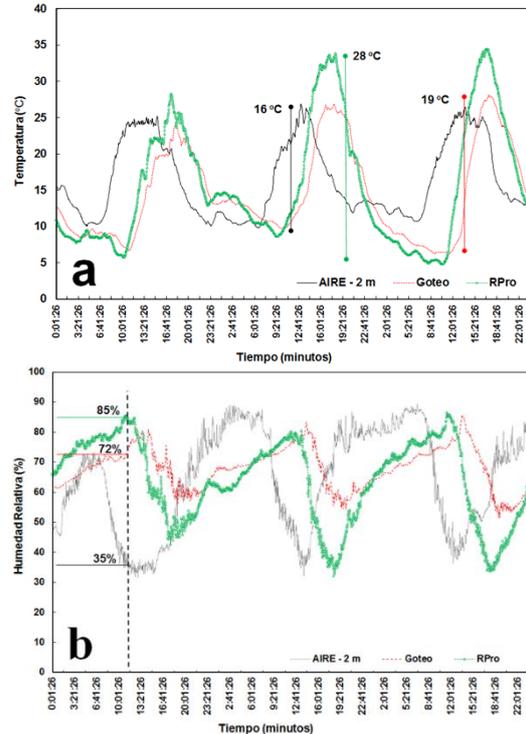


Figura 2. Microclima en el follaje: a) temperatura, b) humedad relativa.

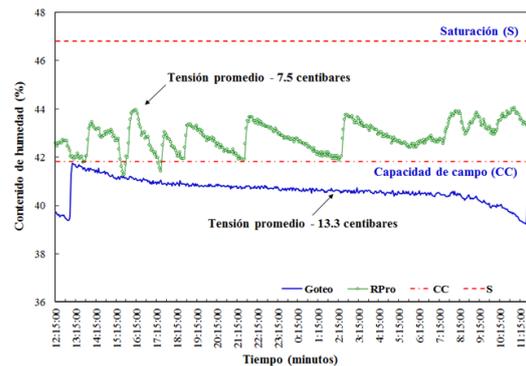


Figura 3. Contenido de humedad en términos de volumen en Goteo y RPro.

Contenido de humedad en el suelo. En RPro, la tensión de humedad promedio fue de 7,5 centibares y alrededor de 13,3 centibares en Goteo. A pesar de que el contenido de humedad en el suelo depende del nivel de humedad que se quiera manejar, la aplicación del agua en pequeñas cantidades a lo largo del día incrementa el contenido de humedad sobre capacidad de campo. El contenido de humedad mayor a capacidad de campo se define como "saturación controlada" y es diferente de la saturación definida en riego y drenaje, en la cual, la porosidad está llena de agua con una concentración nula de oxígeno. En la zona no saturada, cualquier volumen de agua aplicado produce una saturación de tipo temporal debido a que el agua se desplaza en todas las direcciones por

las fuerzas de gravedad y de capilaridad. Un contenido de humedad mayor a capacidad de campo beneficia la absorción del agua por las plantas, permitiéndole transpirar a su máximo potencial energético, con una mejor regulación estomática y mayores tasas de absorción de CO_2 , para a través de la fotosíntesis obtener una mayor cantidad de carbohidratos, por otro lado, el contenido de humedad alto reduce el potencial osmótico de las sales presentes en el suelo, incrementando la disponibilidad del agua para las plantas (Ortiz, 2008). Estos resultados son consistentes con los reportados por El-abedin (2006), Skaggs et al. (2010), Abdelraouf et al. (2012), Eid et al. (2013) y Zamora et al. (2019), en los cuales determinaron que el riego por pulsos incrementa la humedad del suelo a contenidos mayores a capacidad de campo, así como, Segal, Ben-gal & Shani (2000) reportaron que los contenidos de humedad en el riego por pulsos incrementan el potencial del agua y la conductividad hidráulica del suelo.

Bulbo húmedo y zona humedecida. En Goteo, el ancho del bulbo húmedo fue de 34,06 cm y la profundidad de 48,05 cm, y en RPro, el ancho de la zona humedecida fue de 51,07 cm y la profundidad de 25,08 cm. En RPro, el ancho de la zona humedecida fue mayor a Goteo en un 49,94% y la profundidad menor en un 47,80%, considerando que el suelo es una Cangahua (roca). En contraste con el bulbo húmedo producido por el riego continuo, el riego de bajo volumen creó una zona húmeda ancha y poco profunda, reduciendo la infiltración del agua no más allá de los primeros 25 centímetros del perfil del suelo, eliminando la pérdida de agua por percolación profunda. El movimiento del agua en el suelo se produce por fuerzas de gravedad y de capilaridad, las fuerzas gravitacionales intervienen en el movimiento vertical del agua y las fuerzas capilares en el movimiento horizontal. Cuando el suministro del agua es continuo, el movimiento del agua se produce en el eje vertical por efecto de las fuerzas gravitacionales, generando bulbos profundos. La aplicación del agua en volúmenes pequeños, tiempos de riego cortos o riegos intermitentes, anulan la fuerza de gravedad y el movimiento del agua se produce por capilaridad, generando zonas húmedas anchas y poco profundas. El contenido de humedad mayor a capacidad de campo reduce el diámetro de los poros, permitiendo el movimiento del agua por difusión o fuerzas de cohesión, alcanzando las máximas longitudes y una mejor distribución tanto del agua como de los nutrientes en la zona humedecida. Además, este régimen de riego, al no generar zonas saturadas bajo el gotero, reduce las condiciones ambientales para el desarrollo Fusarium, Rhizoctonia & Pythium (Ortiz, 2008). Este régimen de humedecimiento permitió que el sistema radicular secundario de las plantas se desarrolle en toda la franja humedecida, mientras que en Goteo, el sistema radicular se distribuyó en todo el volumen del bulbo húmedo. El sistema radicular (raíces jóvenes) distribuido en la parte superior del perfil del suelo mejoró la eficiencia de absorción del agua y los nutrientes. Los resultados encontrados en la investigación son consistentes con los reportados por Al-Naeem

(2008), Elmaloglou & Diamatopoulus (2009), e Ismail et al. (2014), en los cuales encontraron dos ventajas del riego por pulsos en comparación con la aplicación continua del agua: i) reduce la pérdida de agua por percolación profunda, y ii) genera zonas húmedas más anchas, y Al-Ogaidi et al. (2016) y Kilic (2020) desarrollaron un modelo numérico para determinar el patrón de humedecimiento (ancho y profundidad) en función del número de pulsos, encontrando que una mayor cantidad de pulsos genera una zona humedecida más ancha y menos profunda, muy similar a los datos determinados en campo.

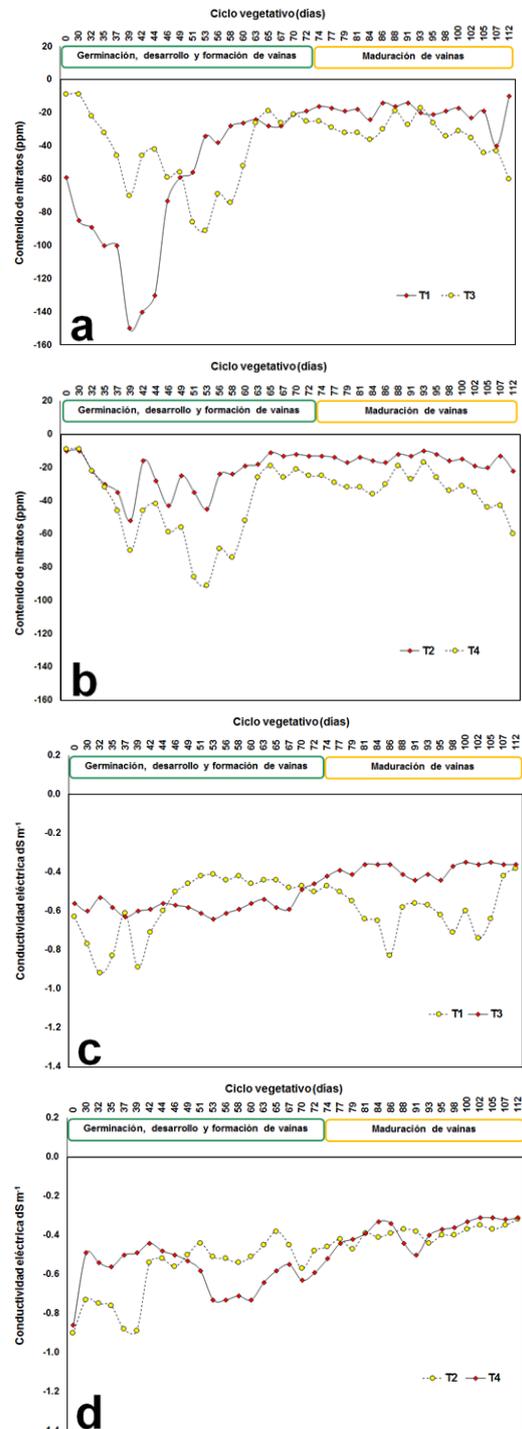


Figura 4. Contenido de nitratos en la solución del suelo primer ciclo: (a) T1 y T3, (b) T2 y T4. Conductividad eléctrica en la solución del suelo segundo ciclo: (c) T1 y T3, (d) T2 y T4.

Nutrientes en la solución del suelo. Se encontraron diferencias estadísticas significativas en el contenido de nitratos (NO_3) y conductividad eléctrica (CE) en la solución del suelo en los dos métodos de aplicación del agua. En los primeros 45 días del ciclo vegetativo, para la misma dosis de fertilizantes, NO_3 y CE fueron mayores en Goteo (Figura 4). Desde el día 45 a 70, NO_3 y CE fueron mayores en RPro. Desde el día 70 a 105, fueron similares. En el primer período, los datos permiten estimar que la tasa de absorción de los nutrientes fue mayor en RPro, debido a que las raíces secundarias y pelos absorbentes se encuentran distribuidas en la zona humedecida en la parte superior del perfil del suelo. En el segundo período, la actividad fisiológica de la planta tuvo un periodo más largo en RPro.

Contrastando el contenido de nitrógeno en el tejido del cultivo entre Goteo (dosis de fertilizantes 100%) y RPro (dosis de fertilizantes 50%), no hubo una diferencia estadística significativa. En el análisis realizado a los 30 días, en Goteo este fue del 3,61%; T2, de 3,55%; T3, de 3,83%, y en RPro del 3,59%; a los 60 días, Goteo del 3,53%; T2, 3,35%; T3, 3,48% y en RPro del 3,58%; a los 90 días, Goteo del 2,71%; T2, 2,58%; T3, 2,65% y en RPro del 2,76%. Los contenidos de nitratos en la solución del suelo y del nitrógeno en el tejido vegetativo demuestran que la aplicación del agua en bajos volúmenes a una alta frecuencia fue más eficiente que la aplicación continua del agua, debido a que la actividad biológica de la planta tuvo un mayor período de reproducción, con un mayor número de vainas por planta. Estos resultados son consistentes con los reportados por Segal, Ben-gal & Shani (2000), Abdelraouf et al. (2012), El-Mogy et al. (2012), Phogat et al. (2012) y Eid et al. (2013), en los cuales reportaron que el contenido de humedad mayor a capacidad de campo generado en el riego por pulsos, mejora la absorción de los nutrientes, y los cultivos presentaron rendimientos mayores.

Según los análisis de fertilidad del suelo (Tabla 2), se determinó una tendencia positiva en el contenido de nitrógeno (T2, T3 y T4); fósforo (T1, T2, T3 y T4); calcio (T3 y T4), y magnesio (T3 y T4). El análisis permite deducir que a más de la dosis de fertilizantes reducida al 50% (T2 y T4), la cantidad de nitrógeno y fósforo puede disminuirse aún más, reduciendo los costos de producción y la contaminación ambiental.

Componentes del rendimiento. El análisis estadístico de la varianza permitió determinar una diferencia estadística significativa para el método

de aplicación del agua en el rendimiento (2018 y 2019), altura de la planta (2018) y número de vainas por planta (2019). En relación al factor fertilización (dosis 50% y 100%) no se determinó ninguna diferencia estadística en las variables estudiadas (Tabla 3). Los resultados fueron consistentes en los dos ciclos. Para la dosis de fertilizantes 100%, el rendimiento promedio de los dos ciclos fue mayor en T3 en un 49,40% y el número de vainas por planta en un 19,91%; para la dosis 50%, el rendimiento fue mayor en RPro en un 43,90% y el número de vainas alrededor del 32,82%. A pesar de que no existió una diferencia estadística significativa en el número de granos por vaina para la misma dosis de fertilizantes, el riego de bajo volumen presentó un mayor número de granos por vaina.

Las variables evaluadas fueron más ventajosas en el riego de bajo volumen debido a que la actividad fisiológica de la planta fue mayor por la óptima disponibilidad de oxígeno, agua y nutrientes en la zona humedecida. Las diferencias en el rendimiento entre RPro y Goteo son consistentes con los reportados por El-Mogy et al. (2012) en Egipto, para fréjol fresco, con cuatro riegos obtuvieron $11,0 \text{ t ha}^{-1}$, y para un riego continuo alrededor de $9,0 \text{ t ha}^{-1}$; Sivasca (2013) en Ecuador, para frecuencias de riego de 1 y 3 días obtuvo 3,2 y $2,4 \text{ t ha}^{-1}$, y Jasso, Martínez, & Huerta (2004) en México, con fertirriego, reportaron un rendimiento de $5,1 \text{ t ha}^{-1}$. Contrastando estos rendimientos con RPro (Tabla 3), el rendimiento fue mayor para el obtenido en Ecuador con una frecuencia de riego diaria ($3,2 \text{ t ha}^{-1}$) y ligeramente menor al obtenido en México ($5,1 \text{ t ha}^{-1}$), debiéndose recordar las condiciones del experimento: densidad de 100 mil plantas por hectárea, fréjol cultivado en una cangahua (roca) y el rendimiento reportado es el comercializable con un 12% de humedad.

Láminas de agua aplicadas. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en las láminas de agua aplicadas en goteo continuo y riego de bajo volumen. El promedio general fue: Goteo, lámina aplicada de 368,15 mm; T2, 370,30 mm; T3, 250,50 mm y RPro, 236,40 mm. En RPro se determinó un ahorro de agua del 46,97% con relación a T1 y del 56,64% en comparación con T2. Esta diferencia de láminas demuestra que en el riego de bajo volumen hubo un uso más eficiente del agua, considerando que la zona humedecida fue más ancha y menos profunda con relación al bulbo húmedo del riego continuo, eliminándose las pérdidas de agua por percolación profunda con el riego intermitente.

Tabla 2

Resultados del análisis de fertilidad del suelo en los dos ciclos

Nutriente	Goteo		T ₂		T ₃		RPro	
	Inicio	Final	Inicio	Final	Inicio	Final	Inicio	Final
Nitrógeno (ppm)	50,40	62,0	40,50	62,27	42,00	52,24	35,0	53,78
Fósforo (ppm)	33,20	118,0	40,80	114,0	36,0	171,0	42,10	146,00
Potasio (ppm)	0,49	0,59	0,76	0,58	0,58	0,61	0,75	0,55
Calcio (meq/100 ml)	12,19	11,19	9,53	11,69	7,30	11,18	9,0	9,96
Magnesio (meq/100 ml)	5,58	6,60	5,01	6,88	4,13	6,23	4,56	5,60

Tabla 3
Componentes del rendimiento (valores promedio) y ANOVA

Tratamientos	R (t ha ⁻¹)		AP (cm)		NVP		NGV	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019
Goteo	3,11 c	3,11 c	62,03 a	72,75 a	22,02 ab	18,31 b	3,50 a	3,84 b
T2	3,05 c	3,04 c	55,70 b	70,19 a	22,32 b	17,69 b	3,50 a	3,81 b
T3	4,12 a	5,18 a	54,70 b	70,13 a	22,55 a	25,81 a	4,00 a	4,04 ab
RPro	3,89 b	4,87 b	55,19 b	69,06 a	22,92 a	27,56 a	3,85 a	4,23 a
ANOVA								
Riego	3,39 *	15,23 *	61,50 *	14,06 ns	9,78 ns	301,89 *	0,72 *	0,38 ns
Fertilización	7,76 ns	0,14 ns	34,08 ns	13,14 ns	1,78 ns	1,27 ns	0,02 ns	0,02 ns
Interacción	2,79 ns	0,05 ns	46,55 ns	2,25 ns	4,27 ns	5,64 ns	0,02 ns	0,05 ns

* p < 0.05; ns, no significativo; letras iguales no son estadísticamente diferentes.

CONCLUSIONES

RPro es una técnica de manejo del agua de riego por goteo que permite aprovechar las ventajas de la naturaleza (suelo-agua-clima-planta) para producir más alimentos con una menor cantidad de agua y de fertilizantes, en un menor tiempo. Esta técnica genera: i) una zona humedecida ancha y poco profunda; ii) incrementa la disponibilidad de oxígeno por efecto de la variación del volumen de aireación en la macro porosidad del suelo por la aplicación intermitente del agua; iii) mejora la distribución del agua y los nutrientes en el suelo humedecido por la alta conductividad hidráulica que producen contenidos de humedad mayores a capacidad de campo; iv) la fertilización es más eficiente, necesitándose menores cantidades que las dosis convencionales, y v) la disponibilidad permanente de oxígeno, agua y nutrientes en la solución del suelo, mejoran la actividad fisiológica de la planta, con rendimientos mayores en un menor tiempo.

El cultivo de fréjol variedad Rojo del Valle, presentó un rendimiento en RPro mayor en un 40,8% con relación al Goteo continuo, del 212,9% en contraste con el rendimiento promedio de la variedad reportado por la Estación Experimental del INIAP,

del 606,4% en comparación con el promedio nacional, y del 119,0% en comparación con los rendimientos de otras variedades producidas en el CADET.

Con RPro se requiere un 50% de la dosis convencional de fertilizantes para obtener rendimientos mayores a los obtenidos con el Goteo continuo, debido a que el movimiento de los nutrientes por difusión hace más eficiente la fertilización, considerando que los contenidos de humedad mayores a capacidad de campo incrementan la conductividad hidráulica del suelo. La técnica RPro permitió reducir el uso del agua en un 55,73% con relación al Goteo continuo, siendo la aplicación del agua en bajos volúmenes con una alta frecuencia más eficiente debido a que se eliminan las pérdidas de agua por percolación profunda.

En RPro, el ciclo vegetativo del cultivo se redujo en dos semanas, debido a que la aplicación del agua en bajos volúmenes con alta frecuencia mejora la actividad biológica de la planta como resultado de la mayor disponibilidad de oxígeno, agua y nutrientes en la zona humedecida.

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección de Investigaciones y a la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Central del Ecuador por el apoyo financiero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelraouf, R., Abou-Hussein, S., Abd-Alla, A., & Abdallah, E. (2012). Effect of short irrigation cycles on soil moisture distribution in root zone, fertilizers use efficiency and productivity of potato in new reclaimed lands. *Journal of Applied Sciences*, 8(7), 3823-3833.
- Al-Naeem, M. (2008). Use of pulse trickles to reduce clogging problems in trickle irrigation system in Saudi Arabia. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 1(1):68-73.
- Al-Ogaidi, A., Wayayok, A., Rowshon, M., & Abdullah, A. (2016). Wetting patterns estimation under drip irrigation systems using an enhanced empirical model. *Agricultural Water Management*, 176(C), 203-213.
- Custode, I., & Trujillo, G. (2000). La Cangahua en el Ecuador: caracterización morfo-edafológica y comportamiento frente a la erosión. *Terra*, 10, 333-340.
- Eid, A., Bakry, B., & Taha, M. (2012). Effect of pulse drip irrigation and mulching systems on yield, quality traits and irrigation water use efficiency of soybean under sandy soil conditions. *Agricultural Sciences*, 4, 249-261.
- El-abedin, T. K. Z. (2006). Effect of pulse drip irrigation on soil moisture distribution and maize production in clay soil. *New Trends in Agricultural Engineering*, 22, 1032-1050.
- Elmaloglou, S., & Diamantopoulos, E. (2009). Effect of hysteresis on redistribution of soil moisture and deep percolation at continuous and pulse drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 96(3), 553-538.
- El-Mogy, M. M., Abuarab, M. E., & Abdullatif, A. L. (2012). Response of Green Bean to Pulse Surface Drip Irrigation. *Journal of Horticultural Science & Ornamental Plants*, 4(3), 329-334.
- ESPAC. (2018). Información sobre el sector agropecuario del Ecuador. Tabulados ESPAC-2018. Quito, Ecuador.
- Fraisse, C., Duke, H., & Heermann, D. (1995). Laboratory evaluation of variable water application with pulse irrigation. *American Society of Agricultural Engineering*, 38(5), 1363-1369.
- INAMHI. 2019. *Serie de datos climatológicos de la estación La Tola*

- (p. 30). INAMHI.
- Ismail, S., El-Abdeen, T., Aziz, & Abdel-Tawab, E. (2014). Modeling the soil wetting pattern under pulse and continuous drip irrigation. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 14(9), 913-922.
- Jasso, C., Martínez, M., & Huerta, J. (2004). Tecnología para la producción de frijol con fertirriego en San Luis Potosí. *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias*. San Luis Potosí, México.
- Karmeli, D., & Peri, G. (1974). Basic principles of pulse irrigation. *Journal of the irrigation and drainage division*, 100(3), 228.
- Kilic, M. 2020. A new analytical method for estimating the 3D volumetric wetting pattern under drip irrigation system. *Agricultural Water Management*, 228, 105898
- Ortiz, R. (2008). Hidroponía en el Suelo: la reingeniería del manejo del agua de riego y de los fertilizantes. *Abya-Yala*. Quito, Ecuador.
- Ortiz, R. (2019). Necesidades de agua de los cultivos S.R. Tumbaco. Quito, Ecuador.
- Palacios, I. F., Ushiña, D. P., & Carrera, D. V. (2018). Identificación de Cangahuas para su recuperación mediante estudio multi criterio y constatación in situ en comunas del volcán Ijaló. *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, 13(1), 10-13.
- Peralta, E., Murillo, A., & Mazon, N. (2009). Catálogo de variedades mejoradas de fréjol arbustivo para los valles de Chota, Mira e Intag, (Imbabura y Carchi) Ecuador (p. 24).
- Perry, C, & Steduto, P. K. F. (2017). Does improved irrigation technology save water? A review of the evidence. Disponible en: <http://www.fao.org/3/i7090EN/i7090en.pdf>
- Phogat, V., Skewes, M., Cox, J., & Mahadevan, M. (2012). Modelling the impact of pulsing of drip irrigation on the water and salinity dynamics in soil in relation to water uptake by an almond tree. *WIT Transactions on Ecology and Environment*, 168, 101-113.
- Segal, E., Ben-Gal, A., & Shani, U. (2000). Water availability and yield response to high-frequency micro-irrigation in sunflowers. 6th International Micro-Irrigation Congress. Micro-irrigation Technology for Developing Agriculture, South Africa, pp. 22-27.
- Sivisaca, J. (2013). Efecto de tres frecuencias de riego por goteo en la producción del cultivo de fréjol (*Phaseolus vulgaris* L.), según la evaporación del tanque evaporímetro clase A (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Loja.
- Skaggs, T., Trout, Th., & Rothfuss, Y. (2010). Drip irrigation water distribution patterns: effects of emitter rate, pulsing, and antecedent water. *Soil Science Society of America Journal*, 74 (6), 1886-1896.
- World Bank. (2020). *Annual freshwater withdrawals*. <https://data.worldbank.org/indicator/er.h2o.fwag.zs>.
- Zamora, V., Silva, M., Silva, G., Santos, J., Menezes, D., & Menezes, S. (2019). Pulse drip irrigation and fertigation water depths in the water relations of coriander. *Horticulture Brasileira*, 37, 22-28.