

# Sistema de riego subsuperficial a demanda mediante vasos comunicantes: estudio de caso cultivo de col rizada

## *Subsurface irrigation system on demand through communicating vessels: case study of curly kale crop*

René Chipana-Rivera <sup>ORCID</sup><sup>a1\*</sup>, Victoria Luna-Calle <sup>ORCID</sup><sup>a2</sup>, Wilfredo Blanco-Villacorta <sup>ORCID</sup><sup>a3</sup>,  
María Fátima Moreno-Pérez <sup>ORCID</sup><sup>b1</sup>, José Roldán-Cañas <sup>ORCID</sup><sup>b2</sup>

<sup>a</sup>Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.

<sup>b</sup>Universidad de Córdoba, España.

E-mail: <sup>a1</sup>rnchipana@umsa.bo, <sup>a2</sup>victorialunacalle0605@gmail.com, <sup>a3</sup>mwblanco1@umsa.bo, <sup>b1</sup>ag1mopem@uco.es, <sup>b2</sup>ag1rocaj@uco.es

\*Autor para correspondencia

Recibido: 04/04/2024

Aceptado: 18/06/2024

Publicado: 31/07/2024

**Citar como:** Chipana-Rivera, R., Luna-Calle, V., Blanco-Villacorta, W., Moreno-Pérez, M. F., & Roldán-Cañas, J. 2024. Subsurface irrigation system on demand through communicating vessels: case study of curly kale crop. *Ingeniería del agua*, 28(3), 185-197. <https://doi.org/10.4995/ia.2024.21483>

## RESUMEN

La escasez de agua y la creciente demanda de alimentos imponen la utilización de tecnologías más eficientes en el regadío. Por tal motivo, se abordaron los fundamentos hídricos e hidráulicos del riego subsuperficial a demanda mediante vasos comunicantes (RSVC), estudio de caso cultivo de col rizada. El sistema estuvo compuesto por un depósito de agua, una cubeta con carga hidráulica constante, una línea de derivación, laterales de riego, emisores y vasos de cultivo. La pérdida de carga en el sistema, para el lateral más alejado, fue 7.38491 mm.c.a., permitiendo operar a presiones muy bajas sin requerimiento energético. Debido a la continuidad hidráulica, generada por la tasa evapotranspirativa, los cultivos no sufrieron estrés hídrico, obteniéndose un rendimiento promedio de 360 g de materia fresca/planta, con una eficiencia de uso del agua de 22.38 g/l, rendimientos favorables cuando se compara con otros estudios.

**Palabras clave** | continuum agua-suelo-planta-atmósfera; pérdidas de carga; flujo laminar; eficiencia de uso del agua.

## ABSTRACT

*The scarcity of water and the growing demand for food impose the use of more efficient technologies in irrigation. For this reason, the water and hydraulic foundations of subsurface irrigation on demand through communicating vessels (RSVC) were addressed, a case study of curly kale crop. The system was composed of a water tank, a bucket with constant hydraulic head, a manifold, laterals, emitters and culture vessels. The pressure loss in the system, for the farthest lateral, was 7.38491 mm.c.a., allowing operation at very low pressures without energy requirements. Due to the hydraulic continuity, generated by the evapotranspiration rate, the crops did not suffer water stress, obtaining an average yield of 360 g of fresh matter/plant, with a water use efficiency of 22.38 g/l, favorable yields when compared with other studies.*

**Key words** | continuum water-soil-plant-atmosphere; head losses; laminar flow; water use efficiency.

## INTRODUCCIÓN

La producción de alimentos y el uso de agua están relacionados de forma inseparable con la competencia cada vez mayor por recursos hídricos no renovables y la creciente demanda de productos agrícolas. Por ello, nunca ha sido tan apremiante la necesidad de mejorar la eficiencia y productividad del uso del agua, a fin de garantizar la seguridad alimentaria y enfrentar las incertidumbres asociadas con el cambio climático (FAO, 2018).

El regadío tecnificado permite optimizar el uso del agua que se suministra a los cultivos, en cantidades necesarias para su desarrollo y de manera eficiente. Sin embargo, el uso de tecnologías modernas implica importantes gastos de inversión. Por ello, en los últimos años se ha trabajado en adoptar otras tecnologías como ser el riego subsuperficial, que es la aplicación de agua a la zona radicular de los cultivos a través del flujo ascendente, reduciendo el gasto hasta en un 50% comparado con otros sistemas de riego (Chipana-Rivera y Serrano-Coronel, 2007), permitiendo aportar la suficiente cantidad de agua a las plantas y adquiriendo mayor significación en el aprovechamiento de la humedad edáfica por las raíces (Serrano-Coronel, 2017). Un inconveniente en el riego subsuperficial es el suministro de agua a la zona radicular, en el momento oportuno y en la cantidad necesaria, además del uso de mano de obra que implica lo anterior.

En el sistema de riego subsuperficial a demanda mediante vasos comunicantes (RSVC), el agua se aplica al suelo de manera automática a tasas bajísimas (en función a la tasa evapotranspirativa del cultivo), a través de emisores consistentes en microtubos de pequeña longitud que van descargando en macetas-depósito de agua (vasos comunicantes) para el crecimiento de las plantas. Este sistema, por su simplicidad, funciona a presiones muy bajas, que se mantienen constantes por la acción de un dispositivo que va regulando la carga hidráulica (cubeta con flotador) (Luna-Calle, 2023).

Este sistema es particularmente adecuado para el riego de hortalizas cultivadas en invernaderos. Según Dewi *et al.* (2020), en el riego subsuperficial mediante vasos comunicantes el contenido de agua del suelo se mantiene entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente, con un adecuado desarrollo de las plantas. Por otro lado, los sistemas de riego localizado, como riego por goteo y microaspersión, tienen la desventaja de que su automatización requiere de complejos sistemas electrónicos y eléctricos, así como el elevado costo que significa su implementación. En cambio, el sistema RSVC opera íntegramente en base a la gravedad, al igual que los sistemas de riego bubbler (Waller y Yitayew, 2016), donde el caudal del emisor depende de una pequeña diferencia de carga hidráulica entre la fuente y la salida del emisor. Las diferencias principales entre los sistemas de riego bubbler y los sistemas RSVC, son que los últimos requieren una carga hidráulica de unos pocos centímetros, y trabajan con caudales casi constantes y extremadamente bajos (Luna-Calle, 2023). Por esa razón, este sistema puede funcionar con cargas de presión tan bajas como 0.10 m.c.a., por lo que no requiere en absoluto de sistemas de bombeo. Por tanto, una ventaja diferencial de este sistema es el notable ahorro en el consumo energético. Asimismo, debido a que el diámetro interno de los emisores varía entre 2 a 6 mm, no son necesarios equipos de filtración, como en el riego localizado.

Los sistemas RSVC pueden ser clasificados como de riesgo bajo, por no ser necesarios costos de inversión considerables y equipos sofisticados. Asimismo, los costos de operación y mantenimiento son muy inferiores comparados con otros sistemas, debido al casi nulo requerimiento de energía y a la ausencia de averías mecánicas por las bajísimas presiones a las que operan las tuberías. Todas estas particularidades mencionadas, hacen que el RSVC sea más apropiado para superficies relativamente pequeñas (como el cultivo en invernaderos) y gocen de mayor aceptación en sistemas agrícolas familiares.

El funcionamiento de este sistema se basa en cuatro elementos: agua-suelo-planta-atmósfera, que están interactuando permanentemente, al ser un riego a la demanda en función a la tasa de absorción de agua. Sin embargo, esta interrelación encierra una cierta complejidad al momento de cuantificar y regular la tasa de flujo ascendente de agua desde la fuente, pasando por el suelo y la planta hasta recalcar en la atmósfera. La fuerza motriz para que se genere dicho flujo es la diferencia de potencial hídrico entre los diferentes puntos del sistema, originado por la tasa evapotranspirativa de la planta. Es por ello que la altura de la columna de suelo en el vaso de cultivo debe estar en concordancia con la profundidad radicular de la planta, que incidirá en la intensidad del flujo ascendente.

En este tipo de sistemas, cuando la demanda evapotranspirativa de la atmósfera es mayor que la tasa de flujo ascendente, las plantas responden desarrollando su sistema radicular hasta su inmersión en el depósito de agua, fenómeno conocido como hidrotropismo (Medrano-García *et al.*, 2019). Otra opción para compensar la alta demanda de agua es colocar una mecha que conecta el suelo con el depósito de agua, para incrementar el flujo ascendente.

Por otro lado, desde la óptica de la seguridad alimentaria, nace la necesidad de producir alimentos ricos en nutrientes necesarios para la alimentación humana, entre estos se encuentra la col rizada o kale, que es una hortaliza que está causando gran aceptación en el mercado, por su rendimiento y sus propiedades nutricionales.

Por tales motivos el presente estudio aborda los aspectos hídricos e hidráulicos que rigen el riego subsuperficial a demanda a través de vasos comunicantes, su diseño y aplicación en el cultivo de col rizada.

## CONSIDERACIONES HÍDRICAS E HIDRÁULICAS DEL SISTEMA RSVC

En el sistema RSVC intervienen cuatro elementos (agua-suelo-planta-atmósfera), que están interactuando continuamente, empero, los primeros dos inciden en mayor grado en el flujo de agua en las tuberías, es decir, el continuum agua – suelo.

### Potencial del agua en el continuum agua - suelo

El potencial del agua en el suelo ( $\Psi_s$ ) define el estado de energía del sistema en puntos considerados, siendo que la tendencia natural del agua en el suelo es moverse en el sentido de los potenciales decrecientes (De Jong van Lier, 2020). Los componentes del  $\Psi_s$  son el potencial matricial ( $\Psi_m$ ), potencial gravitacional ( $\Psi_g$ ), el potencial de presión ( $\Psi_p$ ) y el potencial osmótico ( $\Psi_o$ ).

$$\Psi_s = \Psi_g + \Psi_p + \Psi_m + \Psi_o \quad (1)$$

En el sistema RSVC, el potencial del agua en la superficie libre de agua del depósito ( $\Psi_{SA}$ ) (alimentado permanentemente a través del sistema de tuberías), en contacto con el suelo, será igual a cero, en cambio, en el suelo el potencial  $\Psi_s$  será menor a cero. Por tanto, el movimiento del agua (flujo ascendente) se dará desde la interfaz agua/suelo, siguiendo el gradiente del potencial del agua, hasta la zona radicular.

### Relaciones hidráulicas

Se utilizó la ecuación de la energía en el análisis y diseño de sistemas RSVC, que aplicada a dos puntos de la tubería viene dada por:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \sum h_f + \sum h_x \quad (2)$$

donde  $h_f$  es la pérdida de carga por rozamiento en tuberías (m.c.a.);  $h_x$  las pérdidas menores de carga por rozamiento en accesorios de tuberías (m.c.a.);  $v$  la velocidad de flujo del agua en tuberías ( $\text{m s}^{-1}$ );  $P$  es la presión dentro de la tubería ( $\text{N m}^{-2}$ );  $z$  es la elevación del eje de la tubería con respecto a un nivel de referencia (m);  $\gamma$  es el peso específico del agua ( $\text{N m}^{-3}$ );  $g$  es la constante gravitacional ( $9.81 \text{ m s}^{-2}$ ).

En base a estudios realizados por Medrano-García *et al.* (2019) en el cultivo de lechuga bajo riego subsuperficial a partir de una fuente estática de agua, se determinó que el consumo promedio diario de agua por transpiración, por planta, está en torno a  $47 \text{ cm}^3$ , que al transformarlo en flujo de agua, proporciona valores muy bajos para el número de Reynolds (Re), razón por la cual se consideró más apropiado diseñar sistemas RSVC utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach conocida como fórmula universal de pérdida de carga, expresada como:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

siendo  $f$  el factor de rozamiento adimensional;  $L$  es la longitud de la tubería (m);  $D$  el diámetro interno de la tubería (m),  $v$  la velocidad de flujo del agua en tuberías ( $\text{m s}^{-1}$ ).

## DISEÑO DE SISTEMAS RSVC

El objetivo del diseño de riego de sistemas RSVC es determinar los diámetros de las tuberías para suministrar un volumen similar de agua a cada vaso, consecuentemente a la planta, manteniendo las pérdidas de carga por rozamiento y las pérdidas de carga menores por debajo de la carga disponible en el dispositivo de altura de agua constante.

El diseño en terrenos nivelados y terrenos con pendiente gradual difieren ligeramente porque las alturas máxima y mínima de los emisores ocurren en diferentes puntos a lo largo del lateral, considerando que operan de manera continua, al ser riego a demanda.

A continuación, se describe brevemente los pasos principales, criterios y parámetros asociados con el diseño de sistemas RSVC.

Configuración del terreno: permite determinar el trazado del sistema de tuberías, definiendo la longitud de la parcela  $L_p$ , el ancho de la parcela  $W$ , la pendiente del terreno  $S_o$ , y la pendiente transversal de la parcela  $S_w$ .

Diseño del dispositivo de carga constante: puede ser una cubeta con un flotador en su interior o un tubo vertical con una válvula de compuerta para regular la presión. La carga constante determina la carga disponible y la carga de diseño

$$H_d = H_s - h_s \quad (4)$$

donde  $H_d$  es la carga de diseño (m.c.a.);  $H_s$  la carga disponible (m.c.a.);  $h_s$  la pérdida de carga por rozamiento entre el depósito de agua y el dispositivo de carga constante (m.c.a.).

Definición de los criterios de diseño: 1) tipo de cultivo, espaciamiento entre plantas  $S_p$ , distancia entre hileras de plantas  $S_r$ , espaciamiento entre laterales  $S_l$ , y espaciamiento entre emisores (microtubos)  $S_e$ ; profundidad de instalación del lateral de riego  $d_l$ ; elevación máxima y mínima de los microtubos,  $El_{max}$  y  $El_{min}$ , respectivamente; caudal de diseño del emisor  $q_{dh}$ .

La distancia entre laterales y emisores debe ajustarse al tipo de cultivo, sin embargo, en los sistemas RSVC es conveniente colocar los laterales a mitad de camino entre las hileras de plantas, por tanto, la distancia entre laterales  $S_l$ , será el doble del espaciamiento entre hileras ( $2S_r$ ). La distancia entre los microtubos  $S_e$ , será igual al espaciamiento entre las plantas  $S_p$ . Bajo esta configuración se colocarán dos emisores, uno opuesto al otro, para actuar como “una sola” salida (Figura 1).

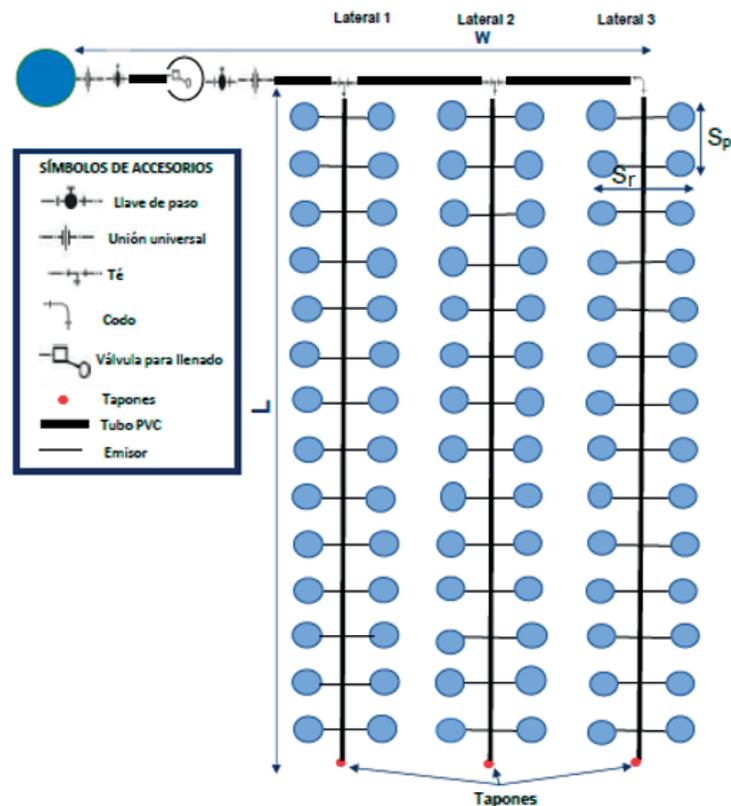
La altura máxima de inserción de los microtubos en los vasos estará en función a las pérdidas de carga por rozamiento en las tuberías y al caudal de diseño de los emisores  $q_{dh}$ . Sin embargo, al ser un riego a demanda el caudal de los emisores también estará regulado por la tasa evapotranspirativa del cultivo, que a su vez dependerá de la fase fenológica y de las condiciones atmosféricas. Medrano-García *et al.* (2019), encontraron que el flujo de agua que compensa el consumo por transpiración de cada planta, para sistemas de riego subsuperficial por mecha en el cultivo de lechuga, está en torno a  $1.59 \times 10^{-6} \text{ l s}^{-1}$ .

Selección de longitudes y diámetros de tuberías: las longitudes de la línea de derivación y de los laterales, están en función de las dimensiones del terreno y de la configuración del sistema de riego. En este tipo de sistema de riego se puede asumir algunos de los criterios existentes para dimensionar los diámetros de las tuberías en el riego localizado: 1) método del gradiente de pérdida de carga o pérdida de carga unitaria, en el cual se establece un límite de pérdida de carga por unidad de longitud de tubería; y 2) método de pérdida de carga porcentual, que consiste en fijar límites de pérdidas de carga por rozamiento, en porcentaje para cada tubería.

Pérdida de carga permitida y dimensionamiento de tuberías: el gradiente de pérdida de carga permisible está determinado por la siguiente ecuación, para diseños en terreno nivelado y con pendiente gradual:

$$\frac{h_f}{L} = \frac{(H_u - H_{do}) - \Delta z}{L} = \frac{(h_f)_a}{L} \quad (5)$$

donde  $h_f/L$  es el gradiente de pérdida de carga;  $H_u$  la carga de presión aguas arriba (m.c.a.);  $H_{do}$  la carga de presión aguas abajo (m.c.a.);  $\Delta z$  el cambio en elevación entre aguas arriba y aguas abajo. Es negativo para pendientes descendentes (m);  $(h_f)_a$  es la



**Figura 1** | Disposición de los componentes del sistema de riego subsuperficial a demanda mediante vasos comunicantes (vista en planta).

pérdida de carga permitida en la tubería (m.c.a.). El diseño de sistemas RSVC comienza en la fuente de agua y va hasta el extremo distal del terreno, efectuándose el cálculo de la pérdida de carga tramo a tramo. Inicialmente, se dimensiona la línea de derivación según la carga disponible y la carga de diseño, posteriormente se dimensiona las líneas laterales y los microtubos. En terrenos a nivel, el punto más desfavorable estará ubicado en el emisor más alejado del dispositivo de carga hidráulica constante, en tanto que en terrenos con pendiente descendente gradual estará en función de la magnitud del desnivel.

Debido a que en los sistemas RSVC se opera en régimen laminar, las variaciones de caudal serán linealmente proporcionales a las variaciones de presión. Por tanto, para obtener una buena uniformidad las variaciones de presión, dentro una unidad operacional, deben ser menores o iguales al 10% de la presión de diseño (Luna-Calle, 2023). De esos 10%, es recomendable que hasta el 70% se disipe por rozamiento en la línea de derivación (al ser mayor el caudal y consecuentemente las pérdidas de carga), y el resto en los laterales y emisores.

En este tipo de sistemas la altura de conexión de los emisores se lleva gran parte de la carga de diseño. Por ello, es conveniente que la pérdida de carga permitida por rozamiento en la línea de derivación,  $hd$ , sea mucho menor que la carga de diseño. Con base en la información anterior se determinará la presión de entrada en cada lateral, para finalmente calcular las alturas de elevación de los microtubos. En razón a que en este sistema las magnitudes que se manejan en las presiones y pérdidas de carga por rozamiento son muy pequeñas, no se vio necesario estudiar el uso de accesorios para provocar pérdidas de carga puntuales, para uniformizar la altura de elevación de los microtubos.

Cuando las pérdidas por rozamiento en la línea de derivación son  $\leq$  a 4% de la carga de diseño, los laterales operan con presiones similares y los emisores tienen prácticamente la misma altura de elevación (Luna-Calle, 2023).

Cálculo de las alturas de elevación de los emisores: una vez determinado los diámetros de todas las tuberías, se procede a calcular las alturas de elevación de los emisores, cuantificando la pérdida de carga total, desde el dispositivo de carga constante hasta el punto de descarga del emisor (Ecuación 6).

$$h_l = \sum h_f + \sum h_x \quad (6)$$

donde  $h_l$  es la pérdida total de carga en tuberías (m.c.a.);  $h_f$  es la pérdida de carga por rozamiento en tuberías (m.c.a.);  $h_x$  son las pérdidas de carga en singularidades (m.c.a.). Esta últimas considera todas las pérdidas de carga en singularidades, entre el depósito de agua y el punto de descarga (puntos de inserción de tuberías, codos, té, reductores, válvulas, etc.). Pérdidas que se pueden calcular empleando la Ecuación 7.

$$h_x = k_x \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

siendo  $k_x$  el coeficiente de pérdida de carga, correspondiente a la pieza especial considerada.

Trazado del diagrama piezométrico y calibración dinámica de las alturas de elevación de los emisores: una vez concluidos los cálculos hidráulicos se debe construir un diagrama piezométrico para la línea de derivación, para los laterales y los emisores, en base a ello y con el sistema en funcionamiento debe calibrarse dinámicamente las alturas de los emisores, para garantizar caudales similares en cada punto de emisión.

## Diseño de un sistema RSVC aplicado a un invernadero

Antes de ejecutar la fase experimental se realizó el diseño de un sistema de riego subsuperficial mediante vasos comunicantes, para el cultivo de col rizada en un invernadero de 800 m<sup>2</sup> de superficie (largo  $L_p = 50$  m y ancho  $W = 16$  m), con pendientes longitudinal  $S_o$  y transversal  $S_w$  igual a cero.

Dadas las características del cultivo, se planteó un emisor por planta, con laterales ubicados entre dos hileras (a medio camino), donde cada salida está conformada por dos emisores. En base a ello se calculó la longitud de la línea de derivación  $L_m$ , la longitud de la línea lateral  $L_l$ , la longitud del emisor  $L_{dh}$ , el número de emisores por lateral  $N_{el}$ , el número de salidas por lateral  $N_{sl}$ , el número de laterales  $N_l$ , el número total de emisores  $N_{te}$  y el número total de plantas  $N_{tp}$ .

Para determinar el caudal de diseño del emisor  $q_{dh}$ , se tomó la información generada por Medrano-García *et al.* (2019) respecto al consumo de agua para plantas de lechuga cultivadas en invernadero bajo riego subsuperficial, equivalente a un caudal de  $1.5787 \times 10^{-6} \text{ l s}^{-1}$ . Para ello se hizo las siguientes apreciaciones: 1) el consumo de agua de las plantas por transpiración ocurre en el horario diurno, por tanto, en el periodo nocturno se equilibran los potenciales hídricos del agua contenida en la maceta-depósito con el potencial del agua del suelo; y 2) el agua fluye hacia los vasos comunicantes, hasta llegar al nivel de equilibrio, durante las 24 horas del día. A partir del  $q_{dh}$  se calculó el caudal de la línea lateral  $q_l$ , caudal de la línea de derivación  $q_d$ , caudal de la línea principal  $Q_s$  y el caudal de diseño,  $Q_d = Q_s$ . Los datos de las variables indicadas están consignados en la Tabla 1.

**Tabla 1** | Valores de las variables de diseño.

Variable	Valor	Variable	Valor
$S_p$ (m)	0.40	$El_{max}$	0.08
$S_r$ (m)	0.40	$El_{min}$ (m)	0.072
$S_e$ (m)	0.40	$Hd = Hs$ (m)	0.08
$S_l = 2S_r$ (m)	0.80	$L_m$ (m)	15.6
$N_{el}$	250	$L_l$ (m)	49.8
$N_{sl}$	125	$L_{dh}$ (m)	0.28
$N_l$	20	$q_{dh}$ (l s <sup>-1</sup> )	$1.5787 \times 10^{-6}$
$N_{te}$	5000	$q_l$ (l s <sup>-1</sup> )	0.000396775
$N_{tp}$	5000	$q_d$ (l s <sup>-1</sup> )	0.0079355
$Q_d$ (L s <sup>-1</sup> )	0.0079355	$Q_s$ (l s <sup>-1</sup> )	0.0079355

Los diámetros internos de la línea de derivación  $D_{ld}$  (13.99 mm) y de la línea lateral  $D_l$  (10.99 mm) fueron elegidos considerando una variación de presión en la unidad operacional  $\leq 10\% H_d$ . En tanto que el diámetro interno de los microtubos  $D_m$  fue 2 mm. Todas las tuberías son de PVC. Las alturas de inserción de los microtubos en el vaso ( $El_{max}$  y  $El_{min}$ ) se determinaron considerando las pérdidas de carga en las tuberías.

La pérdida de carga total en la línea de derivación  $h_{fLD}$ , se computó sumando las pérdidas de carga en la tubería de derivación  $h_{fd}$  y las pérdidas de carga menores en las piezas singulares  $h_{xd}$ . Inicialmente se calculó el número de Reynolds ( $Re$ ), dando un valor de  $Re = 722.22$ , situando al flujo dentro el escurrimiento laminar. Por tal motivo para la determinación del factor de rozamiento,  $f$ , de la fórmula de Darcy – Weisbach, se utilizó la ecuación de Hagen-Poiseuille:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (8)$$

Para el cálculo de las pérdidas de carga menores o localizadas en la derivación,  $h_{xd}$ , se utilizó la ecuación 7 para la válvula de compuerta, té y codos. La pérdida de carga total en la derivación fue de 0.005497 m.c.a., que representa el 6,87% de  $H_d$ .

El cálculo de la pérdida total de carga en la línea lateral  $h_{fLL}$  y en los emisores  $h_{fe}$ , fue realizado de manera similar al efectuado para la línea de derivación, es decir, sumando la pérdida de carga en los laterales  $h_{fl}$  y las pérdidas de carga menores en el punto de inserción del emisor a la línea lateral  $h_{xl}$ . El número de Reynolds ( $Re$ ) calculado fue 45.97, estando el flujo también catalogado como escurrimiento laminar. Como referencia en el diseño, se tomó el lateral más alejado (más desfavorable), donde la pérdida de carga alcanzó a 0.001882204 m.c.a., que representa el 2.35% de la carga de diseño,  $H_d$ . Las pérdidas de carga en el emisor fueron muy bajas, se podría decir despreciables. Es así que la sumatoria de la pérdida de carga fue de 0.001887919 m.c.a., que corresponde al 2.36% de  $H_d$ .

Totalizando las pérdidas de carga, desde la salida del dispositivo de carga constante, pasando por la línea de derivación, el lateral y el emisor más alejado ( $h_{fT}$ ) se obtiene un valor de  $h_{fT} = 0.00738491$  m.c.a., que alcanza al 9.23% de la carga de diseño.

La presión a la salida del primer emisor de la unidad operacional es 0.07947829 m.c.a. y en último emisor (más alejado) es igual a 0.073491631 m.c.a., con una diferencia de 0.005986659 m.c.a., que significa una variación del 7.48% de la presión de diseño. Como en los sistemas RSVC el flujo de agua en las tuberías se dan en régimen laminar, se espera que las variaciones de caudal entre el primer y último emisor estén también en torno a 7.48%. Las alturas mínimas de los emisores corresponderán a la presión a la salida de los emisores.

Con base en los cálculos hidráulicos, se elaboraron los diagramas piezométricos de la línea de derivación (Figura 2a), así como del último lateral y de los emisores (Figura 2b). Se puede observar que la línea de gradiente hidráulico en la línea de derivación varía desde 80 mm.c.a. hasta 75.38 mm.c.a. Para el lateral más alejado (lateral donde se registra la mayor pérdida de carga), la línea de gradiente hidráulica (LGH) varía entre 75.38 mm.c.a. y 73.49 mm.c.a, siendo la LGH prácticamente igual para los emisores instalados a lo largo del lateral.

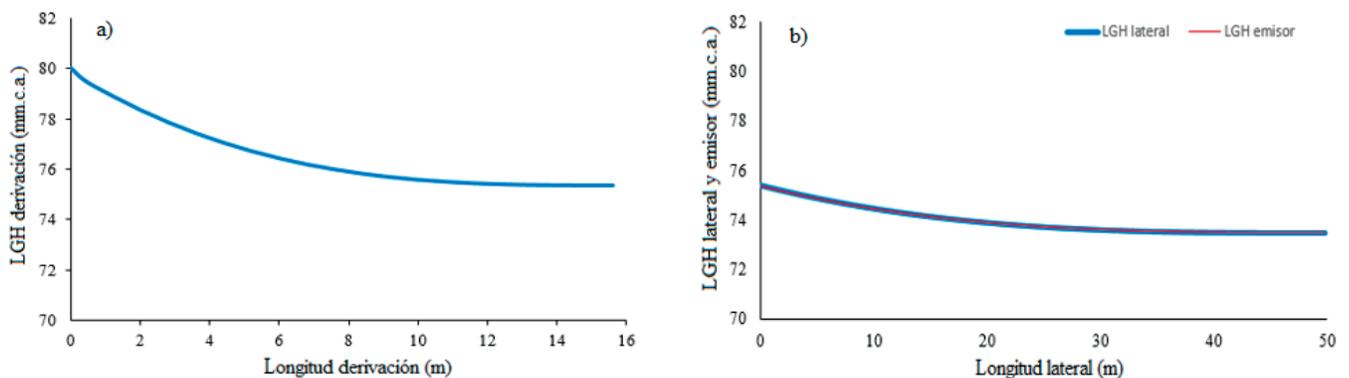


Figura 2 | Diagrama de la línea piezométrica: a) de la línea de derivación, y b) del último lateral y de los emisores.

## ESTUDIO DE CASO

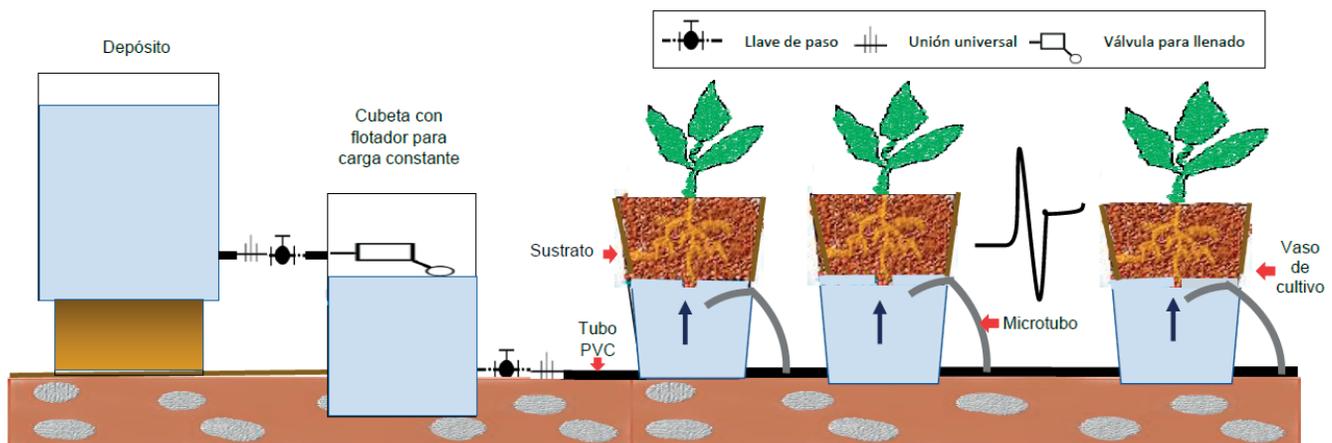
Como estudio de caso, se implementó de manera experimental un sistema de riego subsuperficial a demanda mediante vasos comunicantes en el cultivo de col rizada (*Brassica oleracea* var. *sabellica* cultivar Darkibor) en un invernadero ubicado en la ciudad de El Alto, Bolivia, geográficamente situado a 16°37.4'20" de latitud sur y a 68°10'11.86" de longitud oeste, a una altitud de 4000 m.s.n.m.

## Materiales

Los materiales e insumos utilizados fueron: suelo del lugar y humus de lombriz; depósito de agua de 50 l; cubeta de 25 l con flotador para mantener la carga hidráulica constante; mechas de algodón para facilitar el ascenso de agua; tubos de plástico PVC de ½" (línea de derivación con diámetro interno de 13.99 mm); tubos de PVC tipo conduit de 5/8" (generalmente utilizado para el cableado eléctrico) para las líneas laterales, con diámetro interno de 10.99 mm; dos llaves de paso ½"; accesorios para tuberías de ½" (1 codo, 2 tés, 2 uniones universales, 1 pezón, 2 bridas, 3 tapones de goma); emisores de riego (microtubos de plástico tipo espagueti de 2 mm de diámetro interno); vasos de cultivo (botellas recicladas de plástico de 5 l, con tapas).

## Metodología

La instalación del sistema de RSVC se inició con el emplazamiento del depósito de agua, y el dispositivo para mantener la carga de agua constante (0.08 m.c.a.), una línea de derivación, tres líneas laterales con 14 maceta-depósito de agua por lateral (vasos comunicantes), totalizando 42 vasos de cultivo, de acuerdo con el esquema mostrado en la Figura 3.



**Figura 3** | Esquema del sistema de riego subsuperficial a demanda mediante vasos comunicantes (corte transversal).

Una vez instalado el sistema, se procedió con la calibración dinámica de la altura de los emisores (de 22 cm de longitud), determinándose una altura de 8 cm desde el punto de inserción en el lateral hasta el punto de descarga en el vaso. Posteriormente se colocó el sustrato en la parte superior, cuidando de que la superficie libre de agua de los vasos esté en contacto en el sustrato, a través de tapas con perforaciones de 10 mm, donde se insertó la mecha de algodón para asegurar el contacto suelo-agua. Y de manera inmediata se inició del ascenso de agua por diferencia de potencial hídrico.

El trasplante de las plántulas de col rizada a los vasos se realizó en fecha 25 de diciembre de 2021, cuando las plántulas tenían 4 hojas verdaderas, cubriéndose la superficie del suelo con una lámina de aluminio, para evitar la evaporación del agua.

Las labores culturales realizadas fueron el abonamiento utilizando humus de lombriz en forma escalonada para que la col rizada tenga un buen desarrollo foliar, para lo cual fue incorporada en dos ocasiones una al momento del trasplante con 100 g de humus de lombriz/planta y la segunda después de la segunda cosecha incorporando 80 g de humus de lombriz/planta.

Se realizó cinco cosechas, a los 35, 70, 94, 122 y 155 días después del trasplante. Al ser un cultivo de hoja en cada cosecha se procedió a cortar las hojas maduras, dejando a cada planta con 3 a 4 hojas pequeñas para que se desarrollen. Las plantas cultivadas mediante el sistema RSVC tuvieron un desarrollo más rápido con relación a las regadas tradicionalmente por superficie.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Consumo de agua por transpiración

Al evitarse la evaporación de agua de los vasos, el consumo de agua en el sistema fue igual al uso consuntivo por transpiración de las plantas, datos que se muestran en la Tabla 2, así como el caudal promedio de los emisores.

**Tabla 2** | Volumen de agua consumido por mes, por día y por planta, y caudal por emisor.

Mes	Consumo total de agua (l)	Consumo promedio planta/día (cm <sup>3</sup> )	Caudal promedio emisor (l/d)
Diciembre	26	103.17	0.103
Enero	156	109.82	0.119
Febrero	145	123.30	0.123
Marzo	174	134.64	0.134
Abril	174	138.09	0.138
Mayo	130	106.73	0.107

El consumo de agua fue incrementando a medida que las plantas fueron desarrollándose, disminuyendo para el periodo que comprendió la última cosecha.

### Intensidad de flujo de agua dentro los vasos de cultivo

La intensidad de flujo de agua, desde la superficie libre de agua al sustrato dentro los vasos de cultivo (Figura 4), se calculó con base en los siguientes datos: punto A (superficie libre de agua); punto B (superficie del suelo); distancia A-B,  $\Delta x = 18$  cm; potencial del agua en la superficie libre de agua,  $\Psi_{SA} = 0$  cm.c.a; potencial del agua en la porción superior del suelo  $\Psi_{SB} = -295.80$  cm.c.a (-29 kPa), valor correspondiente al potencial del agua en el estado de capacidad de campo, medido de manera experimental a partir de muestras de suelo.



**Figura 4** | Flujo de agua en la interacción agua –suelo.

El potencial hidráulico en los puntos A y B fue calculado a través de:

$$H_X = Z_X + \Psi_{SX} \quad (9)$$

donde  $H_x$  es el potencial hidráulico (hídrico) en el punto  $x$  (cm.c.a.);  $Z_x$  el potencial gravitacional (cm.c.a.);  $\Psi_{SX}$  el potencial matricial en el punto  $x$  (cm.c.a.). Por tanto:

$$H_A = Z_A + \Psi_{SA} = 0 + 0 = 0 \text{ cm.c.a.}$$

$$H_B = Z_B + \Psi_{SB} = 18 + (-295.80) = -277.80 \text{ cm.c.a.}$$

Para el suelo de textura franco-arenosa, el valor de la conductividad hidráulica del suelo,  $K(\theta)$ , en los puntos A y B fue:

$$K(\theta)_A = 28.02 \text{ mm/h (para suelo saturado)}$$

$$K(\theta)_B = 0.0187 \text{ mm/h (para una tensión de -29 kPa)}$$

el valor promedio de  $K(\theta)$  es:

$$\bar{K}(\theta) = \frac{K(\theta_A) + K(\theta_B)}{2} \quad (10)$$

$$\bar{K}(\theta) = \frac{28.02 + 0.0187}{2} = 14.02 \frac{\text{mm}}{\text{h}} = 33.65 \frac{\text{cm}}{\text{día}}$$

Por tanto, la intensidad de flujo medio de agua ( $\bar{q}$ ) entre los puntos A y B, fue calculado mediante:

$$\bar{q} = -\bar{K}(\theta) \frac{(H_B - H_A)}{\Delta x} \quad (11)$$

$$\bar{q} = -33.65 \frac{(-277.80 - (0))}{18} = 519.33 \text{ cm/día}$$

El volumen de agua diario ( $V$ ) que fluye de manera ascendente al suelo fue calculado a través de la siguiente relación:

$$V = q \cdot A_t \cdot t \quad (12)$$

siendo  $V$  el volumen de flujo ascendente diario ( $\text{cm}^3$ );  $A_t$  la sección transversal al flujo ( $\text{cm}^2$ );  $t$  el tiempo (días).

Como el diámetro interno del orificio de la tapa fue 10 mm, el área  $A_t$  tomó un valor de  $0.7854 \text{ cm}^2$ . Además, se asumió que el proceso transpirativo, consecuentemente el flujo ascendente de agua, ocurrió durante el día, con una duración promedio de la insolación en invernaderos con techos de “un agua” de 9 horas/día, obteniéndose un flujo de volumen diario igual a:

$$V = 519.33 \frac{\text{cm}}{\text{día}} \cdot 0.7854 \text{ cm}^2 \cdot \frac{9}{24} \text{ día} = 152.96 \text{ cm}^3$$

Valor aproximado al máximo consumo registrado en el mes de marzo.

## Parámetros hidráulicos

De acuerdo con las intensidades de flujo de agua obtenidas en el sistema RSVC, se calcularon los parámetros hidráulicos de velocidad, número de Reynolds ( $Re$ ), factor de rozamiento ( $f$ ) y pérdidas de carga (Tabla 3). La velocidad media del agua dentro la tubería estuvo en torno a los  $0.011 \text{ m/s}$ , consecuentemente las pérdidas de carga fueron despreciables. La pérdida de carga total calculada en toda la unidad operacional fue de  $0.0002963 \text{ m.c.a.}$ , valor insignificante respecto a la carga operacional ( $0.08 \text{ m.c.a.}$ ), lo que demuestra que en este tipo de sistemas no es necesario la utilización de bombas mecánicas.

**Tabla 3** | Parámetros hidráulicos del sistema RSVC.

Parámetro	Línea de derivación	Lateral
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	1.6333×10 <sup>-07</sup>	5.4444×10 <sup>-08</sup>
Diámetro interno tubería (m)	0.0139954	0.0109982
Área de la tubería (m <sup>2</sup> )	0.00015384	9.5002×10 <sup>-05</sup>
Velocidad (m/s)	0.00106173	0.00057309
Número de Reynolds ( <i>Re</i> )	14.57	6.18
Factor de rozamiento ( <i>f</i> )	4.39	10.36
Pérdida de carga (m.c.a.)	3.1552×10 <sup>-05</sup>	8.82481×10 <sup>-05</sup>
Pérdida de carga total (m.c.a.)		0.0002963

## Rendimiento de hojas por planta

En la Tabla 4 se presentan los datos registrados respecto al peso fresco y seco de las hojas del cultivo de col rizada, durante cinco cosechas.

**Tabla 4** | Peso fresco y seco de las hojas cosechadas/planta.

Nº cosecha	Peso fresco (g)	Peso seco (g)
1 <sup>a</sup>	72.4±4.2	14.7±1.7
2 <sup>a</sup>	61.4±4.2	10.7±1.7
3 <sup>a</sup>	58.8±5.2	9.2±1.6
4 <sup>a</sup>	83.6±5.0	12.2±1.2
5 <sup>a</sup>	83.4±6.1	9.2±1.4
Media	71.1	11.0
Desviación estándar	11.7	2.3

El peso fresco total cosechado fue de 360 g/planta, con diferencias entre las cosechas, a excepción de la cuarta y quinta, que prácticamente fueron similares. En lo que respecta al peso seco/planta la tercera y quinta cosecha fueron iguales. Las variaciones probablemente se debieron a que el rendimiento de hojas de col rizada es influenciado por la cosecha precedente. El rendimiento equivalente en una hectárea alcanza a 22 475 kg/ha y 3500 kg/ha para peso fresco y seco, respectivamente.

Al respecto Aruquipa (2021) logró un peso fresco por planta de 64.8 g de peso fresco/planta aplicando caldo humus de lombriz con una frecuencia de 14 días, que fue uno de sus mejores tratamientos. Por su parte, Haile y Ayalew (2018) obtuvieron rendimientos totales de hojas frescas entre 105 a 455 g/planta. En sistema hidropónico, Rivera y Crispin (2022) reportaron rendimientos de 272.13 g de hoja fresca/planta. Saavedra *et al.* (2019) indicaron rendimientos de col rizada Darkibor de 13 340 kg/ha de peso fresco y 2320 kg/ha de materia seca, en tanto que Reyna *et al.* (2022), para sistemas en siembra temprana reportaron rendimientos de 5000 kg de peso fresco/ha para 'Darkibor', mientras que en la siembra tardía fue de 3200 kg/ha. Por tanto, se puede indicar que los rendimientos obtenidos en el sistema RSVC son prometedores.

## Eficiencia de uso del agua (EUA)

La EUA promedio obtenida fue 22.38 g/l y 3.48 g/l, para materia fresca y seca, respectivamente. Herrera *et al.* (2011) indican que la EUA para el cultivo de la col puede estar entre 12 a 20 g de materia fresca/l, en tanto que Kiptum y Ndungu (2018), obtuvieron un valor para la EUA de 3.8 g de materia seca/l, para col rizada. Los valores de EUA alcanzados en el sistema RSVC, fueron favorables si se compara con los obtenidos en otros trabajos, a pesar de que las condiciones de cultivo fueron diferentes.

---

## CONCLUSIONES

El sistema RSVC es un método sencillo de riego, que al operar a bajísimas presiones con reducidas pérdidas de carga, no requiere costosas inversiones, y debido a su automatización hidráulica se reduce notablemente el uso de mano de obra, así como el consumo energético. Al ser un sistema de riego a demanda, las plantas no sufren estrés hídrico. Los rendimientos promedio alcanzados, 360 g/planta, fueron favorables, así como la eficiencia de uso del agua que fue de 22.38 g /l. Por las ventajas que presenta, se puede indicar que este sistema se torna en una alternativa para el riego de cultivos en invernaderos a nivel familiar.

---

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el soporte del Centro de Formación e Investigación en Manejo Sostenible del Agua y Riego con Énfasis en Zonas Áridas y Semiáridas (FISAR), de la Universidad Mayor de San Andrés.

---

## REFERENCIAS

- Aruquipa, A. O. 2021. *Comportamiento agronómico de dos variedades de col rizada (Brassica oleracea var. Sabellica) bajo dos frecuencias de aplicación de caldo de humus de lombriz en el municipio de El Alto*. Tesis de Grado. Universidad Mayor de San Andrés.
- Chipana-Rivera, R., Serrano-Coronel, G. 2007. Riego subsuperficial en lechuga (*Lactuca sativa*) y nabo (*Brassica naphus*) en las zonas bajas del altiplano boliviano: consumo de agua. *Ingeniería del Agua*, 14(3), 169-175. <https://doi.org/10.4995/ia.2007.2909>
- De Jong Van Lier, Q. 2020. *Física do Solo baseada em processos*. Edit. de Jong Van Lier, Q. Piracicaba, Brasil. 413 p.
- Dewi, V. A., Setiawan, B. I., Minasny, B., Waspodo, R. S., Liyantono, L. 2020. Performance of closed-type irrigation system at a greenhouse. *AgricEngInt: CIGR Journal*, 22(4), 58-64.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación). 2018. *Trabajo de la FAO sobre El Cambio climático, Conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. Habana Cuba. 40 p.
- Haile, A., Ayalew, T. 2018. Comparative study on the effect of bio-slurry and inorganic N-fertilizer on growth and yield of kale (*Brassica oleracea* L.). *African Journal of Plant Science*, 12(4), 81-87. <https://doi.org/10.5897/AJPS2018.1639>
- Herrera, J., López, T., González, F. 2011. El uso del agua en la agricultura en Cuba. *Revista Ingeniería Agrícola*, 1(2). Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola. La Habana, Cuba.
- Kiptum, C. K., Ndungu, J. W. 2018. Water and petrol use efficiencies of cabbages and kales under supplemental irrigation in Kimumu farm in Uasin Gishu County, Kenya. *American Journal of Agricultural Science, Engineering and Technology*, 4(3), 4-13.
- Luna-Calle, V. 2023. *Riego subsuperficial ad libitum en el cultivo de col rizada (Brassica oleracea var. sabellica) mediante el sistema de vasos comunicantes*. Tesis de Maestría. Universidad Mayor de San Andrés. 94 p.
- Medrano-García, P., Chipana-Rivera, R., Moreno-Pérez, M., Roldán-Cañas, J. 2019. Riego capilar por mecha en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en sistema combinado de solución hidropónica y suelo, como alternativa en la agricultura urbana de Bolivia. *Ingeniería del Agua*, 23(1), 53-63. <https://doi.org/10.4995/ia.2019.10602>
- Reyna, M. E., Marinsaldi, M.A., Paccioletti, P.A., Confortino, L., Gil, S. P. (2022). Rendimiento y morfoanatomía de dos cultivares de *Brassica oleracea* var. *Sabellica* Cv. 'Darkibor' y 'Redbor' (kale) según época de siembra en el campo escuela de la Facultad de Ciencias Agropecuarias-UNC. *Nexo Agropecuario*, 10(2), 11-18.

Rivera, C. N., Crispin, P. I. 2022. *Evaluación agronómica del cultivo de Kale (Brassica oleracea) producida con tecnología hidropónica en condiciones de invernadero en la provincia de Acobamba – Huancavelica*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Agrarias Escuela Profesional de Agronomía Universidad Nacional de Huancavelica. Perú. 98 p.

Saavedra, G., Jana, C. y Kehr, E. 2019. *Hortalizas para procesamiento agroindustrial*. Temuco, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín N° 411. 183- 202.

Serrano-Coronel, G. 2017. Productividad del agua con sub-irrigación a dos alturas de sustrato, en los cultivos de nabo (*Brassica napus*) y lechuga (*Lactuca sativa*) en invernadero en Kentupata. *Apthapi*, 3(2), 529-537.

Waller, P., Yitayew, M. 2016. *Irrigation and Drainage Engineering*. Springer. Switzerland. 742 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-05699-9>