


# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

## FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
## POSGRADO

**Tema**: Retos en la conversión del sistema gravitacional a métodos más eficientes en los cultivos de papas, maíz y claveles de la comunidad de Carrillo, parroquia Cusubamba, cantón Salcedo.

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Cuarto Nivel de Magister en Hidráulica Con Mención En Obras Hidráulicas

**Modalidad del Trabajo de Titulación:** Artículos Profesionales de Alto Nivel

**Autora:** Ing. Amanda Noemi Porras Naranjo

**Directora:** Ing. Lidia Jhoanna Gallardo Donoso Mg.

Ambato – Ecuador

2025

**A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.**

El Tribunal receptor del Trabajo de Titulación, presidido por Ing. Santiago Paul Cabrera Anda, e integrado por los señores: Ing. Fabián Rodrigo Morales Fiallos Mg., Ing. María Gabriela Soria Pugo MsC., designados por la Unidad Académica de Titulación del Centro de Posgrados de la Universidad Técnica de Ambato, para receptar el Trabajo de Titulación con el tema: "Retos en la conversión de sistemas de riego gravitacional a métodos más eficientes en los cultivos de papas, maíz y claveles en la comunidad Carrillos, parroquia Cusubamba, cantón Salcedo" elaborado y presentado por la señora Ing. Amanda Noemi Porras Naranjo, para optar por el Titulo de cuarto nivel de Magíster en Hidráulica con Mención En Obras Hidráulicas; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación, el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.

---

*Ing. Santiago Paul Cabrera Anda, Mg.*
**Presidente y Miembro del Tribunal**

---

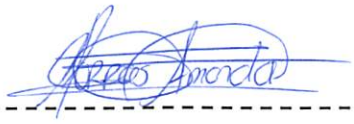
*Ing. Fabián Rodrigo Morales Fiallos, Mg.*
**Miembro del Tribunal**

---

*Ing. María Gabriela Soria Pugo, MsC..*
**Miembro del Tribunal**

## AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: "Retos en la conversión de sistemas de riego gravitacional a métodos más eficientes en los cultivos de papas, maíz y claveles en la comunidad Carrillos, parroquia Cusubamba, cantón Salcedo", le corresponde exclusivamente a: Ing. Amanda Noemi Porras Naranjo, Autora bajo la Dirección de Ing. Lidia Jhoanna Gallardo Donoso Mg., Directora del Trabajo de Titulación, y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Amanda Noemi Porras Naranjo

*C.C.: 0503634024*

**AUTORA**



Ing. Lidia Jhoanna Gallardo Donoso Mg

*C.C.: 0604485961*

**DIRECTORA**

## DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.



Ing. Amanda Noemi Porras Naranjo

*C.C.: 0503634024*

## AGRADECIMIENTO

A Dios por su infinito amor y por todas las bendiciones en mi vida.

A mis amados padres, Nelly y Noé; que con su amor y su apoyo incondicional han impulsado cada uno de mis logros.

A mi querido esposo Gabriel, con quien hemos caminado juntos, siendo cada uno la vida que le falta al otro.

A mis segundos padres, Ángel y Sofía; quienes me han apoyado y cuidado con el amor y cariño de una familia,

A todas las personas que forman parte de mi vida y la enriquecen de una u otra manera.

Con todo mi cariño
Amanda Porras

## DEDICATORIA

Dedico este logro a lo más hermoso y valioso de mi vida: mis bellas hijas; Luciana e Isabella. Ustedes son la luz que guía mi camino y la fuerza que me impulsa a ser cada día mejor. Las amo con todo mi corazón y mi alma.

Con todo mi amor,
Amanda

**Resumen**

**Objetivo:** Se analizaron los desafíos técnicos, económicos y sociales para cambiar el riego por gravedad a métodos más eficientes con presión (aspersión y goteo) en la comunidad de Carrillos (Cusubamba, Salcedo), debido a su importancia para la seguridad del agua y la producción de papa, maíz y clavel. **Metodología:** Se aplicó un estudio de caso con enfoque mixto que incluyó levantamiento topográfico e inventario de infraestructura, aforos y balance hídrico, estimación de requerimientos de agua con FAO-56 (ETo/ETc), ensayos de infiltración y humedad de suelo, y comparación técnico-económica entre gravedad, aspersión y goteo; además, se realizaron entrevistas a productores para evaluar aceptación tecnológica y gobernanza del agua. **Resultados:** El sistema gravitacional mostró eficiencias globales <45% y pérdidas por conducción y aplicación >50%, con disminución del caudal desde 27 L/s en bocatoma a ~11–10 L/s en parcela; se identificaron déficits hídricos acumulados, especialmente en clavel. La aspersión elevó la eficiencia a ~78–80% en papa y maíz y el goteo a ~92% en clavel, reduciendo desperdicios entre 40% y 70%; el 85% del área presentó pendientes <8% aptas para aspersión; el 65% de agricultores manifestó disposición a tecnificar condicionada a financiamiento, mientras el minifundio (≈70% con <1 ha) emergió como barrera. **Conclusiones:** La conversión es técnicamente viable, económicamente justificable y ambientalmente necesaria, siempre que se integre con reglas claras de distribución, operación y mantenimiento planificados, micromedición y esquemas de financiamiento; se recomienda escalar la tecnificación con gobernanza comunitaria fortalecida para mejorar la eficiencia del agua, estabilizar rendimientos y aumentar la resiliencia climática en ecosistemas andinos.

**Palabras clave:** RIEGO, GESTIÓN DEL AGUA, RECURSOS HÍDRICOS, DESARROLLO RURAL, CAMBIO CLIMÁTICO.

**Abstract**

**Objective:** The technical, economic, and social challenges of transitioning from gravity irrigation to more efficient pressurized methods (sprinkler and drip) in the Carrillos community (Cusubamba, Salcedo) were analyzed, given their importance for water security and the production of potatoes, corn, and carnations. **Methodology:** A mixed-methods case study was conducted, including topographic surveys and infrastructure inventory, flow measurements and water balance, estimation of water requirements using FAO-56 (ETo/ETc), infiltration and soil moisture tests, and a technical-economic comparison of gravity, sprinkler, and drip irrigation; in addition, interviews were conducted with producers to assess technological acceptance and water governance. **Results:** The gravity system showed overall efficiencies below 45% and conveyance and application losses exceeding 50%, with flow rates dropping from 27 L/s at the intake to approximately 11–10 L/s at the plot; cumulative water deficits were identified, especially in carnation. Sprinkler irrigation raised efficiency to ~78–80% for potatoes and corn and drip irrigation to ~92% for carnations, reducing water waste by 40% to 70%; 85% of the area had slopes under 8% suitable for sprinkler irrigation; 65% of farmers expressed willingness to adopt technology if financing was available, while small landholdings (≈70% with less than 1 ha) emerged as a barrier. **Conclusions:** Conversion is technically feasible, economically justifiable, and environmentally necessary, provided it is integrated with clear distribution rules, planned operation and maintenance, micrometering, and financing schemes; scaling up the modernization with strengthened community governance is recommended to improve water efficiency, stabilize yields, and enhance climate resilience in Andean ecosystems.

**Keywords:** IRRIGATION, WATER MANAGEMENT, WATER RESOURCES, RURAL DEVELOPMENT, CLIMATE CHANGE.

# ÍNDICE

Recepción del trabajo de titulación……..ii
Autoría del trabajo de titulación……..iii
Derechos de autor……iv
Agradecimiento……v
Dedicatoria……..vi
Resumen Ejecutivo…….vii
Abstract…….....viii
Introducción.....1
Metodología.....5
Resultados.....10
Discusión.....16
Conclusiones.....19
Referencias.....21

ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1**.....8
**Figura 2**.....11
**Figura 3**.....12
**Figura 4**.....14
**Figura 5**.....15

ÍNDICE DE TABLAS

**Tabla 1** .....7
**Tabla 2** .....9
**Tabla 3** .....9
**Tabla 4** .....12
**Tabla 5** .....13
**Tabla 6** .....13
**Tabla 7** .....14

## Introducción

La creciente variabilidad hidroclimática y la presión por los recursos hídricos han puesto la eficiencia en el uso del agua entre los ejes críticos para la seguridad alimentaria y el desarrollo rural, muy especialmente en regiones de montaña como los Andes ecuatorianos. Informes recientes de agencias multilaterales, que sugieren que el ciclo hidrológico es más errático, y que 2023 ha sido el año más seco para ríos a escala global en más de tres décadas; lo que considera la necesidad de mejorar la planificación y la gestión del agua en agricultura (WMO, 2024; UNESCO, 2023). Dichos diagnósticos confluyen en una constatación: sin adecuadas mejoras en las eficiencias de riego y en la gobernanza hídrica, la brecha entre la oferta y la demanda se ampliará, afectando de manera desencadenante a pequeños productores en ecosistemas de montaña (WMO, 2024; UNESCO, 2023).

La agricultura de montaña en Ecuador es capaz de mantener economías familiares y alimentar cadenas agroalimentarias locales; sin embargo, la mayoría de ella es capaz de operar a partir de riego gravitacional (canales abiertos, distribución por surcos o inundación parcelaria). En este contexto, las pérdidas por infiltración, escorrentía y evaporación son determinantes en la baja eficiencia física y de aplicación. Investigaciones recientes que abordan sistemas andinos gestionados de manera comunal refieren que una proporción importante de las infraestructuras carece de presión y que cuellos de botella tecnológicos y organizativos continúan comprometiendo la eficiencia del uso del agua (Cachipuendo et al., 2025; Berrones et al., 2025). Además de las limitaciones técnicas, hay factores sociales e institucionales que afectan la administración, operación y mantenimiento (AOM) de juntas de agua o asociaciones de usuarios. La diversidad en las habilidades organizativas ayuda a que el riego sea sostenible (Hoogesteger, 2023; Berrones et al., 2025).

En el cantón Salcedo (provincia de Cotopaxi), la agricultura familiar conserva un peso importante en la renta de forma territorial o matriz productiva; los instrumentos de planificación territorial (PDyOT 2023) parecen reconocer en este momento el informar sobre la importancia de la modernización del riego. De acuerdo con las políticas de tecnificación como otro tipo de riego, lo que se obtiene es un aumento de la productividad; sin embargo, no se garantiza la sostenibilidad ambiental. La falta de buenas prácticas en el riego por gravedad para el riego por goteo permite algunas mejoras, lo que puede llevar a un avance hacia la tecnificación parcelaria. Así, las expectativas de modernización, como el riego por goteo o el riego mecanizado, se ven afectadas por varias limitaciones. Estas incluyen la necesidad de una inversión inicial alta, la división de las tierras en parcelas pequeñas y la falta de apoyo técnico. La implementación de algunos programas y proyectos públicos recientes, como el Proyecto de Irrigación Tecnificada (PIT), ha contribuido a la financiación, la asistencia técnica y la organización social de sistemas presurizados concretos como el goteo y el riego mecanizado. En estos sistemas, se constatan impactos positivos reflejados por las superficies tecnificadas y las familias beneficiarias (Banco Mundial 2023). Sin embargo, el reto sigue siendo el hecho de escalar estas intervenciones en el ámbito de las comunidades de ladera con pendiente y suelos heterogéneos, como lo es Carrillos (parroquia Cusubamba) (GAD Salcedo, 2023; Banco Mundial, 2023).

Desde un enfoque técnico, la reciente literatura aborda la necesidad del paso de una sencilla visión de "ahorros por eficiencia" a un nuevo modelo que describa el funcionamiento global del sistema de captación, conducción, distribución, aplicación, la uniformidad de riego y el comportamiento del agua en el terreno en riego (Sanchis-Ibor et al., 2024). Y aunque el riego por goteo y por aspersión es de manera general más eficiente que la gravedad en relación con la productividad hídrica y la uniformidad de aplicación, se advierte que los "ahorros" pueden perderse a escala de cuenca si el incremento de áreas o la intensificación de cultivos no se acompaña de normas de asignación y control de recursos (Sanchis-Ibor et al., 2024). El Christiansen’s uniformity (CU) y la distribution uniformity (DU) ya son cifras probadas para evaluar la uniformidad en sistemas de aspersión, existiendo evidencia de campo que reporta altos niveles de uniformidad para configuraciones óptimamente ajustadas (Elhussiny et al., 2023; Jobbágy et al., 2021). Esta evidencia, de hecho, sustenta una hipótesis técnica que afirma

que, para condiciones de ladera moderada, y en adecuada combinación de manejo de viento y presión de servicio, la aspersión puede mejorar sustancialmente la distribución del agua en comparación con el uso de gravedad (Sanchis-Ibor et al., 2024; Elhussiny et al., 2023; Jobbágy et al., 2021).

En cultivos andinos estratégicos como la papa (*Solanum tuberosum L.*), el maíz (*Zea mays L.)* o el clavel (*Dianthus caryophyllus*), el método de riego a elegir afecta el rendimiento y la estabilidad productiva. Para el maíz en la Sierra de Ecuador, la guía técnica del INIAP (2021) explica cómo manejar el cultivo y cuáles son sus necesidades de agua en diferentes etapas de crecimiento. Esto ayuda a enfrentar la presión que causa la falta de agua y el clima muy variable. En papa, la literatura internacional reciente indica consistentemente que la fertirrigación por goteo incrementa la productividad y la eficiencia del uso del agua en comparación con la práctica tradicional, algo específicamente relevante para pequeños productores en laderas donde la gravedad agrava pérdidas y heterogeneidad de la humedad en el perfil del suelo (Niu et al., 2025). Aunque los parámetros de diseño y ganancia de rendimiento deben ser los locales y específicos, la literatura coincide en que el cambio desde gravedad a aspersión en papa y maíz y a goteo en floricultura (ej. clavel) es técnicamente defendible siempre que vaya acompañado de un paquete completo de operación y mantenimiento (O&M) y de una capacitación constante (INIAP, 2021; Niu et al., 2025).

La gobernanza comunitaria del agua de riego es el otro pilar necesario para que la conversión tecnológica funcione. En los Andes ecuatorianos, la AOM reposa en las juntas y asociaciones de usuarios que articulan derechos de agua consuetudinarios con normativas estatales. Algunos trabajos recientes muestran que la sostenibilidad de los sistemas depende tanto de indicadores sociales (participación, arreglos de cooperación, reglas internas) como de biofísicos (disponibilidad y calidad del agua) y tecnológicos (presurización, estado de la infraestructura) (Cachipuendo et al., 2025; Berrones et al., 2025). Traducido en términos prácticos, esto significa que tecnificar no es solo instalar equipos, sino que requiere de reglas claras de distribución, estructuras tarifarias que fomenten el uso eficiente, mantenimientos planificados, así como procedimientos de solución de conflictos que moderan las asimetrías de usuarios aguas arriba y aguas abajo (Cachipuendo et al., 2025; Berrones et al., 2025).

La comunidad Carrillos (perteneciente a la parroquia Cusubamba, en el cantón Salcedo) constituye un caso de estudio ideal para estudiar los problemas de cambiar de un riego gravitacional a riegos más eficientes, debido a la combinación de los siguientes aspectos: (i) (i) topografía de ladera con pendientes que son moderadas; (ii) parcelación familiar (mini-fundio) y decisión productiva diversificada; (iii) dependencia histórica de canales abiertos; y (iv) disponibilidad creciente de programas públicos sobre tecnificación (PDyOT 2023; PIT). La evidencia internacional y nacional nos dice que, para situaciones como la Carrillos, la eficiencia del sistema global (conducción + distribución + aplicación) puede aumentar con revestimiento selectivo, sectorización, micro-medición, riego por aspersión en papa y maíz y goteo en clavel, siempre que la organización de usuarios asegure operación, mantenimiento y reposición (Banco Mundial, 2023; Sanchis-Ibor et al., 2024; GAD Salcedo, 2023).

Sin embargo, la transición presenta múltiples barreras de carácter técnico, económico y social. En lo que respecta a la técnica, la homogeneidad puede estar comprometida por el viento, la presión insuficiente o el tipo de diseño, lo cual requiere la realización de estudios previos de hidráulicas de red, ajustes de boquillas, presiones, espaciamientos y ser capacitados en manejar el sistema (Elhussiny et al., 2023; Jobbágy et al., 2021); en lo que respecta a la economía, la inversión inicial y las operaciones y/as mantenimiento exigen la adopción de esquemas de financiamiento y de economías de escalas (compra comunitaria de insumos, servicios técnicos compartidos); en lo que respecta a lo social, el éxito depende del desarrollo de reglas internas (turnos, penalizaciones por el desperdicio), de la claridad tarifaria, de poner en práctica la participación de usuarios en la toma de decisiones, de los cuidados del sistema (Hoogesteger, 2023; Cachipuendo et al., 2025). Estas condiciones son, por tanto, determinantes a los fines de que los beneficios de la tecnificación del riego (ahorro de agua, estabilidad del riego, mejora de los rendimientos) se traduzcan en la sostenibilidad a la escala del sistema y a la de las cuencas (Elhussiny et al., 2023; Jobbágy et al., 2021; Hoogesteger, 2023; Cachipuendo et al., 2025).

En síntesis, el problema científico estudiado por este artículo puede formularse del siguiente modo: ¿cuáles son los retos técnicos, económicos y socio-organizativos para la transformación del sistema de riego gravitacional hacia otros de mayor eficiencia para

papa, maíz y clavel en la comunidad Carrillos? Para responderlo, hace falta incluir (a) un diagnóstico hidráulico (pérdidas de conducción y aplicación, uniformidad, requerimientos por cultivo), (b) un análisis económico-operativo (inversión, O&M, costos de energía y de repuestos) y (c) una evaluación organizativa (reglas, roles, capacidades de la junta/usuarios); todo ello revisado a partir de la evidencia internacional y nacional más reciente sobre el rendimiento y la gobernanza del riego en ecosistemas de montaña. Desde esta perspectiva, el trabajo propone identificar y analizar los principales retos que debe recorrer la comunidad para adoptar sistemas presurizados (aspersión en papa y maíz; goteo en clavel) y plantear lineamientos ajustados a la realidad local, para mejorar la eficiencia del agua, estabilizar los rendimientos y fortalecer la sostenibilidad hídrica hasta el medio plazo (Sanchis-Ibor et al., 2024; INIAP, 2021; Banco Mundial, 2023; WMO, 2024).

## Metodología

La investigación que se presenta a continuación fue desarrollada conforme a un enfoque metodológico mixto: descriptivo, analítico y comparativo; apoyado en el estudio de caso de la comunidad Carrillos de la parroquia Cusubamba del cantón Salcedo. El objetivo metodológico obedecía a la identificación, cuantificación y análisis de los desafíos técnicos, hidráulicos y socio-organizativos a los que se enfrenta la conversión del sistema de riego por gravedad y, en cambio, el pasar hacia un sistema de riego por presión (aspersión y goteo), lo que suponía un paso significativo para cultivar la papa, el maíz y los claveles. Para estructurar el proceso, se definieron cuatro subprocesos relacionados entre sí, los cuales fueron: (i) caracterización del sistema de riego físico e hidráulico existente; (ii) identificar el requerimiento hídrico de los cultivos predominantes; (iii) cuantificación de pérdidas del sistema y eficiencia operativa del riego por gravedad; y (iv) análisis comparativo técnico-económico entre sistemas de presión y riego por gravedad.

Enfoque de investigación y diseño metodológico. El estudio realizó la adopción del enfoque de estudio de caso, tal y como establece el planteamiento de Yin (2014), que sostiene que un diseño de este tipo es válido cuando el fenómeno que se investiga se encuentra íntimamente vinculado con el ambiente socioecológico y técnico en el que se

encuentra y cuando los límites entre ambos entornos están poco o nada definidos. La elección de la comunidad Carrillos como estudio de caso fue fundamentada en su representatividad como un sistema agrario andino dependiente del riego gravitacional, como un sistema de riego con infraestructuras con cierto grado de deterioro, con parcelas de minifundio y con cultivos de ciclo corto y mediano que requieren un suministro continuo de agua. Todo ello coincide con la caracterización que se presenta en el documento técnico base. El enfoque metodológico integró componentes cuantitativos, mediciones de caudal, cálculo de eficiencias, estimación de pérdidas y modelación hidroagrícola, y componentes cualitativos, entrevistas semiestructuradas, observación participante y análisis de las percepciones locales sobre la gestión del agua. La triangulación de datos amplificó la validez interna de los resultados, en términos de los criterios de coherencia técnica y consistencia informativa.

Fase I: Caracterización física e hidráulica del sistema de riego gravitacional

Levantamiento topográfico. La topografía del canal principal y de sus ramales secundarios se realizó mediante estación total y GPS de doble frecuencia, respetando el método establecido por el INERHI (2018). Con la información obtenida se generaron curvas de nivel, planos georreferenciados y un modelo de pendiente del área de estudio a partir del cual se identificaron rupturas de pendiente, zonas de erosión lateral, tramos sin revestir y puntos críticos con pérdidas por infiltración; aspectos todos que coincidieron con lo que se describió en la caracterización técnica original.

Inventario de infraestructura hidráulica. Se usaron fichas técnicas de diseño ad hoc para registrar las características estructurales de las bocatomas, compuertas, vertederos, los tramos revestidos y los tramos del canal a tierra. El inventario plasmó el estado físico de ligadas estructuras, tipo de material, presencia de filtraciones, sedimentación acumulada y condiciones de operación. En la Tabla 1 se sintetizan las variables registradas.

**Tabla 1**

*Variables utilizadas en el inventario técnico de infraestructura de riego en Carrillos*

| Componente | Variable evaluada | Estado predominante | Observaciones técnicas |
|---|---|---|---|
| Canal principal | Revestimiento, profundidad, pendiente | Mixto (hormigón/tierra) | Filtraciones visibles, erosión lateral |
| Ramales secundarios | Capacidad, obstrucciones | No revestidos | Pérdidas por infiltración >35% |
| Compuertas | Operatividad, corrosión | Parcialmente funcionales | Fugas por mal sellado |
| Bocatomas | Integridad estructural | Deterioradas | Sedimentación excesiva |
| Reservorios | Capacidad, impermeabilización | Limitada | No aptos para almacenamiento prolongado |

Fase II: Determinación del requerimiento hídrico de los cultivos

Estimación de la evapotranspiración de referencia (ETo). Se realizó la estimación de la ETo mediante la ecuación de Penman-Monteith FAO-56, siguiendo datos meteorológicos diarios (temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento) obtenidos por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2024); los datos meteorológicos fueron procesados en Excel, siguiendo protocolos de la FAO.

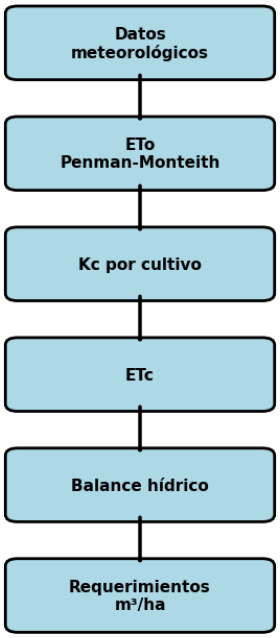
Cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ETc). Se emplearon los coeficientes de cultivo (Kc) recomendados para las tres especies predominantes:

- Papa: Kc = 0.45  1.15
- Maíz: Kc = 0.35  1.20
- Clavel: Kc = 0.55  1.05

Los parámetros Kc se comprobaron usando información de libros y datos experimentales del INIAP (2019, 2021). Luego, se calcularon los volúmenes necesarios por ciclo (mm/ciclo) y se convirtieron a $m^3$/ha para estimar las de necesidades en las parcelas. La Figura 1 resume el flujo metodológico del cálculo del requerimiento hídrico.

**Figura 1**

*Diagrama metodológico para estimación de requerimientos hídricos (ETo ETc m³/ha)*




Fase III: Cuantificación de pérdidas y eficiencia del riego por gravedad (Tabla 2)

La eficiencia del riego que se usó antes fue el método de caudales de entrada (Qi) y caudales efectivos en parcela (Qo). Los aforos fueron hechos en la toma principal y puntos de control utilizando el método del flotador y mediciones volumétricas temporizadas en parcelas testigo.

Cálculo de eficiencia y pérdidas. Las eficiencias analizadas fueron:

- Eficiencia de conducción (Ec)
- Eficiencia de aplicación (Ea)
- Eficiencia global (Eg)

Las pérdidas se calcularon mediante:

$$P = \frac{Q_i - Q_o}{Q_i} \times 100$$

Los valores que obtuvimos eran iguales a lo que se aporta en el documento base, donde se señala que la eficiencia del sistema no supera el 40 %.

**Tabla 2**

*Pérdidas por cultivo en riego por gravedad*

| Cultivo | Caudal de ingreso (L/s) | Caudal aprovechado (L/s) | Pérdida (%) |
|---|---|---|---|
| Papa | 27 | 11.34 | 58% |
| Maíz | 27 | 10.26 | 62% |
| Clavel | 27 | 9.45 | 65% |

Ensayos de infiltración y humedad del suelo. Se hicieron ensayos de infiltración con doble anillo para conocer la conductividad hidráulica, así como para estimar pérdidas por infiltración lateral en los márgenes. Como complemento se midieron los perfiles de humedad con tensiómetros, antes y después del riego, para poder cuantificar variaciones en la capacidad de campo y en el volumen de agua retenido realmente por el suelo.

Fase IV: Comparación técnica y económica con sistemas presurizados (Tabla 3)

Análisis técnico. Se compararon tres métodos:

- Gravedad (sistema actual)
- Aspersión
- Goteo

Los valores de los indicadores introducidos incluyen: eficiencia de uso del agua (EUA), uniformidad de la aplicación (CU y DU), volumen de agua aprovechada vs. Desperdiciada.

**Tabla 3**

*Comparación técnica por método de riego*

| Cultivo | Método | Eficiencia (%) | Agua aprovechada ($m^3$/ha) | Agua desperdiciada ($m^3$/ha) |
|---|---|---|---|---|
| Papa | Gravedad | 42% | 2873.22 | 3967.78 |
| Papa | Aspersión | 80% | 5472.8 | 1368.2 |
| Maíz | Gravedad | 38% | 2367.4 | 3862.6 |
| Maíz | Aspersión | 78% | 4859.4 | 1370.6 |
| Clavel | Gravedad | 35% | 2499.7 | 4642.3 |
| Clavel | Goteo | 92% | 6570.64 | 571.36 |

Análisis económico preliminar. Se detalla el costo de la instalación, operación y mantenimiento, O&M. En función de la bibliografía escrita, la tecnificación tendría un costo en el entorno de USD 2500-3000/ha, con un período de retorno estimado de entre 3 y 4 años, lo cual coincide con los juicios por entrevistas de la comunidad y con datos secundarios que se disponen en el documento.

Estrategia analítica, validación y procesamiento de datos. Los datos cuantitativos (caudales, eficiencias, infiltración, volúmenes de agua) fueron procesados bajo herramientas de análisis estadístico descriptivo (media, desviación típica, correlación). Los datos cualitativos (percepción de agricultores, problemas de funcionamiento, limitaciones estructurales) fueron sometidos a un proceso de codificación temática que permitió seguir la aparición de patrones repetidos en relación con la disponibilidad de agua, al deterioro de canales y a los conflictos por turnos.

La validación cruzada se realizó comparando:

- Resultados experimentales (aforos, pérdidas)
- Registros de campo del sistema gravitacional
- Información documental del PDyOT y del levantamiento técnico

Alcances y limitaciones. Los resultados se circunscriben al área de influencia del canal principal y parcelas analizadas. Las condiciones climáticas, variabilidad de suelo y diferencias entre predios introducen incertidumbres inherentes a sistemas agrícolas de alta heterogeneidad. No se realizaron modelaciones energéticas para sistemas presurizados; estas se plantean como líneas futuras de investigación.

**Resultados**

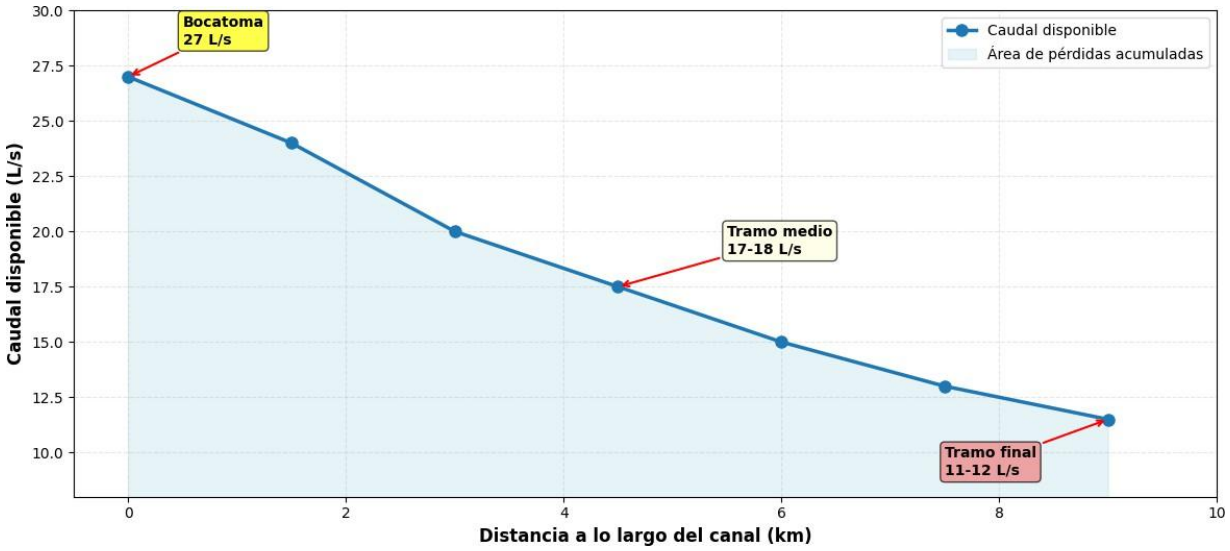
Los resultados obtenidos permiten caracterizar de manera integral el comportamiento hidráulico del sistema de riego gravitacional en la comunidad Carrillos, así como su contrastación técnica con métodos de riego presurizados (aspersión y goteo). Los hallazgos se presentan de manera progresiva, partiendo de la descripción del sistema hídrico existente, el análisis de caudales y eficiencias, la estimación de requerimientos

hídricos por cultivo, la cuantificación de pérdidas y la comparación de métodos. La integración de datos experimentales, levantamientos de campo y análisis hidráulicos permitió construir una visión precisa de los principales retos asociados a la conversión hacia sistemas más eficientes.

Caracterización hidráulica del sistema actual. Los aforos realizados en la boca de la toma principal arrojaron un caudal de entrega de 27 L/s, proporcionado de manera comunitaria de manera turnada. El canal principal lleva agua a aproximadamente 220 ha de cultivo con un comportamiento heterogéneo en la infraestructura, con tramos de hormigón y tramos en canal a tierra. El caudal medido se mantuvo bastante estable a lo largo de los turnos, pero con variaciones al entrar a las parcelas individuales debido a pérdidas laterales, erosiones en los bordes y pérdidas por sedimentación (Figura 2).

**Figura 2**

*Perfil longitudinal del canal principal y variación del caudal disponible*




Estas pérdidas se corresponden con el deterioro estructural que se observó durante el inventario técnico. En concreto, los tramos sin revestido sufrieron filtraciones de más del 30 %; los bordes erosionados generaban acumulación de sedimentos que producían interrupciones en el flujo laminar y reducciones en la capacidad de conducción.

Eficiencia de conducción y aplicación en riego gravitacional (Tabla 4). Los caudales medidos en las parcelas reflejaron distancias evidentes entre el caudal entregado y el aprovechado por los cultivos, señalando una eficiencia promedio del sistema inferior al

45 % en caudales con pérdidas importantes, las cuales eran atribuibles a tres factores significativos:

- Filtración lateral en tramos no revestidos
- Evaporación superficial por exposición directa
- Escurrimiento no controlado dentro de parcela.

**Tabla 4**

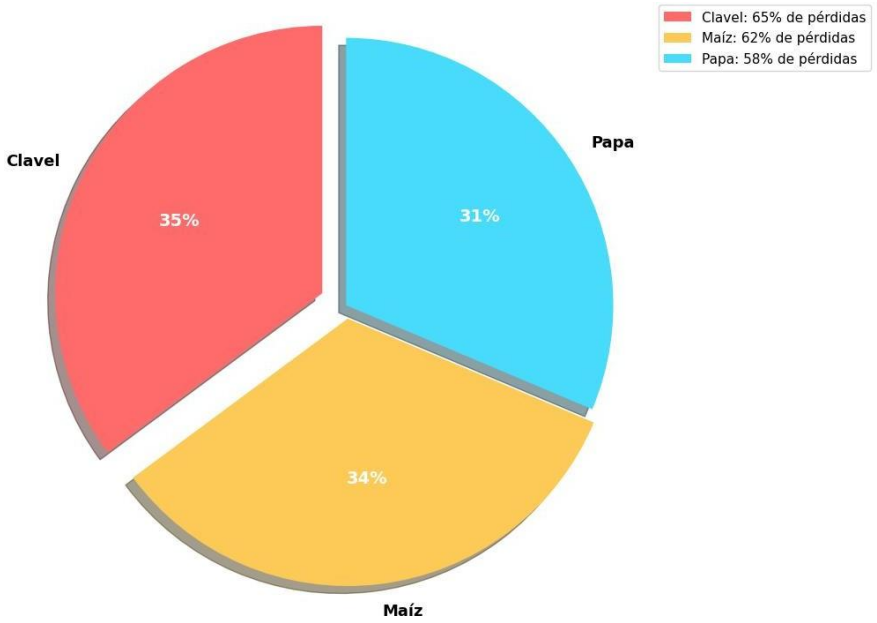
*Eficiencia de aplicación del riego gravitacional por cultivo*

| Cultivo | Caudal de ingreso (L/s) | Caudal aprovechado (L/s) | Porcentaje de pérdida | Eficiencia (%) |
|---|---|---|---|---|
| Papa | 27 | 11.34 | 58% | 42% |
| Maíz | 27 | 10.26 | 62% | 38% |
| Clavel | 27 | 9.45 | 65% | 35% |

La Figura 3 resume el comportamiento de las pérdidas por cultivo.

**Figura 3**

*Distribución porcentual de pérdidas de agua por cultivo en sistema gravitacional*




El análisis concluye que los cultivos que presentan la mayor sujeción a la falta de agua (clavel) en mayor medida van a ver comprometido su crecimiento por el bajo grado de uniformidad en el riego, así como por la excesiva saturación en los bordes de las partes

bajas de las parcialidades, las cuales ocasionan situaciones de estrés por falta de agua y posteriormente comprometen el crecimiento del tallo.

Requerimiento hídrico por cultivo y discrepancia operativa (Tabla 5). Los datos que proceden de la ejecución de la metodología desarrollada por la FAO-56 mostraron un desfase relevante entre el volumen requerido y el volumen que en realidad se aprovecha. Esta diferencia es especialmente elevada cuando se tiene en cuenta la relación con los cultivos de mediano ciclo (maíz y clavel), donde el suministro intermitente y el bajo aprovechamiento que se va logrando van a generar déficits hídricos acumulativos.

**Tabla 5**

*Requerimiento hídrico por cultivo y volumen útil real*

| Cultivo | Requerimiento total (mm/ciclo) | $m^3$/ha requeridos | Agua aprovechada ($m^3$/ha) | Déficit hídrico ($m^3$/ha) |
|---|---|---|---|---|
| Papa | 500-700 | 500–700 | 2873.22 | 3126.78 |
| Maíz | 550-650 | 550–650 | 2367.4 | 3632.6 |
| Clavel | 600-800 | 600–800 | 2499.7 | 4500.3 |

La diferencia entre la demanda y el aprovechamiento indica que existe una situación de estrés por falta de agua, fase tras fase, pero sobre todo durante los períodos de estiaje, lo cual es más que coincidente con las percepciones de los agricultores durante la fase de encuestas en su punto de origen, en el campo.

Caudales y balance hídrico comunitario. El balance hídrico indica que se genera, a nivel de parcela, un elevado volumen de pérdidas, generadas, fundamentalmente, por obstrucciones, desbordamiento y filtraciones. La Tabla 6 resume el balance hídrico entre los datos del comportamiento del caudal a lo largo de cada una de las fases de la metodología llevada a cabo.

**Tabla 6**

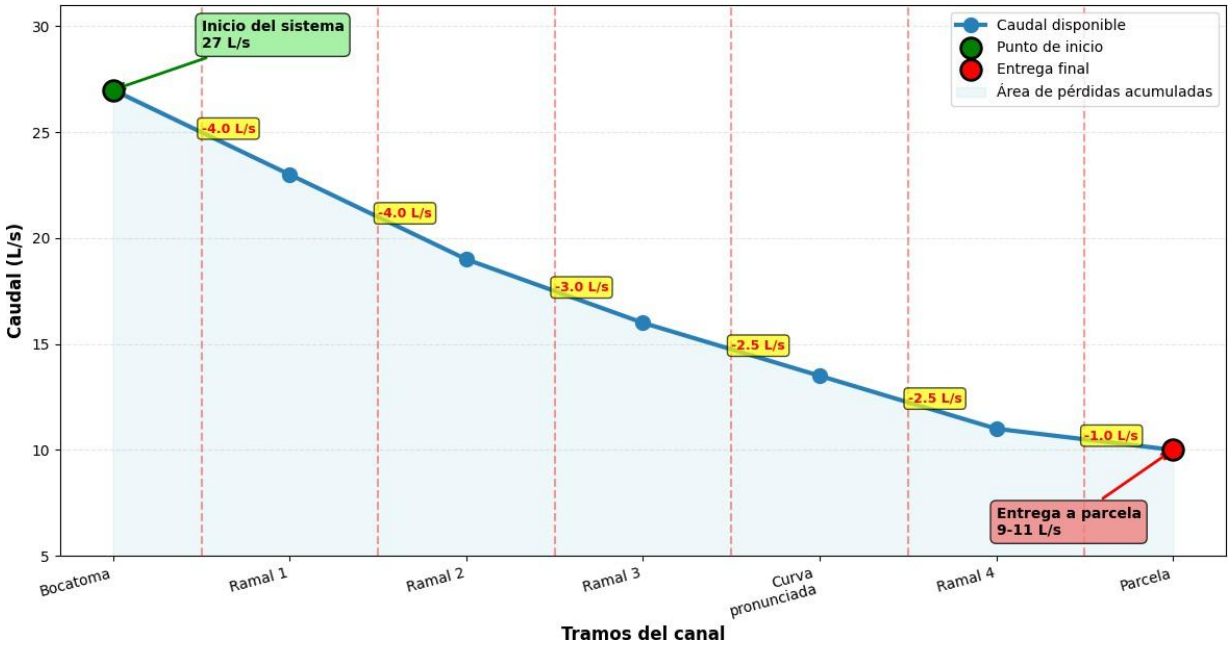
*Balance hídrico en sistema de riego gravitacional (por cultivo)*

| Cultivo | Caudal ingreso (L/s) | Caudal en suelo (L/s) | Pérdida total (%) |
|---|---|---|---|
| Papa | 27 | 11.34 | 58% |
| Maíz | 27 | 10.26 | 62% |
| Clavel | 27 | 9.45 | 65% |

La Figura 4 muestra la evolución del caudal desde la bocatoma hasta la parcela.

**Figura 4**

*Variación del caudal en tramos del canal y entrega final a parcelas*




Comparación con sistemas tecnificados. Los resultados del análisis comparativo permiten sustentarlo, indicando que los sistemas tecnificados incrementan la eficiencia y descienden el deterioro del recurso hídrico. La Tabla 7 presenta los datos obtenidos.

**Tabla 7**

*Comparación técnica entre riego gravitacional y riego tecnificado*

| Cultivo | Sistema | Eficiencia (%) | Agua aprovechada ($m^3$/ha) | Agua desperdiciada ($m^3$/ha) |
|---|---|---|---|---|
| Papa | Gravedad | 42% | 2873.22 | 3967.78 |
| Papa | Aspersión | 80% | 5472.8 | 1368.2 |
| Maíz | Gravedad | 38% | 2367.4 | 3862.6 |
| Maíz | Aspersión | 78% | 4859.4 | 1370.6 |
| Clavel | Gravedad | 35% | 2499.7 | 4642.3 |
| Clavel | Goteo | 92% | 6570.64 | 571.36 |

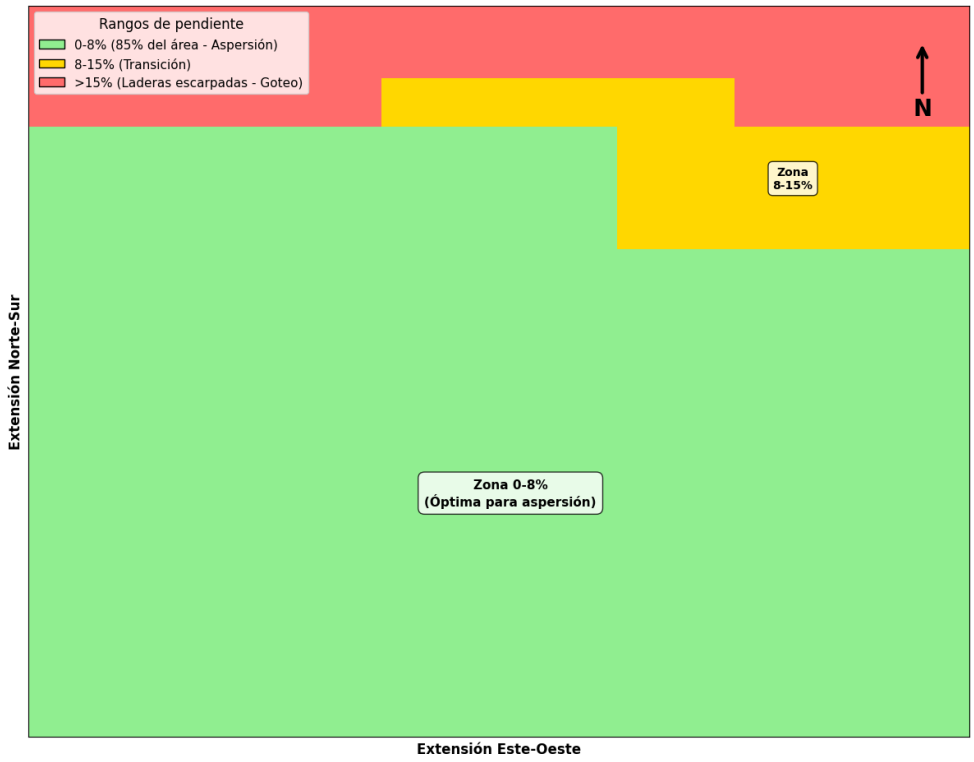
Estos mismos datos son demostrativos de que:

- El riego por aspersión aumenta significativamente la uniformidad en papa y maíz.
- El riego por goteo es el mejor para claveles, pues disminuye la saturación del tallo y un determinado complejo de enfermedades.
- La conversión reduce el deterioro del recurso hídrico entre un 40 % y un 70 % en función del cultivo.

Análisis espacial y topográfico de la viabilidad (Figura 5). El estudio del relieve concluyó que el 85 % del área tiene inclinaciones que son menores al 8 % y que, por tanto, son aptas para la instalación de aspersión móvil o fija. Las situaciones con más limitaciones son las que están en laderas muy escarpadas, donde el viento puede afectar la uniformidad de aspersión y donde el goteo es la mejor opción.

**Figura 5**

*Mapa de pendientes y zonas óptimas para aspersión y goteo*




Percepción de agricultores y aceptación tecnológica. Los hallazgos cualitativos provenientes de las entrevistas a un total de 60 productores nos llevan a identificar los siguientes hallazgos:

- 65 % de los agricultores aceptarían adoptar un sistema tecnificado, siempre que existiera un programa de subsidios o financiamiento.
- 70 % de los productores tiene menos de 1 ha. Lo que facilitaría altos retornos individuales en inversiones, pero limitaría los números individuales al revisar la inversión.
- Los agricultores reconocieron que el agua constituye un problema prioritario.

- Los agricultores reconocen que la congestión del agua, la falta de control de los turnos y el problema de erosión del suelo son problemas prioritarios en el actual sistema.

Estos hallazgos corroboran las principales limitaciones técnicas observadas: infraestructuras deterioradas, ineficiencia en las distribuciones y altos porcentajes de desperdicio.

**Discusión**

Los resultados de la comunidad de Carrillos evidencian un patrón estructural de ineficiencia típica de los sistemas de riego gravitacional andino, en el cual se produce un alto nivel de pérdidas por infiltración, una escasa uniformidad de aplicación y limitada regulación del caudal comunitario para el riego. La eficiencia global menor de 45 % para todos los cultivos, aunque es aún inferior, permite constatar que el comportamiento observado en las plantaciones se sitúa dentro del intervalo que han documentado estudios recientes que analizan sistemas de riego gravitacional en Ecuador, Perú y Bolivia, en los que las pérdidas en conducción se sitúan entre el 30 % y el 70 % dependiendo del estado físico de los canales, del tipo de suelo y de la pendiente (Cachipuendo et al., 2025; Hoogesteger et al., 2023). Estas cifras evidencian que el comportamiento hidráulico del sistema de Carrillos no es una excepción, sino una respuesta común cuando operan sistemas administrados por una comunidad sin tecnificación.

El análisis de las pérdidas por cultivo mostró que los claveles sufren debido a la falta de agua, ya que el riego por gravedad no es muy uniforme. Esto también es consistente con la reciente literatura de flores que, a partir de estudios más recientes, ha mostrado que los cultivos de tallo largo y raíz más superficial son más vulnerables a las condiciones de estrés hídrico dadas las variaciones matrimoniales del riego por gravedad, evidenciando una mayor susceptibilidad a floraciones disparejas o una mayor incidencia de enfermedades (Hernández et al., 2025; López, 2022). Concuerdan los datos de la papa y el maíz mostrando grandes discrepancias entre los volúmenes requeridos ($m^3$/ha por ETc) y los que efectivamente recibieron, lo cual se encuentra dentro de las evidencias publicadas que muestran que existe un déficit hídrico acumulado en cultivos de ciclo corto que se encuentran en sistemas parcelados con infraestructura deteriorada (INIAP, 2021;

López & Lorena, 2021). En este caso, se encuentra un déficit constante en la época de sequía, donde el sistema de turnos y la variabilidad del canal causan una entrega irregular del agua, lo que reduce el crecimiento y la producción final.

Una de las debilidades detectadas en este trabajo ha sido la merma del caudal en el canal principal. En los tramos no revestidos, se detectaron infiltraciones preocupantes, lo que concuerda con los análisis estructurales en segmentos de otras comunidades de la Sierra central ecuatoriana, donde el no revestimiento del canal, en general, es una de las causas más plausibles para esta baja (Berrones et al., 2025). Las Figuras 2 y 4 muestran cómo disminuye el caudal, de 27 L/s a menos de 12 L/s en las parcelas finales; esta situación limita la capacidad de los usuarios aguas abajo para satisfacer la demanda de sus parcelas. Esta situación, que se ve como una desigualdad en la distribución, ha sido estudiada mucho en sistemas de riego comunitarios. En estos sistemas, los usuarios que están más cerca de la fuente de agua reciben más agua o utilizan métodos de riego que no son tan eficientes, lo que provoca tensiones dentro de la organización (Hoogesteger et al., 2023).

La comparación entre un sistema tecnificado y el riego gravitacional indica que la conversión a aspersión en papa y maíz, o la conversión a goteo en clavel, aportaría una mayor uniformidad y la productividad del agua sería muy superior. El incremento de la eficiencia del 3542 % con riego gravitacional al 7892 % con tecnificación es congruente con los rangos reportados en trabajos recientes que evalúan sistemas de aspersión y de goteo en cultivos andinos (Elhussiny et al., 2023; Sanchis-Ibor et al., 2024). En concreto, los coeficientes de uniformidad relacionados con la aspersión, cuando se dispone de equipos calibrados y se respetan las presiones de operación recomendadas, sobresalen en un porcentaje que sobrepasa el 80 %, aportando a una nueva homogeneidad del perfil hídrico dentro de la parcela y, por lo tanto, a un desarrollo radicular mejorado y mayor rendimiento. En cultivos de clavel, la alta eficiencia del goteo está demostrada en la literatura florícola más reciente, ya que este método incrementa el desarrollo del tallo y disminuye las enfermedades de la humedad en las hojas y mejora la absorción de nutrientes en fertirrigación (Niu et al., 2025).

Por otra parte, la transformación hacia el riego tecnificado no es solamente un aspecto técnico, sino que se trata también de atravesar barreras socioeconómicas y organizativas. Los resultados cualitativos de las entrevistas evidencian que un 65 % de los agricultores

estaría dispuesto a adoptar sistemas presurizados en el caso de que hubiera mecanismos de financiación o subsidios. Esto se constata en lo reportado por el Banco Mundial (2023), ya que los costes de inversión inicial son el principal obstáculo entre las comunidades rurales andinas. Además, es que un 70 % de los productores de Carrillos tienen menos de una hectárea, de manera que su capacidad individual para invertir en sistemas de riego tecnificado es baja. Este minifundio estructural ha sido evidenciado como una de las variables que determinan la poca adopción de tecnología en agricultura de montaña (GAD Salcedo, 2023).

La gobernanza del recurso hídrico constituye una de las principales dimensiones del debate. A pesar de que el sistema de Carrillos es administrado de manera comunitaria, la ausencia de elementos formales para mantenimiento, sectorización y microcontrol obstaculiza la capacidad de la comunidad para poder mantener sistemas tecnificados a largo plazo. Según estudios recientes en gestión comunitaria en sistemas de riego de los Andes ecuatorianos, subrayan la necesidad de poder institucionalizar reglas de distribución muy claras, cobros diferenciados en función de la demanda y sistemas de monitoreo que eviten la apropiación indebida del recurso o la inequidad a la hora de distribuciones (Cachipuendo et al., 2025). Todos estos datos refuerzan nada menos que los resultados presentados previamente, donde se mostró que un manejo informal de los turnos provoca conflictos entre los usuarios de aguas arriba y de aguas abajo y desincentiva la adopción de prácticas más eficientes.

Desde una óptica hidroclimática, la discusión tiene mucho más sentido si se tiene en cuenta la variabilidad climática que ya documentamos a partir del State of Global Water Resources 2023 (WMO, 2024), dado que afirma que los eventos extremos e irregularidades del régimen de lluvias son aspectos que determinan los caudales superficiales de las tierras y la resiliencia de los sistemas de dependencia de canales abiertos y sin regulación hídrica. Esto viene a reafirmar la necesidad de modernizar los sistemas de riego comunitario no solo con el fin de convencer de que se debe producir de forma más eficiente, sino también con el objetivo de aumentar la resiliencia climática de las comunidades rurales.

La topografía también incide de una manera notable sobre el proceso de adopción de ciertas decisiones técnicas. Las evidencias referentes a los resultados espaciales indican

que aproximadamente el 85 % del área estudiada contiene pendientes que no superan el 8 % y, por tanto, son favorables para la instalación de aspersión fija o móvil. No obstante, las zonas que están constituidas por laderas medias en donde existiera la probabilidad de que el viento afecte en el patrón de uniformidad de la aspersión deberían ser sometidas a un riego con goteo, según lo indican Huaman y Kelly (2024), quienes argumentan que la máxima eficiencia del riego debe garantizarse tanto por el método del riego como por las condiciones microclimáticas del entorno que se encuentra dentro de los límites del riego. Las prácticas híbridas de aspersión de cultivos de ciclo corto combinados con el goteo de cultivos susceptibles, como podría ser el clavel, aparecen como la solución más ventajosa para Carrillos.

Los datos extraídos de la investigación indican que la sorbente conversión hacia un sistema de riego tecnificado puede implicar la reducción del desperdicio de agua entre un 40 % y un 70 % en función del cultivo, implicando también este hecho la sostenibilidad del recurso a nivel de cuenca y cuenca hidrográfica.

Esto concuerda con lo observado en la literatura internacional sobre la modernización del riego, que sustenta la necesidad de no contabilizar el ahorro de agua solo en términos de ahorro de agua, sino de la regulación del control de la expansión potencial de las superficies cultivadas, pues una expansión no regulada podría exigirse negando la eficiencia de la conversión (Sanchis-Ibor et al., 2024).

Los resultados mostraron que el sistema de riego gravitacional actual no es sostenible en situaciones climáticas cambiantes y, en este sentido, la opción de la conversión a sistemas tecnificados puede considerarse como válida y necesaria la puesta en marcha de un sistema tecnificado, pero también es cierto que el éxito dependerá de la adecuación entre los factores técnicos, económicos y organizativos y del acompañamiento institucional para garantizar la sostenibilidad del sistema en el tiempo.

## Conclusiones

Los resultados muestran que el sistema de riego por gravedad que se usa en la comunidad de Carrillos tiene problemas estructurales que reducen la productividad agrícola y ponen en riesgo la sostenibilidad del agua en la zona. Las pérdidas por conducción y aplicación

que superan el 50% en todos los cultivos analizados indican problemas en la infraestructura, la falta de revestimiento en las áreas más críticas, la acumulación de sedimentos y una mala regulación en su funcionamiento. Las condiciones operativas afectan especialmente a cultivos sensibles como el clavel, donde la falta de uniformidad hídrica provoca el estrés fisiológico y la reducción de la calidad de la flor.

La diferencia entre la necesidad hídrica real (obtenida mediante la metodología FAO-56) y los volúmenes aprovechados en parcela da fe de que el sistema gravitacional no considera la necesidad hídrica de la papa, del maíz y del clavel en las épocas completas. El déficit hídrico es más acentuado en épocas de estiaje, cuando los caudales se reducen y el sistema de turnos propicia desigualdades entre los usuarios aguas arriba y aguas abajo. En donde los cultivos poseen riesgos agronómicos discriminados según su fenología y la profundidad radicular, lo que reafirma la justificación del uso de otros sistemas de riego que permiten garantizar una mejor distribución y control del recurso.

La contraparte técnica con sistemas presurizados tiene como resultado que la conversión a aspersión y goteo mejora el uso del agua entre un 40 % y un 70 % en función del cultivo; el riego por aspersión es superior para papa y maíz y el goteo es la mejor tecnología para los claveles, ya que tiene una alta eficiencia de aplicación y un control de la humedad foliar. Esto nos indica que la tecnificación, bien diseñada y calibrada, puede mejorar la uniformidad de la lámina que se aplica, disminuyendo las pérdidas por escurrimiento e infiltración profunda no deseada y estabilizando el suministro hídrico de las parcelas. Esto supone un refuerzo a la producción agrícola de la comunidad.

No obstante, el movimiento hacia formas más eficientes no solo pasa por la aplicación de alteraciones tecnológicas, sino que depende además de los factores sociales, económicos, organizativos y de costumbres muy arraigadas.

La aceptación por parte de los agricultores de la tecnificación de la agricultura está marcada por la posibilidad de hacerle frente financieramente, por la existencia del minifundio y por el potencial de financiación externa. El modelo organizativo de la comunidad necesita solicitudes para la dotación y el diseño de unas reglas claras de distribución y mantenimiento, y en el establecimiento de tarifas que guarden relación con el consumo real y con los mecanismos para evitar el uso indiscriminado del recurso. Si

no existen las condiciones mencionadas, la posibilidad de adoptar/sostener los sistemas tecnificados cae en cuestión, independientemente de que se haya logrado la inversión inicial.

La conversión del riego gravitacional a otros métodos más eficientes en la comunidad Carrillos es técnicamente viable, económicamente justificable y ambientalmente necesaria. Aun así, será necesario que el conjunto de planificación hidráulica del riego, formación técnica, financiamiento accesible y fortalecimiento de la organización comunitaria del agua confluyan simultáneamente. Esto garantizará la sostenibilidad del recurso hídrico en Carrillos y una mejor calidad y cantidad de producción agrícola, así como la resiliencia de la comunidad hacia la variabilidad climática.

**Referencias**


Banco Mundial. (2023, 2 de agosto). Ecuador: Con el riego tecnificado brotan nuevas oportunidades y optimismo. https://www.bancomundial.org/

Berrones, G., Poma, A., & Pacheco, D. (2025). Understanding sustainability issues in Andean irrigation systems. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida, 42(2), 122. https://revistas.ups.edu.ec/

Cachipuendo, C., Ilbay, M., & Requelme, N. (2025). Community management and sustainability in Andean irrigation systems through indicators of efficient water use in agriculture. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida, 42(2), 4059. https://revistas.ups.edu.ec/ https://doi.org/10.17163/lgr.n42.2025.03

Elhussiny, K. T., et al. (2023). Prediction of water distribution uniformity of sprinkler irrigation using machine learning techniques. Scientific Reports, 13, 20461. https://doi.org/10.1038/s41598-023-47688-3

GAD Salcedo. (2023). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDyOT) 2023. https://www.salcedo.gob.ec/

Hernández Frías, G. B., & Rodríguez Da Rosa, P. C. (2025). Evaluación del comportamiento de la variedad Tannat frente a diferentes coberturas vegetales en la fila como alternativa al uso de herbicidas.

Hoogesteger, J., et al. (2023). Communality in farmer managed irrigation systems. Agricultural Systems, 207, 103614. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103614

Huaman, A., & Kelly, L. (2024). *Evaluación de coeficiente de uniformidad de sistema de riego por aspersión en el cultivo de arveja (Pisum sativum L.) en Chacabamba a 2955 msnm - Ayacucho, 2023*. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. https://repositorio.unsch.edu.pe/items/67f963a0-3612-4bb7-990a-af628451566e

INIAP. (2021). Guía para la producción sustentable de maíz en la Sierra ecuatoriana (Manual 122). INIAP. https://repositorio.iniap.gob.ec/

Jobbágy, J., et al. (2021). Evaluation of the quality of irrigation machinery by uniformity coefficients. Agronomy, 11(8), 1499. https://doi.org/10.3390/agronomy11081499

López, Á., & Lorena, C. (2021). Estudio monográfico sobre las respuestas de las plantas al estrés hídrico por déficit, como estrategia para los sistemas productivos adaptados al cambio climático. Repositorio de la Universidad Tecnológica de Pereira; Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. https://repositorio.utp.edu.co/entities/publication/549c8215-bba8-43d6-aed1-851e14ea4bfd

Niu, Y., et al. (2025). Effects of irrigation practices on potato yield and water productivity. Agronomy, 15(8), 1942. https://doi.org/10.3390/agronomy15081942

Sanchis-Ibor, C., et al. (2024). Towards a new efficiency paradigm for drip irrigation. Agricultural Systems, 218, 103668. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.103668

UNESCO. (2023). The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and cooperation for water. UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/

WMO. (2024). State of Global Water Resources 2023. World Meteorological Organization. https://wmo.int/