

Evaluación de estrategias para la integración de los usos múltiples de agua en un
sistema de abastecimiento colectivo rural en ecosistema de páramo: caso de estudio Berlín
(Santander – Colombia)

Samuel Andrés Carreño Tejedor

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Civil

Directora:
Isabel Cristina Domínguez Rivera
Ingeniera Sanitaria, MSc, PhD

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2019

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	11
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos	14
2. Marco de referencia	15
3. Materiales y métodos.....	18
3.1 Recopilación de información	18
3.2 Análisis estadístico.	18
3.3 Demanda total	20
3.3.1 Demanda de agua verde.....	20
3.3.2 Demanda de agua verde.....	25
3.4 Oferta	26
3.5 Estrategias de integración.....	26
4. Resultados.....	29
4.1 Demanda total.....	30
4.1.1 Demanda de agua verde.....	30
4.1.2 Demanda de agua azul.	32
4.2 Demanda total.....	34
4.3 Estrategias de integración.....	35
4.3.1 Sistema de abastecimiento colectivo para todos los usos.....	37

4.3.2 Sistema de abastecimiento colectivo para usos doméstico y pecuario + sistemas individuales para uso agrícola.	39
4.3.3 Sistema de abastecimiento colectivo para usos doméstico y pecuario + sistemas individuales para uso agrícola + optimización del método de riego.	40
5. Discusión	42
6. Conclusiones.....	44
Referencias Bibliográficas.....	46
Apéndices	50

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. Valores de Kc para cebolla larga.....	23
Tabla 2. Consumo por especie vereda El Progreso (2017).....	34
Tabla 3. Consumo por especie vereda El Progreso (2017).....	34
Tabla 4. Requerimientos de agua azul cultivo de cebolla, vereda El Progreso (riego por aspersión)	34
Tabla 5. Porcentajes de variación entre años secos y años normales.....	35
Tabla 6. Balance hídrico agua azul vereda El Progreso.....	36
Tabla 7. Fuentes y usos del agua en la vereda El Progreso.....	37
Tabla 8. Puntaje de las opciones tecnológicas.....	38
Tabla 9. Porcentajes de variación del área cultivada en la cuenca del río Jordán.....	39
Tabla 10. Requerimientos de agua azul del cultivo de la cebolla para eficiencias del 60% y 80%	43

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1. Criterios de selección de las opciones tecnológicas.....	28
Figura 2. Proceso metodológico.....	30
Figura 3. Patrón de siembra y cultivo típico en la vereda El Progreso.....	32
Figura 4. Distribución del tamaño de los lotes cultivados en la vereda El Progreso.....	32
Figura 5. Balance hídrico agua verde para los cuatro cortes cultivados.....	33
Figura 6. Oferta y demanda según la proyección del sistema colectivo para todos los usos.....	40
Figura 7. Oferta y demanda para usos doméstico y pecuario y, necesidades de riego de las conexiones individuales.....	41
Figura 8. Oferta y demanda del sistema colectivo para usos doméstico y pecuario y, necesidades de riego de las conexiones individuales con mejora de eficiencia.....	44

Lista de Apéndices

Pág.

Apéndice A. Formulario de entrevista con agricultor de la zona.....	50
Apéndice B. Tablas para la determinación de la demanda doméstica y pecuaria.....	51
Apéndice C. Implementación del método SPI.....	53
Apéndice D. Datos de entrada CROPWAT.....	55

Resumen

TÍTULO: EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA LA INTEGRACIÓN DE LOS USOS MÚLTIPLES DE AGUA EN UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO COLECTIVO RURAL EN ECOSISTEMA DE PÁRAMO, CASO DE ESTUDIO BERLÍN (SANTANDER – COLOMBIA).*

AUTOR: SAMUEL ANDRÉS CARREÑO TEJEDOR**

PALABRAS CLAVE: PÁRAMO, USO MÚLTIPLE, DEMANDA Y OFERTA DE AGUA, AGUA VERDE, AGUA AZUL.

DESCRIPCIÓN:

El enfoque de los sistemas de abastecimiento de usos múltiples en las zonas rurales del país es cada vez más estudiado y aplicado. La necesidad de garantizar los medios de subsistencia de la población plantea la integración de cada uno los usos del agua. Este trabajo consistió en la identificación de los usos del agua para una población pequeña de agricultores de cebolla, ubicada en el páramo de Berlín, municipio de Tona, Santander, y su comparación con la oferta del recurso bajo una época de sequía, planteando así un enfoque de integración de los usos domésticos, agrícolas y pecuarios. El cálculo de la demanda doméstica siguió los lineamientos de la Resolución 0330 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio; la demanda pecuaria precisó de guías de levante y producción de las diferentes especies presentes en la zona, y, la demanda agrícola utilizó el enfoque propuesto por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Se plantearon tres estrategias de integración de los usos del agua y se evaluaron en términos de cantidad y disponibilidad del recurso. El análisis mostró que conexiones individuales para suplir requerimientos agrícolas y un sistema de abastecimiento colectivo para suplir demanda doméstica y pecuaria es una alternativa a tomar en cuenta, que puede ser mejorada mediante el aumento de la eficiencia en los métodos de riego.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Isabel Cristina Domínguez Rivera, Ingeniera Sanitaria, MSc, PhD.

Abstract

TITLE: EVALUATION OF STRATEGIES FOR THE INTEGRATION OF MULTIPLE WATER USES IN A RURAL COLLECTIVE SUPPLY SYSTEM IN PARAMOUS ECOSYSTEM, CASE STUDY, BERLIN (SANTANDER - COLOMBIA). *

AUTHOR: SAMUEL ANDRÉS CARREÑO TEJEDOR**

KEYWORDS: PARAMO, MULTIPLE USES OF WATER, WATER DEMAND AND SUPPLY, GREEN WATER, BLUE WATER.

DESCRIPTION:

The multiple uses of water is an approach increasingly studied and applied in rural areas worldwide. The need to ensure rural people's livelihoods demands the integration of water uses and sources. This work identified the water uses from a small rural population, dedicated to the cultivation of onions, located in the Berlin paramo, municipality of Tona, Santander, and its comparison with water availability during the dry season, thus proposing an approach of integration of domestic, livestock, and agricultural uses. Domestic demand was estimated following the guidelines of the Resolution 0330 from the Ministry of Housing, City and Territory. Livestock demand was estimated using guidance on the rearing for the different species present in the area, and, the agricultural demand used the approach proposed by the Food and Agriculture Organization (FAO). Three strategies for integrating water uses were considered and assessed in terms of water demand and availability. The analysis showed that individual connections to supply agricultural requirements and collective supply systems to provide domestic and livestock demand is an alternative to be considered, that can be improved by increasing the efficiency of irrigation methods.

* Bachelor Thesis.

** Faculty of Physico-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Isabel Cristina Domínguez Rivera, Sanitary Engineer, MSc, PhD.

Introducción

La idea central de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es un análisis sistémico de los recursos, que pretende equilibrar los usos humanos con los usos que tienen los ecosistemas que soportan la vida. El enfoque de la GIRH cruza todos los sectores, poniendo en evidencia que el manejo sectorial sin coordinación es uno de los principales problemas en América Latina, desencadenando crisis en la gobernabilidad del agua, donde la relación entre la reglamentación de las instituciones y las prácticas reales del uso del agua no tienen correspondencia alguna, además de que dichas reglamentaciones por lo general no son aplicables a todos los contextos (Restrepo, 2004). Para alcanzar las metas de la GIRH es necesario armonizar los intereses y la dinámica de las poblaciones con las condiciones y la dinámica propia del ecosistema donde habitan (Dourojeanni & Jouravlev, 2001).

En Sudamérica, los páramos forman un corredor insular desde la cordillera de Mérida, Venezuela, hasta la depresión de Huancabamba, Perú, contando con complejos aislados en Panamá, Costa Rica y en la Sierra Nevada de Santa Marta. Colombia cuenta con el 39% del área total perteneciente a los páramos de Sudamérica (Llambí, Soto-w, Borja, Soto-w, & Calle, 2012). Se estima que los ecosistemas de páramos andinos son la fuente de servicios ambientales más importante de América del Sur, sirviendo a más de 100 millones de personas (Buytaert et al., 2006). El incremento de las actividades antrópicas en los páramos del país es cada vez más tangible, de modo que la importancia hidrológica de estas zonas montañosas contrasta con su vulnerabilidad. En muchos lugares, el uso del suelo por parte de los humanos implica una invasión acelerada de áreas naturales, resultando en estrés sobre el ecosistema, deterioro ambiental y cambios en el ciclo hidrológico. A medida que los problemas ambientales asociados a las actividades humanas en los páramos se vuelven críticos, se necesita una planificación efectiva de los usos del suelo para garantizar el acceso al agua (Buytaert et al., 2006). El agua con todos sus usos múltiples desempeña un papel

fundamental en el sustento de las familias ubicadas en este tipo de ecosistemas, especialmente las familias de escasos recursos. Los sistemas de abastecimiento de agua en zonas rurales son usados para suplir la demanda múltiple del recurso. El uso del agua en estas zonas se destina principalmente a usos domésticos como la bebida, aseo, preparación de alimentos e higiene, tanto para usos productivos como la agricultura y actividades pecuarias. No obstante, las etapas de planeación y diseño de los sistemas de abastecimiento no contemplan un enfoque de uso múltiple del agua, e incluso en la reglamentación el uso productivo está prohibido, causando un contraste entre las necesidades de agua de los pobladores y las características de los servicios (infraestructura y gestión) (Smits & Mejía, 2011).

El enfoque de sistemas de uso múltiple (MUS) es un enfoque holístico de gestión sostenible de los servicios de agua, que mejora la salud y los medios de subsistencia de las personas, que compara sus necesidades con las fuentes disponibles y plantea estrategias para armonizarlas (Renwick, n.d.). Este enfoque no desconoce la provisión del recurso para garantizar los medios de subsistencia de los pobladores, por lo que es un planteamiento que aporta al desarrollo de las comunidades rurales, entendiendo que las necesidades de agua de las personas en las zonas rurales y su múltiple uso están integradas y son parte de sus estrategias de subsistencia (Katsi, Siwadi, Guzha, Makoni, & Smits, 2007). El enfoque MUS sigue los planteamientos de la Organización de las Naciones Unidas, al reconocer de una manera clara la interdependencia entre el agua y temas fundamentales como la energía y los alimentos (ONU, 2011).

De esta manera, el presente estudio pretendió comparar la demanda de agua de los habitantes de la vereda El Progreso ubicada en el Páramo de Berlín, Santander, y contrastarla con la oferta, ambos parámetros (demanda y oferta) bajo un periodo de sequía. El propósito

general de este trabajo fue el planteamiento de estrategias de integración y armonización de estos factores, siguiendo un enfoque MUS, según las características particulares de la zona.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar las posibilidades de integración de los múltiples usos del agua dentro del sistema de abastecimiento de la vereda El progreso, perteneciente al DMI Páramo de Berlín, a partir de un balance hídrico entre la oferta y demanda para múltiples usos.

1.2 Objetivos Específicos

- Estimar de manera cuantitativa el comportamiento de la demanda de agua para los usos múltiples de la zona.
- Evaluar la cantidad de agua que puede ser entregada por el sistema de abastecimiento rural dispuesto en la zona, en conjunto con el caudal total de la fuente.
- Plantear alternativas para armonizar la oferta y la demanda de agua para múltiples usos adecuados al contexto del DMI páramo de Berlín.

2. Marco de referencia

“La Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) se define como un proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos, la tierra y los recursos naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales” (Hassing, Ipsen, Jønch-Clausen, Larsen, & Lindgaard-Jorgensen, 2009). Por mucho tiempo las agencias internacionales reguladoras del recurso, han enfocado sus esfuerzos en el concepto de agua potable limpia y saneamiento adecuado, dejando así un vacío en el enfoque del agua hacia la provisión para los medios de subsistencia de las poblaciones dispersas o rurales. En un entorno rural, los múltiples usos del agua juegan un papel principal y fundamental en sus medios de subsistencia y por lo tanto en su desarrollo. Se debe comprender que las necesidades de agua de las personas en zonas rurales y su múltiple uso, están integradas y son parte de sus múltiples estrategias de subsistencia (Katsi et al., 2007). Estos usos múltiples del agua, especialmente en zonas rurales, abarcan necesidades de agua para el consumo doméstico, así como para actividades productivas en escala pequeña, que bien pueden ser actividades de pastoreo y agricultura en general. Estos usos múltiples del agua pueden verse afectados por la segmentación de los servicios, la tecnología y el diseño de los sistemas, la calidad y la cantidad de agua disponible (Katsi et al., 2007).

La Organización de las Naciones Unidas (ONU), ha planteado que resulta necesario un reconocimiento más claro de la fuerte interdependencia entre el agua y temas fundamentales como la energía y los alimentos. Dentro de la GIRH, una parte fundamental es la sustentabilidad de los ecosistemas vitales mediante una buena gobernanza del agua. Esta gobernanza no debe abordar los problemas relacionados con la gestión del recurso hídrico, meramente desde un panorama despolitizado, sino que reúna esfuerzos en la centralización de los problemas, vistos desde una perspectiva conjunta entre procesos de ingeniería y

políticas a nivel global, implementadas en un nivel local (Grupta, 1970). Para esto, se debe garantizar un entorno propicio para la creación de normativas, que faciliten la formulación y aplicación de políticas y planes pertinentes. El óptimo aprovechamiento del recurso hídrico, depende en gran medida del cuidado ambiental que se tenga de la fuente.

En el continente suramericano, las principales fuentes de captación de agua son los páramos, pues proveen la mayor parte del agua a las tierras altas andinas y a una vasta área de zonas en tierras bajas, donde los principales usos del agua son el consumo doméstico, agrícola, e industrial. Se debe realizar una gestión del recurso que garantice la conservación del ecosistema y que supla la necesidad hídrica de las zonas dependientes de los páramos ya que, en muchas ocasiones la invasión desproporcionada de zonas naturales resulta en un incremento del estrés en el ecosistema (Buytaert et al., 2006). Debido a que la actividad humana en los páramos se ha incrementado recientemente, se han realizado investigaciones de su impacto en los ciclos hidrológicos. Algunas repercusiones de este impacto son la disminución de las precipitaciones y el aumento de la temperatura, problemas que además se ven influenciados por los fenómenos naturales como ENSO (El Niño-Southern Oscillation). En épocas precolombinas, las actividades antrópicas permanecieron locales y no influían en la hidrología, no obstante, la intensidad y la naturaleza de las actividades humanas han incrementado drásticamente (Buytaert et al., 2006). La agricultura y el pastoreo son las actividades que más aumento han tenido en los páramos, en donde los pastizales naturales se convierten en campos agrícolas que se drenan y cultivan intensamente. En Colombia se estima que el incremento de área cultivada en los páramos es de 24.9% (Buytaert et al., 2006). Aunque en Colombia la relación entre demanda y la oferta de agua es del 37% (Frenken & Gillet, 2012), se requiere una buena gestión del recurso hídrico, que garantice la productividad agrícola de los páramos y que, a su vez, proteja sus cuencas. Para lo anterior, se debe tener presente que la agricultura juega un papel esencial al momento de

alcanzar una economía sostenible, dado que supone el 70 % del consumo de agua a nivel mundial y abarca el 40% de empleos de la población mundial. Además, el crecimiento del Producto Interno Bruto generado por la agricultura es cuatro veces más efectivo en la reducción de la pobreza comparado con otros sectores (ONU, 2011). Debido al aumento desproporcionado de la población (crecimiento marcado en países poco desarrollados o con altos índices de pobreza), se evidencia un inminente aumento de las actividades agrícolas para proporcionar alimentos suficientes a toda la población. Una economía sustentable, por lo tanto, necesita alcanzar la seguridad agrícola utilizando menos recursos naturales. Esto podría lograrse mejorando la eficiencia de los recursos o a través de inversiones e innovaciones sustanciales, lo que conlleva a incrementar los cultivos que garanticen una mayor eficiencia en términos de nutrición por gota de agua (ONU, 2011).

Dada la evidente relación agua-agricultura y sus impactos sociales y ambientales, la ONU-Agua propone ciertas prácticas en la gestión del agua para mejorar la eficiencia en la irrigación, entre las que resaltan la agricultura de secano actuando conjuntamente con pequeños embalses y recogida del agua lluvia, tecnologías de irrigación a pequeña escala (bombas de pedal, técnicas de riego por goteo) que ayudan a aliviar las insostenibles extracciones de agua para regadío y por último una transición del enfoque basado en la oferta a un enfoque basado en la demanda (ONU, 2011). Esta última práctica sugiere que actualmente el enfoque de gestión del agua se basa en la infraestructura física para garantizar la oferta y plantea que, este concepto debería evolucionar hacia un enfoque basado en el uso sostenible del agua, con una mayor consideración de las soluciones económicas por el lado de la demanda. En el contexto páramo, estas prácticas podrían ser llevadas a cabo combinando nuevas tecnologías y mejorando el conocimiento y la capacitación por medio de campañas de sensibilización y educación sobre conceptos como la eficiencia del agua, su calidad y su disponibilidad limitada.

3. Materiales y métodos

Caso de estudio: La zona de estudio seleccionada para este proyecto corresponde al área de influencia del acueducto Los Andes El Progreso, localizado en la vereda “El Progreso” que se ubica sobre el kilómetro 54 en la vía Bucaramanga – Pamplona. El área de estudio cuenta con aproximadamente 340 habitantes, dedicados en su mayoría a la agricultura, principalmente al cultivo de la cebolla, con una cobertura estimada en 36% de la extensión total del área cubierta por el sistema de abastecimiento. Por su parte, en una proporción menor (32%) se encuentra la actividad pecuaria. Las principales fuentes de abastecimiento de agua de esta población son: acueducto, quebradas, nacimientos, ríos y pozos (GPH-UIS & CDMB, 2017).

3.1 Recopilación de información

Se recolectó información relacionada con parámetros climatológicos, geográficos y sociales, mediante el uso de bases de datos, portales institucionales, gubernamentales y mediante el estudio de artículos científicos. Además, se identificaron y estudiaron trabajos realizados con anterioridad en la zona de estudio que sirvieron como base de partida para el presente proyecto.

3.2 Análisis estadístico.

Mediante la recopilación de información, se contó con series históricas de datos de precipitación, temperatura, humedad relativa, brillo solar y velocidad de viento, todos con escala diaria y proporcionados por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), a través de su estación climatológica ubicada en el corregimiento de Berlín, municipio de Tona . El análisis de estos datos fue el punto de partida para el cálculo de la demanda del sector agrícola y para los balances hídricos que suceden al cálculo de la demanda total.

Para el cálculo de la demanda de agua verde (uso agrícola) se precisa el uso de los datos mencionados anteriormente, durante un año. Para esto se procedió a realizar la selección de un año crítico (año seco), mediante un análisis estadístico de los datos de precipitación. Para ello, se empleó el método desarrollado por McKee, Doesken y Kleist, que es ampliamente aceptado y recomendado por diversos autores ((Quevedo & Peredo, 2015), (Tosunoğlu & Onof, 2017), (Yacoub & Tayfur, 2017), (Loaiza Cerón, Carvajal Escobar, & Baquero Montoya, 2015)). El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI de ahora en adelante, por sus siglas en inglés), es de fácil cálculo y de gran efectividad en el análisis de ciclos húmedos y secos por igual, en donde el único parámetro necesario es la precipitación; para su estimación, se recomienda contar con por lo menos 30 años de datos mensuales de precipitación (Svoboda, Hayes, & Wood, 2012). La metodología de estimación del SPI se basa en la preparación de la muestra, idealmente, una serie mensual continua de al menos 30 años, se seleccionan periodos de promediación de j meses (3, 6, 12, 24, o 48 meses), los cuales deben ser periodos de precipitaciones típicas de la zona; a continuación, se ajustan los datos a la distribución Gamma. Finalmente, cada probabilidad es usada para calcular el SPI por medio de la inversa de la distribución normal, con media cero y desviación estándar correspondiente a la unidad (Mckee et al., 1993). Para el caso de estudio, se abarcó un total de 48 años desde 1970 a 2017, con periodos de promediación de 12 meses. Los valores para el SPI definen categorías de sequía, donde un evento de sequía corresponde a un periodo con SPI negativo continuamente. El Centro de Predicción Climática, establece categorías de sequía según los valores del SPI (ver Apéndice C) (Climate Prediction Center Internet Team, n.d.). Una vez identificado el año crítico con la metodología del SPI, se usaron los datos meteorológicos de este año para la estimación de la demanda del cultivo con el software CROPWAT.

En cuanto al cálculo de la oferta hídrica de la fuente superficial correspondiente al año crítico, se realizó un análisis conjunto de datos entre el método SPI y una serie histórica de caudales del río Jordán, del cual la fuente de abasto del acueducto el Progreso (quebrada Las Puentes) es tributaria. Esta decisión se debe a la carencia de aforos de caudal para periodos de sequía en la quebrada Las Puentes, en donde sólo se contó con aforos de caudal correspondientes al año 2017. Los aforos correspondientes al caudal en el río Jordán van desde el año 1972 hasta el año 2001. Empleando el método SPI se pudo definir la categoría de sequía para cada uno de estos años (1972 – 2001) y para el año 2017 en concreto. Sabiendo la categoría de sequía para el año crítico y para el 2017, se procedió a comparar la relación entre estas dos categorías entre los demás años que presentaron las mismas categorías, calculando así un porcentaje de variación entre ambas categorías de sequía. Por último, este porcentaje fue usado para afectar el caudal ofrecido por la fuente hídrica de la zona, medido en el año 2017, dando así un caudal (oferta) contextualizado a un año típico seco en la zona.

3.3 Demanda total

La demanda total de agua es la suma de cada uno de los requerimientos de agua de los pobladores. Según sus usos, la demanda de agua se dividió en demanda de agua verde (uso agrícola) y demanda de agua azul (uso doméstico, pecuario y necesidades de riego).

3.3.1 Demanda de agua verde. La cantidad de agua que debe aplicarse, para compensar la pérdida de agua por evapotranspiración, teniendo en cuenta el aporte de la precipitación efectiva, constituye la demanda agrícola (Bedoya, Contreras, & Ruiz, 2010). El principal producto agrícola en la zona de estudio es la cebolla, ya que representa un 95% de los cultivos (GPH-UIS & CDMB, 2017). La evapotranspiración del cultivo de cebolla se determinó mediante el método propuesto por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en colaboración con la Comisión Internacional de Riego y Drenaje y la Organización Meteorológica Mundial. La evapotranspiración del

cultivo se encuentra definida en la Ecuación 1, y se divide en: evapotranspiración de referencia y coeficiente de cultivo.

$$Da = 10(Kc * ET_o - Pe) * A \quad [m^3/día] \quad (1)$$

$Kc * ET_o$: Evapotranspiración del cultivo. [mm]

Pe : Precipitación efectiva. [mm]

A : Área cultivada. [Ha]

La evapotranspiración de referencia (Ecuación 2) es la tasa a la que una superficie, con un cultivo hipotético de referencia bajo condiciones no limitantes de agua, evapotranspira. Este cultivo de referencia hipotético es de 0.12 cm de altura, con resistencia superficial fija de 70 s/m, y un albedo de 0.23. Este valor cuantifica la evapotranspiración de una superficie lo suficientemente extensa, cubierta con pasto verde, con crecimiento activo y bajo condiciones óptimas de agua (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C]

R_n : Radiación neta en la superficie del cultivo [MJ/m²día]

G : Flujo de calor del suelo [MJ/m²día]

γ : Constante psicrométrica [kPa/°C]

T : Temperatura media del aire a 2 m de altura [°C]

u_2 : Velocidad del viento a 2 m de altura [m/s]

e_s : Presión de vapor de saturación [kPa]

e_a : Presión real de vapor [kPa]

La Ecuación 2 usa exclusivamente parámetros climáticos y permite comparar la evapotranspiración de referencia para diversos periodos del año. Para el caso de estudio, se contó con un amplio rango de datos climatológicos con escala diaria (1970 – 2016), que fueron proporcionados por el IDEAM (IDEAM, 2018a). El coeficiente del cultivo (Kc) integra los efectos de las características que distinguen la superficie cultivada de la superficie

de referencia. El coeficiente de cultivo presenta dos enfoques de cálculo: el coeficiente único de cultivo y el coeficiente dual del cultivo. El coeficiente único de cultivo se utiliza en la mayoría de las aplicaciones relacionadas con la planificación del riego, diseño y manejo, mientras que el procedimiento dual del cultivo es importante cuando se requieran estimaciones detalladas de la evaporación del suelo, calendarios de riego en tiempo real, la aplicación de modelos de calidad del agua y en la investigación en general (Allen et al., 2006). En el presente estudio se optó por la evaluación del coeficiente único de cultivo, debido a las limitantes en la información para el empleo del enfoque de coeficiente dual del cultivo, ya que, este último requiere de un análisis diario del comportamiento del agua en el suelo, mediante balances hídricos, en donde aspectos como la percolación, escurrimiento y láminas de riego tienen un peso importante. El coeficiente del cultivo varía en función del desarrollo del cultivo. Las etapas de desarrollo del cultivo son: la etapa inicial, de desarrollo, de mediados de temporada y final (Allen et al., 2006). La determinación de la duración de estas etapas se realizó mediante una entrevista con un agricultor típico de la zona (ver formulario de entrevista en el Apéndice A). El método del coeficiente único de cultivo permite la utilización de valores de K_c propuestos por la FAO, pero especifica que se deben hacer correcciones por las variaciones de los parámetros climáticos entre la zona para la cual se propusieron en un principio y la zona en que se aplica el método (Allen et al., 2006). La Tabla 1, muestra los coeficientes de cultivo propuestos por la FAO. El valor para el K_c inicial puede ser utilizado sin correcciones cuando no se encuentre información detallada de los intervalos de tiempo entre humedecimientos del suelo y sus láminas de infiltración.

Tabla 1.

Valores de Kc para cebolla larga.

Kc ini	Kc med	Kc fin	Altura máxima Cultivo (h) [m]
0.7	1.00	1.00	0.3

Nota: Adaptado de R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.

La corrección respectiva de Kc a mediados y finales de temporada, corresponde a climas en donde la humedad relativa mínima difiere de 45% y donde la velocidad del viento es diferente a 2 m/s. Para el caso de estudio los valores de humedad relativa y velocidad del viento difieren a los valores mencionados anteriormente (Apéndice D, Tabla D.1), por lo cual, se realizó la corrección de Kc para mediados y finales de temporada (Apéndice D, Tabla D.3).

La evapotranspiración de referencia y la demanda de agua para uso agrícola fueron determinadas mediante el programa CROPWAT, desarrollado por la FAO (<http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/es/>). CROPWAT es un programa empleado para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos, teniendo como base datos climáticos y de cultivo. Los parámetros de entrada del programa se dividen en cuatro apartados: Clima/ETo, Precipitación, Cultivo y Suelo.

- Clima/ETo: en este apartado, el programa calcula la evapotranspiración de referencia a partir de datos climatológicos como: temperatura máxima y mínima, humedad, velocidad del viento y brillo solar. Los valores para estos parámetros fueron proporcionados por el IDEAM (IDEAM, 2018a).
- Precipitación: permite calcular la precipitación efectiva por diferentes métodos simplificados; para el caso de estudio se seleccionó el método propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Sistema de Información

Agroclimática para el Regadío, 2015). Los datos de precipitación fueron proporcionados por el IDEAM (IDEAM, 2018b).

- Cultivo: además de los parámetros mencionados con anterioridad (coeficiente del cultivo y sus etapas), el programa requiere el ingreso de información complementaria como: profundidad radicular, rendimiento del cultivo, altura máxima del cultivo y la fracción de agotamiento crítico del cultivo. Estos valores fueron tomados de Allen et al. (Allen et al., 2006).
- Suelo: los parámetros de entrada de este apartado son: humedad del suelo disponible total, tasa máxima de infiltración, profundidad radicular máxima y agotamiento inicial de humedad. Estos parámetros se encuentran en Allen et al. (Allen et al., 2006) y dependen del perfil del suelo de la zona, el cual se obtuvo del Estudio General de Suelo y Clasificación de Tierras en el Departamento de Santander (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2003).

Los resultados que arroja CROPWAT para la estimación de la demanda de agua de los cultivos, de interés para este estudio son:

- RAC: Relación Agua – Cultivo, que presenta los requerimientos de agua por decenas y además relaciona gráficamente este requerimiento con la ET_c, es decir una comparación indirecta entre la demanda y la oferta de agua verde.
- Programación: muestra los días en que el cultivo alcanza el agotamiento crítico y por lo tanto necesita ser regado, así mismo, presenta el caudal necesario para suplir este riego, teniendo en cuenta la eficiencia en el método de riego empleado, clasificada en FAO (FAO, n.d.). La necesidad de riego se da cuando el cultivo consume parte del agua disponible en la zona radicular sin entrar en estrés hídrico (Agua Fácilmente Aprovechable) y, al regar, se pretende humedecer el suelo hasta recuperar la cantidad

de agua que puede retener el suelo en contra de las fuerzas gravitatorias (capacidad de campo) (Allen et al., 2006).

Finalmente, CROPWAT realiza automáticamente el balance hídrico entre la oferta de agua verde (precipitación efectiva) y la totalidad de la demanda de agua verde (evapotranspiración del cultivo). Los valores finales arrojados por el software se dan en unidades de litros por segundo por hectárea (l/s/Ha), los cuales deben ser extrapolados a la totalidad de área que se encuentra cultivada. Esta extrapolación se realizó teniendo en cuenta las prácticas de siembra que se presentan en la zona de estudio. De esta manera, se identificaron patrones de cultivo y las hectáreas sembradas bajo cada uno de estos patrones. Teniendo el área que abarca cada patrón y los requerimientos de agua por patrón de cultivo, se calculó la demanda total agrícola para toda el área cultivada.

3.3.2 Demanda de agua verde. La demanda de agua para fines domésticos fue determinada siguiendo los criterios establecidos en la Resolución 0330 de 2017, por la cual se adopta el Reglamento Técnico de Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS 2000, y, en el que se establecen valores de dotaciones netas para usos domésticos, teniendo en cuenta aspectos geográficos, demográficos y poblacionales (Resolución 0330 - 2017, n.d.). Para estimar el consumo de agua para fines pecuarios, se usaron valores de consumo según la especie de animales, obtenidos a través de revisión de literatura así: -consumos para aves y bovinos a partir del Estudio Nacional del Agua 2010 (Bedoya et al., 2010) y, - consumo para caprinos y ovinos a partir de guías para la producción y levante de estas especies (Fernández, Martínez, Tavarez, Castillo, & Salas, 2009). La información detallada de estos consumos se encuentra en el Apéndice B. Teniendo estos consumos y la cantidad de animales por especie obtenida a partir de la encuesta realizada en GPH-UIS & CDMB (GPH-UIS & CDMB, 2017), se pudo obtener el consumo total pecuario de la zona de estudio.

3.4 Oferta

La oferta de agua de la fuente hídrica (oferta de agua azul), fue obtenida de los resultados del proyecto realizado por el Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH – UIS), con financiación de la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), en el cual se analizaron parámetros de cantidad y calidad de la oferta hídrica en la zona de estudio ((GPH-UIS & CDMB, 2017), (Hernández & Domínguez, 2018)). Por su parte, la oferta de agua asociada a la precipitación (oferta de agua verde), se obtuvo de datos históricos de este parámetro, proporcionados por el IDEAM (IDEAM, 2018b). Como se menciona en el numeral 3.2, esta oferta se contextualizó al año crítico seco con la ayuda del método SPI.

3.5 Estrategias de integración

Con base en los resultados del balance hídrico aportado por CROPWAT, se determinó si el aporte de agua verde puede compensar la demanda de agua verde, o, si hay un déficit que debe suplirse mediante otras fuentes de abastecimiento. A partir de los resultados, se revisaron diversas estrategias de integración para suplir integralmente las necesidades de agua de los pobladores (consumo humano, pecuario y agrícola), buscando tener en cuenta sus medios de sustento.

Las opciones tecnológicas consideradas para la integración de usos múltiples y oferta fueron: i) Sistema de abastecimiento existente; ii) Sistema de abastecimiento único; iii) Sistema de captación y almacenamiento exclusivo para riego; iv) Aprovechamiento de agua lluvia; v) Sistemas de riego individuales; vi) Sistema de reutilización; y vii) Optimización del método de riego. Estas opciones tecnológicas fueron evaluadas considerando cinco criterios de selección. C1) Cobertura de la demanda: se puntuó de acuerdo con los usos que

suple en términos de cantidad, de esta forma, a coberturas de usos domésticos o pecuarios se les asignó 1 punto, mientras que cobertura de uso agrícola se puntuó con 2 puntos; C2) Necesidad de tratamiento; C3) Necesidad de fuentes adicionales de suministro; C4) Nivel de gestión local; C5) Aprovechamiento de infraestructura existente. Los criterios de C2 al C5 responden a las preguntas del Diagrama 1, de esta manera se puntuó cada pregunta según su respuesta (C2, C3 y C4: SI= 0 puntos, NO= 1 punto; C5: SI= 1 punto, NO= 0 puntos) Al final, se filtraron las opciones tecnológicas con mayor puntaje y se plantearon combinaciones entre ellas para evaluarlas como estrategias de integración.

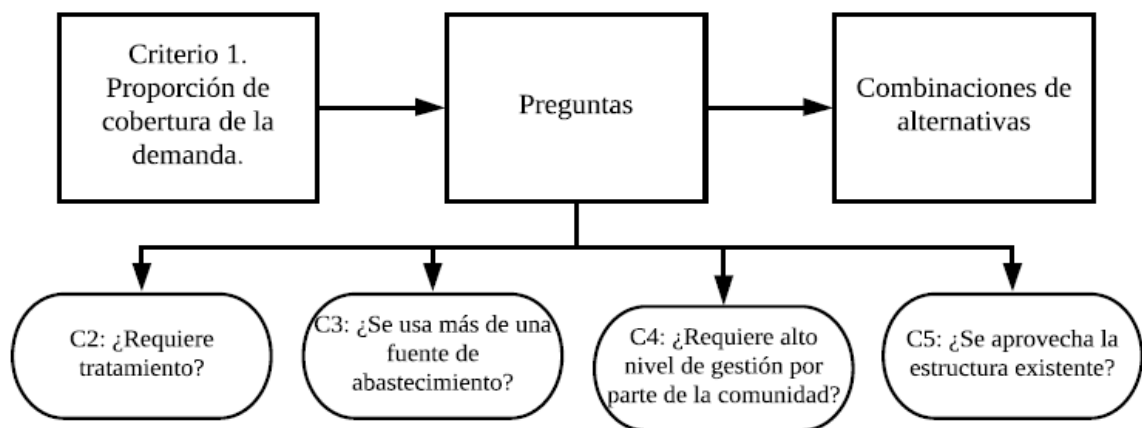


Figura 1. Criterios de selección de las opciones tecnológicas.

Las estrategias de integración que se evaluaron son i) Sistema de abastecimiento colectivo para todos los usos (EI1); ii) Sistema de abastecimiento colectivo para usos doméstico y pecuario + sistemas individuales para uso agrícola (EI2); iii) Sistema de abastecimiento colectivo para usos doméstico y pecuario + sistemas individuales para uso agrícola + optimización del método de riego (EI3).

Las estrategias mencionadas anteriormente se evaluaron en términos de cantidad, por lo cual se proyectaron las demandas doméstica, pecuaria y agrícola para cada una de ellas. Para esto, se determinó un período de diseño para proyectar las demandas de agua, teniendo en cuenta las recomendaciones del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo en (Resolución

0330 - 2017, n.d.). Una vez definido el período de diseño, se proyectó la población para este periodo (Ecuación 3).

$$P_d = P_a(1 + 0.01r)^n \quad (3)$$

P_d : Población de diseño [hab]

P_a : Población actual [hab]

r : Tasa de crecimiento anual [%]

n : Periodo de diseño [años]

La tasa de crecimiento anual se calculó según la Ecuación 4, sabiendo que la población inicial es la referente al año 1990, cuando se asentaron las primeras familias en la zona y, la población final se refiere a la población del año 2017 (GPH-UIS & CDMB, 2017).

$$r = \ln\left(\frac{P_f}{P_i} * \frac{1}{t} * 100\right) \quad (4)$$

P_f : Población final [hab]

P_i : Población inicial [hab]

t : Tiempo entre censos [años]

La proyección de las demandas implica también, el cálculo de la dotación bruta (Ecuación 5), que considera las pérdidas que pueden ocurrir en el sistema. La dotación neta para este caso será la suma de las demandas doméstica y pecuaria, como un consumo per cápita.

$$D_{bruta} = \frac{D_{neta}}{1 - \%pérdidas} \quad (5)$$

D_{bruta} : Dotación bruta [l/hab/día]

D_{neta} : Dotación neta [l/hab/día]

Para la proyección de la demanda agrícola se tuvo en cuenta el porcentaje de variación de los mosaicos de pastos y cultivos en la cuenca del río Jordán, ya que muchos de los terrenos que se encuentran identificados como pastos, pueden corresponder a extensiones que son usadas para cultivo, pero al momento de las capturas satelitales pueden ser suelos que se encuentran en descanso, siendo usados para pastoreo temporal con el fin de que el suelo no

pierda su fertilidad. Cabe recalcar que el aumento en este tipo de cobertura implica la ampliación de la frontera agrícola en el ecosistema de páramo. Para este análisis se tuvieron en cuenta valores de área para diferentes años y sus porcentajes de variación, datos obtenidos de Macías and Omaña (Macías & Omaña, 2018). Se calculó el porcentaje de variación entre el año 2017 y el periodo de diseño, se afectó la demanda de agua azul para riego con este porcentaje y, se calculó la demanda agrícola usando la Ecuación 5. La Figura 2, sintetiza las etapas del proceso metodológico previamente descrito.

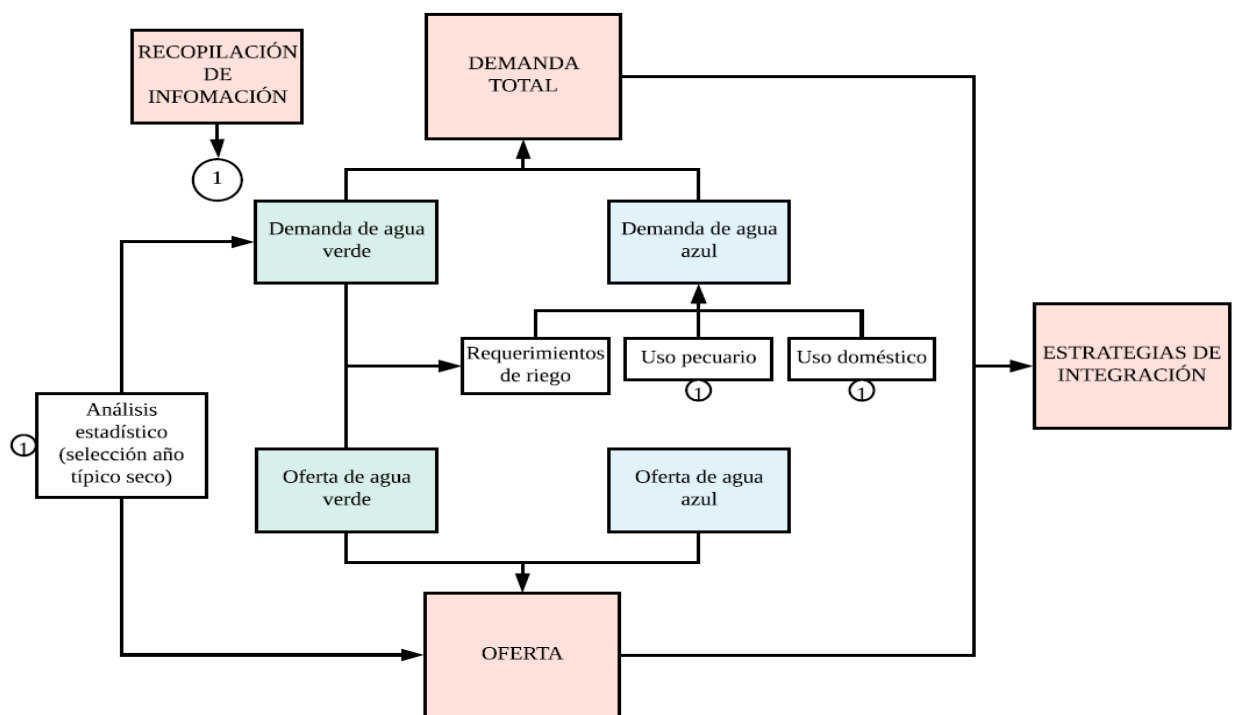


Figura 2. Proceso metodológico.

4. Resultados

La base de partida para los cálculos de demandas de agua fue la elección del año típico seco, esta elección se realizó con el método SPI, arrojando que el año 2001 fue un año de sequía pronunciada con un periodo de retorno de 19 años, por lo tanto, se identificó como un año crítico y se usaron los datos meteorológicos respectivos a este. Cabe recalcar que el año 2001 no es el año con la peor sequía en la zona, sino un año seco, cuya ocurrencia se da con más

frecuencia. El año más seco según los registros históricos y el método SPI es el año 1973, seguido del año 1992 y como el tercer año más seco se encuentra el año 2001. La elección de este año garantiza que la aplicabilidad de las estrategias de integración de los usos del agua se mantendrá, siempre que la precipitación no caiga por debajo de la del año de referencia. La implementación del SPI para la selección del año crítico se encuentra en el Apéndice C.

4.1 Demanda total

4.1.1 Demanda de agua verde. El patrón de siembra de los cultivos en la zona obtenido a través de una entrevista con un agricultor típico de la zona consiste en: i) división de los lotes en cuartos de hectárea, a los que se denominan “los cortes”; ii) siembra de uno de los “cortes”; iii) cosecha del “corte” pasados 5 meses, que consiste en quitarle a la planta la mayoría de los gajos, siempre dejando algunos para iniciar nuevamente el ciclo; iv) segunda cosecha luego de cuatro meses. En la zona, es común encontrar que, de un corte a otro, la diferencia en el desarrollo es de un mes. La cebolla larga no tiene un periodo de siembra definido, puede ser sembrada inicialmente en cualquier época del año, no obstante, los pobladores manifiestan la preferencia de no sembrar por primera vez, entre los meses de diciembre a febrero; el corte puede ser productivo por tiempo indefinido, de modo que la rotación de cultivos con fines de recuperación de la fertilidad del suelo no es una práctica común en este cultivo. Posterior a la definición de los ciclos y patrones de cultivo se procedió a la implementación del software CROPWAT 8.0, en donde se pudo calcular la demanda de agua verde (ET_c) y hacer el balance hídrico con la oferta de agua verde (precipitación). En el Apéndice D se puede encontrar los datos de entrada para cada apartado del software. Aclarando esto, se propuso el patrón de cultivo ilustrado en la Figura 3, tomando como unidad de análisis un lote con extensión de una hectárea que se divide en 4 lotes de igual proporción cada uno con un corte de siembra.

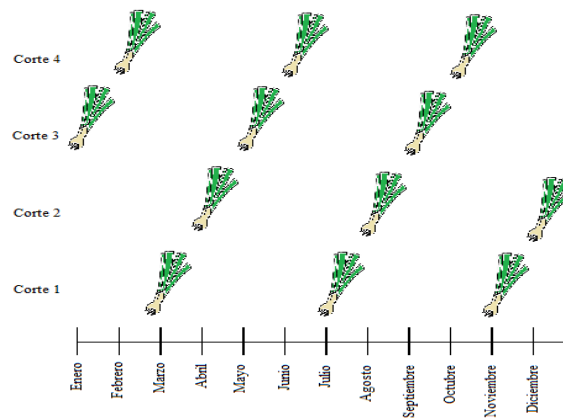
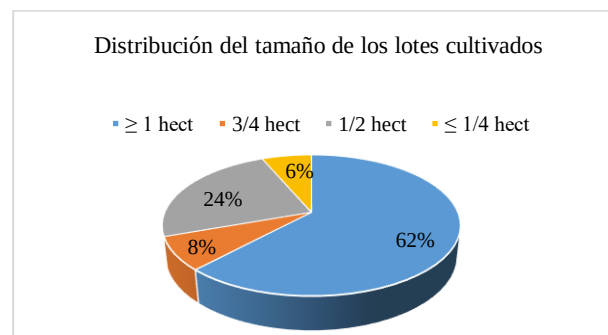


Figura 3. Patrón de siembra y cultivo típico en la vereda El Progreso.

De esta forma, se asume que los habitantes con más de una hectárea cultivada seguirán el patrón de los cuatro cortes al tiempo. Los habitantes con 0.75 hectáreas se ajustarán a los cortes 1, 2 y 3. Los pobladores con media hectárea tendrán los cortes 1 y 2. Por último, quienes tengan 0.25 hectáreas o menos, sólo tendrán un corte y será correspondiente al patrón del corte 1. Esta distribución se propuso teniendo en cuenta el tamaño típico de los lotes cultivados en la zona (ver Figura 4).



Categoría	A total [Ha]	Cortes
≥ 1 Hectárea	24.5	1, 2, 3, 4
3/4 Hectárea	3	1, 2, 3
1/2 Hectárea	9.5	1, 2
≤ 1/4 Hectárea	2.5	1

Figura 4. Distribución del tamaño de los lotes cultivados en la vereda El Progreso.

La Figura 5 muestra el balance hídrico entre demanda y oferta de agua verde para el cultivo de la cebolla, durante la duración de la primera cosecha de cada uno de los cortes y con escala de diez días (decadías).

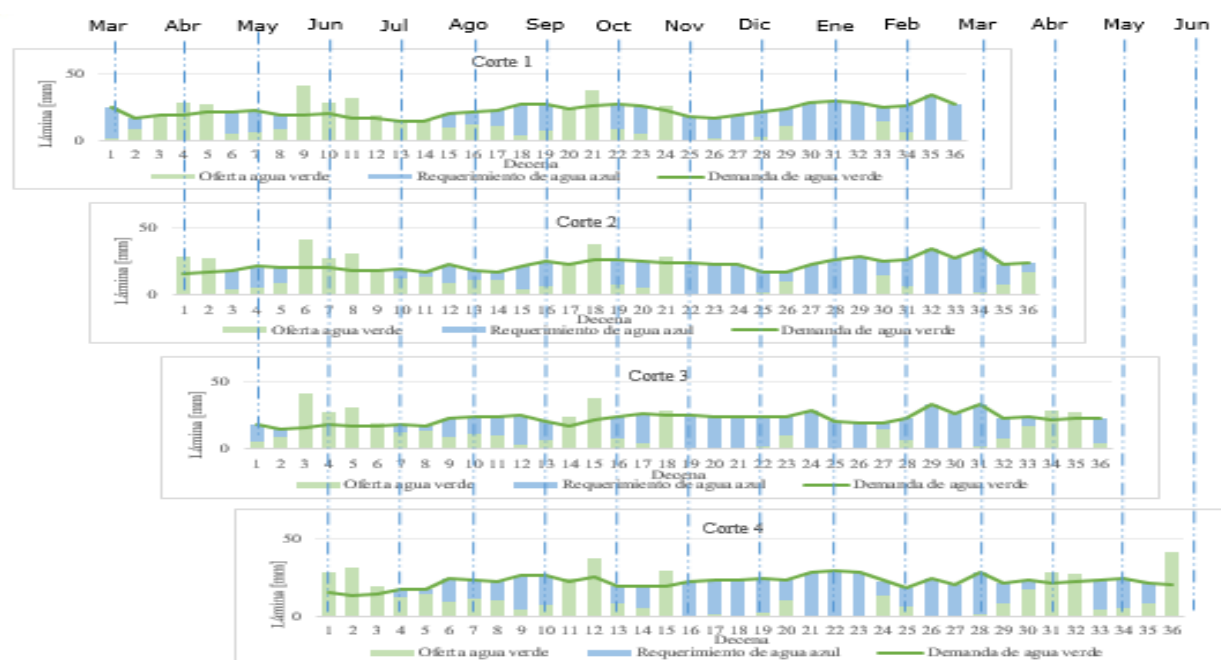


Figura 5. Balance hídrico agua verde para los cuatro cortes cultivados

Según los resultados de CROPWAT, y como se observa en la Figura 5, la precipitación no puede compensar en su totalidad a la demanda de agua por parte del cultivo (Etc), de esta forma es necesario suplir este déficit mediante el riego, proporcionado por otras fuentes de abastecimiento. El riego representado en la Figura 5, se refiere a una lámina neta de riego. De esta manera, se calcularon con CROPWAT los días en que es necesario complementar con riego el cultivo y el caudal bruto de agua azul requerido para ello.

4.1.2 Demanda de agua azul. Según el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (Resolución 0330 - 2017, n.d.), la dotación neta máxima para consumo doméstico, de acuerdo a las características de la zona de estudio equivale a 120 [L/día-persona]. La Tabla 2 muestra los consumos por especie y la demanda pecuaria total para el año 2017 para la comunidad de los Andes – El Progreso. Con el consumo pecuario, la dotación neta máxima y la población, se pudo obtener la demanda total para fines pecuarios y usos domésticos (Tabla 3).

Tabla 2.

Consumo por especie vereda El Progreso (2017).

Especie	Cantidad	Consumo [m^3 /mes]
Vacunos	56	193.2
Ovinos	5	1.6
Caprinos	79	15.6
Aves	245	17.6
Demanda pecuaria total		228

Tabla 3.

Demanda agua azul vereda El Progreso (2017).

Uso	Consumo [m^3 /mes]
Doméstico	1,224
Pecuario	228
TOTAL	1,452

Para incorporar a los datos de la lámina de riego (Gráfico 3), parámetros que afectan el aprovechamiento del agua, como el método de riego, los valores de requerimiento de agua azul para el riego complementario fueron afectados teniendo en cuenta una eficiencia en el método de riego más usado en la zona, el riego por aspersión del 60% (ver Tabla 4).

Tabla 4.

Requerimientos de agua azul cultivo de cebolla, vereda El Progreso (riego por aspersión).

Mes	Requerimiento agua azul [m^3]
Enero	30,843
Febrero	28,447
Marzo	23,614
Abril	4,272
Mayo	5,795
Junio	1,469
Julio	3,541
Agosto	12,580
Septiembre	13,020
Octubre	11,464
Noviembre	20,148
Diciembre	18,107
Promedio [m^3 /mes]	14,441

4.2 Demanda total

Los resultados de la clasificación según el método SPI para el año 2001 y 2017 fueron seco y normal respectivamente. Contando con la serie histórica de los caudales del Río Jordán y con la clasificación del SPI para estos años, se filtraron los años en que se presentaban las mismas categorías de los años 2001 y 2017. Posterior al filtro se comparó cada caudal correspondiente con los demás caudales de los demás años (Tabla 5). Se tomó un porcentaje de variación promedio y este se aplicó al caudal de la fuente en la zona de estudio.

Tabla 5.

Porcentajes de variación entre años secos y años normales.

Año		1973	1974	1978	1987	1991	1992	1993	1996
	Clasific	seco	normal	normal	normal	normal	seco	normal	normal
1973	Seco	-	7.3	78.3	22.7	112.9	-	63.4	98.7
1974	normal	7.9	-	-	-	-	2.2	-	-
1978	normal	43.9	-	-	-	-	49.2	-	-
1987	normal	18.5	-	-	-	-	26.1	-	-
1991	normal	53.0	-	-	-	-	57.4	-	-
1992	Seco	-	2.2	96.7	35.4	134.8	-	80.3	119.2
1993	normal	38.8	-	-	-	-	44.5	-	-
1996	normal	49.7	-	-	-	-	54.4	-	-
PROMEDIO		54.1							

El sistema de abastecimiento en época de verano en el 2017 proporcionó un caudal de 2.9 [l/s] (GPH-UIS & CDMB, 2017), aplicando el porcentaje de variación para el año de sequía, el caudal captado se estimó en 1.33 [l/s], lo que equivale a 3,447 [m^3 /mes]. De acuerdo con las normas acordadas por la comunidad para el uso del agua del acueducto, Esta oferta de agua está destinada a suplir la demanda de agua azul correspondiente al uso doméstico y pecuario [12] (ver Tabla 6).

Tabla 6.

Balance hídrico agua azul vereda El Progreso.

Uso doméstico y pecuario [m^3 /mes]	
Demanda	1,452
Oferta	3,447
Reserva	1,995

Según el balance hídrico de la Tabla 6, el sistema de abastecimiento proporciona una reserva de agua que, en teoría, no es utilizada. Teniendo en cuenta los requerimientos de agua azul del cultivo de la cebolla (14,441 [m^3 /mes]), esta reserva (1,995 [m^3 /mes]) podría ser utilizada para cubrir parte del riego complementario. Así, la demanda de agua azul es mitigada en su totalidad por la oferta, y la reserva que queda, en promedio, puede cubrir los requerimientos de agua azul de la cebolla en un 14%.

4.3 Estrategias de integración

Según la encuesta realizada por GPH-UIS (GPH-UIS & CDMB, 2017), las principales fuentes de abastecimiento de agua en la zona son la precipitación, nacimientos, pozos y el acueducto que se alimenta de la Quebrada las Puentes, siendo esta última la principal fuente de suministro de la zona. Si bien los habitantes de la vereda El Progreso manifestaron en la encuesta no usar el agua del acueducto para fines agrícolas, observaciones en campo, charlas con administradores del sistema y la medición de la demanda del tanque de almacenamiento, indicaron que el recurso si está siendo utilizado para actividades de riego de los cultivos. La Tabla 7 muestra estas fuentes, y los usos que suple cada una de ellas según la encuesta realizada.

Tabla 7.

Fuentes y usos del agua en la vereda El Progreso.

Fuentes de agua	Infraestructura	Usos	% Uso
Quebrada las Puentes	Sistema de abastecimiento	Doméstico	95
		Pecuario	39
		Agrícola	0
	Conexiones individuales	Doméstico	2
		Pecuario	32
		Agrícola	67
Nacimiento	Conexiones individuales	Doméstico	4
		Pecuario	13
		Agrícola	16
Pozos	Conexiones individuales	Doméstico	2
		Pecuario	13
		Agrícola	18
Precipitación	Captaciones artesanales	Doméstico	0
		Pecuario	3
		Agrícola	0

La Tabla 8 muestra los resultados de la evaluación de las opciones tecnológicas según los cinco criterios que se muestran en el Diagrama 1. Teniendo en cuenta las opciones tecnológicas con mayor puntaje, se plantearon combinaciones entre ellas para satisfacer los cinco criterios definidos, de modo que, se cubra la totalidad de la demanda, el tratamiento se proporcione sólo al uso doméstico y pecuario, se adapten a la capacidad de gestión local, se aprovechan fuentes alternativas de abasto disponibles y se pueda emplear la infraestructura existente.

De acuerdo con los puntajes obtenidos por las opciones tecnológicas mostrados en la Tabla 8, se decidió definir como estrategias a evaluar desde el punto de vista de la oferta y la demanda: i) Sistema de abastecimiento colectivo para todos los usos, ii) Sistema de abastecimiento colectivo para usos doméstico y pecuario + sistemas individuales para uso agrícola. iii) Sistema de abastecimiento colectivo para usos doméstico y pecuario + sistemas individuales para uso agrícola + optimización del método de riego. La evaluación de cada

una de estas combinaciones se realizó en términos de cantidad, comparando oferta vs demanda para todos los casos.

Tabla 8.

Puntaje de las opciones tecnológicas.

Opción tecnológica	Criterio 1			Preguntas				PUNTAJE
	Dom	Pec	Agr	C2	C3	C4	C5	
Sistema de abastecimiento existente	1	1	0	0	1	0	1	4 puntos
Sistema de abastecimiento único	1	1	2	0	1	0	0	5 puntos
Sistema de abastecimiento exclusivo para riego	0	0	2	1	0	0	0	3 puntos
Aprovechamiento de agua lluvia	0	0	0	0	1	1	0	2 puntos
Sistemas de riego individuales	0	0	2	1	0	1	1	5 puntos
Sistema de reutilización aguas residuales	0	0	0	0	1	0	0	1 puntos
Optimización del método de riego	0	0	1	1	1	0	1	4 puntos

4.3.1 Sistema de abastecimiento colectivo para todos los usos. El planteamiento de un sistema de abastecimiento único colectivo implica la cobertura y el tratamiento de agua para todas las demandas del recurso. De esta manera, se determinó un periodo de diseño de 25 años, una población proyectada de 906 habitantes, una dotación neta de 142.4 [l/hab/día] y un porcentaje de pérdidas de 30% en el sistema. Así, la proyección para las demandas de agua doméstica y pecuaria es:

$$D_{bruta}(dom + pec) = \frac{142.4}{1 - 0.3} = 203.4 \text{ [l/hab/día]}$$

$$D_{proyectada}(dom + pec) = 203.4 * 906 = 184,306 \text{ [l/día]}$$

Según lo anterior, la demanda doméstica y pecuaria proyectada es 5,529 [m³/mes]. En cuanto a la proyección de la demanda agrícola, la Tabla 9 muestra los años y el porcentaje de variación respectivo de los mosaicos de pastos y cultivos de la cuenca del río Jordán. Con

estos valores se pudo establecer una tendencia lineal para el cambio del área cultivada, luego, se proyectó el área cultivada para el año 2017 y posteriormente para el año 2042, en el que se cumple el periodo de diseño. Teniendo los valores del área cultivada para estos años, se determinó un porcentaje de variación (Tabla 9), con el cual, se pudo proyectar la demanda agrícola para el periodo de diseño.

Tabla 9.

Porcentajes de variación del área cultivada en la cuenca del río Jordán.

Año	A [Ha]	% variación
1987	1555.92	
1997	2078.81	34
2015	3106.49	49
2017	3210.89	
2042	4600.44	43

Nota: Adaptada de Y. Macías and H. Omaña, “VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA CORINE LAND COVER PARA GENERACIÓN DE MAPA DE COBERTURA DEL SUELO: CASO CUENCA DEL RÍO JORDAN (TONA, SANTANDER).

Posteriormente se tomó el promedio de los requerimientos de agua azul para el cultivo de la cebolla expresados en la Tabla 4, que equivale a 14,441 [m^3/mes], se afectó este promedio con el porcentaje de variación calculado, se tomó en cuenta el porcentaje de pérdidas del 30% en el sistema y finalmente se calculó la demanda agrícola proyectada.

$$D_{proyectada}(agrícola) = \frac{14,441(1 + 0.433)}{1 - 0.3} = 29,563 [m^3/mes]$$

Por lo tanto, la demanda proyectada total es:

$$D_{proyectada}(total) = 35,092 [m^3/mes]$$

Por su parte, la Quebrada Las Puentes en el año 2017, en época seca, trasportó un caudal promedio de 18 [l/seg], el cual fue afectado con el porcentaje de variación calculado en 4.3 para contextualizar la oferta entorno al año crítico seco estudiado. Además para garantizar la conservación de un caudal ecológico en la quebrada, que debe ser como mínimo el 25% del caudal medio mensual multianual menor de la corriente estudiada (Izquierdo & Madroñero, 2014) y, teniendo en cuenta que la oferta está calculada en función de un año seco, además de que no se cuenta con aforos mensuales multianuales, se afectará la oferta

directamente con este porcentaje para garantizar este caudal ecológico. De esta manera la cantidad de agua que puede ser extraída de la Quebrada las Puentes es:

$$Oferta = 18 * 54\% * 75\% = 7.29 [l/seg]$$

$$Oferta = 18,896[m^3/mes]$$

Según los cálculos y como se observa en la Figura 6, la demanda proyectada es mucho mayor a la oferta disponible en la zona, por lo que la idea de un sistema colectivo único en donde se suplan todas las demandas de agua no es viable en su proyección.

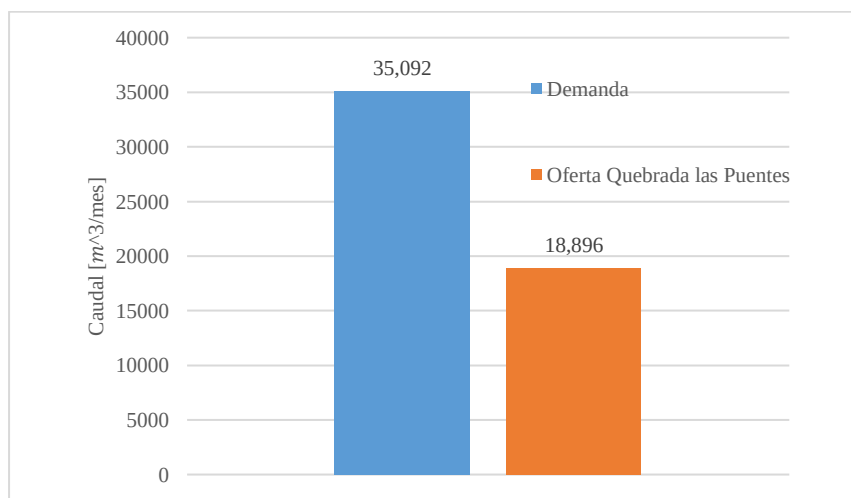


Figura 6. Oferta y demanda según la proyección del sistema colectivo para todos los usos.

4.3.2 Sistema de abastecimiento colectivo para usos doméstico y pecuario + sistemas individuales para uso agrícola. Esta estrategia se basó en estudiar las condiciones existentes del sistema de abastecimiento ya que como se vio en la Tabla 6, el sistema de abastecimiento actual no presenta dificultades en suplir las demandas doméstica y pecuaria bajo las condiciones actuales de población. El tratamiento en este punto sólo es requerido para los usos domésticos y pecuarios más no para los usos agrícolas. Este tratamiento ya fue estudiado y dimensionado en Ortiz and Bustos (Ortiz & Bustos, 2018), donde se propuso el diseño de un filtro lento de arena. El proceso de cálculo de la oferta y la demanda es el mismo que el descrito en el literal anterior, sin embargo, la demanda doméstica y pecuaria serán abastecidas exclusivamente por el sistema de abastecimiento colectivo, mientras que la

demanda agrícola será mitigada mediante diversas fuentes de abastecimiento, por medio de sistemas de conexión individuales por parte de los pobladores a cada una de estas fuentes. La Figura 7 compara las demandas doméstica y pecuaria con la oferta disponible en la Quebrada las Puentes.

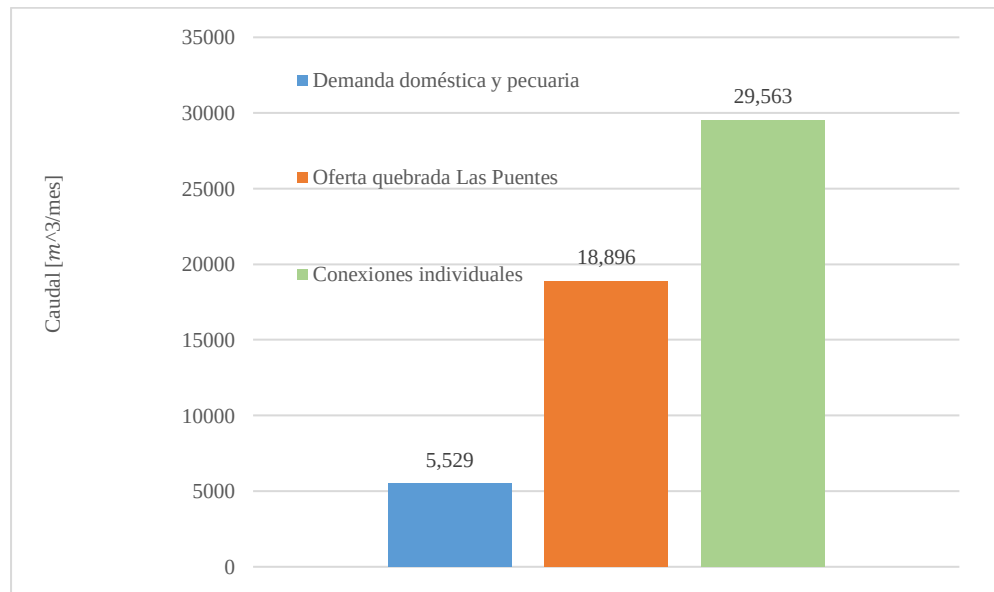


Figura 7. Oferta y demanda para usos doméstico y pecuario y, necesidades de riego de las conexiones individuales.

Las conexiones individuales para suplir la demanda agrícola deben ser realizadas por cada poblador según sus necesidades y condiciones particulares. Las fuentes de abasto para estas conexiones pueden ser cualquiera de las estipuladas en la Tabla 7.

4.3.3 Sistema de abastecimiento colectivo para usos doméstico y pecuario + sistemas individuales para uso agrícola + optimización del método de riego. Esta estrategia integra los parámetros descritos en el literal anterior junto con el planteamiento de una optimización en la eficiencia del método de riego por aspersión, bien sea mejorando parámetros técnicos de este método o cambiando el método de riego. Algunos aspectos técnicos, de bajo costo, que podrían mejorarse son la localización de los aspersores, cambios de boquillas para garantizar la presión deseada, reguladores de presión para garantizar caudales constantes y garantizar la uniformidad de humedecimiento del área cultivada

(Howell, 2015). Métodos de riego con mayor eficiencia de aplicación son la micro aspersión y el goteo (Howell, 2015). Este apartado pretende evaluar los requerimientos de riego para el cultivo de la cebolla si la eficiencia de riego fuese de 80%. Eficiencias mayores a la establecida, implica mejoras técnicas más profundas, lo que implica mayores costos para los pobladores. La Tabla 10 muestra los requerimientos de agua azul del cultivo de la cebolla teniendo en cuenta el aporte de la precipitación, para las condiciones actuales (eficiencia del 60%) y para una eficiencia proyectada del 80%.

Tabla 10.

Requerimientos de agua azul del cultivo de la cebolla para eficiencias del 60% y 80%.

Mes	Eficiencia	
	60%	80%
Enero	30,843	23,024
Febrero	28,447	22,956
Marzo	23,614	17,668
Abril	4,272	3,193
Mayo	5,795	4,322
Junio	1,469	1,086
Julio	3,541	2,120
Agosto	12,580	8,113
Septiembre	13,020	9,408
Octubre	11,464	8,630
Noviembre	20,148	15,078
Diciembre	18,107	13,473
Promedio [m^3 /mes]	14,441	10,756
% Mitigado	26%	

Si bien, aunque con esta estrategia los pobladores deben establecer sus sistemas de conexiones individuales, un enfoque más técnico y elaborado en el método de riego implica una reducción significativa en la demanda de agua por parte de los cultivos. Con el porcentaje de mitigación, la proyección de la demanda agrícola también es mitigada. La Figura 8 muestra todas las demandas para todos los usos, además de la demanda agrícola según la eficiencia.

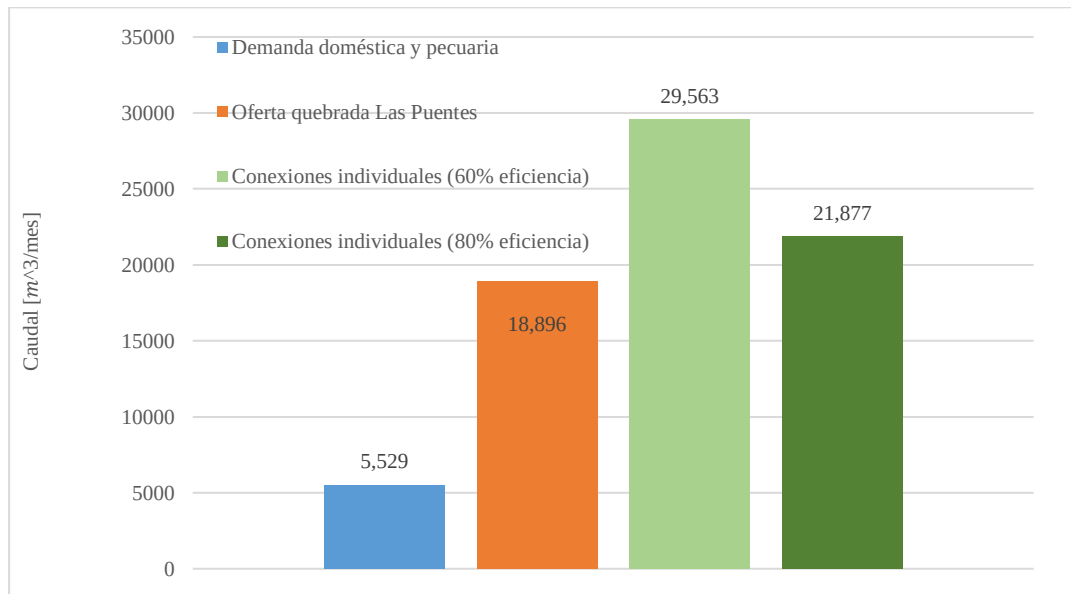


Figura 8. Oferta y demanda del sistema colectivo para usos doméstico y pecuario y, necesidades de riego de las conexiones individuales con mejora de eficiencia.

5. Discusión

Las dos principales fuentes de abastecimiento de los pobladores son la quebrada Las Puentes, de la que se extrae agua para el sistema de abastecimiento y para conexiones individuales para su uso en la agricultura y, la precipitación. El uso de los datos de precipitación del año 2001 permitió evaluar tanto la demanda de agua verde (agrícola), como la oferta de agua verde (precipitación), bajo un periodo de sequía, por lo tanto, años con precipitaciones mayores representan un alivio en el estrés hídrico de la zona y, en consecuencia, demandas menores a las estudiadas en este documento. Por su parte, el caudal disponible en la quebrada Las Puentes también se vio afectado por la sequía del año 2001, por lo tanto, años con sequías menores implican caudales mayores en la quebrada y más capacidad de captación en el sistema de abastecimiento y en las conexiones individuales de los pobladores. Lo anterior implica la aplicabilidad de este trabajo a años con precipitaciones semejantes o mayores a las del año 2001.

Las condiciones actuales del sistema de abastecimiento de la zona de estudio, en términos de cantidad de agua disponible, permiten pensar que el agua es más que suficiente para suplir los usos domésticos de los habitantes, incluso, aun incluyendo los usos pecuarios el recurso no escasearía. No obstante, la realidad puede ser diferente al considerarse el uso del acueducto para actividades agrícolas. El uso del agua para fines agrícolas presenta la mayor demanda del recurso en la zona de estudio. Esta demanda de agua es mitigada en parte por la precipitación, sin embargo, esta precipitación no es suficiente para cubrir la totalidad de la demanda. De esta forma, es necesario aplicar riego complementario. La demanda de este riego complementario representa el 91% de la demanda de agua azul total en donde se incluyen los usos domésticos y pecuarios. Según los resultados de este estudio, el sistema de abastecimiento colectivo de la zona no está en capacidad de suplir completamente la demanda de uso múltiple de sus beneficiarios (incluyendo riego), y, aunque se deben garantizar los medios de sustento de los habitantes, la comunidad administradora debe conocer el impacto del uso del agua para riego por parte de todos los usuarios, de acuerdo a demandas proyectadas bajo posibles escenarios de sequía, para evitar el estrés sobre el sistema y asegurar el acceso al servicio para todos los habitantes.

Es preciso mencionar que, bajo las condiciones actuales en la zona de estudio, de presentarse condiciones de sequía similares a las del año 2001, la quebrada las Puentes estaría al límite de su capacidad oferente, ya que en condiciones secas sólo puede aportar 18,896 [m^3 /mes] frente a una demanda total de agua azul de 15,893 [m^3 /mes]. Esta situación hace necesario implementar estrategias para integrar los usos múltiples de los pobladores.

Las estrategias consideradas en el numeral 4 se evaluaron bajo un escenario que contempla las tendencias históricas de aumento de actividades antrópicas en los ecosistemas de páramo y no incorporó las iniciativas de delimitación y gestión del páramo que se desarrollan por el gobierno para evitar la expansión del uso de suelo para actividades

antrópicas. Bajo este escenario, se evidenció que el diseño de un sistema colectivo que abarque todos los usos del agua no es posible en su implementación, debido a la gran demanda de agua que esto supone y a la incapacidad de la fuente superficial usada actualmente para aportar dicha cantidad, además de necesitar un tratamiento básico, ya que parte del agua captada suple las necesidades del consumo humano, lo que quiere decir que se estaría tratando la totalidad del agua captada en el sistema aunque sólo se necesite tratamiento para una fracción de ella. Por otra parte, un sistema colectivo único que contemple suplir las demandas doméstica y pecuaria es posible desde el punto de vista de la demanda y la disponibilidad de agua. Esta opción puede incluir el diseño de un nuevo sistema con las proyecciones realizadas o la ampliación del sistema existente. Por su parte la demanda complementaria a la precipitación para usos agrícolas puede ser abastecida por las diferentes fuentes de abastecimiento cercanas a la zona, ya que se cuenta con diferentes nacimientos que se convierten en quebradas y se cuenta con la presencia de estanques. Estos sistemas de abastecimiento individual podrían ser implementados por cada propietario, según sus necesidades particulares y teniendo en cuenta las necesidades reales de riego de sus cultivos; este trabajo puede ser usado como guía para calcular las necesidades reales de riego para cualquier año. Además de estas alternativas, la optimización de los métodos de riego implementados es de gran importancia al momento de minimizar el uso del agua y aliviar el estrés hídrico en la zona, ya que al ser tan grande esta demanda de riego, una mejora en la eficiencia de aplicación implica el ahorro de gran cantidad del recurso, además de ahorros en costos monetarios a largo plazo, asociados por ejemplo a expansiones del sistema.

6. Conclusiones

Según los resultados de este trabajo, las características de la zona de estudio, en cuanto a cantidad disponible del recurso, suplen sin problema los requerimientos de agua para usos

doméstico y pecuario de los pobladores (considerando los patrones actuales). La dificultad surge al plantear la necesidad del uso del agua para fines de riego, ya que, la demanda de agua agrícola representa la mayoría de los requerimientos de agua en la zona, por lo que armonizar este uso con las demás demandas y al mismo tiempo con la oferta de agua es indispensable.

Según la evaluación de las estrategias de integración consideradas en este documento, la opción más favorable de acuerdo a las características de la zona de estudio, es el uso de un sistema de abastecimiento colectivo para suplir las necesidades de agua doméstica y pecuaria (pequeña escala), ya que plantear un sistema colectivo que cubra adicionalmente los requerimientos de riego de los cultivos, implica la captación de gran cantidad de agua mediante un mismo sistema de abasto que se alimente de un mismo cuerpo de agua, sin embargo en el punto actual de captación, la quebrada Las Puentes no puede proporcionar tal cantidad de agua. Por lo tanto, el mejor sistema para garantizar el acceso al recurso para fines agrícolas, son las conexiones individuales por parte de cada poblador a las fuentes de abastecimiento más cercanas y a su disposición, no obstante, cada poblador debe ser consciente del impacto de estas conexiones a las fuentes de las que captan el recurso, ya que un exceso en las captaciones puede producir estrés hídrico en estas fuentes.

El desarrollo de este trabajo se realizó bajo diferentes supuestos e idealizaciones de los comportamientos de las demandas en un nivel teórico. Las metodologías de estimación de las demandas de agua para uso múltiple, pueden ser mejoradas mediante mediciones en el sistema de abastecimiento para validar la demanda doméstica y pecuaria, frente a mediciones directas en campo de evapotranspiración de cultivo para validar la demanda agrícola.

Referencias Bibliográficas

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. In *Estudio FAO Riego y Drenaje*. <https://doi.org/M-56>
- Anónimo. (1970). 6 *Humedales artificiales para depuración*. 79–90.
- Bedoya, M., Contreras, C., & Ruiz, F. (2010). Agua 2010. *Estudio Nacional Del Agua 2010*, 421.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Climate Prediction Center Internet Team. (n.d.). Drought Indices: Standardized Precipitation Index. Retrieved March 20, 2018, from <http://www.cpc.noaa.gov/products/Drought/Monitoring/spi.shtml>
- Dourojeanni, A., & Jouravlev, A. (2001). *Crisis de gobernabilidad en la gestión del agua* (Serie 35). Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- FAO. (n.d.). *Diseño de métodos de riego*. 39–53. Retrieved from http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/prior/recnat/pdf/MR_cap3.PDF
- Fernández, D., Martínez, M., Tavarez, C., Castillo, R., & Salas, R. (2009). Estimación de las demandas de consumo de agua. *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, SAGARPA*, 33.
- Frenken, K., & Gillet, V. (2012). Irrigation water requirement and water withdrawal by country. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 264. Retrieved from http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use_agr/index.stm
- GPH-UIS, & CDMB. (2017). *Evaluación De La Sostenibilidad De Abastecimientos De*

Agua Rurales Colectivos En Ecosistema De Páramo: Caso De Estudio Berlín (Santander – Colombia).

- Hassing, J., Ipsen, N., Jønch-Clausen, T., Larsen, H., & Lindgaard-Jorgensen, P. (2009). Integrated Water Resources Management in Action. *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.02.002>
- Hernández, C., & Domínguez, I. (2018). *Evaluación De La Sostenibilidad De Abastecimientos De Agua Rurales Colectivos En Ecosistema De Páramo, con énfasis en la oferta hídrica en cantidad y calidad: Caso De Estudio Berlín (Santander – Colombia)*. 34.
- Howell, T. A. (2015). Irrigation Efficiency. *United States Department of Agriculture (USDA)*, (January 2003). <https://doi.org/10.1081/E-EWS>
- IDEAM. (2018a). *SISTEMA DE INFORMACIÓN ESTACIÓN BERLÍN AUTOMÁTICA (otros datos climatológicos) 20180207084939*. Municipio de Tona.
- IDEAM. (2018b). *SISTEMA DE INFORMACIÓN ESTACIÓN BERLÍN AUTOMÁTICA (Precipitación) 20180129124354*. Municipio de Tona.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2003). Perfiles modales. In *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras*. Departamento de Santander.
- Izquierdo, M., & Madroñero, S. (2014). ECOLOGICAL FLOW REGIMEN , MANAGEMENT TOOL TO PRESERVE ACUATIC BIOTA. *Universidad Militar Nueva Granada - Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 77–94.
- Katsi, L., Siwadi, J., Guzha, E., Makoni, F. S., & Smits, S. (2007). Assessment of factors which affect multiple uses of water sources at household level in rural Zimbabwe - A case study of Marondera, Murehwa and Uzumba Maramba Pfungwe districts. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32(15–18), 1157–1166. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2007.07.010>

- Llambí, L. D., Soto-w, A., Borja, P., Soto-w, A., & Calle, T. (2012). *Páramos Andinos Ecología , hidrología y suelos de páram os*. (June 2014).
- Loaiza Cerón, W., Carvajal Escobar, Y., & Baquero Montoya, O. L. (2015). Índice estandarizado de precipitación (SPI) para la caracterización de sequías meteorológicas en la cuenca del río Dagua-Colombia. *Estudios Geográficos*, 76(279), 557–578. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201520>
- Macías, Y., & Omaña, H. (2018). *VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA CORINE LAND COVER PARA GENERACIÓN DE MAPA DE COBERTURA DEL SUELO: CASO CUENCA DEL RÍO JORDAN (TONA, SANTANDER)*. 1–90.
- Mckee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *AMS 8th Conference on Applied Climatology*, (January), 179–184. <https://doi.org/citeulike-article-id:10490403>
- ONU. (2011). *Agua y agricultura en la economía*. 1–8.
- Ortiz, C., & Bustos, J. (2018). ALTERNATIVAS PARA EL MEJORAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO EN EL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE LA VEREDA EL PROGRESO, EN EL PÁRAMO DE BERLÍN. *Universidad Industrial de Santander*, 28.
- Quevedo, D., & Peredo, M. (2015). *Clasificación De Años Secos , Normales Y Húmedos Mediante El Método Standardized Precipitation Index ...* (October).
- Renwick, M. (n.d.). A Guide to Multiple-Uses Water Services. *WINROCK INTERNATIONAL*, 31.
- Resolución 0330 - 2017*.
- Restrepo, I. (2004). Tendencias Mundiales en la Gestión de Recursos Hídricos: Desafíos para la Ingeniería del Agua. *Instituto CINARA, Facultad de Ingeniería, Universidad Del Valle*.

- Sistema de Información Agroclimática para el Regadío. (2015). *Cálculo de la precipitación efectiva*.
- Smits, S., & Mejía, T. (2011). *Guía para la Planificación e Implementación de Proyectos de Usos Múltiples del Agua*.
- Svoboda, M., Hayes, M., & Wood, D. (2012). Guía del usuario sobre el Índice normalizado de precipitación (OMM-Nº 1090). *Organización Meteorológica Mundial*, 1–23.
<https://doi.org/978-92-63-31090-3>
- Tosunoğlu, F., & Onof, C. (2017). Joint modelling of drought characteristics derived from historical and synthetic rainfalls: Application of Generalized Linear Models and Copulas. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 14(November), 167–181.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.11.001>
- Yacoub, E., & Tayfur, G. (2017). Evaluation and Assessment of Meteorological Drought by Different Methods in Trarza Region, Mauritania. *Water Resources Management*, 31(3), 825–845. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1510-8>

Apéndices

Apéndice A. Formulario de entrevista con agricultor de la zona

Se realizó una visita a la zona de estudio para determinar aspectos referentes a las iniciativas agrícolas que se presentan en la vereda. Se contactó con un agricultor y se mantuvo una charla a modo de entrevista por alrededor de media hora para discutir dichos aspectos. Las preguntas más relevantes se enuncian a continuación.

¿En qué fechas se realizan las primeras siembras?

¿Cuánto tiempo toma realizar la primera cosecha?

¿Cómo es el proceso de la resiembra?

Después de la primera cosecha, ¿cuánto tiempo toma realizar la segunda cosecha?

¿Cómo se divide en terreno para realizar las siembras?

Según lo anterior, ¿cuál es la diferencia de tiempo en el desarrollo del cultivo entre las divisiones?

¿Cuál es el método de riego empleado?

¿Cómo dividiría usted las etapas de desarrollo del cultivo?

Apéndice B. Tablas para la determinación de la demanda doméstica y pecuaria

Tabla B.1.

Consumo por especie.

Especie	Consumo (L/día)
Vacas adultas secas	57
Vacas adultas productoras	90 – 130
Lechones de 1kg	0.5
Cerdos en crecimiento de 13.6kg	2.6
Cerdos en última etapa de crecimiento	6.8
Cerdos en finalización de crecimiento	8 – 12
Ovinos en crecimiento	3
Ovinos a 1 mes de gestación	3
Ovinos a 2 meses de gestación	4.2
Ovinos a 3 meses de gestación	4.5
Ovinos a 4 meses de gestación	5.4
Ovinos a 5 meses de gestación	6.6
Cabras productoras de carne	4.2
Cabras productoras de leche	11.2
Conejas a 8 semanas de parto	4.5
Conejos a 8 semanas de edad	0.5
Conejos machos adultos	0.5
Conejas preñadas	0.5
Pollos de 0.4 kg	0.6
Pollos de 1.3 kg	1.6
Gallinas de 1.3 kg	3.3
Gallinas de 2.2 kg	5.5
gallinas de 4 kg	10

Nota: D. Fernández, M. Martínez, C. Tavarez, R. Castillo, and R. Salas, “Estimación de las demandas de consumo de agua,” *Secr. Agric. Ganad. Desarro. Rural. pesca y Aliment. SAGARPA*, p. 33, 2009.

Tabla B.2.

Demanda hídrica del sector aves.

Inventario avícola	Módulo de consumo fase de cría levante y terminación (L/día-animales)
Pollos y gallinas	240 (L/día-100 animales)
Patos	370 (L/día-100 animales)
Pavos	650 (L/día-100 animales)
Codornices	58 (L/día-100 animales)

Nota: Adaptado de M. Bedoya, C. Contreras, and F. Ruiz, “Agua 2010,” *Estud. Nac. del agua 2010*, p. 421, 2010.

Tabla B.3.

Demanda hídrica del sector de bovinos.

Inventario Bovino	Módulo de consumo fase de cría levante y terminación (L/día)
Machos y hembras de 0 - 12 meses	20 – 30
Machos y hembras de 12 - 24 meses	45
Machos y hembras de 24 - 36 meses	80 – 110
Mayor de 36 meses	80 – 115

Nota: Adaptado de M. Bedoya, C. Contreras, and F. Ruiz, “Agua 2010,” *Estud. Nac. del agua 2010*, p. 421,

2010.

Apéndice C. Implementación del método SPI

Tabla C.1.

Clasificación del SPI según el Centro de Predicción Climática.

Valores del SPI	Categoría
>2.0	Extremadamente lluvioso
1.5 a 2.0	Lluvioso
1.0 a 1.5	Moderadamente lluvioso
0.5 a 1.0	Ligeramente lluvioso
0.0 a 0.5	Normal
0.0 a -0.5	Normal
-0.5 a -1.0	Ligeramente seco
-1.0 a -1.5	Moderadamente seco
-1.5 a -2.0	Seco
≤ -2.0	Extremadamente seco

Nota: Adaptada de Climate Prediction Center Internet Team, “Drought Indices: Standardized Precipitation Index.” [Online]. Available: <http://www.cpc.noaa.gov/products/Drought/Monitoring/spi.shtml>. [Accessed: 20-Mar-2018].

Tabla C.2.

Clasificación de sequía 1970 - 2017

Año	Precipitación [mm]	Dist. Gamma	SPI	Clasificación	Periodo de retorno (años)
1970	639.4	0.371	-0.330	Normal	3
1971	719.9	0.598	0.249	Normal	2
1972	610.3	0.291	-0.551	Lig. Seco	3
1973	463.8	0.037	-1.790	Seco	27
1974	643.3	0.382	-0.301	Normal	3
1975	779.1	0.741	0.648	Lig. Lluvioso	1
1976	580.1	0.215	-0.788	Lig. Seco	5
1977	556.2	0.163	-0.982	Lig. Seco	6
1978	741.1	0.653	0.394	Normal	2
1979	890.4	0.911	1.346	Mod. Lluvioso	1
1980	856	0.872	1.137	Mod. Lluvioso	1
1981	847.6	0.861	1.085	Mod. Lluvioso	1
1982	867	0.886	1.204	Mod. Lluvioso	1
1983	616.7	0.308	-0.502	Lig. Seco	3
1984	561.9	0.175	-0.936	Lig. Seco	6
1985	610.2	0.290	-0.552	Lig. Seco	3
1986	882.9	0.903	1.301	Mod. Lluvioso	1
1987	708.9	0.568	0.172	Normal	2
1988	888.4	0.909	1.334	Mod. Lluvioso	1
1989	604	0.274	-0.600	Lig. Seco	4
1990	762.5	0.705	0.538	Lig. Lluvioso	1
1991	629.4	0.343	-0.405	Normal	3
1992	477.5	0.048	-1.663	Seco	21
1993	706.7	0.562	0.157	Normal	2
1994	608.6	0.286	-0.564	Lig. Seco	3
1995	902	0.922	1.416	Mod. Lluvioso	1
1996	638.4	0.368	-0.337	Normal	3
1997	544.8	0.141	-1.077	Mod. Seco	7
1998	741.8	0.655	0.399	Normal	2
1999	734.6	0.637	0.350	Normal	2
2000	584	0.224	-0.757	Lig. Seco	4
2001	483.7	0.054	-1.607	Seco	19
2002	505.2	0.078	-1.415	Mod. Seco	13
2003	646.3	0.390	-0.278	Normal	3
2004	724.1	0.609	0.278	Normal	2
2005	750.9	0.677	0.460	Normal	1
2006	791.2	0.766	0.727	Lig. Lluvioso	1
2007	724.5	0.611	0.281	Normal	2
2008	772.1	0.726	0.602	Lig. Lluvioso	1
2009	557.2	0.165	-0.974	Lig. Seco	6
2010	1000.6	0.976	1.984	Lluvioso	1
2011	1081.2	0.992	2.422	Ext. Lluvioso	1
2012	819.1	0.817	0.906	Lig. Lluvioso	1
2013	588.5	0.235	-0.722	Lig. Seco	4
2014	574.4	0.202	-0.834	Lig. Seco	5
2015	555.2	0.161	-0.990	Lig. Seco	6
2016	647.4	0.393	-0.270	Normal	3
2017	700	0.544	0.110	Normal	2

Apéndice D. Datos de entrada CROPWAT

Tabla D.1.

Datos de entrada apartado Clima/ETo.

TMIN [C]	TMAX [C]	% HUMEDAD	VIENTO [m/s]	INSOLACIÓN [hrs]
-6.6	15.4	89	1.9	10.5
-0.1	15.8	98	2.2	11.2
-0.1	16.4	89	2.8	9.2
-0.1	15.6	89	2.6	10.3
-9.6	15.2	93	2.6	11.2
-3.4	17.0	85	2.4	7.3
-7.6	15.6	85	2.1	10.6
5.4	15.8	95	1.9	7.6
4.8	15.6	95	2.0	7.6
-7.6	15.6	77	2.3	10.6
6.2	15.4	73	2.4	11.2
-0.1	14.2	89	1.9	6.7
-6.8	14.2	94	1.7	4.8
1.6	14.0	91	1.6	4.5
1.8	15.4	81	1.8	10.2
2.2	14.8	80	1.5	11.1
1.4	15.2	89	1.6	11.2
-7.8	14.6	89	0.9	11.3
-9.8	14.0	89	1.1	8.4
5.4	14.8	93	1.6	5.7
3.0	16.8	84	2.2	6.3
2.8	12.0	88	2.2	1.2
5.6	14.7	93	2.0	0.0
2.4	12.6	96	1.7	4.7
2.4	13.6	82	1.9	9.0
2.0	14.4	89	1.5	10.7
-8.4	15.4	87	1.9	8.9
5.0	14.7	87	1.6	5.3
5.8	13.4	94	1.7	4.9
6.6	11.8	91	1.7	1.2
-0.1	12.2	94	1.8	1.3

Nota: Sólo se muestra el mes de enero a modo de ejemplo. Los demás datos para los demás meses siguen la misma estructura mostrada.

Tabla D.2.

Datos de entrada apartado Precipitación [mm].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Ene	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.6	0	0	0	0	0	1.8	2.8	2.5
Feb	0	0	3.2	2.2	0.1	0	1.3	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-
Mar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.8	5.2	0.3	0	0	0.2	0.3	1.3	0.8	0.1	0.1	1.5	1	0	0	0	0.1	9.5	3.7	2.9	0.4	0.1
Abr	0	0	0	0	0	12.4	13.5	4.4	2.1	1.9	0.6	1.5	1.1	4	0	0	0.8	7.5	13.9	3.1	0.3	0.3	0	0.5	0	0.8	0	2	0.3	0.5	-
May	0	1.7	1	0	0	0	0.3	0.2	2	0.6	1	4	0.7	0.9	2	0.2	0.3	0.1	0.1	0	0.1	0.2	1.3	5.4	19.2	3.2	7.9	15.7	0.4	0.9	2
Jun	0	1.2	0	0	6.5	19.7	2.3	3	0	0.7	1.2	0.1	0.5	0	0.3	31.7	1.7	0.5	1.4	1.1	0.2	1.5	0.6	2.7	2.5	2.4	2	2.6	6.7	0.4	-
Jul	4	0	1.3	1.4	1.7	0	0	1.1	0	4	3.9	0	2	1	1	0	4.1	0.2	1.5	1.5	0.4	0	3.6	1.4	0	0	1.3	0.5	1	1.7	0.1
Ago	0	0	0.3	1	0	0.2	2.2	8	0.5	0.3	0.4	0.4	0.2	1.2	4.8	0.9	0	1.3	1	1.3	0.6	0	0	0	0	0	2.9	0	0.5	0	0.1
Sep	0.8	0	5.2	0	0	0	0	0	0.4	1.2	1	0	0.2	0	0	2.3	2	18.7	3	0.5	0	0	0	0	4.2	24.7	17	1	2.5	0	-
Oct	0	0	0	0	0.1	0.4	2.8	0.6	0.2	4.4	3.8	0	0	0	0	0	0	0	0	1.4	0.2	0	0	4.8	1	3.2	15.5	1.6	4.7	3.1	0.8
Nov	0	0.1	0	0	0	0	0.2	0.5	0	0	0	0	0	0	0.5	0.1	0	0	0	0.6	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0.3	-
Dic	0.4	0.2	0	0	0	0	0	0.4	1.4	0	0	0	0	2.3	1.5	5	2.5	0.1	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0.1	0	0	0	0

Tabla D.3.

Datos de entrada apartado Cultivos.

	Inicial	Desarrollo	Mediados	Final	Total
Kc*	0.7	-	0.99	0.99	-
Etapas [días]	20	26	46	30	122
Profundidad radicular	0.1	-	0.2	-	-
Agotamiento Crítico [fracción]	0.38	-	0.42	0.42	-
F. respuesta de rendimiento	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Altura del cultivo [m]	-	-	0.3	-	-

*La corrección de Kc siguió la siguiente expresión:

$$K_{c\ med/fin} = K_{c\ med/fin\ (tabla\ 1)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(HR_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$

 $K_{c\ med/fin}$: coeficiente de cultivo para la etapa media o final $K_{c\ med/fin\ (Tabla\ 1)}$: coeficiente de cultivo para la etapa media o final tomado de la Tabla 1 u_2 : velocidad del viento [m/s] HR_{min} : humedad relativa mínima.

Nota: Datos tomados de R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.

Tabla D.4.

Datos de entrada apartado Suelo.

Datos generales del suelo	
Humedad del suelo disponible total (CC-PMP) [mm/m]	160
Tasa máxima de infiltración de la precipitación [mm/día]	100
Profundidad radicular máxima [cm]	25
Agotamiento inicial de hum. del suelo [como % de ADT]	0
Humedad del suelo inicialmente disponible [mm/m]	160

Nota: Datos tomados de R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. para un perfil de suelo de tipo Franco y Franco Arenoso, clasificado en Instituto Geográfico Agustín Codazzi, “Perfiles modales,” in *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras.*, Departamento de Santander, 2003.