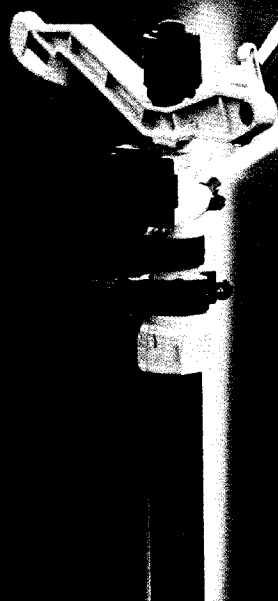




UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

E2

E2PACIOS



Manejo eficiente del agua en sistemas comunitarios de riego Andinos

Álvaro Martín Gutiérrez Malaxechebarría
Jerson Leonardo González Umaña

Manejo eficiente del agua en sistemas comunitarios de riego Andinos

Manejo eficiente del agua en sistemas comunitarios de riego Andinos

Álvaro Martín Gutiérrez Malexechebarría
Jerson Leonardo González Umaña



Agradecimientos

A las comunidades rurales de Fómeque que apoyaron la realización de este trabajo, con singular amabilidad y generosidad compartieron sus conocimientos.

A Ricardo Flórez, de excelentes cualidades humanas y gran fontanero, quien conoce a su comunidad y sus sistemas hidráulicos. Amable, inteligente y comprometido con su trabajo.

A Eliseo Acosta, señor maravilloso, conocerlo es querer ser su amigo y admirarlo. Fontanero, con profundo conocimiento de lo que hace y de los quereres de su comunidad. Infinitamente generoso.

A Julián Jiménez, quien trabajó como auxiliar de investigación de este proyecto, participó activamente en la revisión de la literatura y en los aforos de las bocatomas y de los puntos de entrega.

A un grupo de entusiastas en las relaciones sociedad-naturaleza que desinteresadamente colaboraron en el aforo de caudales durante un par de arduas jornadas: Gina Peña, Laura Ospina, Linda Manuela Sánchez, Paola Jiménez, Samir Mahecha, Julián Hernández, Sebastián Acelas y Carlos Acelas.

Al Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (CIDC), por apoyar económicamente la realización de este proyecto mediante una convocatoria dirigida a profesores recién vinculados, y al personal del CIDC, especialmente a Alexandra García Rodríguez, por el apoyo administrativo y sus sabios consejos.



UD
Editorial

E2
ESPACIOS

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
© Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico
© Álvaro Martín Gutiérrez Malexechebarría,
Jerson Leonardo González Umaña
Primera edición, abril de 2017
ISBN: 978-958-5434-28-8

Dirección Sección de Publicaciones
Rubén Eliécer Carvajalino C.

Coordinación editorial
María Elvira Mejía P.

Corrección de estilo
Irina Florián

Diagramación
Margoth de Olivos SAS

Imagen de cubierta
Designed by Molostock / Freepik

Editorial UD
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Carrera 24 No. 34-37
Teléfono: 3239300 ext. 6202
Correo electrónico: publicaciones@udistrital.edu.co

Gutiérrez Malexechebarría, Álvaro Martín

Manejo eficiente del agua en sistemas comunitarios de riego andinos : pérdida de agua en sistemas de pequeña irrigación andinos / Álvaro Martín Gutiérrez Malexechebarría, Jerson Leonardo González Umaña. -- Bogotá : Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.

96 páginas : fotografías, gráficas ; 17 x 24 cm.

ISBN 978-958-5434-28-8

1. Sistemas de irrigación 2. Riego - Técnicas 3. Drenaje agrícola 4. Abastecimiento de agua 5. Manejo de cuencas hidrográficas I. González Umaña, Jerson Leonardo, autor II. Tít.

631.587 cd 21 ed.

A1569098

CEP-Banco de la República-Biblioteca Luis Ángel Arango

Todos los derechos reservados.

Esta obra no puede ser reproducida sin el permiso previo escrito de la Sección de Publicaciones de la Universidad Distrital.

Hecho en Colombia

Contenido

Introducción	11
Agricultura irrigada	13
Riego en ladera	14
Problemas por mal manejo de sistemas de riego	15
El papel del riego en la Reforma Rural Integral: “Hacia un nuevo campo colombiano”	17
Pérdidas de agua en sistemas de distribución	19
Pérdidas	19
Tipos de pérdidas	20
Pérdidas en sistemas de distribución de agua	23
<i>Experiencias de medición de pérdidas en sistemas de riego</i>	25
<i>Experiencias de control de pérdidas en sistemas de riego</i>	26
Necesidad de incluir las pérdidas	27
Suministros	28
Pérdidas en Colombia y su normatividad	30
Cálculo de caudales ofertados	33
Oferta	33
<i>Curvas adimensionales de duración de caudales regionalizadas</i>	35
<i>Precipitación horizontal</i>	35
Caudales ambientales	36
Definición de caudales para sistemas de riego en Colombia	41
Cálculo de caudales para riego	41
Cálculo de la demanda de agua en Colombia	44
<i>Cálculo de la demanda de agua para solicitar adecuación de un distrito de riego</i>	46
<i>Cálculo de la demanda de agua de una comunidad para solicitar una concesión de aguas. Una revisión a la concesión de aguas de un distrito de riego de carácter semiinformal</i>	47

<i>Cálculo de la demanda de agua para sistemas de riego, según entrevista a funcionario del Instituto Colombiano de Desarrollo Rural</i>	48
Zona de estudio	51
Presentación de la zona de estudio	51
Tipos de distritos de riego	52
<i>Sistema de riego formal</i>	53
<i>Sistemas de riego informal</i>	54
<i>Sistemas de riego semiformal</i>	56
Sistemas de riego estudiados	57
Resultados	59
Cálculo de la oferta	59
<i>Cálculo institucional</i>	59
<i>Cálculo de caudales de la Caquinal</i>	60
Consumos y pérdidas	64
<i>Cálculo de la oferta</i>	64
<i>Cálculo de las pérdidas</i>	65
<i>Resultados</i>	66
<i>Indicadores. Suministro relativo de agua; suministro relativo de riego</i>	76
Conclusiones	79
Reflexión final y recomendaciones	83
Referencias	87

48

51

51

52

53

54

56

57

59

59

59

60

64

64

65

66

de riego

76

79

83

87

Introducción

Los sistemas de riego permiten aumentar la producción de alimentos, mejorando tanto la calidad de vida de los consumidores urbanos como la de los productores rurales. Es claro que la agricultura irrigada hace parte de la larga lista de los grandes desarrollos de la humanidad; si bien estos sistemas fueron desarrollados en épocas antiguas, hoy en día son concebidos, diseñados y evaluados por criterios desarrollados en el siglo XX, cuando la Revolución Verde estaba ya bien aclimatada en la mayor parte del mundo. Estos criterios generalmente se orientan hacia la maximización, de la producción o de los ingresos percibidos por área cultivada, o a la disminución de las cantidades de agua consumidas por área y, en este sentido, se encuentran múltiples investigaciones y desarrollos tecnológicos.

Más recientemente, algunos investigadores, enfocados principalmente en sistemas de riego pequeños y de tipo comunitario, se han enfocado en conocer la organización social al interior de los sistemas. Estas últimas investigaciones permiten conocer con mayor profundidad las particularidades de los sistemas y la rica organización social que los sustenta.

Consideramos que los dos enfoques anteriores (tecnicista y social) deben ser complementarios, pues de esta forma se logra una mejor comprensión que permitirá hacer aportes para el mejoramiento real de los sistemas; estos aportes se soportan tanto en el profundo conocimiento del medio y de las necesidades locales por parte de los usuarios como en los criterios de optimización y eficiencia que pueden aportar los técnicos.

Si bien no es posible imaginar un sistema de riego sin el agua, es poco común encontrar experiencias de medición y mejoramiento de los índices de eficiencia del consumo de agua en sistemas de riego; en este trabajo medimos las pérdidas de agua en las redes (es decir, su ineficiencia). Pero no se trata solamente de una medición de pérdidas, quisimos conocer cómo la construcción social del sistema de riego puede ayudar a mejorar el uso del agua; para ello, consideramos dos tipos de sistemas de riego: formal y semiformal.

Hemos buscado conocer la eficiencia del consumo de agua en sistemas comunitarios de riego. Con este fin, nos enfocamos en una zona particular de los Andes colombianos, reconocida por la excelente dinámica de su agricultura y por la presencia de varios sistemas comunitarios de riego que funcionan muy bien; esta zona corresponde a sectores del municipio de Fómeque, Cundinamarca, donde conviven sistemas

de riego formales y semiformales, que han sido estudiados por varios autores que se citan en este texto. Se escogió esta zona, pues se espera que al investigar en una zona de tradición campesina con sistemas de riego comunitarios que funcionan muy bien desde el punto de vista técnico y social, se puedan identificar indicadores de eficiencia reales y dar luces para mejorar los sistemas de riego en otras zonas de la región andina colombiana, también caracterizados por la presencia de comunidades de identidad campesina.

En Colombia poco se sabe del funcionamiento de los sistemas de riego comunitarios, en los escasos casos en que son mencionados suelen ser criticados y tildados de ineficientes; la normatividad desconoce la realidad del terreno y busca que estos se ajusten a lógicas externas netamente tecnicistas, desconociendo la construcción colectiva.

Con este trabajo buscamos reconocer los éxitos de los sistemas colectivos de riego, unir la experiencia de las comunidades y de mediciones numéricas para aportar a la mejora de dichos sistemas buscando un uso más eficiente del agua, que beneficie tanto a los usuarios como al ecosistema. Es decir, no buscamos desconocer la experticia local ni las virtudes de los indicadores, sino identificar índices de pérdidas de agua para encontrar las mejores soluciones a partir de elementos integradores.

Para ello, si bien nos propusimos calcular la eficiencia del consumo del agua en sistemas de pequeña irrigación en la zona andina colombiana, también nos trazamos unos objetivos específicos, que fueron abordados tanto en su aspecto conceptual como metodológico en capítulos separados. El primero de ellos busca calcular los caudales ofertados por las fuentes abastecedoras de los sistemas de riego, para ello nos servimos del concepto de *curva adimensional de caudales*, este tema se aborda en el capítulo "Cálculo de caudales ofertados"; el siguiente objetivo consiste en medir el caudal captado por los sistemas de riego, que se trata a nivel conceptual en el capítulo "Definición de caudales para sistemas de riego en Colombia" y cuyos resultados se muestran en "Cálculo de la oferta"; finalmente, los dos últimos objetivos: calcular los consumos, caudales demandados y las pérdidas en las redes de los sistemas de riego y calcular los suministros relativos de agua y de riego son abordados en los capítulos 2 y 4.

Esta presentación, que podría parecer un poco desordenada, se hizo a propósito para presentar el libro de forma fácil y amena, para que todo público interesado en el tema lo lea, principalmente las comunidades; no quisimos estructurarlo como un informe de investigación, leído solamente por especialistas.

Este trabajo fue posible gracias al decidido apoyo de las comunidades y a su interés en usar de la mejor manera el agua, pues son conscientes de que, al disminuir las pérdidas podrán ampliar los sistemas de riego; asegurar un adecuado suministro para sus cultivos, que incluso podrían crecer en área; disminuir problemas de erosión y de agotamiento de la fuente de suministro y sobre todo mejorar sus condiciones de vida.

Esperamos que esta investigación repercuta en la mejoría de las condiciones de las comunidades de riego y que aporte al conocimiento técnico de estas; asimismo, esperamos que sirva de motivación a otros investigadores para profundizar en estos temas.

os por varios autores que
a que al investigar en una
unitarios que funcionan
an identificar indicadores
riego en otras zonas de la
presencia de comunidades

sistemas de riego comuni-
n ser criticados y tildados
terreno y busca que estos se
iendo la construcción co-

sistemas colectivos de rie-
numéricas para aportar a
te del agua, que beneficie
nos desconocer la experi-
idices de pérdidas de agua
integradores.

del consumo del agua en
iana, también nos traza-
to en su aspecto concep-
de ellos busca calcular los
temas de riego, para ello
s, este tema se aborda en
etivo consiste en medir el
conceptual en el capítulo
ia” y cuyos resultados se
ltimos objetivos: calcular
redes de los sistemas de
go son abordados en los

nada, se hizo a propósito
o público interesado en el
s estructurarlo como un

comunidades y a su inte-
es de que, al disminuir las
adecuado suministro para
problemas de erosión y de
sus condiciones de vida.

de las condiciones de las
de estas; asimismo, espe-
ofundizar en estos temas.

Agricultura irrigada

El rápido crecimiento de la población mundial, que se proyecta de 6000 millones de habitantes en la actualidad a 8300 millones en 2025 (Sorooshian, Whitaker y Hogue, 2002), hace que se planteen importantes desafíos para asegurar la producción de alimentos. En este sentido, la agricultura irrigada desempeña un papel, pues los sistemas de riego permiten suavizar los impactos de la variabilidad hidrológica y climática sobre la producción de alimentos (Turrall, Svendsen y Faures, 2010), la intensificación de las actividades agrícolas y la expansión de áreas de cultivo. Por lo tanto, la irrigación se piensa como un elemento clave de la Revolución Verde que permitió sacar de la pobreza a millones de asiáticos y creó las condiciones para el subsecuente desarrollo económico e industrial de varios países. La agricultura irrigada es clave en el necesario aumento de la producción de alimentos que permita atender la creciente población (Howell, 2001).

Hoy por hoy, la agricultura irrigada provee aproximadamente el 40 % de los alimentos del planeta, y utiliza para ello menos del 20 % de su área cultivable (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2003; Özerol, Bressers y Coenen, 2012; Smith, 2002). El riego desempeña un papel crucial en la seguridad alimentaria global, en el mejoramiento del nivel de vida (Lipton, Litchfield y Faure's, 2003) y en el estímulo al crecimiento económico (Turrall *et al.*, 2010); por lo tanto, se espera que a futuro el riego en la agricultura tenga un rol aún más importante.

Entre las ventajas de la agricultura irrigada, se encuentra la disminución de la pobreza rural, gracias al aumento en la producción de los cultivos. Por esta razón, en la década de los sesenta del siglo XX, se dio la expansión de créditos por parte de las agencias de cooperación y bancos internacionales hacia proyectos de riego de grandes dimensiones. Debido a ello, la superficie de riego en América Latina pasó de 8 millones de hectáreas a principios de 1960 a 18 millones de hectáreas a finales de los años noventa (FAO, 2000).

Latinoamérica es una de las regiones del mundo con mayor potencial de seguir desarrollando la agricultura irrigada, pues ha desarrollado solo un bajo porcentaje de su área potencialmente irrigable; en particular, en Colombia, la información oficial reporta que existen 14,4 millones de hectáreas aptas para agricultura, de las cuales 10 millones son aptas para la agricultura mecanizada y el desarrollo de agricultura

irrigada (Urrutia Cobo, 2006). Sin embargo, solo 900.000 tienen infraestructura de irrigación y drenaje, lo que deja un amplio margen de expansión. Este gran potencial de expansión del riego en Colombia realmente muestra un precario desarrollo, lo que afecta la competitividad del país, al impedir un buen desarrollo de la agricultura y del sector rural, además ataca el crecimiento y la articulación de cadenas de valor.

Al revisar la información regionalizada, se encuentra que la mayor parte de los esfuerzos estatales o de los agronegocios para desarrollar la agricultura irrigada se han concentrado en las zonas planas bien interconectadas con los centros de consumo o de distribución, fenómeno común en toda Latinoamérica, evidenciado en una amplia revisión empírico-teórica en Gutiérrez-Malaxechebarría (2014a). Razón por la que las estadísticas oficiales reportan áreas muy pequeñas en las zonas de montaña, por ejemplo para Colombia; según las estadísticas oficiales, solo el 4 % del área adecuada para irrigación se encuentra en la zona montañosa. Estos valores claramente no se compadecen con la realidad fácilmente observable en las zonas montañosas, donde innumerables productores, particularmente familiares o campesinos, basan su producción agrícola en sistemas de riego. Lo anterior parece indicar que las decisiones estatales de desarrollo de sistemas de riego no han tenido en cuenta que el agua de riego en la agricultura campesina, además de aumentar los rendimientos de los cultivos, contribuye a conservar los recursos naturales, establece relaciones sociales comunitarias, genera nuevos conocimientos y mantiene una relación campesino-agua para hacer agricultura (Mena, Ormazábal, Llanos y Díaz, 2007).

Al parecer, la mayor parte de los sistemas de riego de las zonas montañosas corresponden a sistemas de riego informal; es decir, a aquellos sistemas de riego desarrollados directamente por los productores sin cumplir con los requerimientos formales del Estado y que no se encuentran reportados por las estadísticas nacionales (Gutiérrez-Malaxechebarría, 2013). El anterior documento muestra que su presencia fue comprobada en todos los departamentos andinos de Colombia y aunque por sus características no es posible cuantificar el área bajo riego informal en las zonas montañosas, existen indicios que nos permiten asegurar que al menos en la zona andina su presencia es muy superior a la del riego formal.

Esto se debe a que muchos productores de las zonas altas han intensificado su producción y, por esta vía, mejorado sus ingresos y calidad de vida incorporando cultivos de altas rentabilidades que suelen requerir del suministro seguro de agua; algunos se han favorecido de las inversiones estatales en distritos de riego; otros tantos, ante la demora del Estado para responder a sus requerimientos, optaron por diseñar, construir y operar sistemas de riego por su propia cuenta, es decir informales.

Riego en ladera

El desarrollo de la agricultura irrigada en las montañas tropicales busca aprovechar la favorabilidad climática y sanitaria propicias para la producción de cultivos como hortalizas y frutas. Por favor cambiar por “Por esta razón, este fenómeno es común en varios países tropicales; ejemplos de ello se encuentran documentados para prácticamente toda Latinoamérica intertropical (ver, por ejemplo, Angeliaume-Descamps y Oballos, 2009; Angeliaume-Descamps, 2010; Boelens y Gelles, 2005; Boelens y Hoogendam, 2002;

0 tienen infraestructura de
ansión. Este gran potencial
a precario desarrollo, lo que
arrollo de la agricultura y
ción de cadenas de valor.

ue la mayor parte de los es-
agricultura irrigada se han
a los centros de consumo o
a. evidenciado en una am-
rria (2014a). Razón por la
s en las zonas de montaña,
s. solo el 4 % del área ade-
a. Estos valores claramente
en las zonas montañosas,
res o campesinos, basan su
ece indicar que las decisio-
uido en cuenta que el agua
ar los rendimientos de los
eple relaciones sociales co-
a relación campesino-agua
(2007).

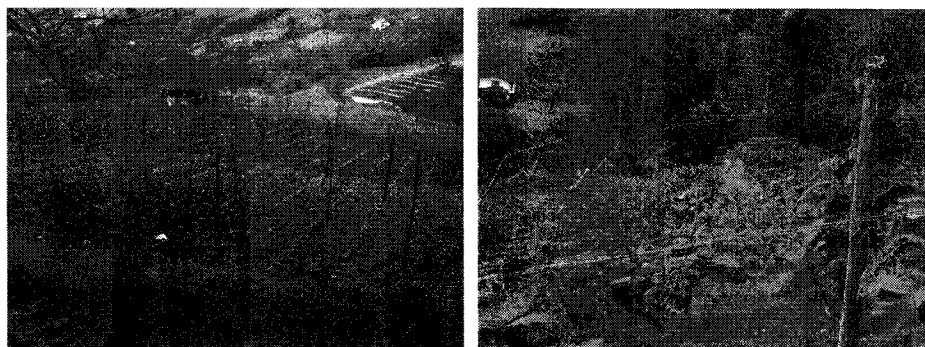
de las zonas montañosas
ellos sistemas de riego de-
con los requerimientos for-
las estadísticas nacionales
o muestra que su presencia
Colombia y aunque por sus
informal en las zonas mon-
al menos en la zona andina

altas han intensificado su
dad de vida incorporando
ministro seguro de agua; al-
ritos de riego; otros tantos,
entos, optaron por diseñar,
es decir informales.

icales busca aprovechar la
ón de cultivos como horta-
ómeno es común en varios
os para prácticamente toda
Descamps y Oballos, 2009;
dens y Hoogendam, 2002;

Ramírez, 1999; Trawick, 2001; Villagómez Velázquez, 2006; Zimmerer, 2000, 2010, 2011; Palerm-Viqueira, 2010); en África, en especial para los montes Atlas y para Kenia (por ejemplo, Adams, 1990; Laoubi y Yamao, 2009); y para la zona de influencia del Himalaya (Kumar, Satyal y Kandpal, 2006; Rutkowski, Raschid-Sally y Buechler, 2007)

Figura 1. Sistemas de riego en el área rural del municipio de Fómeque



Fuente: registro fotográfico de las diferentes salidas de campo.

En los Andes, la pequeña y mediana irrigación están ampliamente extendidas en todas las zonas altitudinales, lo que coadyuva a modelar el paisaje (Le Goulven y Ruf, 1994). Según Zimmerer (2010), en los países andinos, estos desarrollos son especialmente notorios en una franja difusa ubicada entre los 1000 y 3500 m. s. n. m. Sin embargo, la variabilidad del relieve hace que la agricultura irrigada de montaña sea dispersa y difícil de monitorear (Trawick, 2003). En particular, para Colombia Gutiérrez Malaxecharría (2013) encontró que el riego en zonas de ladera es fácilmente observable entre los 1200 y 3400 m, a excepción de la franja dominada por la caficultura, cultivo de secano.

El éxito logrado por estos sistemas de producción se debe a que el acceso al agua de irrigación permite diversificar y desarrollar pequeños sistemas agrícolas competitivos con uso intensivo de mano de obra. Este fenómeno ha sido incentivado por la disminución de precios de las tecnologías y equipos de irrigación, la integración a los mercados, la introducción de nuevos cultivos, la subdivisión de las tierras que obliga a plantear explotaciones más productivas vía intensificación y la incorporación de tecnologías de la Revolución Verde.

Problemas por mal manejo de sistemas de riego

A pesar de las grandes ventajas de la agricultura irrigada, esta genera algunos impactos negativos. Se debe considerar que la agricultura irrigada es responsable del consumo del 72 % del agua fresca del planeta (Cai, Rosegrant y Ringler, 2003). Además, se ha encontrado que el mal manejo de algunos de estos sistemas genera impactos negativos; por ejemplo, se ha comprobado el incremento en la concentración de sedimentos en los ríos, producto de una inadecuada construcción y mal manejo de la

infraestructura de irrigación (Vanacker *et al.*, 2003) y de la reducción de su capacidad de transporte por la disminución de los caudales, especialmente en las temporadas secas (Harden, 2006) y salinización de suelos tropicales (Pla Sentis, 1988), lo que a su vez impacta en la reducción del rendimiento de los cultivos (Arenas, Velez y Camacho, 2012). Adicionalmente, la observación directa muestra también que en las zonas bajas de algunas fuentes pequeñas de montaña los caudales se extinguen durante las temporadas secas, debido a la sobredemanda de los usuarios de las zonas altas. Es decir, existe sobreexplotación del recurso y las necesidades ambientales no son consideradas.

Figura 2. Erosión por mal manejo de tuberías



Fuente: registro fotográfico de las diferentes salidas de campo.

Probablemente, uno de los impactos ambientales negativos más conocidos de los sistemas de riego es la salinización de suelos. El 35 % de tierras bajo riego en Argentina y Chile sufren problemas de ensalitramiento, mientras que el 30 % (250.000 ha) de las tierras agrícolas en la región costera del Perú padecen también este problema. En el Brasil, el 40 % de las tierras bajo riego localizadas en la parte noreste se encuentran ensalitradas por riego inadecuado. Los problemas de salinidad inducidos por el hombre, y en forma natural en Cuba, cubren cerca de 1,2 millones de hectáreas; las provincias de Guantánamo y de Granma son las más afectadas (Alfaro y Marin, s. f.). Estos mismos autores mencionan que por esta razón, en algunos países latinoamericanos, la superficie de tierras bajo riego ha disminuido, a pesar de que cuentan con la infraestructura adecuada. Como respuesta a esta problemática, en los países que se encuentran en vía de desarrollo se buscan alternativas de modernización, las que reemplazarían, comúnmente, a los sistemas de riego de trabajo intensivo y bajo consumo de energía por sistemas más sofisticados y con mayores requerimientos de energía y capital. Sin embargo, el funcionamiento de estos sistemas es inferior a lo esperado, con resultados desalentadores en términos de conservación de agua y energía y en los rendimientos de los cultivos.

En particular, para este libro, deseamos calcular y destacar el efecto negativo de las pérdidas técnicas en las redes de riego; es decir, aquellas diferencias entre el volumen de agua captado y el volumen de agua entregado a los usuarios. Este es un fenómeno poco considerado, a pesar de que es sabido que la eficiencia en la con-

ducción del agua en las redes de distribución de los distritos de riego ha sido relativamente baja (Mejía y Palacios, 2002). El mal manejo y mal funcionamiento de los sistemas de riego no es solamente motivado por problemas técnicos y financieros que pueden ocurrir, sino que muchos problemas parten de deficiencias en la organización y administración del propio sistema (Sagardoy *et al.*, 1991). Evidentemente, el agua, al ser un bien común, requiere de la gestión comunitaria; un mal manejo del recurso puede ser fuente de conflictos entre comunidades o, incluso, dentro de estas.

Las pérdidas técnicas excesivas o no controladas en los distritos de riego implican que se deba captar un volumen de agua mayor al que realmente se va a utilizar, lo que genera sobredemandas en las fuentes de agua que repercuten en afectaciones al régimen hídrico y a los ecosistemas ribereños y en la imposibilidad de que nuevos y mayores usuarios se beneficien de los caudales ofertados, e incluso, un mal manejo de las pérdidas puede hacer que los usuarios directos del sistema reciban menores volúmenes de agua de los que esperarían o deberían recibir, lo cual disminuye las posibilidades de ampliar sus áreas de cultivos y por esta vía ven truncadas sus esperanzas de mejorar su calidad de vida.

Factores como el desconocimiento de las necesidades hídricas de los cultivos, de las relaciones agua-suelo-planta y de los aspectos culturales y sociales contribuyen al mal manejo de los sistemas de riego; por lo que se presentan otro tipo de pérdidas relacionadas con un consumo superior al estrictamente necesario por parte de los usuarios, porque estos aplican mayores cantidades de agua a sus cultivos o reciben agua a la que no le dan ningún uso y es vertida de forma incontrolada. Así como el suministro insuficiente de agua puede perjudicar a los cultivos, un suministro exagerado también puede dañarlos; por otra parte, el vertimiento incontrolado de agua puede, en especial en zonas de ladera, generar inestabilidad de los terrenos.

El papel del riego en la Reforma Rural Integral: "Hacia un nuevo campo colombiano"

Colombia es un país con una marcada diferencia entre la ciudad y el campo, no solo en términos de cantidad poblacional y variables demográficas, sino también en cuanto a niveles económicos, de infraestructura, oportunidades políticas, culturales y sociales. Según Forero y Merchan (2007), en los sectores urbanos se ubica un mayor número de pobres, pero es en las zonas rurales donde los índices de pobreza son más altos y más aún con la presencia de un conflicto armado de más de 50 años. A pesar de estas condiciones, los campesinos colombianos han desarrollado una capacidad de adaptación para sobrevivir y sobreponerse a los diferentes cambios y crisis del sector; incluso, han aportado al crecimiento de la economía.

Las condiciones del riego en zonas de ladera hace indispensable y necesaria la puesta en marcha de programas para la formalización de distritos que consideren criterios de eficiencia técnica e institucional, conocimiento del medio, acompañamiento por parte de los organismos especializados y, lo más importante, apropiación y participación de las comunidades.

Actualmente, Colombia no cuenta con una política o programas para la formalización de distritos de riego con las características mencionadas anteriormente, pero

en el marco del proceso para la terminación del conflicto con las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia (FARC-EP), se plantea como primer punto del acuerdo la Reforma Rural Integral (RRI), denominada “Hacia un nuevo campo colombiano”, donde los sistemas de riego adquieren un valor fundamental en el proceso de recuperación y proyección del campo colombiano.

Sin lugar a dudas el eje central de este acuerdo es el uso de la tierra, pero la proyección del campo Colombiano requiere reconocer las diversas formas de producción agrícola (economía campesina, agricultura familiar y comunitaria, entre otras); reactivar y desarrollar de forma eficiente el campo y brindar tanto los medios, las capacidades para hacer uso de la tierra (capital semilla, riego donde sea necesario, asistencia técnica, vivienda y crédito), como los bienes y servicios públicos básicos (vías, salud, educación, agua potable y apoyo a diferentes formas de asociatividad).

La RRI diseña un plan para la ampliación y recuperación de la infraestructura existente de riego que permita incrementar la productividad de la agricultura familiar, establezca sus ingresos y recupere las formas tradicionales de producción. Estos planes tendrán seguimiento por parte de las comunidades y abordarán el estudio del comportamiento de los sistemas de pequeña irrigación, principalmente desde la oferta y la demanda del recurso hídrico (Mesa de Conversaciones de la Habana, 2013).

Lo expresado anteriormente convierte esta investigación en un insumo base y apropiado para la elaboración, proyección y puesta en marcha de este tipo de planes. Asimismo, entrega herramientas, estrategias y resultados del manejo de pequeños sistemas de riego por parte de comunidades que han sabido aprovechar sus potencialidades y bondades. Por último, se espera que los resultados y las reflexiones acá mostrados sirvan para replicar estrategias exitosas en otros contextos y así mejorar las condiciones de otros productores rurales.

Pérdidas de agua en sistemas de distribución

Pérdidas

El grupo de trabajo para las pérdidas de agua de la Asociación Internacional del Agua (IWA, por siglas en inglés), por medio del balance hídrico estándar, ubica las pérdidas como un ingreso no recibido por el suministro de agua y las diferencia entre pérdidas aparentes y pérdidas reales (Internacional Water Association [IWA], 2000). La mayoría de autores definen las pérdidas desde el punto de vista del funcionamiento de los sistemas de acueducto, aquí es importante citar las definiciones de autores como Mesa (2004), que asume las pérdidas como agua no contabilizada (ANC) y las define como aquella agua que al ser producida en una planta de tratamiento, no es comercializada. A su vez, Todini (2008) equipara las pérdidas al nivel de agua no registrada y las define como el agua que se libera al sistema de distribución, pero que no es cargada en el cobro de las compañías; además, estima que el porcentaje de pérdidas o agua no registrada puede variar según el funcionamiento del sistema entre el 15 % para sistemas funcionando correctamente y el 60-65 % en sistemas con dificultades. Mutikanga, Sharma y Vairavamoorthy (2012), al igual que el anterior autor, definen las pérdidas como agua no registrada y la relacionan con la eficiencia operacional del sistema de distribución del agua; afirman que: “altos niveles de agua no registrada o pérdida representan una baja gobernanza y una condición física pobre del sistema de distribución de agua” (Mutikanga *et al.*, 2012, p. 166).

En algunos casos, las pérdidas técnicas son llamadas agua no facturada (ANF) o ANC, esto es todo aquel volumen de agua que al haber sido tratado o captado, no es comercializado. Para sistemas de acueducto, se cuantifica como la diferencia entre el agua potabilizada y el agua facturada, la que es considerada como la combinación de dos tipos de pérdidas reales de agua: las pérdidas aparentes o comerciales y las pérdidas reales. Las primeras son causadas por errores en la medición por lecturas mal hechas o sistemas de medición dañados o inadecuados, fraudes, derrames o manipulación de medidores no autorizados; por otra parte, las segundas están estrechamente ligadas a las dispersiones al medio ambiente, por tuberías, instalaciones o unidades dañadas (Todini, 2009).

Para distritos de riego, Playan Jubillar (1994) definió las pérdidas como el exceso de agua que se dota a los usuarios respecto a la necesidades; este se calcula en el transporte del agua desde las captaciones o los almacenamientos y durante la

aplicación del agua a los cultivos. Mientras que Losada (1994) dividió las operaciones de riego en tres: primero, captación, transporte y distribución; segundo, el gasto en función de los requerimientos de riego del cultivo, y tercero, la capacidad del agricultor para manejar con cierta facilidad el riego, y afirmó que para cada una, se debe considerar la eficiencia del sistema, entendida como el aprovechamiento del agua de riego, lo que da a entender que existe un agua que no es aprovechada y a la cual se denomina pérdida. Para Palacios-Vélez (2004), desde un concepto de eficiencia del uso del agua en los distritos de riego, las pérdidas son la diferencia que hay entre el agua captada en una fuente con un fin y el agua utilizada para este mismo fin, considerando su evaluación y cálculo en diferentes momentos, el almacenamiento, la conducción y aplicación del agua al cultivo.

Figura 3. Pérdidas en el transporte de agua



Fuente: registro fotográfico de las diferentes salidas de campo.

El caso estudiado en este libro construye el concepto de pérdidas desde distintos enfoques; primero, desde la eficiencia, con la cual se busca el mejoramiento técnico de los sistemas de riego en Colombia; segundo, desde el punto de vista ambiental para la preservación de los ecosistemas de las fuentes de abastecimiento de los sistemas de riego, y, por último, desde un enfoque social para mejorar la calidad de vida de las comunidades rurales que hacen parte de los sistemas de riego. Para este fin se asumen las pérdidas como la diferencia entre el volumen de agua captada y el volumen de agua que llega a los puntos de consumo teniendo en cuenta la captación, el almacenamiento y el transporte del agua.

Tipos de pérdidas

Vela, Martínez, García-Serra y Pérez (1994) afirman que el uso eficiente del recurso hídrico de todo sistema debe ser calculado mediante el balance hídrico del abastecimiento en cuestión, donde el volumen total de agua es igual a la suma del volumen

registrado más el volumen no registrado; el volumen registrado se define como el volumen de agua contabilizado y que por lo general es usado para actividades humanas (consumo doméstico, industrial, agrícola, comercial, etc.) y el volumen no registrado, según las causas que impiden su registro, como ausencia de contador, avería o daño en el contador, gasto en usos públicos y volumen no registrado restante; en este último, se consideran pérdidas por rotura de elementos del sistema, defectos del sistema (fugas), pérdidas y evaporación en depósitos y extracciones clandestinas, estas últimas son consideradas las de mayor dificultad para ser cuantificadas y por lo general son la fracción más importante del volumen no registrado (más o menos el 50 %). Esta clasificación puede ser catalogada como una de las primeras definiciones de los tipos de pérdidas en los sistemas de distribución de agua.

Playan Jubillar (1994) hace una definición de los usos consuntivos y no consuntivos del agua, en lo referente a riego, y asocia el uso no consuntivo con lo que se conoce como retornos de riego, “retornos de riego; estos retornos se deben a una serie de procesos en donde se destacan las pérdidas durante el transporte de agua a la parcela, la percolación profunda producida por un riego excesivo, y la escorrentía superficial en los campos de cultivo” (Playan Jubillar, 1994, p. 104). Además, clasifica en dos grupos las pérdidas: en el primer grupo se encuentran las pérdidas vertidas a los cauces naturales (escorrentía y pérdidas operacionales en canales y acequias), y en el segundo, las pérdidas de forma indirecta (percolación profunda y filtraciones desde la red de distribución). Las pérdidas por filtración tienen relevancia para el autor por las afectaciones e influencia que pueden tener sobre las condiciones del suelo y la calidad del agua.

La International Water Association (IWA) (2000) divide las pérdidas en dos: pérdidas aparentes y pérdidas reales; las aparentes hacen referencia a los consumos no autorizados y los errores en los metros calculados de consumo; las reales, a las fugas en la transmisión y distribución en la red, fugas y desbordamientos en los tanques de almacenamiento o las fugas en las conexiones o puntos de medición. En el desarrollo del concepto de reducción integral de pérdidas en agua potable, Ochoa y Bourguett (2001) clasificaron las pérdidas desde el punto de vista económico: fugas y ANC. Las fugas se refieren a cualquier escape de tipo físico en cualquier punto del sistema y para ellas, identificaron dos tipos: las visibles y las no visibles. Visibles son aquellas que emergen a superficie y son detectadas con facilidad. Las no visibles son las que se infiltran en el suelo y demoran un tiempo considerable en ser detectadas. También, determinaron una clasificación según el lugar donde ocurren las fugas (en depósitos, en conducciones, en conexiones, en el medidor, en las válvulas o al interior del domicilio). Para el ANC, tomaron toda aquella que por cualquier razón no puede ser cuantificada ni medida con exactitud y tiene un uso desconocido en cualquier punto del sistema; estas pérdidas, según los autores, pueden deberse a errores en la medición, errores de facturación o usos no autorizados.

Farley y Trow (2003) sostienen que en todo el sistema de distribución existen pérdidas, lo que varía son los volúmenes de agua perdidos, que en cierta medida dependen de factores como las condiciones de la tubería de conducción, factores locales, el nivel tecnológico de la infraestructura, la experticia en el manejo y control de operación del sistema y la región de análisis.

Según los autores, las expresiones “pérdida de agua”, “agua no facturada” y en menor consideración “agua no contabilizada” son términos internacionalmente aceptados para referirse a las pérdidas, y entienden su cálculo como la diferencia entre el agua captada y el agua facturada o consumida; “para los países desarrollados, las fugas son el mayor aportante al agua perdida, mientras que en los países en desarrollo o parcialmente desarrollados son más significativas las conexiones ilegales, errores de medición o fallas no contabilizadas” (Farley y Trow, 2003, p. 8).

En términos comerciales, se ha definido el concepto de ANC como aquella que al haber sido producida en un pozo o planta de tratamiento, no es comercializada (Mesa, 2004); para la estimación de la ANC, se definió el siguiente índice:

$$IANC = \frac{AP - AF}{AF} * 100$$

En donde

IANC: índice de agua no contabilizada.

AP: volumen de agua producida.

AF: volumen de agua facturada.

El ANC puede generarse por usos de agua no autorizados, pérdidas por infiltración o roturas en los sistemas troncales, pérdidas por infiltración o roturas en las redes de distribución. En el caso de las pérdidas, se especificaron dos tipos: las pérdidas comerciales y las técnicas; las comerciales corresponden al funcionamiento de la empresa, donde se ubican la detección de conexiones ilegales, deficiencia en la medición y usuarios no facturados (alrededor del 65 % del total de pérdidas); las técnicas se atribuyen a la estructura de producción y conducción del agua, son las más comunes por presentarse en los accesorios del sistema (codos, *tees*, uniones, etc.) y aun cuando pueden reducirse, no pueden desaparecer (35 % de las pérdidas totales); los factores más comunes que afectan los accesorios son presión, movimiento del suelo, condición de la tubería, baja calidad de los materiales, características del suelo y carga de tráfico. Además, se diferencian entre detectables y no detectables (Mesa, 2004).

En términos del cálculo de la eficiencia del uso de agua en sistemas de riego, Palacios-Vélez (2004) definió tres momentos de análisis: en el almacenamiento, en la conducción y en el riego, y estableció para cada momento de análisis las pérdidas como la relación entre el agua que sale y el agua que ingresó al sistema; además, clasificó las pérdidas según su origen:

- a) Infiltración: la mayoría de veces ocurre en cauces naturales y canales no revestidos, pero, en algunos casos, pueden ocurrir pérdidas en sistemas donde existen coberturas de canales, debido al agrietamiento o a su estado deficiente.
- b) Evaporación: se consideran menores que las pérdidas por infiltración y, en mayor medida, son para distritos con cauces naturales y canales no cubiertos.
- c) Fugas: por lo general, se presentan en las estructuras de conducción y se deben a su mal estado o a las conexiones defectuosas.

- d) Pérdidas por manejo: son derivadas de los malos manejos del sistema; se destacan la no detección de conexiones ilegales, la falta de mantenimiento de las estructuras y, recientemente, Sánchez y Viáfara (2014) incluyeron como pérdida por mal manejo la acumulación de sólidos suspendidos totales. En algunos casos, llegan a ser importantes las pérdidas por evapotranspiración de malezas y vegetación presente a lo largo del canal o la infiltración de canales con fallas en el revestimiento.

Como se ve, la definición de los tipos de pérdidas es muy variada y diversa, depende de las condiciones del sistema, responde muchas veces a definiciones y clasificaciones basadas en un punto de vista económico, técnico o comercial, y en gran parte se ha desarrollado para sistemas hidráulicos de distribución de agua potable. En los sistemas hidráulicos de distribución para riego, existe una baja inclusión de instrumentos de medición y cuantificación de los volúmenes de agua, lo que ha permitido el desarrollo de conceptos y clasificaciones de pérdidas mucho más específicas, que permitan entender y dimensionar el comportamiento de los sistemas.

En general, se pueden clasificar en pérdidas por diseños inadecuados, pérdidas por mala operación del sistema o pérdidas por combinación de los dos; dentro de esta clasificación, se pueden mencionar los siguientes fenómenos que causan pérdidas: diseños inadecuados, ANC o ANF, mal manejo del sistema, robos, daños o sabotajes a la red, sobrecaptación de los sistemas y fugas por desgaste del sistema.

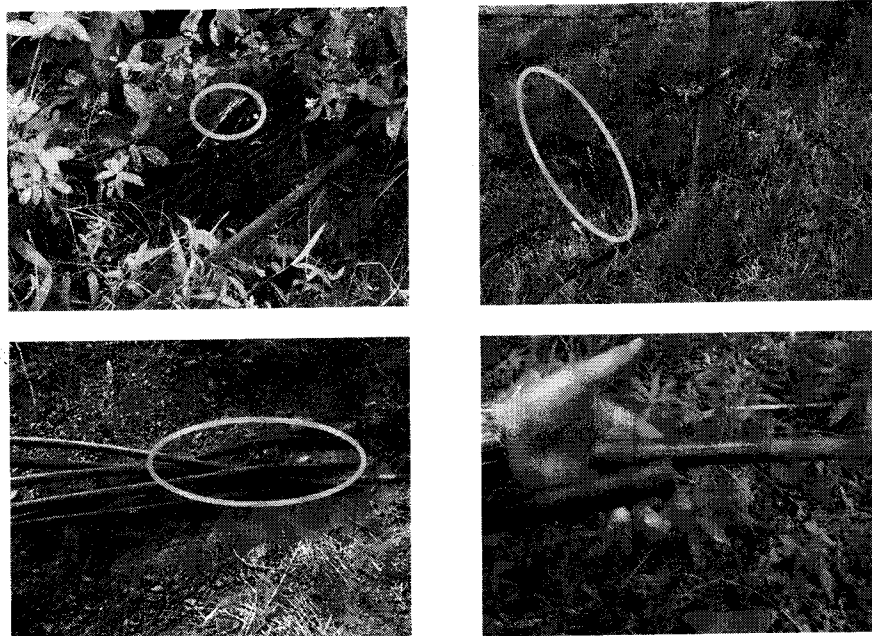
Si bien no existen cifras concretas, la evidencia muestra que en Colombia la mayoría de sistemas para riego son de carácter informal y a pesar de solucionar problemáticas bien definidas de sus usuarios, no incluyen los criterios técnicos necesarios, lo que genera importantes pérdidas de agua en el transporte en la red y lleva a que dentro de los sistemas agrícolas se consuma más agua de la necesaria. La poca investigación sobre sistemas de riego y aún menos sobre valoración de pérdidas, además de una gran cantidad de clasificaciones de tipos de pérdidas, hace más complejo su cálculo y determinación. Por esta razón, el estudio de caso plantea evaluar y comparar las pérdidas de dos sistemas de riego, uno formal y otro semiformal, mediante el estudio y cálculo de las pérdidas en la red, usando la relación entre el volumen de agua captado y el volumen de agua que llega a las fincas. Si bien en el cálculo no se diferencia por tipo de pérdida, debido a las dificultades para su estimación, se realiza un cálculo por tramos del sistema para determinar un comportamiento en los diferentes momentos (captación, conducción a tanques de almacenamiento y conducción a predios).

Pérdidas en sistemas de distribución de agua

Si bien la agricultura irrigada es responsable de entre el 70 y 80 % de los consumos de agua en el mundo, se considera que es el sector que más ineficientemente la usa. A pesar de sus falencias, el estudio del adecuado uso de agua en sistemas de riego no ha despertado un gran interés a nivel académico y ha sido difícil encontrar investigaciones con el nivel de detalle y la validez metodológica deseada que permita encontrar información cuantitativa o al menos reportes de estudios sobre sus pérdidas. Sin embargo, este tema se ha abordado ampliamente para sistemas de abastecimiento

de agua, tanto que cerca de 48 billones de m^3 de agua son perdidos anualmente provenientes de sistemas de distribución, lo que representa aproximadamente US\$14 billones por año (Mutikanga *et al.*, 2012).

Figura 4. Pérdidas en sistemas de riego



Fuente: registro fotográfico de las diferentes salidas de campo.

El ANF puede ser responsable de disminuciones de entre el 155 y 65 % de los ingresos de las empresas de acueducto. En el caso español, a finales de la década de los ochenta del siglo XX, las pérdidas urbanas oscilaban entre un 25 y 50 % (Aguilera Klink, 1994). En el caso argentino, el promedio nacional de producción de agua por habitante servido se estima en 380 l/hab/día; el consumo medio real sobre la base de los resultados de sectores que operan con menores registros es del orden de los 180 l/hab/día, lo que significa que las pérdidas en las etapas de producción y distribución de agua son del orden del 40 % del total producido (Mirassou, 2009).

Si bien el promedio mundial del índice de agua no contabilizada (IANC) está entre 30 y 35 %, en los países desarrollados, el IANC es bajo (15 %) en USA y (12 %) en Europa. En América Latina es de 42 % y en Colombia está entre 40 y 45 %. A pesar de lo anterior, en Colombia, según la normatividad de agua potable, se aceptan pérdidas de hasta 5 % en la aducción y en la conducción de agua tratada, y de entre el 20 y 40 % en los sistemas de distribución, dependiendo de las características de la población servida.

En el 2006, se hizo una auditoría fiscal a Filadelfia (USA), en la que se estimó una pérdida aparente de agua de 21 millones de m^3 , de acuerdo con datos dados por

la American Water Works Association; esa pérdida está calculada en US\$20 millones comparado con US\$4 millones que son la pérdida real. Esto se debe a que las pérdidas aparentes se valoran al precio de venta cobrado a los clientes, mientras que las pérdidas reales se valoran de acuerdo con el costo de producción (Mutikanga *et al.*, 2012).

En Inglaterra y Gales, con un 37 % de mediciones realizadas en casas, las pérdidas aparentes están estimadas en 118 millones de m³/año, el uso ilegal en 32 millones de m³/año, y metros registrados de 86 millones de m³/año; datos dados según Office of Water Service (Mutikanga *et al.*, 2012).

El uso de agua que no se encuentra autorizada es un problema de tipo social y técnico en el que no solo es necesario la intervención de la ingeniería, sino también de los enfoques socioculturales, donde se incluye el trabajo con las comunidades de todo tipo, en lo que se define como el *concepto de gestión del territorio*; estos factores son los reductores principales de ANC en algunas ciudades asiáticas, como por ejemplo la zona este de Metro Manila, donde se ha reducido de un 63 a un 11 % en 14 años, salvando alrededor de 0,6 millones de m³ por día (Mutikanga *et al.*, 2012).

Experiencias de medición de pérdidas en sistemas de riego

En un estudio realizado por el Banco Mundial en 1988 se estimó que la eficiencia promedio alrededor del mundo en el uso del agua en la agricultura es del 30 %. En México se estima que la eficiencia de conducción es del orden de 30 a 40 % (lo que implica pérdidas del 60 al 70 %) (Palacios-Vélez, 2004) y la de aplicación a nivel de parcela es del 60 %. Se estima una eficiencia global de solo el 36 % (Ortiz, Nikolskii, Palacios y Acosta, 1999), es decir que el 74 % del agua captada se pierde en la conducción y por un uso ineficiente en las parcelas. Este dato es semejante al obtenido para el río Lerma, también en México, donde la eficiencia total es de menos del 36 %; en este caso, la eficiencia total del canal principal y de su red de canales secundarios es de solo 57,3 %, y la eficiencia media de aplicación del riego en las parcelas es de 57 % (Mejía y Palacios, 2002); en otros distritos de este país, como el del río Mayo, se logran eficiencias del 75 % (Palacios-Vélez, 2004).

Con respecto a la situación mexicana en el tema del riego, Mejía, Palacios, García y Santos (2002) mencionan que la eficiencia en la conducción del agua en las redes de distribución de los distritos de riego ha sido relativamente baja, debido a que la mayor parte de los canales no están revestidos y a que las estructuras de control no son adecuadas para mantener niveles constantes durante la distribución del agua, así como a un deficiente mantenimiento en las obras de infraestructura, lo cual favorece las pérdidas operativas en la red.

Palacios-Vélez (2004) menciona que no toda el agua se desperdicia, ya que parte va a los acuíferos y, posteriormente, puede ser nuevamente aprovechada; sin embargo, en los distritos costeros, la mayor parte del agua perdida se va hasta el mar, sin que sea posible su utilización. Si bien el agua desperdiciada puede ser aprovechada por el ecosistema, sí genera unas sobredemandas en las fuentes y aumenta los costos, pues se hace necesario captar y transportar volúmenes superiores a los requeridos.

Losada (1994) refiere que para aquel entonces, en España, el volumen de recursos hídricos que escapaban del control de los sistemas de riego, sin llegar a beneficiar los cultivos, superaba los 10.000 hm³/año, si bien una parte retornaba a los cursos naturales, acuíferos y ríos, unos 5000 hm³/año no se recuperaban, magnitud que es del mismo orden que la de todas las otras demandas de la población española de la época. En este mismo sentido, Aguilera Klink (1994) mencionaba que las pérdidas en las redes agrícolas oscilaban entre un 40 y un 50 %, llegando incluso hasta el 80 % en algunos casos, lo que para un consumo agrícola en 1989 de 23.184 hm³ da una idea del volumen que se puede ahorrar introduciendo mejoras en los sistemas de riego.

En experimentos de campo en Brasil, con suelos arenosos y velocidades medias de viento de 5 m/s, se obtuvieron eficiencias en la aplicación del riego del 40 %. Las principales pérdidas de agua se debieron fundamentalmente al exceso de tiempo de riego, fugas en las tuberías y por escurrimiento superficial. El efecto de la evaporación, del viento y las pérdidas debido a la infiltración se consideraron iguales tanto para las eficiencias reales como para las potenciales (Alfaro y Marin, s. f.).

En el Distrito de Riego Arenal Tempisque (DRAT), ubicado en el Pacífico Norte de Costa Rica, se encontró que las pérdidas en el drenaje final eran del 31 %, mientras que en la década de los noventa eran del 7 %; este aumento se debe a que los agricultores ya no tienen los mismos incentivos que antes, a la disminución de la participación gubernamental y comunitaria, además se ha presentado captación ilegal a través de la ruptura de canales, y el desperdicio de agua se ve en el alto nivel de drenaje de las parcelas (Madrigal, 2005).

Camposano, Balsameda y Proaño (2015) estudian el caso de una finca bananera en San José de los Ríos, en Ecuador, donde se midieron eficiencias de riego del 90 %, es decir, pérdidas del 10 %.

Para el pequeño distrito de riego Lujan Oeste en Mendoza, Argentina, con un área de 3518 ha y 4429 usuarios, se documentan pérdidas del 70 %, de las cuales las pérdidas por infiltración representan hasta el 20,1 % (Salomon, Loyola, Martini y Sánchez, s. f.).

Experiencias de control de pérdidas en sistemas de riego

Ocampo y Escobedo (2006) realizan una investigación en la región de Atlixco, Puebla, México, donde se establecieron medidas para el control de pérdidas, especialmente por filtración; para disminuir este problema se comenzaron a utilizar diferentes estrategias de manejo y conservación del agua, como tanques o jagüeyes, depósitos o tanques para lavaderos, manejo de achololes (agua sobrante que rebosa de los surcos agrícolas), y el uso de sistemas de riego modernos: como el riego por aspersión (microaspersores) y sistemas de goteo (mangueras) para frutales, como el durazno y el guayabo, que han sido introducidos en el último tiempo dentro del área de estudio. Es de esperarse que estas tecnologías permitan la introducción de otras técnicas, como la construcción de depósitos de agua (subterránea), la utilización de filtros y la optimización de sistemas de bombeo. Sin embargo, por los grandes costos que acarrean estas tecnologías, son los productores con mayores recursos económicos los que

han adoptado estas nuevas técnicas, que están ligadas a cultivos de alto rendimiento y rentabilidad.

Rodríguez, Santana, Brown y Alonso (2013) muestran el caso de la introducción del riego intermitente como una estrategia de incremento de la eficiencia de los sistemas de riego superficial en Cuba, en particular en la comunidad Banao, provincia de Sancti Spiritus.

También en Cuba, Hernández, Jiménez, Montero, Sarmiento y Guzmán (2010) compararon, para cultivo de papaya maradol, tres alternativas de manejo del riego: riego con flujo de agua continuo (RC), en surcos abiertos y en surcos cerrados; así como riego con flujo de agua intermitente o por pulsos (RI), con ciclos de tiempos variables.

Para RC, con la variante de surcos abiertos de 130 m de longitud, fue el de 1,56 l s⁻¹, con eficiencia de aplicación de 61,8 %, eficiencia de almacenamiento 97 % y distribución de 82,6 %; las pérdidas por escurrimiento superficial y percolación profunda fueron del 25 y 13 % del volumen de agua aplicada, respectivamente.

Para la variante de riego por surcos cerrados con dicho caudal, se obtuvieron incrementos en las eficiencias de aplicación y distribución, de 3,2 y 11,4 % respectivamente; por su parte, la variante de riego intermitente o por pulsos con 4 ciclos de tiempos variables permitió lograr una eficiencia de aplicación del 85 %, asociado a una disminución del 24,37 % del volumen total de agua suministrada por tonelada producida.

En un estudio realizado por Montemayor *et al.* (2006), en San Pedro, México, se quiso comparar el efecto de tres profundidades de cinta de riego por goteo subsuperficial, con un sistema de riego por gravedad en surcos. Con el uso de una lámina aplicada en el riego por goteo sub-superficial a 0,47 m de profundidad, se obtuvo un ahorro de agua del 28 % y mayores rendimientos de los cultivos de forraje frente al sistema por gravedad.

Las experiencias anteriores, en su mayoría, son para la aplicación en el cultivo. Sin embargo, se resalta que en la revisión de literatura no se encontraron experiencias para el cálculo de pérdidas en la captación, la conducción y la distribución.

Necesidad de incluir las pérdidas

En los sistemas de riego suelen presentarse pérdidas por el mal estado de la infraestructura, favorecido, en algunos casos, por pérdidas, fugas, infiltración en canales de tierra o un deficiente control del agua en los canales (Mejía y Palacios, 2002). Esta condición disminuye significativamente la disponibilidad de agua, lo que conduce a una menor productividad de los recursos agua-suelo, así como a una menor producción agrícola y, en definitiva, un menor ingreso para los productores. En el proceso de transporte del agua (desde las captaciones a los cultivos y durante la aplicación del agua en los cultivos) se producen pérdidas que hacen que el sistema de riego necesite dotarlos con una cantidad de agua superior a sus necesidades. En muchos sistemas de riego la eficiencia no supera el 50 % (Playan Jubillar, 1994). Si bien, desde el punto de vista conceptual y a pesar de que algunos diseñadores consideran que se presentarán pérdidas que serán tenidas en cuenta para el dimensionamiento del sistema, en

la normatividad suele calcularse el volumen de agua captado y transportado como aquel que efectivamente van a utilizar los cultivos, lo que implica que bajo estas consideraciones los agricultores reciban menos agua de la que realmente requieren.

Por lo anterior, es necesario profundizar en los estudios sobre pérdidas en sistemas de riego, para conocer cuáles son sus ineficiencias y tomar medidas que permitan hacer un mejor uso del agua y, por esta vía, mejorar las condiciones de los agricultores e, incluso, ampliar la cobertura de los sistemas de riego, con el fin de lograr mayores coberturas y eficiencias con menores volúmenes de agua y mejorar las condiciones ecosistémicas al disminuir las demandas sobre las fuentes de agua. Además, se busca ampliar las evidencias para lograr que el cálculo de los caudales de los sistemas de riego incluya las pérdidas en su cálculo, esto es diseñar considerando la realidad.

Suministros

Gorantiwar y Smout (2005) y Molden *et al.* (1998) plantean que si bien existe multiplicidad de indicadores que buscan medir y comparar el desempeño de un sistema de riego con otro, generalmente estos son variables de respuesta que captan la producción o su equivalente económico, con respecto a las unidades utilizadas o servidas de agua y tierra. Cuando el agua es el recurso limitante, el indicador relacionado con esta será el más importante, mientras que en los casos en que la tierra es el recurso limitante, los indicadores relacionados con esta variable serán los más importantes. En este sentido, y según Gorantiwar y Smout (2005), las variables de entrada de interés son tierra, agua y finanzas.

Si bien existen varios tipos de indicadores externos, la institucionalidad interna de los sistemas de riego puede hacer que estos operen bajo sus propios objetivos. Chambers (1980) propuso cinco posibles objetivos del sistema: productividad del agua, equidad en la distribución a los usuarios, estabilidad en mantener el suministro de agua durante el tiempo, continuidad en el uso del agua durante el año y la capacidad de mantener la población servida en niveles de vida aceptables. La organización puede apuntar a satisfacer simultáneamente varios objetivos; por otra parte, se pueden obtener respuestas semejantes con distintos principios organizacionales. En este sentido, si bien los indicadores externos planteados, aquellos relacionados con la productividad del agua o de la tierra, podrían ser insuficientes para comprender o evaluar el desempeño de un sistema de riego, desde la óptica de la propia organización, son una herramienta útil para comparar distintos sistemas o para hacer análisis externos.

En esta misma línea, Kloezen (1998) dice que si bien existe una gran variedad de metodologías que buscan evaluar la eficiencia de los sistemas de riego y que cada una de estas apunta a diferentes dimensiones y perspectivas, estas pueden ser agrupadas en dos aproximaciones: el enfoque de desempeño comparativo (que ha demostrado ser relativamente más económico y rápido de realizar) y el enfoque de desempeño interno de los procesos, que de acuerdo con Svendsen y Small (1990) son métodos que evalúan los procesos y operaciones internas del sistema utilizando indicadores y estándares internos, estos mismos autores dicen que medir el desempeño interno implica mediciones subjetivas, tanto al establecer las metas

y los objetivos y en la forma en que su cumplimiento por distintos administradores y usuarios son medidas.

Por su parte, Wichelns (1999) dice que existen tres grandes grupos de personas que desean medir la eficiencia deseada de los sistemas de riego (no considera a los usuarios), estos son economistas, agrónomos e ingenieros. En cuanto a los indicadores, Dembélé, Ouattara y Keita (2001) mencionan que estos pueden agruparse en tres grupos: operacionales, de gestión agronómica, hidráulicos y socioeconómicos. En tanto Jensen (2007), expone varias metodologías para medir la eficiencia de riego y muestra que ellas dan resultados distintos. Los grupos de interés tienen distintas definiciones para eficiencia, razones por las que las que las recomendaciones de mejora suelen ser igualmente variables como resultado de sus perspectivas.

En la misma línea de aterrizar la relatividad de la información dada por los indicadores, Dayton-Johnson (2003) hace una completa revisión bibliográfica y de casos de estudio a partir de lo cual plantea que los indicadores cuantitativos de desempeño y eficiencia deben ser complementados con interpretaciones cualitativas de los regímenes institucionales.

En todo caso, y a pesar de la relatividad de los indicadores, estos son necesarios. Al inicio de la investigación, se había planteado utilizar dos indicadores propuestos por Molden et al. (1998):

Suministro relativo de agua = agua total suministrada/demanda de los cultivos Ecuación 2

Suministro relativo de riego = suministro de riego/demanda de riego Ecuación 3

Adicionalmente, deberán calcularse las pérdidas en el sistema como

Pérdidas en el sistema = volumen de agua captado/volumen de agua que llega a las unidades Ecuación 4

Donde:

Agua total suministrada: desvíos superficiales de agua, más suministro neto de agua subterránea, más aguas lluvias.

Demanda de los cultivos: evapotranspiración potencial de los cultivos.¹

Suministro de riego: solamente desvíos superficiales de agua, más suministro neto de agua subterránea.

Demanda de riego: evapotranspiración del cultivo menos lluvia efectiva.

Sin embargo, ante dificultades técnicas y de recursos para calcular estos indicadores, optamos por utilizar el suministro relativo de agua, adaptado de Molden *et al.* (1998) por Gutiérrez-Malaxechebarría (2014b). La ventaja de este indicador es que

¹ Se utiliza la evapotranspiración potencial debido a que su cálculo se hace de forma directa y que al ser mayor que la evapotranspiración real, permite asegurar un suministro mucho más favorable para los agricultores y así atender los picos de consumo de agua.

considera las prácticas culturales al calcular la demanda; por esta razón, se calcula teniendo en cuenta el agua que se utiliza, de acuerdo con lo que el agricultor considera que debe suministrársele a un cultivo y con su experiencia; en agua utilizada no se incluye lo que puede considerarse, dentro de los saberes locales, como desperdicios.

$$\text{Suministro relativo de agua} = \text{oferta total} / \text{agua utilizada} \quad \text{Ecuación 5}$$

Oferta total: es el agua disponible para riego, similar a suministro de riego.
Agua utilizada: es la cantidad de agua aprovechada por el agricultor.

Este indicador fue calculado para el promedio anual; es decir, no considera las variaciones climáticas ni de la etapa de desarrollo de los cultivos. Sin embargo, un valor de 1,0 indica que toda el agua que llega al predio es utilizada; en caso de obtener un valor menor a 1,0, se entiende que el agua recibida no es suficiente para satisfacer todas las necesidades, y un indicador superior a 1,0 significa que se obtiene más agua de la que se requiere. Teniendo en cuenta que el indicador ofrecerá un dato promedio y que probablemente no dé cuenta de la escasez durante algunos cortos periodos del año, se considera que un valor de 2 es aceptable y un valor menor a 2 significa que el predio tiene problemas de escasez, al menos durante algún periodo del año.

Pérdidas en Colombia y su normatividad

En este apartado se hace una descripción de las pérdidas en sistemas de abastecimiento de agua desde un enfoque normativo-legal, partiendo de la base de las consultas realizadas al Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, al Instituto de Desarrollo Rural (Incoder), a la Corporación Autónoma del Guavio (Corpoguavio) y la normatividad revisada en el desarrollo de la investigación.

Inicialmente, se debe aclarar que el manejo del recurso hídrico en Colombia recae sobre dos instituciones: la primera es el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, mediante el Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico y la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (entidad adscrita), que se encargan de “promover el desarrollo sostenible a través de la formulación y adopción de las políticas, programas, proyectos y regulación para el acceso de la población a agua potable y saneamiento básico” (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2014); la segunda es el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, a través de la dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico, que busca “orientar el desarrollo de políticas públicas en materia de recurso hídrico, a través de una combinación de desarrollo económico, social y la protección de los ecosistemas” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Dentro de las funciones de estas dos entidades existen funciones conjuntas, principalmente las que tienen que ver con proponer medidas dirigidas a la promoción del uso y ahorro eficiente del agua; eficiencia, desde una visión de uso adecuado del recurso a través de la implementación de medidas operativas, educativas o de inversión y no de reducción en el uso del recurso (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Este tipo de apreciación por parte de los ministerios en ningún momento hace mención a los diferentes tipos de pérdidas en los sistemas y abre una puerta para

pensar que en Colombia el uso del agua está supeditado a un tema de máximo aprovechamiento del recurso (económico) y no a una protección de las fuentes hídricas (ambiental), diferente al planteamiento misional establecido por estas instituciones en las cuales buscan el desarrollo sostenible.

Dentro del marco normativo colombiano, el código de los recursos naturales (Decreto 2811/1974), establece que es responsabilidad de la administración pública “reducir las pérdidas y derroches de agua para asegurar el mejor aprovechamiento” (Presidencia de la República, 1974). Desde el carácter reglamentario, el Decreto 1541 de 1978 es el primero en hacer referencia a los desperdicios o pérdidas, en él se contempla como uso prohibido el desperdicio de aguas asignadas, pero no existe ningún componente de carácter técnico. posteriormente, se establece la Ley 373 de 1997, con la cual se crea el programa para el uso eficiente y ahorro del agua, en ella se establece que los programas deben contener metas anuales de reducción de pérdidas, pero en ningún momento se hace mención al diagnóstico, verificación y control de estas; es importante recalcar que en este acto administrativo se determina que las entidades usuarias del recurso hídrico deben actualizar la información en un periodo no mayor a seis meses del porcentaje en litros por segundo de las pérdidas del sistema, pero en consulta realizada a Corpoguvio, no se entregó ningún inventario de pérdidas establecidas para la zona de estudio y en la respuesta otorgada, se hace referencia a los valores de pérdidas según lo establecido en la ley en mención y los módulos de consumo adoptados por la Resolución 345 de 2011 de esta entidad.

La gran mayoría de resoluciones de concesión de aguas consultadas (principalmente bajo la jurisdicción de Corpoguvio) hacen referencia técnica a las pérdidas según lo establecido en la Resolución 1096 de 2000 o Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico en Colombia (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000b) y sus posteriores actualizaciones (Resolución 2320 de 2009). Sin embargo, esta normatividad está desarrollada para la operación y el mantenimiento de sistemas de acueducto, particularmente en centros urbanos y en su mayoría para un uso doméstico, a diferencia de los sistemas de riego ubicados en zonas rurales y con un uso mayoritariamente agrícola.

La Resolución 2320 establece que las pérdidas de agua pueden clasificarse como técnicas y comerciales y sumadas no deben superar 25 %; si bien esto es lo que establece la normatividad, la realidad es muy diferente; por ejemplo, ciudades como Barranquilla reportan pérdidas superiores al 60 % o Bogotá, del 41 % (Redacción Bogotá, 2015).

De lo anterior se observa que las pérdidas de agua en los sistemas de distribución solo han sido consideradas, en el caso colombiano, para sistemas de abastecimiento de agua potable y que la normatividad no se ajusta a la realidad. No se encontró normatividad ni políticas que consideren las pérdidas en las redes de sistemas de riego.

Cálculo de caudales ofertados

Oferta

Sin conocer la información de los caudales ofertados por una cuenca es muy difícil definir las condiciones de funcionamiento del ecosistema y estimar los posibles usos que se le pueden dar al agua, tanto por su volumen como por su calidad; no se pueden hacer proyecciones serias de desarrollo de sistemas agrícolas o, incluso, de otros usos. No es posible saber si las necesidades pueden o no ser satisfechas con el agua naturalmente disponible.

Los caudales ofertados por las fuentes hídricas suelen calcularse a partir de información histórica de caudales; en los casos en que la cuenca o el punto de interés no se encuentre instrumentado, es necesario estimar los caudales, extrapolando la información de la cuenca y ajustándola en función del área aferente de interés o por medio de balances hídricos, para lo cual es necesario contar con información hidrológica y climatológica.

Un modelo hidrológico busca representar los procesos involucrados en la distribución de la lluvia y la generación de caudales en una determinada cuenca. La modelación hidrológica es una herramienta de gran importancia para el estudio de avenidas que se ha extendido por todo el mundo, fundamentalmente en países desarrollados. En la actualidad, con el empleo de estos modelos, se realiza el análisis y la prevención de las inundaciones; además, es posible manejar hipótesis suficientemente realistas o previsibles que ofrezcan un cierto grado de confianza para la toma de decisiones, ya sea en la ordenación del territorio en torno a los ríos o para exigir criterios de diseño de obras e infraestructuras capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia. Incluso, alertar a los servicios de protección civil y establecer protocolos de actuación ante posibles situaciones de peligro por intensas lluvias (Estrada y Pacheco, 2012).

Para el caso colombiano, deseamos destacar la modelación efectuada para el río Chinchiná, documentada por Ocampo y Vélez (2013), con altitudes que van desde los 767 m. s. n. m. a los 5278 y precipitaciones entre 555 y 1350 mm/año. Para su modelación, se utilizaron los modelos Tetis, Témez, Abcd, T, P, Autorregresivos (ARMA) y, como resultado, se obtuvo que una de las principales desventajas de los modelos conceptuales es la equifinalidad, es decir, la existencia de diferentes valores de parámetros del modelo con los que se obtienen las principales medidas de ajuste; por ello, se

recurrió a la calibración y validación para mejorar el ajuste entre las observaciones y las simulaciones de las variables. Todos los modelos fueron calibrados satisfactoriamente, es decir, fue necesario ajustarlos con la información histórica existente. Lo anterior permite concluir que es necesario contar con una curva de duración de caudales, elaborada con datos históricos que faciliten la comprensión de la escorrentía de los ríos de alta montaña. La validación realizada con la curva de duración de caudal es necesaria en sentido físico e hidrológico.

Una vez estimado el caudal de la fuente, es necesario considerar las demandas o derivaciones existentes o proyectadas, entre estas se suelen considerar usos domésticos, agrícolas e industriales, entre otros de carácter antrópico; adicionalmente, se debe considerar el llamado caudal ecológico o, en su visión más amplia, caudal ambiental, que es aquel mínimo caudal que un cuerpo de agua debe tener para garantizar la preservación de los ecosistemas, sus funciones ambientales y los usos actuales y prospectivos del agua (Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Universidad Nacional de Colombia, 2007); en este sentido, todo caudal que transporte el cuerpo de agua y que lo supere podría ser extraído. Sin embargo, una visión inclusiva de los ecosistemas lo considera como consumos o necesidades ambientales, definidos por Smakhtin, Revenga y Döll (2004) y calculados para varios ríos representativos de distintas zonas del mundo. En todo caso, el cálculo de caudales requiere de suficientes datos históricos y confiables, lo que no es fácil de obtener.

Además, los modelos hidrológicos suelen desarrollarse para cuencas de gran tamaño; entre mayor sea el tamaño de la cuenca, mayor la exactitud de las predicciones, en función de lo que suele llamarse la inercia de la cuenca. En una cuenca de gran tamaño, las variaciones hidrológicas de una de sus partes no suelen afectar en gran medida los caudales de cierre y sus afectaciones suelen distribuirse en el tiempo, contrario a lo que sucede en una cuenca pequeña, donde el efecto de un fuerte aguacero implica aumentos sustanciales y casi inmediatos en los caudales.

Para el caso de cuencas de montaña, se cuenta con la dificultad de que las precipitaciones suelen ser más abundantes que en las zonas bajas, pues a las de carácter ciclónico y convectivo hay que añadir las de origen orográfico; además, en ellas los fenómenos torrenciales se desencadenan con mayor intensidad, y se transmiten *a posteriori* aguas abajo. Entre otros, los problemas para modelar este tipo de cuencas, según Mintegui (1994), son:

- Controlar las consecuencias que se derivan del geodinamismo torrencial, cuando tienen lugar eventos torrenciales, sobre todo si son extraordinarios.
- Resolver los problemas derivados de las disponibilidades hídricas en las diferentes zonas de la cuenca a lo largo del año medio, así como sus posibles desviaciones respecto al mismo.

En las pequeñas cuencas de montaña la respuesta hidrológica suele darse con gran rapidez y su comportamiento suele ser, aparentemente, errático, razón por la que si bien con alguna facilidad es posible calcular los caudales medios, es muy difícil predecir sus caudales para distintos periodos de tiempo. Sin embargo, una estrategia que suele utilizarse es la de estimarlos utilizando las curvas regionales de duración

de caudales; en estos casos, se asume que el comportamiento hidrológico para una región determinada es semejante en todos sus puntos.

Curvas adimensionales de duración de caudales regionalizadas

La curva de duración de caudales representa la recurrencia anual de una determinada magnitud del flujo en la corriente; si se grafica en las ordenadas el valor de Q y en las abscisas el porcentaje de tiempo en que dicho caudal es excedido, puede establecerse el porcentaje de ocurrencia anual de un evento de magnitud cualquiera. Las curvas de duración tienen formas típicas que dependen de las características morfométricas y climatológicas de la cuenca.

Las curvas de duración de caudales se elaboran a partir de las series disponibles de caudales medios diarios. Se acepta que la curva obtenida en la estación de la cual se tienen datos es apropiada para cualquier microcuenca o subcuenca aguas arriba del área del sitio mencionado, o incluso para otras cuencas de la misma zona geográfica.

Para formar la curva de duración adimensional en el eje vertical, se tiene en cuenta la siguiente relación:

$$qi = \frac{Qi}{Q_{medio}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

Qi : caudal absoluto (m^3/s).

Q_{medio} : caudal medio anual (m^3/s).

qi : caudal adimensional

Los caudales traspasados mantienen la misma probabilidad de los caudales de origen. Entonces, la curva adimensional tiene en el eje Y los valores dados de la relación y en el eje X va el porcentaje del tiempo que cada uno de estos caudales es igualado o excedido.

Precipitación horizontal

Si bien los modelos lluvia escorrentía suelen basarse en los balances hidrológicos, es decir, que los caudales que salen de la cuenca corresponden a la diferencia entre las entradas y salidas de agua, se calculan como el resultado de la precipitación recibida, menos la evapotranspiración y las infiltraciones. Esto es cierto en la mayoría de los casos. Sin embargo, se ha encontrado que en las zonas de páramo, los caudales resultantes suelen ser mayores que aquellos que pueden ser calculados por un balance hídrico. Es decir, existen entradas de agua no explicadas por la precipitación; esto se debe a la precipitación horizontal.

La cantidad, la distribución y la calidad de la precipitación horizontal, en relación con la lluvia, pueden variar fuertemente. Sin embargo, en muchos casos (no en todos), los bosques nublados se encuentran en lugares donde la incidencia de nubes y neblina ocurre en combinación con fuertes lluvias orográficas (Stadmüller, 1986).

Los bosques nublados tienen condiciones atmosféricas especiales, donde ocurren nieblas y neblinas con gran frecuencia, como en la faja de condensación de las laderas de montañas expuestas a los vientos predominantes; estas pueden constituir una fuente significativa de humedad adicional. Dicha humedad se puede condensar en las superficies de la vegetación y gotear o escurrir por los troncos al suelo. Esta cantidad de agua no está medida por pluviométricos tipo estándar y depende fuertemente del estado sucesional de la vegetación dominante y de las características de su follaje.

En este estudio, el ingreso de agua al ecosistema condicionado por procesos de condensación de humedad, nubes o de neblina en las superficies de la vegetación o por medio de captación directa de gotas de nubes a través de la vegetación será llamada precipitación horizontal y significa un insumo de agua adicional a las lluvias. La cantidad de la precipitación horizontal depende tanto de factores inherentes a la vegetación como de factores y elementos climáticos. Los factores inherentes a la vegetación, a grandes rasgos, son los siguientes: altura de la vegetación; estructura del dosel; tamaño, cantidad, colocación y agrupación del follaje; cantidad, formas y especies de epífitas.

La precipitación horizontal corresponde al volumen de agua captado por la vegetación de la niebla y del rocío y a la interceptación por la vegetación (Buytaert y Céleri, 2004); con este fin, la vegetación paramuna ha evolucionado con la presencia de pilosidades que aumentan su área de contacto y capacidad de interceptar agua, este fenómeno es de gran importancia en la regulación de caudales.

La precipitación horizontal suele representar entre un 15 y 23 % de la precipitación vertical; con el fin de considerar la precipitación horizontal, Ingetec S.A. (s. f.) mayoró en un 20 % la precipitación vertical para un proyecto de consultoría; por su parte, Díaz Granados, Navarrete Gonzáles y Suárez López (2005) encontraron que para el río Blanco, en Chingaza, la cantidad total de precipitación horizontal estimada es equivalente a un 18 % de la precipitación vertical; igual valor fue obtenido por Dorenwend (1979) (citado en Bruijnzeel y Proctor, 1995) para páramos de Costa Rica.

Caudales ambientales

Los Gobiernos del mundo, reconociendo las problemáticas que enfrentan los cauces de agua dulce, principalmente para suplir las necesidades humanas (suministros de agua, generación hidroeléctrica, mitigación de inundaciones, transporte y producción de alimentos, entre otras) han decidido proteger la salud de los cuerpos de agua dulce mediante la definición del concepto de caudal ambiental como: “la cualidad y cantidad de agua requerida para sostener los ecosistemas de agua dulce y sus servicios a los humanos” (Steinfeld, Kingsford, Webster y Sharma, 2015).

Establecer y conocer los niveles de agua óptimos y la calidad adecuada en los cuerpos de agua dulce que garanticen el sostenimiento de los procesos ecológicos y de los bienes y servicios asociados no es una discusión nueva, desde los años cuarenta, en los Estados Unidos, se desarrollaron metodologías para establecer los niveles mínimos de flujo de agua requeridos para sostener la pesca, así como metodologías para evaluar los incrementos de flujo producto de presas o de las medidas de regulación de los ríos (Abdi y Yasi, 2015).

Respaldados en la teoría que establece que a medida que la extracción de agua es mayor, la condición de salud de los ríos se deteriora y que una vez alcanzados niveles de extracción superiores, a cierto valor umbral el deterioro se agudiza, para los años setenta se puso en práctica el concepto de caudales mínimos, con los cuales se buscaba garantizar las condiciones adecuadas de funcionamiento del ecosistema de los cuerpos de agua dulce. Posteriormente, y con un enfoque ecológico, el concepto de caudal mínimo ha ido apropiando elementos del régimen de flujo fundamentales desde el punto de vista del funcionamiento ecosistémico; estos elementos incluyen altos flujos, necesarios para la limpieza del canal, mantenimiento de las planicies de inundación, conectividad y vegetación ribereña; flujos medios, fundamentales en el crecimiento y la migración de los peces y bajos flujos esenciales en procesos de conectividad y mantenimiento de la calidad de agua (Jain, 2012).

En el marco de la planificación ecosistémica, el caudal ecológico está ligado a la restricción que impone la demanda medioambiental para el desarrollo de las funciones esenciales del ecosistema y se considera como “aquel que debe mantener una corriente en un tramo determinado a fin de garantizar los recursos hidrobiológicos y los ecosistemas asociados” (Díaz y Ruiz, 2007). El caudal ambiental debe mantener y garantizar el funcionamiento, la composición y la estructura del ecosistema fluvial que contiene el cauce en su estado natural, además preservar los valores ecológicos, el hábitat y la riqueza natural, y las funciones ambientales (Castro Heredia, Carvajal Escobar y Monsalve Durango, 2006)

Como se ve a lo largo del tiempo, el concepto de caudal ambiental ha sido ampliamente discutido, debatido y ha evolucionado, pero, en términos generales, se ha reducido la definición de caudal ambiental a aquel mínimo caudal que un cuerpo de agua debe tener para garantizar la preservación de los ecosistemas, sus funciones ambientales y los usos actuales y prospectivos del agua (Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos-Universidad Nacional de Colombia, 2007); en este sentido, todo caudal que transporte el cuerpo de agua y que supere dicho caudal ambiental podría ser extraído.

La utilización de las fuentes de agua por encima de su capacidad, definida por el caudal ambiental, afecta la disponibilidad del recurso y genera conflictos que pueden ser resueltos por medio de diversos tipos de instituciones. Por un lado, se pueden generar reglas que reproducen situaciones de acceso basadas en el beneficio individual o reglas de manejo colaborativo que tienden a maximizar el beneficio común. Por otra parte, las reglas generadas por la interacción de los miembros de una comunidad o por la imposición de una autoridad externa pueden conducir a un manejo sostenible o insostenible del recurso; este factor se analizará en terreno al comparar la relación entre caudales ofertados y demandados.

El término caudal ambiental suele ser utilizado como sinónimo del término caudal ecológico. Sin embargo, en Colombia, la legislación define caudales ambientales, no ecológicos, y el primer término, a diferencia del segundo, incluye los usos y las valoraciones sociales del agua, como se ve a continuación. En cuanto a los caudales ecológicos, se han planteado muchas metodologías para su cálculo, sin que haya consenso acerca de cuál es la más apropiada; tal es la diversidad de criterios que Díaz Hernández y Burbano Burbano (2006) mencionan que King (2004) reportaba más de

200 métodos en 50 países. En general, las metodologías de cálculo de los caudales ambientales pueden clasificarse en cuatro grandes grupos: hidrológicas, hidrológico-hidráulicas, de simulación de hábitat fluvial y holísticas o funcionales:

Las metodologías hidrológicas: se basan únicamente en datos históricos hidrológicos, definen el caudal ambiental como un valor fijo que puede ser un porcentaje del caudal medio multianual o del mínimo mensual; a pesar de ser las metodologías menos aceptadas por la comunidad científica, son las más ampliamente utilizadas gracias a su facilidad de cálculo.

Las metodologías hidrológico-hidráulicas relacionan el caudal del canal con su funcionamiento hidráulico.

Las metodologías de simulación de hábitat fluvial vinculan información hidrológica, hidráulica y biológica; algunas de estas metodologías de simulación de hábitat fluvial se basan en aspectos geomorfológicos y otras en las características del hábitat para la biota.

Las metodologías holísticas o funcionales requieren información hidrológica, hidráulica, modelos que relacionen el caudal con los requerimientos de todos o algunos componentes del ecosistema y de la biota acuática, además de información económica y social; estas tienen dos aproximaciones: *bottom-up*, diseñadas para construir un régimen de caudal modificado mediante la adición de componentes a una línea base de caudal cero y *top-down*, que abordan la pregunta ¿cuánto se puede modificar el régimen de caudal de un río antes de que los ecosistemas acuáticos cambien notablemente o se degraden seriamente? (Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos-Universidad Nacional de Colombia, 2007).

Si bien en nuestro país no se ha definido una metodología única para el cálculo de caudales ambientales, desde hace algún tiempo se han calculado caudales ambientales para grandes proyectos, especialmente hidroeléctricos, y recientemente, por parte de las corporaciones ambientales para definir los caudales máximos que pueden ser licenciados. Las metodologías utilizadas son muy variadas y, en algunos casos, se utilizan sin contar con los suficientes datos históricos; asimismo, se privilegian las metodologías hidrológicas (en las que se define un único valor de caudal ambiental para todo el año) sobre las otras, sin considerar que el criterio de mayor importancia para determinar los requerimientos ambientales incluye el mantenimiento de la variabilidad de flujos, que afectan la diversidad estructural y funcional de los ríos, sus cauces y su entorno, lo que influencia la diversidad de las especies acuáticas (Smakhtin, 2008); igualmente, las metodologías utilizadas no consideran que un régimen de caudales se define por cinco componentes que incluyen la magnitud, frecuencia, duración, predictibilidad y tasa de variación, pues la alteración de los valores naturales de cualquiera de estos componentes perturba el funcionamiento, la estructura o la composición del ecosistema fluvial (Diez Hernández y Burbano Burbano, 2006). Ante la ausencia de un criterio definido en el país, la Resolución 865 de 2004 define que el caudal que es excedido el 75 % del tiempo (Q_{75}) representa el mínimo que podría fluir por el cauce una vez se realicen las captaciones; este criterio también se aconseja para realizar el cálculo de índices de escasez para aguas superficiales; adicionalmente, la

normatividad también permite la adopción de Q90 como el caudal mínimo permitido; estos criterios, como ya se ha dicho, no son los más apropiados.

En particular, para la zona de estudio, Corpoguavio, en concordancia con las directrices establecidas en la Resolución 865 de 2004 para el cálculo del índice de escasez del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, determina para el área de drenaje del río Negro, el caudal ecológico, como el 25 % del valor del caudal mensual multianual más bajo y, además, determina un valor de caudal de la calidad del agua como el 25 % del valor del caudal promedio multianual.

Definición de caudales para sistemas de riego en Colombia

Cálculo de caudales para riego

Desde el punto de vista técnico, el glosario de sistemas de riego define la demanda de agua como: "necesidades de agua calculadas con parámetros exclusivamente técnicos, pero pretendiendo un significado planificador, no obstante debe hacerlo con independencia de los precios" (Losada, 1997, p. 58). Asimismo, Losada (1997) considera que debe incluirse la necesidad del cultivo según las condiciones inducidas por la atmósfera y debe tenerse en cuenta un remanente de agua para cubrir pérdidas, retornos y la variación de las condiciones atmosféricas.

Para Pierrer (1984, citado en Alcobendas y Moreno, 2005), las necesidades hídricas son "Pérdida(s) de agua bajo forma de vapor desde un suelo con cubierta vegetal a través de la evaporación y de la transpiración durante un intervalo de tiempo determinado" (p. 2). Para otros autores como Doll y Siebert (2002), la demanda de agua está relacionada con las necesidades o requerimientos de agua y la definen como: "la cantidad de agua que debe ser aplicada al cultivo por medio del riego, para lograr el su crecimiento óptimo" (p. 2).

Las necesidades hídricas para la producción de alimentos ha llevado a diferentes organizaciones, universidades y científicos a desarrollar un sinnúmero de metodologías y fórmulas para estimarlas (Guevara, 2006), además a la transformación de una serie de conceptos necesarios en el cálculo de los balances hídricos para la estimación de estas demandas.

La evapotranspiración es un concepto fundamental en el cálculo de las necesidades, y autores como Guevara (2006) y Alcobendas y Moreno (2005) han referenciado los cambios que ha sufrido a lo largo del tiempo; desde las ecuaciones para su estimación, como: Thornthwaite, Penman (1948), Penman-Monteith, y los diferentes cambios en las metodologías: Doorenbos y Pruitt (1975) en *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements*, quienes lo mejoran en 1977, Doorenbos y Pruitt (1977 revisión); cuaderno N.º 24 de FAO "Las necesidades de agua de los cultivos" (1977); cuaderno N.º 46 de FAO "CROPWAT" (1992). En 1990 y tras una revisión de la FAO de las metodologías, teniendo en cuenta los avances de los últimos años, publica el handbook denominado "Crop Evapotranspiration, Guidelines for Computing Crop Water Requirements, en Irrigation and Drainage Paper 56" o más conocido como el cuaderno N.º 56 de FAO (2006); en este último, se hacen recomendaciones sobre la

estimación de la evapotranspiración y el uso de la fórmula FAO Penman Monteith, donde se desarrolla el concepto de evapotranspiración de referencia como se conoce actualmente: "la evapotranspiración desde una superficie de un cultivo hipotético de 0,12 m de altura, 70 s/m de resistencia y 0,23 de albedo, la cual se asemeja a una superficie extensa de grama verde, de altura uniforme, en crecimiento y sin limitaciones de agua" (Allen *et al.*, 1998, citados en Guevara, 2006).

La fórmula de Penman-Monteith es ampliamente recomendada como el método estándar para estimar la evapotranspiración de referencia con validez mundial en los diferentes tipos de clima. Su cálculo requiere de datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento; según Allen, Pereira, Raes y Smith (2006) y FAO (1990), el cálculo de la ET_0 se realiza así:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34U_2)}$$

Donde,

- ET_0 = evapotranspiración de referencia
- R_n = radiación neta
- G = flujo de calor en el suelo
- $(e_s - e_a)$ = déficit de presión de vapor de aire
- T = temperatura media del aire a 2 m de altura
- U_2 = velocidad del viento a 2 m de altura
- Δ = pendiente de la curva de presión de vapor de saturación
- γ = constante psicrométrica
- e_s = presión de vapor de saturación
- e_a = presión real de vapor

Al calcular la evapotranspiración de referencia, se procede al cálculo de la evapotranspiración del cultivo, así:

$$ET_c = ET_0 * K_c * K_l$$

Donde,

- ET_c = evapotranspiración del cultivo
- ET_0 = evapotranspiración de referencia
- K_c = coeficiente de cultivo
- K_l = coeficiente de localización

A partir de la ecuación de balance de agua del suelo, se establecen las necesidades netas:

$$(N_n + P_e + G_e) - (ET_c + P_{ip} * E_s) = \Delta W$$

Donde,

- N_n = necesidades netas
- P_e = precipitación efectiva
- G_e = ascenso de agua capilar

ET_c = evapotranspiración del cultivo
 P_{ip} = pérdida por infiltración profunda
 E_s = pérdidas por escorrentía superficial

ΔW = variación de la reserva de agua en el suelo

Si se hace el balance de agua entre dos riegos, tenemos que $\Delta W = 0$, y podemos simplificar la ecuación a:

$$Nnr = ET_c - PE$$

Donde,

ET_c = evapotranspiración del cultivo
 PE = precipitación efectiva

Para el caso de las necesidades totales, se debe tener en cuenta que si existe un contenido elevado de sales, las necesidades totales son ligeramente superiores a las necesidades netas, por esta razón se propone ajustar los cálculos de las necesidades netas según sea el caso.

El aumento actual de la escasez y las necesidades de agua han permitido desarrollar un modelo global del recurso hídrico y su uso, conocido con el nombre de WaterGAP (Water-Global Assessment y Prognosis), con el cual se busca proveer información hídrica a nivel de cuencas hidrográficas. Este modelo busca identificar la escasez de agua, comparando la demanda y la disponibilidad. Con este método, no se modela el uso actual del agua para riego, sino las necesidades de agua, entendidas como aquellas que llevarán al crecimiento óptimo del cultivo. La primera versión del modelo WaterGAP permitió establecer las necesidades de riego a escala de país de una forma muy rudimentaria, dado que no existía información sobre las áreas realmente irrigadas en cada país, por lo cual se tuvieron que modelar sus valores (Doll y Siebert, 2002).

Doll y Siebert (2002) desarrollan una versión mejorada del modelo WaterGAP para calcular los requerimientos de agua a condiciones actuales y en función del área, el clima y el cultivo; como base para la estimación de impactos futuros del cambio climático, cambios demográficos socioeconómicos y tecnológicos. Esta nueva versión del modelo está basada en la información del mapa global de áreas irrigadas con resolución 0,5, latitud y 0,5 longitud, y calcula los requerimientos de agua en función del clima, la intensidad de cultivo y el tipo de cultivo. Como aún persisten vacíos de información en temas como las características de los cultivos bajo condiciones de riego, patrones de cultivo y tiempos de crecimiento, se han tenido que simular mediante *software*, que se basa en la aptitud del suelo y el clima.

El modelo WaterGAP es una herramienta muy útil para la determinación de las demandas de agua para sistemas de riego, pero debido a que en gran medida dependen de información de las áreas realmente irrigadas, y dada la ausencia de información sobre las áreas realmente irrigadas en Latinoamérica y particularmente en los países andinos como Colombia —lo que se documenta en Gutiérrez-Malaxechebarria (2014a); Gutiérrez-Malaxechebarria *et al.* (2013)—, estos modelos tienen un alto nivel de incertidumbre y un margen de error amplio, lo que impide determinar las demandas y los requerimientos reales para la zona de estudio.

Cálculo de la demanda de agua en Colombia

Colombia es distinguida en el ámbito mundial por estar a la vanguardia en temáticas ambientales, por su amplia receptividad a nuevos acuerdos y por adelantar estudios sobre el estado de sus recursos, que aunque muy amplios y detallados, muchas veces han sido subvalorados, olvidados y pocas veces tenidos en cuenta para la formulación de las políticas públicas y de desarrollo.

Para el caso de la demanda de agua en Colombia, actualmente existen dos estudios nacionales de agua (ENA), el del 2010 y el del 2014; en ellos se dedica un capítulo completo al cálculo de las demandas hídricas para los diferentes sectores productivos del país a un nivel general y se establece la demanda hídrica total del país. La tabla 1 presenta una comparación entre los ENA del año 2010 y 2014 y relaciona los cambios más significativos.

Tabla 1. Cuadro comparativo de estudios nacionales de agua (2010 y 2014)

Parámetros	2010	2014
Fórmula de cálculo de la demanda hídrica	$ET_c = K_c * ET_p$	$ET_c = K_s * K_c * ET_p$
Concepto de demanda	Demanda = extracción	Demanda = extracción
Sectores analizados	Doméstico, agropecuario, industrial y energía	Doméstico, agropecuario, industrial, energía y minero
Fuentes hídricas analizadas	Agua superficial y agua subterránea	Agua superficial y agua subterránea
Nuevos conceptos	No aplica	Agua azul, agua verde, huella hídrica (azul y verde)
Eficiencia de riego	Maneja un factor general de eficiencia del 65 %	Desagrega la eficiencia según el tipo de riego de cada sistema
Presentación de resultados	Por sector productivo analizado	Por sector productivo analizado y por subzonas hidrográficas
Pérdidas	Las maneja englobadas dentro del concepto de agua no consumida	Las diferencias del flujo de retorno y, además, empieza a hablar de pérdidas técnicas y comerciales
Pérdidas en sistemas de riego	No son consideradas como tal, pero en el cálculo de la demanda se deja un componente de agua adicional que debe cubrir lavado de sales de los suelos y falta de uniformidad o eficiencia de los sistemas de riego	Las pérdidas técnicas y las comerciales son determinadas únicamente para acueductos, en el caso de la agricultura, se considera como pérdida los procesos de evaporación y evapotranspiración
Demanda hídrica total (millones de m ³)	35.877	35.987,1

Parámetros	2010	2014
Demanda hídrica para el sector agrícola (millones de m ³)	19.386	16.760,3
Observaciones	Muchos de los cálculos no pueden ser comparables debido al cambio en las fuentes de información, aunque son una herramienta importante para dimensionar el comportamiento del agua a nivel de país	

Fuente: elaborada por los autores según la información de los documentos oficiales.

A pesar de que los datos obtenidos en los ENA 2010 y 2014 son relevantes y útiles para el manejo del recurso hídrico en Colombia, aún continúan siendo muy generales y no permiten comprender la situación real del agua a nivel de cuencas, subcuencas y microcuencas, dado que el país no tiene un sistema de información continua y sectorial del uso del agua ni mucho menos ha contabilizado el agua que usa de sus fuentes superficiales y subterráneas, únicamente existen estimativos. Por tal razón, la información consignada en los ENA es subutilizada, subvalorada y no es suficientemente clara.

Con el ánimo de calcular el índice de escasez en Colombia, se ha adoptado la metodología propuesta en la Resolución 865 de 2004 del antiguo Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; en esta se establece la demanda como la suma de las demandas sectoriales, entendida cada una como el volumen de agua que es usado para las diferentes actividades socioeconómicas en un espacio y tiempo determinados (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004). Para el caso de la demanda del sector agrícola, se establece la siguiente metodología de cálculo:

Con el uso de sistema de información SIG, se asocian los datos fisiográficos del área de estudio sobre cultivos, precipitación y evapotranspiración. A estos valores se adiciona el coeficiente de uso de agua por tipo de cultivo obtenido teóricamente del informe de la FAO 33. Una vez construida una tabla de valores de variables asociadas, se estima la demanda de agua a partir de la expresión. (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004, p. 22)

$$DUA = [P * (ET0 * K_c)] * H_a$$

Donde:

DUA: demanda de agua para el sector agrícola

P: precipitación

ET0: evapotranspiración potencial

K_c: coeficiente de uso de agua del cultivo (FAO 33)

H_a: número de hectáreas cultivadas

La solicitud de concesiones de agua y el diseño de los sistemas de riego se han calculado con las metodologías expuestas anteriormente, las cuales han entregado aproximaciones generales que no han permitido conocer a nivel de detalle las condiciones del recurso hídrico en Colombia. Por esta razón, se requiere una serie de

ajustes en el cálculo de la demanda de agua que permita reconocer, abarcar e interpretar las condiciones específicas y particulares de cada comunidad; asimismo, se debe tener en cuenta la influencia de las condiciones del entorno y las fuentes de abastecimiento. Por lo tanto, a continuación se presentan algunos ejemplos del cálculo de la demanda de agua para diferentes procesos y según diferentes actores, en ellos se puede observar el cambio y las diferentes apreciaciones respecto a los conceptos que influyen en el cálculo de la demanda de agua (los ejemplos citados a continuación son la respuesta a solicitudes presentadas por los autores a diferentes entidades y entrevistas personales a autoridades en materia de distritos de riego en Colombia, además de la información de los sistemas de riego estudiados).

Para mayor entendimiento, a continuación se presentan tres ejemplos de cálculo de la demanda de agua revisados por los autores y determinados por diferentes actores; estos se dividirán de la siguiente forma: 1) estudio presentado por un grupo consultor a una entidad del Estado para solicitud de adecuación de un distrito de riego (caso técnico-entidad privada), 2) estudio de las resoluciones de concesión de aguas de varios distritos de riego (caso técnico-entidad pública), y por último, 3) entrevistas de los autores a funcionarios del Incoder.²

Cálculo de la demanda de agua para solicitar adecuación de un distrito de riego

En el 2012, los habitantes de las veredas Río Negro y Río Blanco, en Fómeque (Cundinamarca), que no hacían parte de los distritos de riego existentes en esta zona (Asorionegro y Asoriblanco) decidieron agruparse y presentarse a la convocatoria para la adecuación y construcción de distritos de riego del Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario (Finagro). En el marco de los estudios técnicos para el proyecto de construcción del distrito de riego Asorenacer, elaborados y presentados por el grupo consultor (externo), se elaboró el informe técnico de la demanda de agua; en este se determinó el cálculo de la demanda mediante el balance hídrico, teniendo en cuenta las condiciones hidrometeorológicas y el cultivo con mayor necesidad de agua en la zona.

Para establecer la demanda hídrica de los usuarios del distrito Asorenacer, inicialmente se realizó la caracterización hidrometeorológica con los parámetros de tres estaciones (La Bolsa, Doña Juana, Fómeque); al definir los parámetros a emplear, se determinaron los valores medios mensuales multianuales y se hicieron las correcciones necesarias. Una vez determinados los parámetros, se procedió al cálculo de la evapotranspiración de referencia y posteriormente la evapotranspiración de cultivo; para esta última, se determinaron los cultivos pertenecientes a la región (mediante observación directa en campo y encuestas a los usuarios), y de acuerdo con los cultivos encontrados en la zona y la metodología de la FAO (2006), se calcularon los coeficientes de cultivo para cada una de sus etapas de crecimiento; así se seleccionó el cultivo de mayor coeficiente. Para el caso de este estudio, se seleccionó el tomate

2 Estos casos de estudio son producto de la revisión bibliográfica y no son realizados por los autores.

arbustivo chonto en etapa media de crecimiento, con este se calculó la evapotranspiración de cultivo para todos los meses del año.

A continuación, se calculó la lluvia efectiva de diseño, por medio de series mensuales multianuales; para esto, se utilizaron los datos de la estación hidrometeorológica de Fómeque, teniendo un periodo de retorno de 2 años y probabilidad de excedencia del 50 %. Con los datos obtenidos anteriormente y mediante la diferencia de valores, se determinó el balance hídrico de la región, el cual es la demanda neta de agua mensual del cultivo. Con los valores de la demanda neta, se calcularon las demandas brutas de los cultivos, teniendo en cuenta las eficiencias de conducción, distribución y aplicación del agua (determinadas según la experiencia del equipo de trabajo).

Los valores obtenidos en la demanda bruta de cultivo son la base para el diseño de la infraestructura de riego y con ellos se estableció el caudal de diseño. Para el presente caso, el grupo de trabajo usó tres metodologías: FAO Penman-Monteith, CAR y experiencia propia (Corporinoquia). La metodología FAO Penman-Monteith halló un valor de caudal de diseño de 43,53 lps para un módulo de riego de 0,46 lps/ha; la metodología de la CAR (la más usada por las autoridades ambientales) determinó un valor de caudal de diseño de 24,23 lps para un módulo de riego de 0,26 lps/ha, y por último, la metodología de la experiencia del grupo investigador (basada en un módulo de 0,2 lps/ha establecido por Corporinoquia) halló un valor de caudal de diseño de 19 lps desde el respectivo módulo de riego de 0,2 lps/ha. Todos los métodos establecieron una jornada de riego de 24 horas. Debido a la diferencia de valores entre los tres métodos, el grupo decidió reunir a la junta directiva del distrito y socializar los resultados obtenidos y así tomar una decisión. Una vez analizados los resultados, sus ventajas y desventajas, todo el grupo determinó como módulo de riego 0,19 lps/ha, que corresponde a un caudal de diseño de 15,2058 lps que es el valor concesionado por Corpoguavio³ (Asociación de Ingenieros Agrícolas de Colombia, 2012).

Cálculo de la demanda de agua de una comunidad para solicitar una concesión de aguas. Una revisión a la concesión de aguas de dos distritos de riego de carácter semiformal

Los distritos pertenecen a la jurisdicción de Corpoguavio; estos tienen la particularidad de que sus concesiones de agua están reglamentadas por el mismo acto administrativo (Resolución N.º 345 de 2011) y estas tienen el mismo procedimiento para establecer sus demandas hídricas; todo esto a pesar de no tener el mismo carácter y nivel de tecnificación en su infraestructura. Los distritos pertenecen al área de drenaje de la quebrada Caquinal y para cada uno de ellos, se establece el caudal a concesionar para cada tipo de uso (doméstico, agrícola, bovino, porcícola, ovino, equino, avícola y piscícola).

La cantidad de agua se establece teniendo en cuenta los diferentes módulos de consumo para cada actividad, y que según la Resolución tienen su soporte técnico

3 Adaptado del informe técnico de demanda de agua Asorenacer (Asociación de Ingenieros Agrícolas de Colombia, 2012).

en: "Estudio Técnico de soporte para la Reglamentación de las áreas de drenaje de los Ríos Blanco y Negro y del Censo de Usuarios elaborados por la Corporación" (Corporación Autónoma Regional del Guavio [Corpoguavio], 2011). Los documentos mencionados no se han encontrado para su consulta y por tal razón, es difícil establecer si dentro de los análisis son consideradas las pérdidas; por medio de la Resolución, es posible evidenciar que los módulos de consumo de agua calculados solo varían según el tipo de uso y que no se hace diferenciación alguna entre sistemas de riego, acueductos y usuarios individuales. Cabe mencionar que las pérdidas son contempladas únicamente para el consumo humano o doméstico, dada su prioridad sobre los demás usos: "El consumo humano se asigna acorde a las consideraciones técnicas establecidas en la Resolución 2320 de 2009 del Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, que reglamenta la dotación neta, el porcentaje máximo de pérdidas admisibles de agua" (Corpoguavio, 2011).

La revisión de las concesiones de los distritos de riego registran un módulo de consumo de agua para uso agrícola de 0,220 lps/ha, diferente a la encontrada realizando una revisión al Pomca del río Guayuriba, al cual pertenece la quebrada Caquinal, donde se establece un módulo de consumo de agua para riego de 0,8 lps/ha, determinado mediante los mapas de uso actual y cálculo de las demandas de agua a partir de la evapotranspiración potencial y el uso consuntivo del cultivo. Si bien la Corporación asumió este valor representativo teniendo en cuenta que el área de drenaje de la cuenca está ubicada entre los 750 y 3900 m. s. n. m., aproximadamente, y que la mayoría de los cultivos y pastos bajo riego se encuentran por debajo de la cota 2600, este valor es moderadamente bajo según lo estipulado en Corpoguavio (2006) y, además, solo contempla pérdidas en la aplicación del riego (como factor aislado) y no en el transporte y la captación.

Cálculo de la demanda de agua para sistemas de riego, según entrevista a funcionario del Instituto Colombiano de Desarrollo Rural

La Subgerencia de Adecuación de Tierras del Incoder es la entidad encargada de realizar actividades de planeación, diseño y construcción de proyectos que le den al campo colombiano la infraestructura necesaria para aumentar la productividad de las zonas agropecuarias y garantizar la seguridad alimentaria. Por tal razón, se entrevistaron a varios de sus funcionarios para conocer de primera mano el manejo que se les da a los sistemas de riego en el marco de la institucionalidad colombiana; de estas entrevistas, se obtuvieron varias apreciaciones importantes para la discusión acerca de los cálculos de las demandas de agua.

Inicialmente, se aclaró que el Incoder es una institución que rehabilita y construye distritos de riegos, no los amplía, y por consiguiente, no está en condiciones de ofertar una mayor cantidad de agua o aumentar el número de usuarios; debe velar por garantizar el flujo de agua 24 horas, 365 días a la semana; no está en la capacidad de cobrar tarifas por el uso de agua en los distritos, y no tiene funciones de inspección, control y vigilancia; asimismo, se ratificó que el agua de los distritos de riego tiene una destinación específica para producción agrícola.

Bajo estas salvedades, el Incoder tiene establecido, como procedimiento para la construcción de distritos de riego, varios procesos: la verificación de la disponibilidad de agua en la zona (fuente hídrica cercana) y el cálculo de la demanda según el número de usuarios. Para este último procedimiento, el Instituto determina el caudal inicial base, mediante un módulo de consumo estándar establecido para cultivos tradicionales y más representativos de Colombia (excluyendo el cultivo de arroz por su alta demanda hídrica); este módulo tiene un valor de 0,5 lps/ha; también, se calcula la hoja hidráulica del sistema, bajo el principio de conservación de la energía, en donde se hace especial énfasis en eliminar las pérdidas de energía del sistema, “la cantidad de agua que ingresa al sistema (distrito de riego) debe llegar a cada usuario en la misma cantidad” (entrevista a Hernando Palomino, 2015).

Posteriormente, se selecciona el aspersor que permita manejar el caudal que llega a cada usuario (los últimos sistemas de riego están diseñados para riego por aspersión como medida de uniformidad en la aplicación del riego); por último, se determinan los parámetros de riego, cuando se definen el módulo y el tiempo de riego, que varían según el tipo de aspersor seleccionado; para este cálculo, se tiene que los aspersores manejan valores de eficiencia de riego del 70 al 80 %. Este último valor pone en evidencia la ausencia del concepto de pérdida de agua (pérdidas en la captación, transporte y aplicación), ya que únicamente se aborda un concepto de eficiencia de riego en la selección del aspersor que con el caudal entregado a los usuarios logre satisfacer la demanda de los cultivos (eficiencia de aplicación del riego).

Es importante mencionar que no todos los sistemas de riego en Colombia están diseñados y construidos por el Incoder, pues las organizaciones y asociaciones de usuarios tienen la opción de presentarse a convocatorias de financiación (ONG, sector privado u otras entidades del Estado) o financiar sus proyectos con recursos propios, por lo cual los criterios y procedimientos mencionados anteriormente del Incoder no pueden estar presentes en todos los sistemas de riego del país.

Como pudimos ver en los tres ejemplos citados anteriormente, el concepto de pérdida en el cálculo de la demanda varía dependiendo del actor o grupo de interés que realice los cálculos y, peor aún, en algunas ocasiones, las pérdidas no son contempladas en el momento de hacerlos. Asimismo, es importante ver cómo en cada uno de los ejemplos son diferentes los módulos de consumo de agua para los mismos sectores; principalmente por diferencias en las metodologías y por una baja uniformidad de criterios y conceptos. Además, se identifica un libre albedrío en los diferentes actores para elegir la metodología con la que se calcula la demanda; estas metodologías, en su mayoría, no tienen en cuenta las necesidades reales de los usuarios y las condiciones hídricas e hidrometeorológicas del área a irrigar.

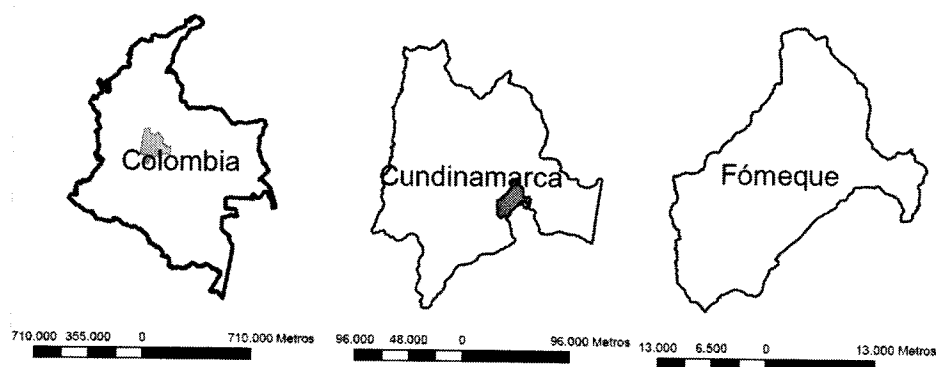
Zona de estudio

Presentación de la zona de estudio

El trabajo de campo se realizó en Fômeque, en Cundinamarca. Es un municipio reconocido por su dinámica agricultura en la que se combinan sistemas tradicionales orientados al autoconsumo con la incorporación de tecnologías avanzadas tanto de cultivo como de riego. Si bien su tradición agrícola se remonta a tiempos prehispánicos, fue después de los años sesenta del siglo XX que se incorporaron paulatina, masiva y exitosamente paquetes de la Revolución Verde para la producción de cultivos altamente rentables, dirigidos al mercado. Parte fundamental en el éxito de la agricultura de los pequeños productores de este municipio se sustenta en los sistemas de riego existentes.

Si bien en el municipio, por localizarse en los Andes, se encuentran altitudes que van de los 800 a los 3800 m, la mayor parte de la producción agrícola y de los habitantes se localiza en la franja ubicada por debajo de los 2100 m, donde el clima templado hace más favorable la producción de hortalizas. Además de un clima propicio, el municipio se ve favorecido por su cercanía a Bogotá y Villavicencio, grandes centros de consumo y distribución de alimentos.

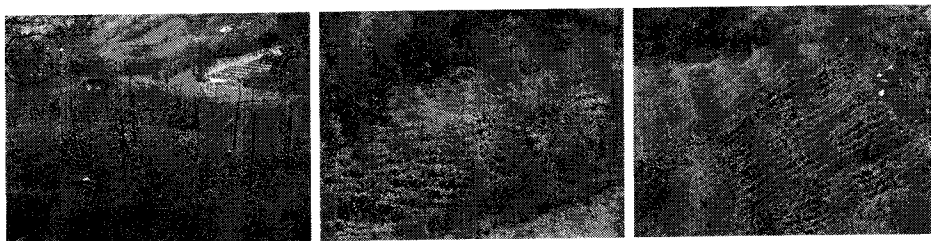
Figura 5. Localización del municipio



Fuente: elaboración propia.

Las hortalizas son especialmente representativas de la agricultura fomequeña, entre ellas se destacan el tomate, el pimentón, la habichuela y el pepino de rellenar; este es otro ejemplo de agricultura familiar de montaña exitosa gracias a la incorporación de estos cultivos.

Figura 6. Cultivos de hortalizas en la zona rural del municipio de Fómeque



Fuente: registro fotográfico de las diferentes salidas de campo.

Debido a la variabilidad climática, ha sido necesario asegurar el suministro de agua para riego por medio de varios tipos de infraestructura y de arreglos variables que han dado paso a una intrincada red de suministro de agua y de acuerdos para acceder al agua que pueden ser variables en el tiempo.

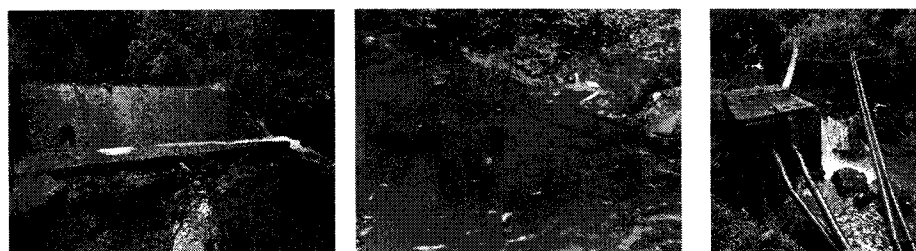
Como zona de estudio, se escogieron dos sistemas de riego en el municipio de Fómeque, que representan dos tipologías de riego diferente: formal y semiformal. Inicialmente, se había planteado estudiar también los sistemas informales, pero si bien se caracterizaron, debido a sus condiciones, no fue posible hacer aforos allí. Todos ellos se abastecen de la quebrada Caquinal, una fuente de agua que tiene muchísimos usuarios, razón por la cual fue declarada en agotamiento; es decir, existe una prohibición legal para otorgar nuevos permisos de captación de sus aguas.

Decidimos que el punto de cierre de la cuenca alta de la quebrada Caquinal se localiza donde se encuentra la más baja de las bocatomas de los sistemas de riego, es decir, a 2548 m. Aproximadamente, la mitad de la cuenca alta tiene coberturas naturales de páramo o de bosque de niebla, dependiendo de la altitud, las zonas alrededor de la quebrada, con pendientes más suaves que el resto de la cuenca, están cubiertas de pastizales dedicados a la ganadería extensiva. Por su altitud y fuerte presencia de coberturas naturales, la precipitación horizontal es muy importante y evidente.

Tipos de distritos de riego

A continuación, se presentan los tipos de distritos de riego que se pueden encontrar en el área de estudio, en ellos se hace una definición de sus características teóricas, sus comportamientos y cada una de las variables a tener en cuenta para clasificarlos como formales, semiformales e informales, de acuerdo con los criterios y la actualización realizados por Gutiérrez-Malaxechebarria (2014b).

Figura 7. Fotografías de las bocatomas de los diferentes distritos de riego estudiados

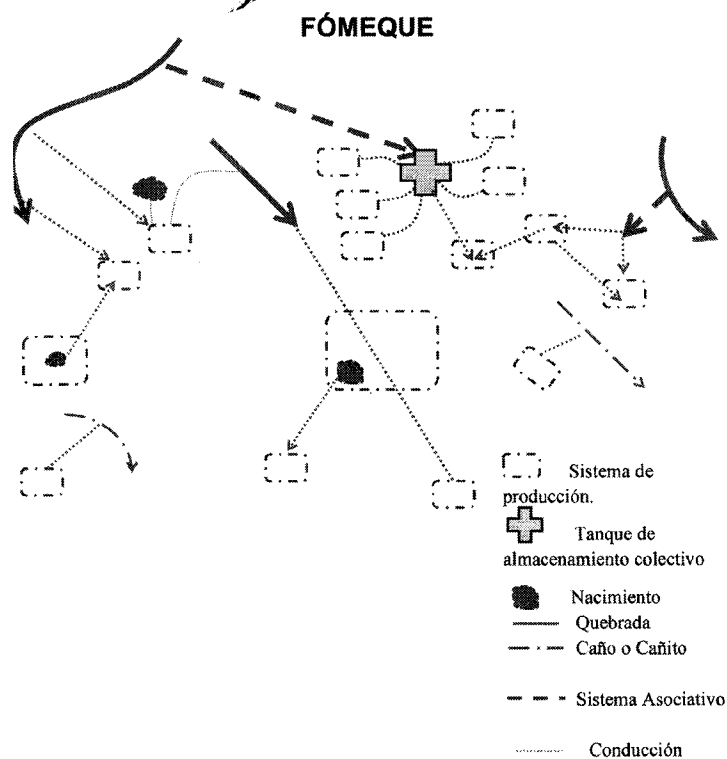


Fuente: registro fotográfico de las diferentes salidas de campo.

Sistema de riego formal

Los sistemas de riego formal son aquellos sistemas que han sido desarrollados bajo el cumplimiento de la normatividad estatal, se han diseñado bajo criterios de ingeniería, acceden al agua utilizando permisos oficiales y están formalmente constituidos y reconocidos por el Estado (Gutiérrez-Malaxechebarria, 2014a).

Figura 8. Esquema de un sistema de riego formal



El distrito de riego formal ha sido construido siguiendo criterios técnicos y cumpliendo la normatividad estatal, por medio de la presentación de los usuarios a convocatorias de adecuación de distritos de riego del Finagro. Como muestra la figura 8, el sistema cuenta con estructuras para la captación y transporte del recurso (bocatoma, desarenador, tanques de repartición), así como estructuras de inspección, regulación y mantenimiento (cámaras de quiebre, tanques de almacenamiento).

A simple vista, no se observan pérdidas, ya que las estructuras de conducción y transporte están enterradas y a lo largo del camino existen equipos para controlar el paso del agua en caso de fugas; el sistema cuenta permanentemente con un fontanero que realiza labores de inspección, control, mantenimiento y vigilancia. En el sistema, existen herramientas de medición, todos los usuarios cuentan con micromedidores a la entrada de sus predios (algunos en funcionamiento y otros no) y varios macromedidores por el camino; a pesar de la existencia de estas estructuras de medición, no existe regulación volumétrica de los consumos de agua de los usuarios.

Dentro de los predios de los usuarios del distrito de riego formal existen muy pocos tanques de almacenamiento de agua, pues tienen la posibilidad de regular los caudales que reciben mediante registros de paso en las cajas de inspección a la entrada de sus predios y garantizar así el retorno del agua a la fuente de captación en momentos donde no la estén utilizando. Los sistemas de riego formal, además de contar con criterios técnicos para la captación y distribución del agua, tienen estrategias y herramientas para la aplicación del agua en los cultivos. Dentro del distrito de riego formal, utilizan en mayor medida el riego por aspersión y en una menor proporción el riego por goteo. Cabe mencionar que en estos sistemas el agua tiene un uso multipropósito, donde los usuarios no solo garantizan sus necesidades de riego, sino que además cubren el consumo humano.

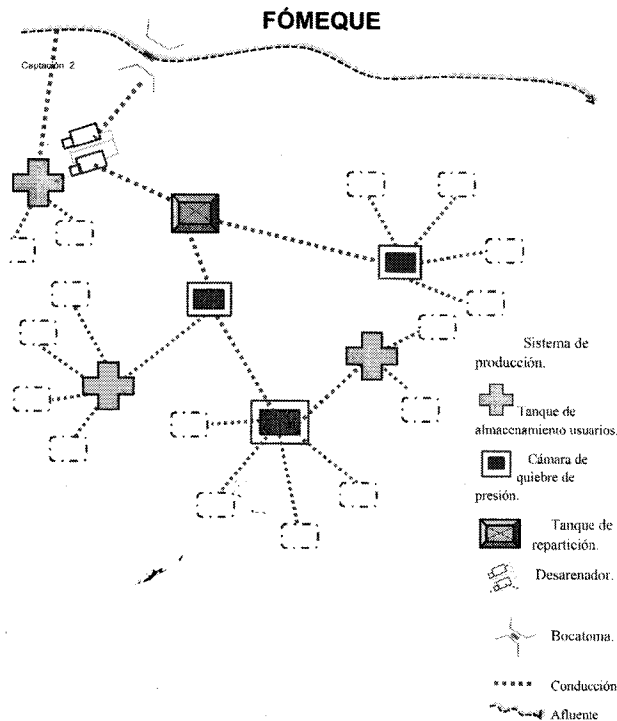
Estos usuarios tienen una única fuente de captación (quebrada Caquinal) y un único punto de captación; no pueden realizar entre ellos ni con externos acuerdos de préstamos, cesiones o ventas de sus puntos de agua asignados, tampoco existen sistemas de asociación para el aprovechamiento del agua.

Sistemas de riego informal

Son aquellos sistemas que no cumplen los requerimientos formales y que no están reportados en las estadísticas nacionales, pero que se conciben desde un proceso asociativo y comunitario por lo general de pequeños y medianos productores que buscan satisfacer sus necesidades hídricas. No cuentan con infraestructura especializada o esta es muy precaria; además, sus formas de asociación no están reconocidas por el Estado y su acceso al recurso hídrico no está reportado o autorizado por la autoridad ambiental competente (Gutiérrez-Malaxechebarria, 2013).

Dentro del sector rural del municipio de Fómeque existen asociaciones de usuarios, que son consideradas sistemas de riego informal. Este tipo de sistemas no cuentan con estructuras de captación formal, pero dadas las necesidades hídricas de los usuarios, se crean grupos que establecen formas alternativas de captación y que por lo general provienen de diferentes fuentes (quebradas, caños, cañitos, nacimientos, etc.); asimismo, establecen tanques de almacenamiento comunitarios que garantizan el flujo de agua a otros usuarios.

Figura 9. Esquema de un sistema de riego informal



En estos sistemas predominan los acuerdos entre vecinos, se destacan las ventas y los préstamos entre usuarios, quienes establecen diferentes formas de pago (horas de trabajo, dinero, intercambio de productos o préstamo de tierras). Por lo general, los usuarios aprovechan el recurso hídrico según sus necesidades y demandas, sin ningún control, ni interno (por parte de los mismos usuarios) ni por las autoridades ambientales. En su mayoría, los usuarios individuales buscan diferentes fuentes de captación que les permitan alcanzar y cubrir los requerimientos hídricos sin tener en cuenta criterios de protección ambiental.

La infraestructura de estos sistemas es muy rudimentaria y precaria, razón por la cual no existe la forma de evaluar las pérdidas; además, muchas de estas estructuras son de carácter intermitente o no son informadas o reportadas por los usuarios debido al miedo de ser sancionados o reprendidos. Tampoco existen criterios de uso y ahorro del agua, pues no es su obligación y en su mayoría, los usuarios desconocen este tipo de reglamentación. Asimismo, los usuarios no tienen criterios de manejo y aplicación del riego en sus cultivos (en su mayoría predomina el riego por aspersión o manual) y usan el agua con criterios multipropósito que les permita garantizar la demanda de agua para todos los tipos de uso.

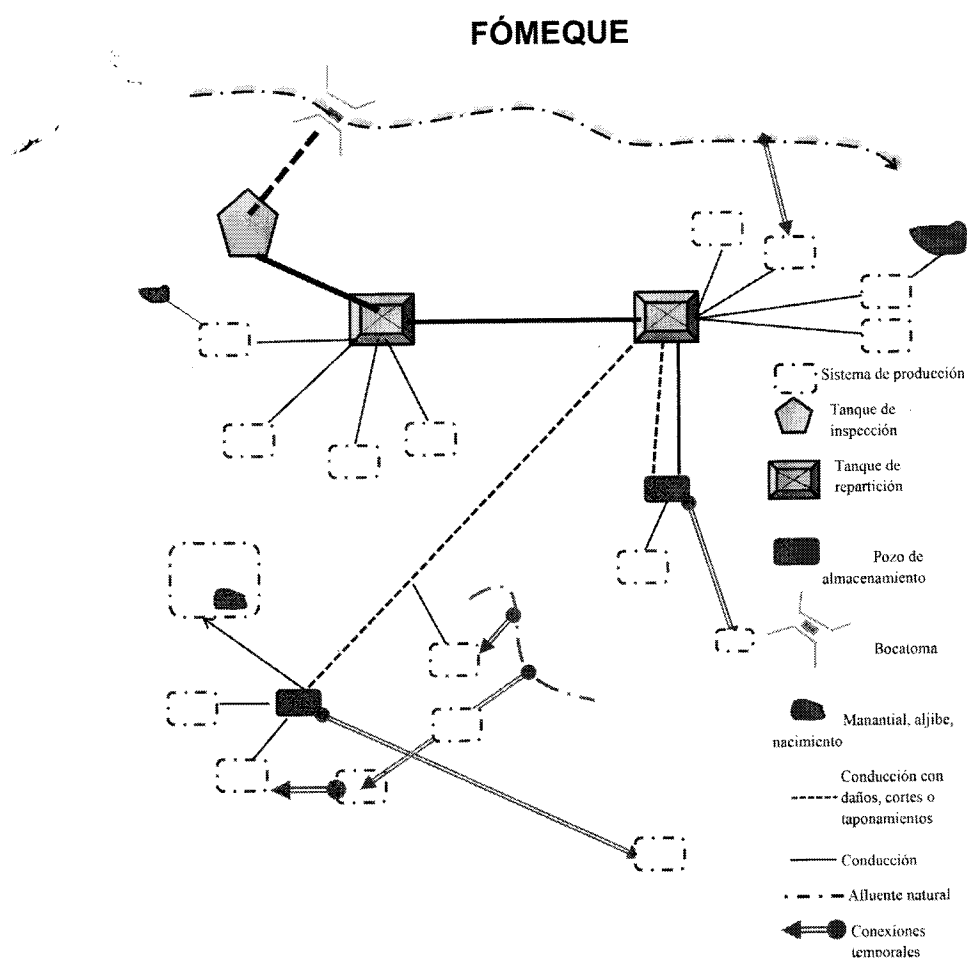
Como ya se ha dicho, dentro del estudio planteado no fue posible establecer las pérdidas de los usuarios del sistema informal debido a la alta cantidad de formas de

extracción y acceso al recurso y a la dificultad de establecer una metodología para medir la cantidad de agua que extraían de las fuentes y la cantidad que llegaba a los predios; pero se asumió que debido al bajo nivel de tecnificación, desarrollo y las condiciones de estos sistemas, las pérdidas son considerablemente mayores a las de los sistemas formales y semiformales.

Sistemas de riego semiformal

Los sistemas de riego semiformal son aquellos que cumplen parcialmente con algunas de las características de los sistemas formales y que en algunos comportamientos se acercan a los sistemas de riego informales (Gutiérrez-Malaxechebarria, 2014b). El sistema de riego semiformal del sector rural del municipio de Fômeque describe puntualmente este tipo de caracterización.

Figura 10. Esquema de un sistema de riego semiformal



Este sistema cuenta con estructuras de captación, tanques de inspección y tanques de repartición, que hacen parte de los requerimientos técnicos que solicita la autoridad ambiental para el otorgamiento de la concesión, están contruidos de forma rudimentaria y con un bajo nivel de tecnificación. Requieren de un permiso de concesión de aguas, el cual se ha tramitado ante la autoridad ambiental correspondiente y les ha permitido organizarse y establecer herramientas para el uso y ahorro del agua (manual de uso y ahorro eficiente del agua).

Dentro del sistema existe una red de transporte del agua que se encuentra a nivel y de forma expuesta, por lo cual es propensa a daños y afectaciones. Para el sistema, existe una única fuente oficial de abastecimiento (quebrada Caquinal) y un solo punto de captación, pero algunos usuarios con déficit hídrico acceden a otros puntos de captación en la misma quebrada del sistema o en otras fuentes pequeñas; en otros casos, dentro de los mismos predios de los usuarios, existen fuentes hídricas (manantiales, aljibes, nacimientos, etc.) que los usuarios usufructúan para alcanzar sus requerimientos o que intercambian, comercializan o ceden a los demás miembros del sistema.

En estos sistemas semiformales, estos acuerdos son muy comunes, dentro de los más frecuentes está el arriendo del punto de quienes no están usando el agua, o quienes por medio de acuerdos de asociación para producción ponen como capital el terreno y el agua. Un tipo de acuerdo, menos común, es el préstamo a usuarios que no pertenecen al distrito, estos se realizan cuando el nivel de agua ofertado a cada usuario es mayor que su demanda y los usuarios deciden prestar su punto de agua, con un intercambio económico o en especie. Aunque no existe un acuerdo de por medio, existen usuarios que no pertenecen al distrito y que en la zona alta desconectan el sistema de mangueras y acceden al recurso afectando a los usuarios ubicados en la zona baja.

A pesar de tener en cuenta algunos criterios técnicos en el diseño, no cuentan con un sistema de macromedición ni micromedición, por lo cual es imposible controlar los volúmenes de agua que usan los usuarios del sistema; a esto se suma la imposibilidad de controlar el flujo continuo de agua dentro del sistema, pues debido al diseño, no es posible bloquear la salida de agua cuando esta no se está usando (existe flujo continuo de agua mientras se esté captando en la bocatoma); algunos usuarios han desarrollado estrategias para minimizar las pérdidas por este fenómeno como tanques de almacenamiento dentro de sus predios o la aplicación de algunos de los acuerdos mencionados anteriormente.

Los sistemas de riego semiformal se caracterizan por variar dependiendo de la época del año; por lo general, estos cambios son más evidentes en los periodos secos, en donde salen a relucir conexiones temporales, provenientes en su mayoría de fuentes cercanas, intercambios entre usuarios o de acuerdos de rotación del riego. Este último punto cobra especial interés, pues dentro de estos sistemas cada usuario maneja su propio sistema de aplicación del riego; aquí encontramos riego por goteo, por aspersión y manual o la combinación de varios métodos.

Sistemas de riego estudiados

Los distritos de riego semiformal y formal, ubicados en el sector rural del municipio de Fómez, fueron estudiados y analizados para entender y comprender sus

dinámicas y algunas de sus particularidades en los procesos de construcción, funcionamiento, mantenimiento y operación, lo que permite, a su vez, clasificarlos en sistemas formales, semiformales o informales.

A continuación, se presentan las características principales de los distritos de riego estudiados en la tabla 2 se puede ver que existen diferencias entre unos valores y otros; la principal está en el distrito de riego semiformal, entre usuarios concesionados y usuarios reales del distrito; esta diferencia se sustenta en que muchos de los usuarios tienen registrados puntos a nombre propio y a nombre de sus cónyuges o familiares que llegan a un mismo predio. En el caso del sistema de riego formal, los tres usuarios que aparecen de diferencia están porque los usuarios han entregado sus puntos o los tienen cerrados debido a que no se encuentran en la región.

Tabla 2. Principales características de los distritos de riego estudiados

Distrito de riego	# Usuarios concesionados	# Usuarios reales	Caudal concesionado (l/s)	Área concesionada por usuario (ha)	Área agrícola por usuario (ha)
Formal	69	66	15,28	1,00	0,90
Semiformal	50	38	11,49	1,00	1,80

Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el proceso de estudio de los distritos de riego. Para iniciar, se presenta el cálculo de la oferta hídrica del área de estudio, en donde se realiza una revisión inicial para establecer y conocer el cálculo institucional realizado por la autoridad ambiental del territorio, Corpoguavio; después, se realiza el cálculo de la oferta hídrica de la quebrada Caquinal por medio del balance hídrico y la curva de duración de caudales medios. Una vez conocida la oferta hídrica, se realiza el cálculo de los consumos y las pérdidas en el área de estudio; los consumos se establecen mediante el método volumétrico para establecer la cantidad de recurso hídrico que está llegando a cada punto del sistema, asimismo en las estructuras de captación (bocatomas); el cálculo de las pérdidas se realiza mediante la diferencia entre los caudales captados y la sumatoria de los caudales que llegan a cada uno de los puntos de los usuarios.

Cálculo de la oferta

Cálculo institucional

A nivel institucional, existe deficiencia en el cálculo de la oferta hídrica del área de estudio, pues para la quebrada Caquinal, Corpoguavio solo ha desarrollado el cálculo general de la oferta hídrica desde el Plan de Manejo y Ordenamiento de Cuenca (Pomca) del Guayuriba y no existen aforos periódicos sobre la Caquinal, los últimos reportados son del 2012 y son del distrito de riego semiformal para presentarse a la convocatoria de rehabilitación de distritos de riego del Incoder. En consulta elevada a la oficina de Corpoguavio, ubicada en el municipio de Fómeque, se manifestó que debido a un accidente sufrido en el 2013, cuando se iban a realizar los aforos, ha sido imposible acceder al lugar y llevar los técnicos para actualizar los aforos, por las incapacidades médicas derivadas.

La Resolución N.º 345 de 2011, por medio de la cual se reglamentaron los usos y aprovechamientos de las aguas de las áreas de drenaje de los ríos Blanco y Negro en el municipio de Fómeque, con fundamento en las visitas oculares y los estudios de reglamentación de la Corporación, que determinó que la demanda es superior a la oferta hídrica y que existe un conflicto por el uso del agua en las quebradas Caquinal, La Palma y el Raudal (tributarias del río Negro), y La Cabra y Pausugá (tributarias

de la quebrada Negra), decide declararlas como fuentes en agotamiento, lo que restringe la asignación de nuevas concesiones o nuevos usuarios y, además, obliga a los usuarios existentes a crear acciones para la conservación, protección y restauración de dichas fuentes (Corpoguavio, 2011).

Cálculo de caudales de la Caquinal

Antes de iniciar este aparte, deseamos mencionar que Corpoguavio, mediante Resolución 865 de 2004, estimó caudales ofertados y caudales disponibles para el área de drenaje del río Negro, cuenca de la cual hace parte la quebrada Caquinal. Sin embargo, hemos decidido calcularlo nuevamente por nuestros propios medios, pues la información presentada era muy general y presentaba algunas inconsistencias frente a la información capturada en esta investigación.

Para la elaboración del análisis hidrológico, se elaboró un análisis de la información disponible, esta comprende información de lluvia e información de caudales. La primera fue empleada para la elaboración del balance hídrico y la segunda como ayuda para la regionalización de la curva de duración de caudales medios.

El análisis de calidad de la información de precipitación se basó en la curva de masa, la cual indica la consistencia de los datos. Las estaciones consideradas fueron Alto del Tigre, Choachí, Fómeque, Las Casas y Puente Abadía Llano Largo. Todas mostraron datos de buena calidad.

El análisis de calidad de las estaciones de caudales se basó en curvas de masa, diagramas de puntos y curvas diferenciales de masa. Se analizaron las estaciones sobre la cuenca colindante del Guatiquía, la cual se considera tendría condiciones muy similares a las cuencas de estudio. Finalmente, se construyeron las curvas de duración de caudales.

La estación Puente Abadía presenta registros de caudales medios mensuales desde 1969 hasta 1985 y se encuentra ubicada en la parte media de la cuenca del río Guatiquía en una altitud cercana a los 523 m. s. n. m. (altitud muy baja comparada con las de estudio, sin embargo, se empleó con fines comparativos). Esta presenta un registro continuo durante todo su periodo. La estación Llano Largo está a una altitud de 2980 m y la estación Oro Podrido, a una altitud de 1345 m. Esta se ubica en la cuenca del río Negro (la misma cuenca de la quebrada Caquinal).

Los datos de caudal de las estaciones analizadas presentan buena calidad y son aptos para la elaboración de una curva de duración de caudales regional aplicable a las cuencas en estudio.

Para determinar los caudales en las coordenadas de las bocatomas, se elaboró un balance hídrico, empleando los registros de precipitación analizados; la precipitación se estimó a partir de isoyetas y para la estimación de la evapotranspiración, se utilizó la ecuación de Turc.

Con base en las isoyetas calculadas, se procedió a estimar la precipitación media en las cuencas de estudio. Igualmente, se calculó la evapotranspiración por medio de la ecuación de Turc (valores en milímetros), y se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 3; finalmente, para determinar el caudal, la diferencia entre la

precipitación y la evapotranspiración fue afectada por el área de la cuenca. Debido a que la cuenca Caquinal es afectada por la precipitación horizontal, se procedió a afectar el cálculo de la precipitación vertical por un 20 %.

Figura 11. Isoyetas

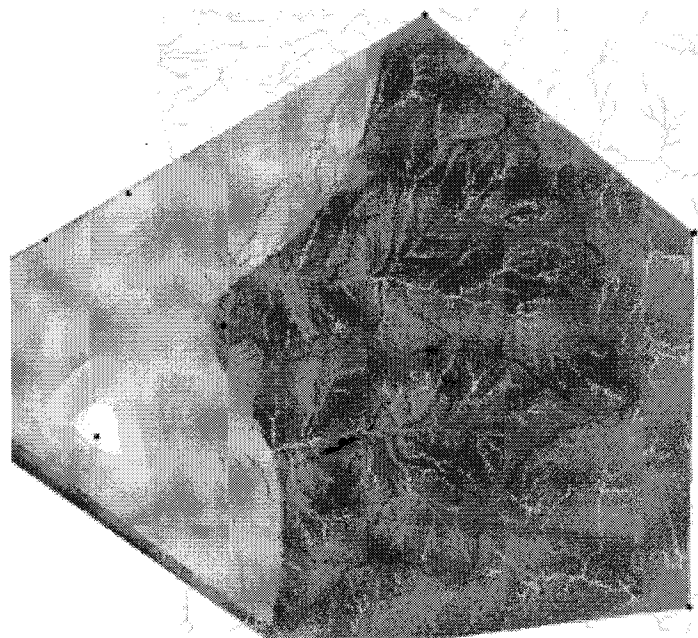


Tabla 3. Parámetros hidrometeorológicos de la quebrada Caquinal

Parámetros	Caquinal
P (precipitación mm/año), incluye 20 % de precipitación horizontal	2100
Evt (evapotranspiración mm/año)	701
Kc	0,90
Temperatura (°C)	17
L	739,45
P-E (mm/año)	1469
Área (m²)	1,79E+07
Qmedio	0,83

El caudal se estimó con la siguiente fórmula:

$$Q = (P - E_v T) * K_c$$

K_c es un factor que depende de las coberturas vegetales.

$$L = 300 + 25 * T + 0,05 * \sqrt{T}$$

$$Evt = \frac{P}{\sqrt{\left(0,9 + \frac{P^2}{L^2}\right)}}$$

Se procedió a elaborar una curva de duración de caudales adimensional regionalizada de la zona, con la cual se construyen las curvas de duración de caudales para la quebrada Caquinal, en el punto de captación de las bocatomas. A continuación, se presentan los resultados.

Se debe recordar, de la ecuación 1, que en la curva adimensional de caudales, en el eje Y se localizan los valores dados de la relación entre los caudales absolutos y los caudales medios y en el eje X va el porcentaje del tiempo, esto se muestra en la figura 12. Por su parte, teniendo el valor del caudal promedio de la quebrada Caquinal, es posible reemplazar en la ecuación 1 con el fin de obtener los valores absolutos y graficar la curva para este afluente y obtener los valores de los caudales que son igualados o excedidos durante un porcentaje del tiempo definido en el eje X; esta curva de duración de caudales para la quebrada Caquinal se muestra en la figura 13.

Figura 12. Curva de duración de caudales adimensional regionalizada de la zona

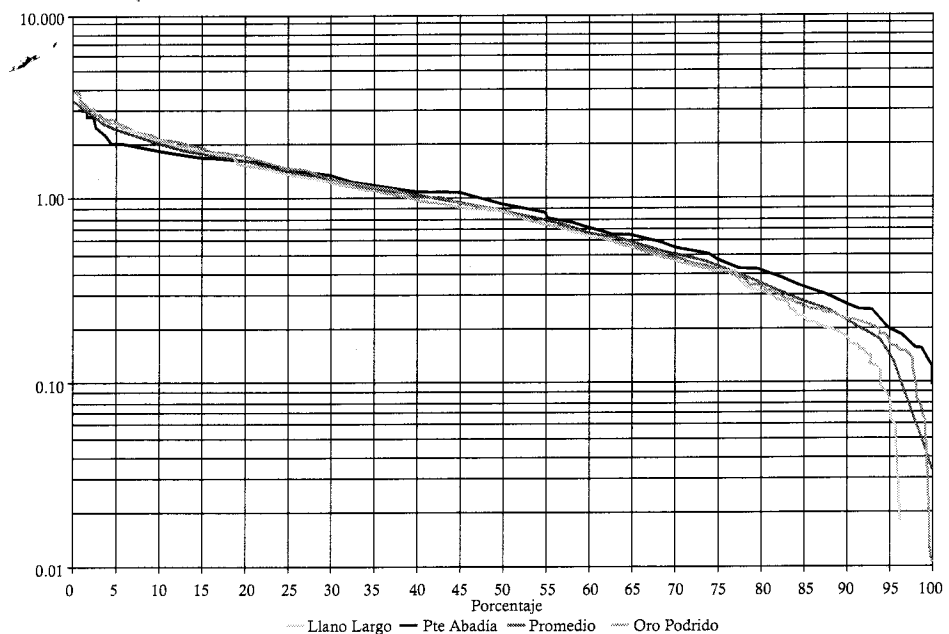


Figura 13. Curva de duración de caudales cuenca Caquinal

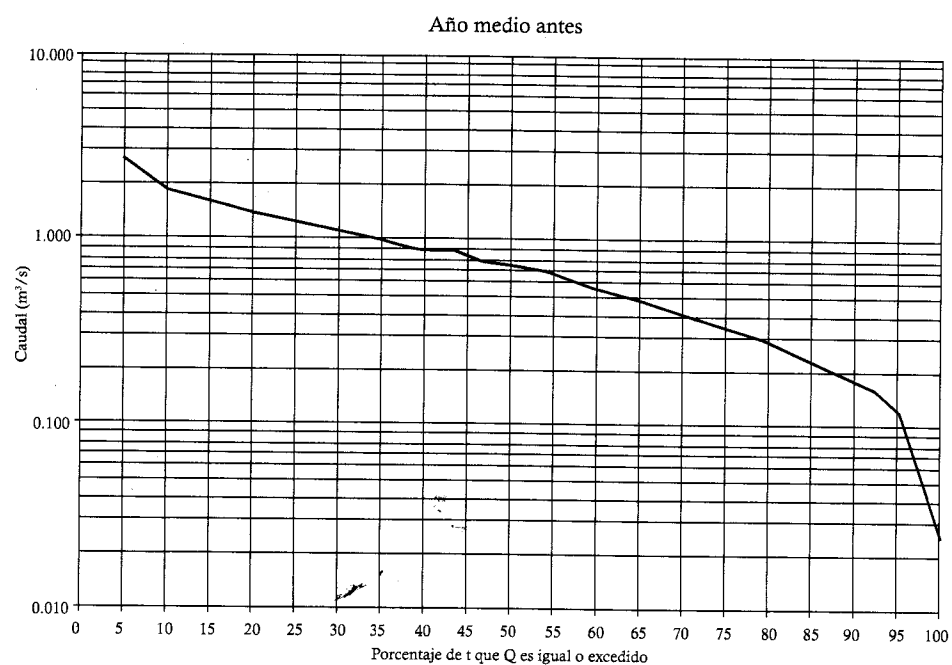


Tabla 4. Resultados del modelamiento hidrológico

Porcentaje del tiempo que el caudal es excedido (%)	q_i	Valor caudal quebrada Caquinal ($q_i * Q_{medio}$) (m ³ /s)
0,0	3,48	2,904
5,0	2,37	1,976
10,0	2,02	1,681
15,0	1,77	1,474
20,0	1,59	1,327
25,0	1,43	1,193
30,0	1,29	1,073
35,0	1,15	0,961
40,0	1,06	0,885
45,0	0,97	0,809
50,0	0,89	0,743
55,0	0,76	0,632
60,0	0,66	0,552
65,0	0,58	0,483
70,0	0,50	0,415

Porcentaje del tiempo que el caudal es excedido (%)	q_i	Valor caudal quebrada Caquinal ($q_i * Q_{medio}$) (m ³ /s)
75,0	0,43	0,359
80,0	0,35	0,293
85,0	0,27	0,228
90,0	0,22	0,186
95,0	0,15	0,122
100	0,03	0,028

Los valores fueron calculados considerando todos los decimales, por esta razón, al hacer el cálculo manual con los datos mostrados en la tabla 4, no se obtienen idénticos valores.

Si bien hemos obtenido algunos valores que nos permiten definir un caudal ecológico, o remanente en la fuente, esto debe considerarse solamente una aproximación, pues no se cuenta con registros de caudales ni con registros de precipitación en el área de estudio y las precipitaciones fueron calculadas mediante isoyetas; lo ideal habría sido contar con suficientes registros históricos en el punto de interés; además, la pequeña área de la cuenca hace que la variación de sus respuestas a fenómenos climáticos sea más rápida que para las estaciones limnimétricas utilizadas como base. Sin embargo, los valores obtenidos deben considerarse como una primera aproximación.

Consumos y pérdidas

Al establecer la oferta hídrica del área de estudio, fue necesario calcular los consumos de los usuarios y las pérdidas que existen en el sistema. El cálculo de los consumos se realizó por medio de una metodología de aforos volumétricos para cada uno de los puntos pertenecientes a los diferentes distritos de riego; posteriormente, se estableció el total del agua consumida por el distrito, mediante la sumatoria de los caudales individuales.

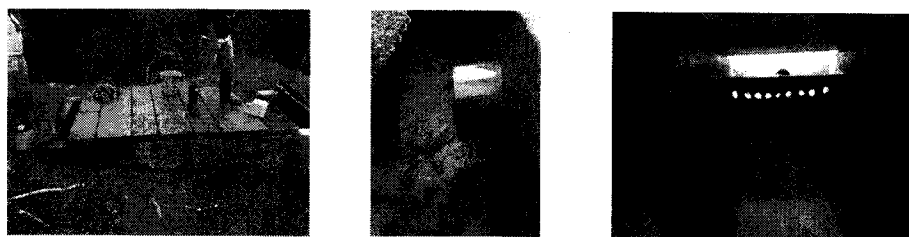
El valor del caudal consumido fue comparado con el valor del caudal aforado en la estructura de captación del sistema, lo que permitió establecer las pérdidas en el transporte del sistema. Es importante aclarar que inicialmente se había planteado realizar un muestreo estadístico estratificado. Sin embargo, la primera campaña arrojó resultados no representativos, por lo que se decidió aforar todos los puntos concesionados. Es decir, se tomó información del 100 % de los usuarios.

Cálculo de la oferta

Para calcular la oferta de agua del sistema, se realizó el aforo volumétrico a cada una de las estructuras de captación; este aforo fue diferenciado debido a las condiciones técnicas de construcción y operación de cada sistema.

En el distrito de riego formal, fue necesario aforar el desarenador, del cual se conocían su capacidad y sus dimensiones; se calculó el tiempo de llenado y se estableció el valor del caudal que ingresa al sistema mediante la relación volumen/tiempo (figura 14).

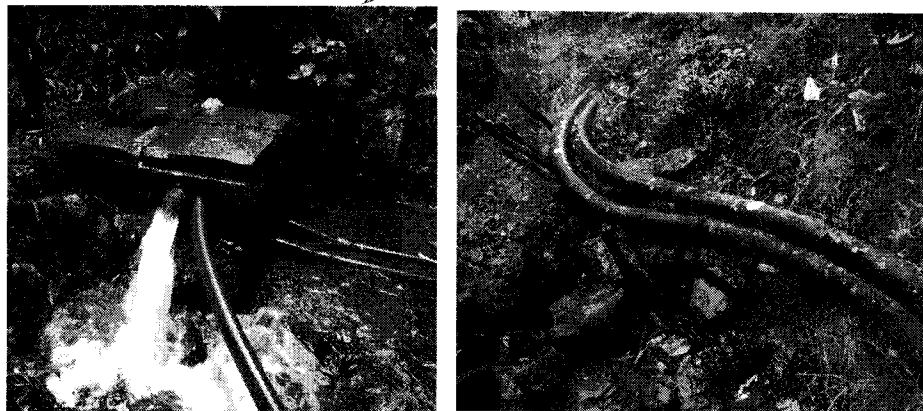
Figura 14. Aforo del desarenador del distrito de riego formal



Fuente: registro fotográfico de las diferentes salidas de campo.

Para el distrito de riego semiformal, fue necesario aforar con baldes las mangueras de conducción a unos 50 m de la bocatoma, debido a que, como se ve en la figura 15a, es imposible hacer la medición directamente en la estructura. La figura 15b muestra el lugar donde se desconectó la manguera para hacer el aforo; en este lugar, mediante un balde y un cronómetro, se calculó la cantidad de agua que estaba ingresando al sistema por la relación volumen/tiempo.

Figura 15. Aforo en las estructuras del distrito de riego semiformal



Fuente: registro fotográfico de las diferentes salidas de campo.

Mediante la recopilación histórica y las entrevistas a líderes, fontaneros y presidentes de los distritos de riego, se ubicaron cada uno de los puntos pertenecientes a los distritos. Posteriormente, se procedió a aforar tres veces cada punto por medio de un balde. Se calculó el tiempo de llenado del balde y mediante la relación volumen/ tiempo, se estableció el caudal que estaba recibiendo cada usuario (figura 16).

Cálculo de las pérdidas

Para establecer las pérdidas en los sistemas, se determinó la diferencia entre el caudal que entra a cada sistema (caudal en las bocatomas) y la sumatoria del caudal que reciben cada uno de los usuarios del distrito. Se debe recalcar que los sistemas cuentan

con estructuras intermedias (cámaras de quiebre de presión, tanques de repartición y tanques de almacenamiento), donde sería muy importante realizar aforos volumétricos que permitan establecer pérdidas en diferentes tramos, pero, como se muestra en la figura 17, es imposible acceder a ellas para realizar el aforo, bien sea por estar cerradas o porque los puntos de medición se encuentran subterráneos o a nivel del suelo.

Figura 16. Ejemplos de aforos realizados en cada predio



Fuente: registro fotográfico de las diferentes salidas de campo.

Figura 17. Tanques de almacenamiento, cámaras de quiebre de presión y tanques de repartición de los diferentes distritos



Fuente: registro fotográfico de las diferentes salidas de campo.

Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los distritos de riego; primero, se dan a conocer los resultados del distrito formal y posteriormente, se contrastan con los resultados del distrito de riego semiformal. Debe aclararse que dentro de los resultados no se incluyen los distritos de riego informal, pues debi-

do a su alta variabilidad, dispersión y complejidad, es más difícil medir y establecer su comportamiento, pero se asume que sus condiciones y comportamientos son más deficientes a los de estos dos sistemas estudiados.

Para una mayor claridad y comprensión de los fenómenos que ocurren en cada sistema, se presentan los resultados en unidades y no en litros/segundo, lo que permitirá una mejor comprensión y comparación. Si bien los detalles se presentan a continuación, se debe destacar que tanto el distrito de riego formal como el semiformal presentaron pérdidas de agua en la red menores a la mayor parte de los casos reportados en el capítulo “Pérdidas de agua en sistemas de distribución”.

Distrito de riego formal

Como ya se había mencionado, un distrito de carácter formal presenta unas características de operación, mantenimiento y seguimiento que respaldan los resultados obtenidos en la tabla 5; además, marcan grandes diferencias con los distritos de riego semiformales y, más aún, con los informales.

En un primer análisis, está la diferencia entre el número de usuarios reales y concesionados; estos tres usuarios están suspendidos y no están usando el recurso (falta de pago o usuarios que no se encuentran dentro del área del distrito). Para evitar desperdicios de recurso en los predios de estos usuarios, el fontanero está en la capacidad de sellar los puntos, previa autorización de las directivas del distrito y por solicitud de los mismos usuarios. Esta característica garantiza un control sobre el uso que los regantes tienen de su recurso y, además, la capacidad para evitar conexiones ilegales cuando los usuarios no estén aprovechando el agua. Asimismo, en cada predio, el usuario tiene la posibilidad de cerrar el flujo hacia su predio cuando no desee usarlo, esto lo puede realizar cada usuario sin importar el momento del día y le permite regular y controlar el manejo del agua dentro de su predio; igualmente, el distrito tiene las herramientas para regular este exceso de caudal por medio de un sistema de tubería que hace el retorno a la fuente de captación (figura 18). En los aforos realizados en las salidas de campo, se denominó caudal que retorna a la fuente y tiene un valor promedio de 15,54 unidades. Estas deben ser restadas a las 100 unidades que ingresan al sistema y con esas unidades deben calcularse las pérdidas.

El distrito de riego formal tiene unas pérdidas de aproximadamente 19,15 unidades porcentuales, valor que puede considerarse aceptable si se compara con el valor de 25 %, aceptado para el diseño de acueductos establecido en la modificación excepcional del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2009; Ministerio de Desarrollo Económico, 2000a). Debe considerarse que los acueductos requieren especificaciones técnicas superiores y que no se han reportado casos en Colombia de sistemas que logren tener pérdidas que cumplan con esta normatividad; es decir, se esperaría que un distrito de riego tuviera pérdidas superiores a las de un acueducto bien gerenciado. Estas pérdidas no son de carácter superficial, pues en las diferentes salidas que se realizaron no se evidenciaron, a simple vista, pérdidas, daños o fugas; se puede mencionar la percepción de los usuarios y del fontanero del distrito, quienes tienen una uniformidad de criterios acerca de las pérdidas, pues consideran que su distrito está construido bajo especificaciones técnicas, con lo que estas disminuyen; y que si

por algún motivo llega a ocurrir alguna afectación o daño dentro del sistema, están en la posibilidad de detectar, informar y cerrar el paso de flujo para que el fontanero permanente realice las reparaciones respectivas (González, 2015).

Figura 18. Sistema de retorno del distrito de riego formal a la fuente de abastecimiento



Fuente: registro fotográfico de las diferentes salidas de campo.

Es importante recalcar que durante las cuatro salidas de campo, solo se observó un daño en el distrito de riego formal y fue por motivo de la construcción de la nueva infraestructura de un distrito de riego complementario para la zona que rompió la conducción de un usuario.

Figura 19. Registro fotográfico del único daño encontrado a lo largo de las visitas de campo en el distrito formal



Fuente: registro fotográfico de las diferentes salidas de campo.

En la tabla 5, se calcularon los parámetros de caudal concesionado por usuario y por punto; este valor se establece como referencia para comparar con el caudal que

realmente llega a los usuarios cuando se está aforando y encontrar el valor promedio en unidades que pierde cada usuario. Como muestra la tabla 5, se puede ver que cada usuario del distrito de riego formal pierde 0,53 unidades en promedio por cada 100 unidades de caudal que entran al sistema.

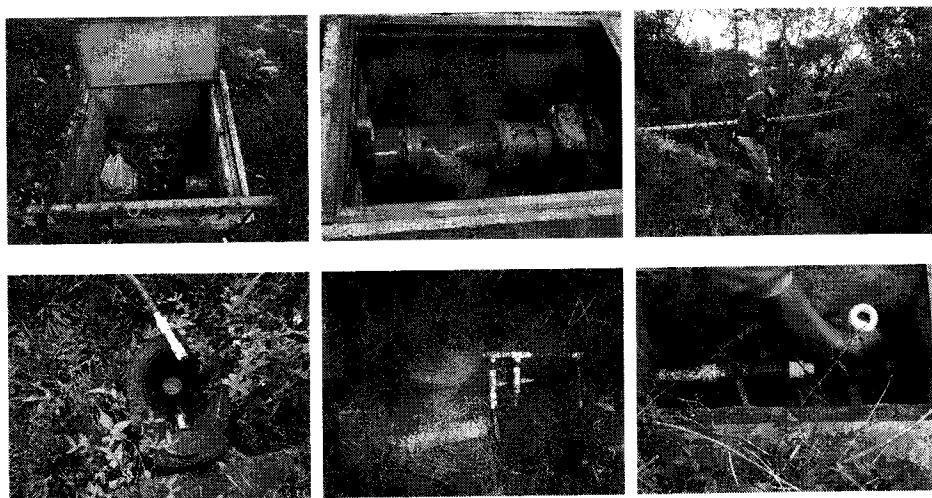
Tabla 5. Resultados distrito de riego formal

Parámetro	Dato
# Usuarios concesionados (puntos)	69
# Usuarios reales (usuarios)	66
Caudal captado en unidades	100
Caudal que retorna a la fuente (unidades)	15,54
Caudal que sale del punto anterior hacia los usuarios (unidades)	84,46
Caudal total que llega a los usuarios (unidades)	65,31
Pérdidas entre la bocatoma y los usuarios (unidades)	19,15
Caudal concesionado por punto (unidades)	1,45
Caudal concesionado por usuario (unidades)	1,52
Caudal aforado promedio por punto (unidades)	0,95
Caudal aforado promedio por usuario (unidades)	0,99
Diferencia entre el caudal concesionado y el caudal aforado por punto (unidades)	0,51
Diferencia entre el caudal concesionado y el caudal aforado por usuario (unidades)	0,53
Área concesionada	1
Área agrícola	0,9

Percepción de los usuarios sobre las pérdidas en el sistema formal

En este sistema de riego formal, los usuarios tienen ante este tipo de estudios una percepción desfavorable, pues consideran que su sistema es reciente y, por tal condición, es casi imposible que se presenten pérdidas. Tampoco ven como una oportunidad de mejora y optimización de su sistema el evaluar las pérdidas en la red, pues consideran que estas estructuras han sido diseñadas con los criterios técnicos requeridos y no tienen por qué presentarse; asimismo, al interior de sus predios, no consideran que existan pérdidas, pues aseguran estar en la capacidad de manejar el flujo y controlar los daños. Los usuarios consideran el pago como la herramienta para verificar las pérdidas e, incluso, los abusos en consumo de agua; por tal razón, no consideran necesario saber si existen pérdidas en sus sistemas.

Figura 20. Imágenes que respaldan la percepción de los usuarios del distrito de riego formal



Fuente: registro fotográfico de las diferentes salidas de campo.

Distrito de riego semiformal

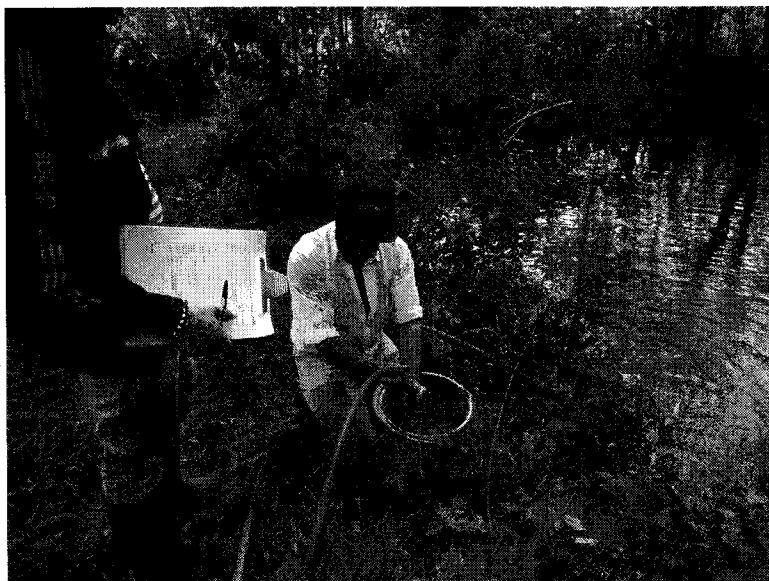
Un distrito de carácter semiformal posee condiciones formales e informales; la primera, porque cuenta con una concesión de aguas por parte de la autoridad ambiental, está reportado en las estadísticas nacionales, tiene algunas estructuras técnicas para su abastecimiento (bocatoma, tanques de repartición, entre otros), cuenta con una red de distribución (construida y gestionada empíricamente por la comunidad) y los usuarios están asociados en torno al distrito de riego, y la segunda, porque algunos usuarios suplen sus necesidades por medio de acuerdos, permisos, préstamos, alquiler u otras fuentes de captación; funciona como un proceso asociativo y comunitario de pequeños y medianos productores que se autoabastecen y comercializan sus productos hacia centros urbanos cercanos. Sus estructuras no se han diseñado con criterios ingenieriles y cumplen solamente algunos de los requisitos legales para un distrito de riego formal.

Inicialmente, la tabla 6 muestra una gran diferencia entre el número de usuarios concesionados y el número de usuarios reales. Esta diferencia de doce usuarios se debe, en particular, a que dentro de estos distritos de riego operan con facilidad los acuerdos, principalmente el alquiler, las sociedades y los préstamos; en la figura 21, se puede apreciar un estanque de almacenamiento a donde llegan varios puntos de agua y donde se recolecta el agua que después es suministrada a un solo usuario.

Aunque esta práctica no es permitida, y en algunos casos genera conflictos, se ha convertido en una alternativa para que los usuarios disminuyan los desperdicios de agua, garanticen el almacenamiento del recurso para épocas secas y, además, solucionen la dificultad de no poder cerrar el flujo constante de agua durante todo el día. Esta última problemática se muestra en la figura 22, donde se ve cómo el punto de un usuario, que en un momento del día no requiere del agua para riego, debe ponerse a

fluir sin control en cualquier lugar, ya sea canal, zanja, pozo o cultivo; esta situación no puede ser controlada, debido a que si algún usuario cierra o impide el flujo de caudal, puede generar una ruptura de la tubería de distribución por el aumento de la presión.

Figura 21. Ejemplo de un estanque de captación que recibe varios puntos para un solo usuario



Fuente: registro fotográfico de las diferentes salidas de campo.

Figura 22. Ejemplos de caudales que se dejan fluir cuando no se están usando



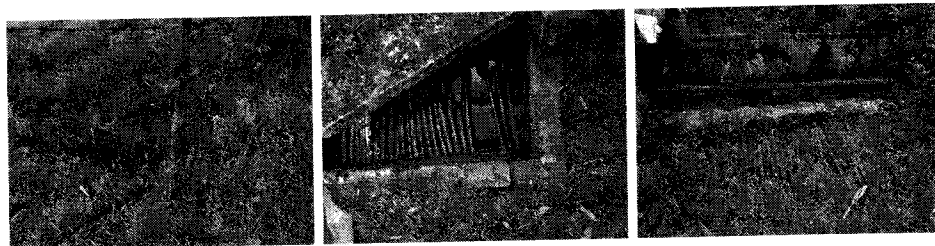
Fuente: registro fotográfico de las diferentes salidas de campo.

En la tabla 6, se hace referencia al caudal que llega a los tanques de distribución, pero durante las salidas de campo realizadas a este distrito, no se logró acceder a ninguno de ellos, pues como se muestra en la figura 23, las tuberías llegan enterradas y su acceso es muy difícil. La importancia de lograr establecer mediciones en estos puntos radica en la necesidad de conocer el comportamiento por tramos de cada uno de los sistemas; en la figura, también se pueden ver cómo en estas estructuras existen pérdidas que no pueden ser contabilizadas.

Tabla 6. Resultados distrito de riego semiformal

Parámetro	Dato
# Usuarios concesionados (puntos)	50
# Usuarios reales (usuarios)	38
Caudal captado (unidades)	100
	Promedio
Caudal que llega a los tanques o puntos de distribución	N/R
Pérdidas entre la captación (bocatoma) y el punto de distribución	N/A
Caudal total que llega a los usuarios (unidades)	76,34
Pérdidas entre la bocatoma y los usuarios (unidades)	23,66
Caudal aforado promedio por punto (unidades)	1,53
Caudal aforado promedio por usuario (unidades)	2,01
Caudal concesionado por punto (unidades)	2,00
Caudal concesionado por usuario (unidades)	2,63
Diferencia entre el caudal concesionado y el caudal aforado por punto (Unidades)	0,47
Diferencia entre el caudal concesionado y el caudal aforado por usuario (unidades)	0,62
Área concesionada ha	1,0
Área agrícola ha	1,8

Figura 23. Tanques de repartición y almacenamiento



Fuente: registro fotográfico de las diferentes salidas de campo.

La tabla 6 muestra que en promedio, el distrito de riego semiformal presenta pérdidas de 23,66 unidades porcentuales, podría decirse que este valor cumple con el 25 % aceptado para el diseño de acueductos establecido en la modificación excepcional

del RAS 2000 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2009; Ministerio de Desarrollo Económico, 2000a), valor con el cual también se comparó el distrito de riego formal. Esta apreciación es contraria a las observaciones hechas durante las diferentes visitas de campo, donde se evidenciaron pérdidas en las estructuras de captación y almacenamiento o a lo largo de la red de transporte, la cual se encuentra al aire libre o a poca profundidad a lo largo de los diferentes tramos, como se puede apreciar en la figura 24.

Figura 24. Sistema de conducción por medio de tuberías del distrito de riego Asorioblanco



Fuente: registro fotográfico de las diferentes salidas de campo.

Esta situación lleva a buscar explicaciones al comportamiento del distrito y, para ello, nos remitimos a las observaciones hechas en campo, consignadas en las respectivas bitácoras:

Para el caso de los sistemas de riego semiformal, se observan pérdidas desde la bocatoma, pues los sistemas no cuentan con estructuras acordes a la captación que se realiza, por lo cual existe un rebose (este llega a la misma fuente de abastecimiento); continuando el recorrido entre las bocatomas y las cajas de inspección, en el sistema de conducción se observan, a simple vista, pérdidas durante todo el recorrido por pequeñas perforaciones y, también, en las uniones entre las diferentes mangueras, pues sus sistemas de acople no son lo suficientemente herméticos y se encuentran desperdicios de agua por todo el camino. En los tanques de inspección, existe rebose, en la mayoría de los casos no controlado.

En la red de distribución de los sistemas de riego semiformales es donde más se observan pérdidas, a simple vista se observan mangueras desconectadas y regando el agua a la carretera. También, debido al sistema de conducción aéreo, las mangueras son propensas a enredarse con vehículos o a que otros usuarios las afecten con sus actividades diarias. Las mangueras que van enterradas no están a gran profundidad, por tal razón cuando los usuarios realizan actividades de labranza de la tierra, muchas veces rompen las mangueras de sus vecinos. Asimismo, en las mangueras que no están enterradas ni a un nivel alto, se evidencian conexiones ilegales de otras personas, estas son muy rústicas y, por lo general, generan pérdidas al sistema.

Las mayores pérdidas en los sistemas de riego semiformal se dan por la dificultad que tienen los usuarios para cerrar el paso de agua cuando no la están usando en el riego de sus cultivos; esta condición fomenta las pérdidas en el sistema y aunque algunos usuarios han diseñado estrategias para no perder el recurso, como tanques, pozos y otro tipo de reservorios, al tener un flujo constante de agua, durante todo el día, y alcanzar la capacidad de las estructuras de almacenamiento, el agua no se puede detener y debe dejarse correr, por lo cual se generan pérdidas en el sistema que muchas veces son difíciles de cuantificar (González, 2015).

Lo expuesto anteriormente lleva a pensar que el valor obtenido de pérdidas no es el valor real y que los usuarios de alguna manera acceden a diferentes formas para suplir sus necesidades hídricas, probablemente derivando el caudal de otras fuentes hacia el sistema de riego, las cuales no fueron posibles de aforar debido a que esta suposición fue negada por los miembros de la comunidad. Sin embargo, juegan un papel importante los valores calculados de caudal aforado promedio por punto y usuario y el caudal concesionado por punto y por usuario.

Si se tiene en cuenta que el valor concesionado por punto es el valor que la autoridad concesiona a cada uno de los cincuenta usuarios que hacen parte del sistema (que para este caso tiene un valor de 2,00 unidades por cada 100 suministradas) y que se compara con el valor aforado por usuario, que es el valor real en unidades que está recibiendo cada usuario del distrito (que para este caso en promedio es de 2,01), se puede concluir que mediante los acuerdos, préstamos, intercambios y demás, los usuarios buscan de alguna forma alcanzar el valor que se les ha autorizado por la respectiva autoridad ambiental; y además, suplir las necesidades hídricas de sus cultivos; lo que lleva a pensar que usuarios que no cuentan con este tipo de acuerdos pueden llegar a tener en algún momento déficit de agua.

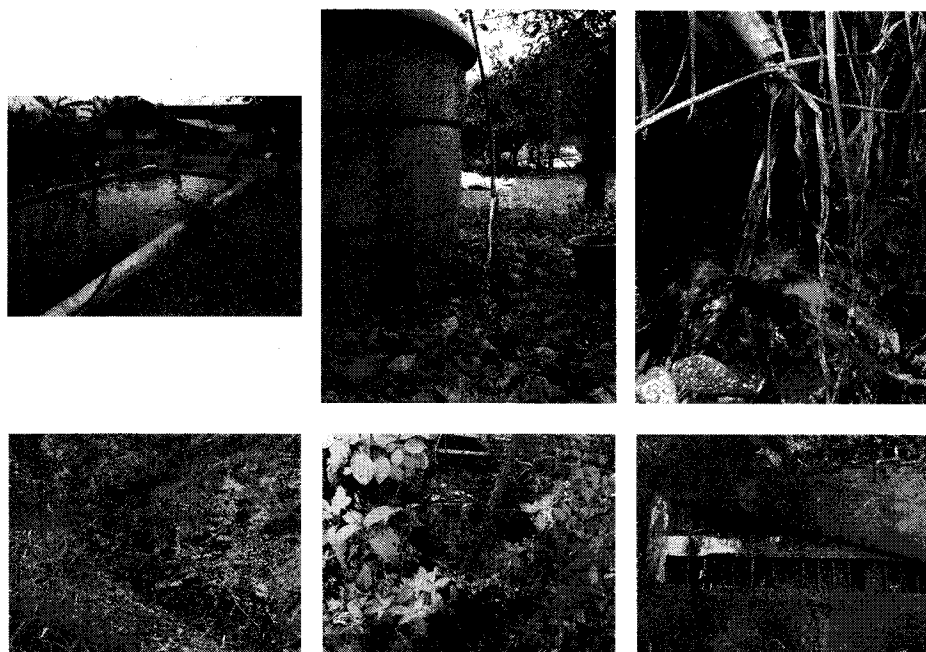
Aquí es importante recalcar que además de esta diferencia del caudal concesionado contra el caudal real que llega a cada usuario, los usuarios tienen que afrontar el problema de no incluir dentro del caudal concesionado las pérdidas en el transporte, que para estos sistemas son mucho más altas, pues, como se pudo ver al analizar las concesiones de agua de los dos distritos estudiados, no existe diferenciación según el grado de tecnificación y desarrollo de las diferentes estructuras del sistema.

Otro fenómeno que puede validar el valor de pérdidas obtenido es la dificultad de los usuarios de almacenar el recurso o de cerrar su paso cuando no lo están usando; esta situación puede generar que los usuarios pongan sus mangueras a regar en cualquier parte del sistema y propicien que otros usuarios conecten sus mangueras para

acceder a una mayor cantidad de recurso, o que se generen filtraciones y aumente la cantidad de agua de la que disponen. Esto se muestra en la figura 25, donde se puede ver, además, la diferencia de caudales entre unos usuarios y otros.

Otro factor que influye en las pérdidas es la dificultad de contar con un fontanero de forma permante, pues si bien las afectaciones o daños en el sistema son solucionados de forma comunitaria, cuando no existe el conocimiento o las herramientas para resolver el problema, su solución puede llegar a tardar varios días mientras se gestionan los materiales y el personal idóneo; en estas situaciones, el recurso debe dejarse correr sin ningún tipo de control, pues no existe forma de cerrar el paso de agua por sectores y, de llevarse a cabo el cierre, es necesario realizarlo para todo el distrito.

Figura 25. Ejemplos de reboses y diferencias de caudales entre usuarios



Fuente: registro fotográfico de las diferentes salidas de campo.

Cabe mencionar que entre más lejos se encuentren los usuarios de la estructura de captación y del tanque de repartición, es menor la cantidad de recurso que pueden obtener o mayor la dificultad para solucionar sus problemas; un ejemplo claro es la situación de una usuaria, ubicada en la zona baja del distrito, que en ninguna de las salidas de campo realizadas contó con servicio de agua; se pudo establecer que, en algunos casos, personas malintencionadas desconectaban su manguera de transporte en la zona alta para derivar su recurso y, en otros casos, tenía daños en lugares muy alejados de su predio que ella no podía ir a reparar por sus propias manos o no tenía la capacidad de informar a alguien para que realizara esta labor.

Percepción de los usuarios sobre las pérdidas en el sistema semiformal

Los usuarios del sistema de riego semiformal consideran que es indispensable medir y evaluar las pérdidas en los sistemas de riego; creen que es una oportunidad para mejorar el acceso al agua y la cobertura; incluso, algunos tienden a realizar comparaciones entre los distritos para evaluar su comportamiento. Todos los usuarios concuerdan en que la imposibilidad de cerrar el paso del agua cuando no la están usando influye sobre las pérdidas en el sistema. Asimismo, creen que muchas de las pérdidas en el sistema se dan por los robos de agua en la parte alta por parte de personas externas al distrito, quienes cortan o desconectan la manguera para abastecerse del líquido y, una vez usado el recurso, no se realiza la reconexión o arreglo, lo que deja el agua perdiéndose en cualquier punto del sistema.

Los usuarios ven como una gran oportunidad para mejorar la eficiencia del manejo de agua el evaluar las pérdidas, además de que es una fuente de información para demostrar a las entidades y autoridades encargadas la necesidad de tecnificar y mejorar sus sistemas para obtener un mayor caudal o una mayor cobertura; asimismo, para dar a conocer los procesos de protección de sus fuentes de abastecimiento.

Los usuarios consideran que dentro de los sistemas semiformales existe facilidad para el aumento de las pérdidas, pues creen que algunas personas, pertenecientes al distrito o ajenas a él, tienen facilidades para abastecerse de sus recursos; incluso, quienes están en la zona baja de los distritos manifiestan que pertenecen a estos, pero que no les llega el agua por la que pagan. Los usuarios destacan que la red con la que cuentan en el distrito propicia los daños, taponamientos, modificaciones y, a su vez, no tiene la capacidad suficiente para abastecer a los usuarios; enfatizan en la antigüedad de la infraestructura que exacerba sus problemas. Asimismo, el no contar con un fontanero exclusivo para el distrito impide hacer un continuo mantenimiento o seguimiento a la red, por lo cual los usuarios consideran esto como un factor clave a la hora de hablar de pérdidas del sistema.

En lo que respecta a las pérdidas dentro de los predios, los usuarios en su mayoría no dan mayor información, pues creen que contar este tipo de detalles traerá repercusiones sobre el manejo y uso que dan al recurso, o incluso que perderán el beneficio de pertenecer al distrito. Dentro de los pocos que realizan comentarios, manifiestan que hacen un buen uso del recurso para evitar las pérdidas y que, aun cuando no pueden cerrar el suministro continuo de agua, realizan estructuras de almacenamiento para disminuirlas; además, que revisan dentro de sus predios periódicamente sus mangueras y conexiones. Es un común denominador escuchar entre los usuarios que el agua que reciben nunca les alcanza para suplir el consumo que requieren en sus sistemas de producción.

Indicadores. Suministro relativo de agua; suministro relativo de riego

El suministro relativo del agua, como se ha dicho, se calculó considerando los caudales demandados por los usuarios según sus prácticas culturales; para ello, fue necesario aforar el caudal utilizado durante las faenas de riego de distintos cultivos utilizando métodos volumétricos. Se tomó nota del tipo de sistema de riego (aspersor, mateo o goteo) y se calcularon los volúmenes de agua utilizados y el tiempo de riego. Lo anterior nos arrojó el valor del volumen de agua que es utilizada por los

agricultores, además se tuvo en cuenta el agua requerida para consumo humano y animal. Sin embargo, los usos no agrícolas no son significativos en comparación con los volúmenes requeridos para riego.

Por su parte, la oferta total se calculó midiendo, también por métodos volumétricos, el caudal disponible a la entrada del predio.

Tabla 7. Suministros relativos de agua

	Sistema formal	Sistema semiformal
Suministro relativo de agua	3,52	1,33
c.v.e (%)	36,04	15,82

Fuente: tomado de Gutiérrez-Malaxechebarría (2014b).

Estos resultados deben analizarse desde dos puntos de vista complementarios: la eficiencia y la necesidad. Por un lado, el sistema semiformal aprovecha prácticamente toda el agua que dispone, mientras que el formal utiliza solo la tercera parte, esto puede indicar una mayor eficiencia del uso del agua a nivel predial en los sistemas semiformales, consecuente con la bibliografía estudiada y discutida en el capítulo “Pérdidas de agua en sistemas de distribución”. Por otra parte, la mayor intensidad agrícola en el sistema semiformal demanda mayores volúmenes de agua, pues se debe recordar que las áreas cultivadas por predio en este sistema son del doble del sistema formal; es decir, las mayores demandas de agua en predios del sistema semiformal hacen que esta se use eficientemente, pues las necesidades no permiten su desperdicio. De hecho, el valor de 1,33 para el sistema de riego semiformal, además de mostrar una gran eficiencia en el manejo del agua, podría interpretarse como que la oferta de agua se ha convertido en una limitante para la expansión de las áreas agrícolas de estos sistemas.

Conclusiones

Este es el primer trabajo sobre el que tengamos conocimiento que estudia las pérdidas de agua en sistemas comunitarios de riego. Si bien la literatura presenta algunos casos de estudio de pérdidas técnicas de agua en sistemas de acueducto, son pocas las referencias encontradas sobre este tema para sistemas de riego y la mayor parte de ellas se encargan de estudiar aquellas que se presentan en sistemas de gran extensión.

Si bien esta investigación se realizó para dos sistemas específicos en Fómeque, Cundinamarca, busca representar una realidad más amplia, de la cual los casos de estudio son representativos. Se espera que los hallazgos y las recomendaciones permitan avanzar en la mejor gestión de otros sistemas semejantes; en todo caso y ante la falta de mayores estudios como este, se sugiere replicar el trabajo en zonas con otras condiciones, con el fin de obtener mayor información y de caracterizar otras realidades.

Si bien lo siguiente ya se dijo anteriormente, consideramos importante volverlo a mencionar: el caso estudiado construye el concepto de pérdidas desde distintos enfoques, el primero desde la eficiencia, con la cual se busca el mejoramiento técnico de los sistemas de riego en Colombia; el segundo, desde el punto de vista ambiental para la preservación de los ecosistemas de las fuentes de abastecimiento de los sistemas de riego; y por último, desde un enfoque social para mejorar la calidad de vida de las comunidades rurales que hacen parte de los sistemas de riego. Para este fin, se asumen las pérdidas como la diferencia entre el volumen de agua captada y el volumen de agua que llega a los puntos de consumo, teniendo en cuenta la captación, el almacenamiento y la conducción o transporte del agua.

Hemos presentado tres ejemplos de cálculo de caudales a concesionar, cada uno realizado por distintas entidades colombianas y ofrecen un resultado distinto, lo que no es de sorprender, pues en los cálculos de las necesidades de agua de los cultivos, entran varios factores que pueden ser calculados de distinta manera sin que esto afecte su rigor. En todo caso, ninguna de las experiencias presentadas tiene en cuenta las pérdidas de agua que se presentan en la red y, como se ha dicho, todo sistema presenta pérdidas, por lo tanto, su cálculo es necesario, pues de no hacerlo, es imposible que cada usuario reciba un caudal suficiente para sus necesidades.

Además de lo anterior, es importante resaltar la diferencia conceptual y las implicaciones prácticas entre lo que se constituye en caudal de diseño en flujo continuo y

el caudal que finalmente va a manejar el sistema de riego en su distribución. Asumir, como se viene haciendo desde las instituciones del Estado, que los caudales transportados son iguales a los concesionados es incurrir en el error antes mencionado.

Por lo mencionado, es necesario que los diseños de los sistemas de riego y los caudales concesionados se establezcan considerando las diferencias, dadas por las pérdidas de agua, con valores diferentes que tengan en cuenta la realidad de funcionamiento.

Aunque ya se manifestó con anterioridad, es necesario recalcar que dentro del estudio planteado no fue posible establecer las pérdidas de los usuarios del sistema informal, debido a la alta cantidad de formas de extracción y acceso al recurso y a la dificultad de establecer una metodología para medir la cantidad de agua que extraían de las fuentes y la cantidad que llegaba a los predios; pero se asumió que debido al bajo nivel de tecnificación, al desarrollo y a las condiciones de estos sistemas, las pérdidas son considerablemente mayores a las de los sistemas formales y semiformales.

Los resultados obtenidos muestran valores de pérdidas muy bajos, tanto para el sistema formal como para el semiformal. Los valores de pérdidas son menores que los reportados para la mayoría de casos de acueducto y muy inferiores a los sistemas de riego reportados y presentados en la revisión de literatura, lo que muestra un buen manejo técnico, que va de la mano de algunos estudios que sugieren que los sistemas autogestionados funcionan mejor que los otros.

Los buenos resultados obtenidos de bajas pérdidas de agua en los sistemas deben leerse entendiendo que estos son reconocidos por su éxito y, como tal, se estudiaron. No debe asumirse que todos los sistemas autogestionados se comportan de la misma manera. Los casos mostrados son muy buenos ejemplos de una conveniente combinación entre adecuada organización institucional y buen manejo técnico, algo que se considera más bien atípico.

Los sistemas estudiados buscan satisfacer varios objetivos simultáneamente y, si bien se analizan bajo el enfoque comparativo al contrastar sus índices con los reportados para otros sistemas, se cree que la inclusión del índice de suministro relativo adaptado, al incluir los usos culturales y no estimados teórica o técnicamente, intenta hacer una aproximación a un índice de desempeño interno de los procesos.

El índice de suministro relativo utilizado se acerca a un indicador técnico que considere los saberes locales, pues, como se mencionó, se calculó teniendo en cuenta el agua que se utiliza, de acuerdo con lo que el agricultor considera que debe suministrarse a un cultivo y no los valores estimados por métodos homologados científicamente. Sin embargo, en este documento, se calculó este indicador para valores anuales promedio, una mejor aproximación se obtendría considerando las variaciones temporales. Consideramos que este valor, si bien hace una aproximación interesante a un índice de tipo cultural/técnico, al tener en cuenta los valores anuales, subestima las penurias por agua que puedan presentarse, pues se suman las ofertas de épocas de lluvias (cuando no se riega), razón por la que consideramos necesario que en futuros estudios se calcule mes a mes.

Ante la ausencia de información hidrológica en la zona, se construyó una curva de duración de caudales adimensional regionalizada de la zona; esta estrategia,

si bien se encuentra soportada teóricamente y se utiliza con alguna frecuencia en cuencas no instrumentadas, da valores muy aproximados y para nada reemplaza la información que puede obtenerse a partir de datos históricos.

Buena parte de los sistemas comunitarios de riego que se ubican en las zonas de montaña se abastecen de cuencas con pequeñas áreas; las pequeñas áreas sumadas a la falta de datos hacen muy difícil definir los caudales ambientales y concesionables, por lo que es necesario trabajar en la definición de técnicas que permitan calcular estos caudales.

Reflexión final y recomendaciones

Esta investigación busca aportar al conocimiento de los sistemas de riego, en particular los de zonas de ladera, un campo aún poco estudiado. El conocimiento de su funcionamiento y reconocimiento de las pérdidas hidráulicas es un gran avance para aportar a su mejor gestión y avanzar en un uso eficiente del agua.

La normatividad colombiana para cálculo de concesiones de agua para sistemas de riego parte de un enorme error, el no considerar las pérdidas en el sistema. Para beneficio de los agricultores, e incluso de los ecosistemas, es necesario y urgente corregir este error, pues no es posible plantear estrategias de conservación desconociendo la realidad.

Es necesario reconocer la existencia de las pérdidas de agua en los sistemas de riego, es decir en las conducciones, y apuntar a un buen manejo de ellas llevándolas a un valor aceptable. Proponer que no existan pérdidas de agua va en contra de la realidad y, como se ha mostrado en la amplia revisión de literatura, es un imposible físico y técnico. Desconocer la existencia de las pérdidas apuntará a subdimensionar las infraestructuras y condenar a los usuarios a recibir menor cantidad de agua de la necesaria, y eventualmente a saltarse la reglamentación para poder captar el agua realmente requerida por valores superiores a los concesionados.

Si bien el diseño de sistemas de riego suele incluir las eficiencias en conducción, distribución y aplicación, lo que implica el reconocimiento de pérdidas, esto se queda solo en los cálculos, pues el agua que puede ser transportada es el agua concesionada, que, como ya se ha dicho y reiterado, es inferior a la requerida; es decir, un sistema de riego diseñado considerando la eficiencia o pérdidas quedará sobredimensionado ante los caudales otorgados por las autoridades ambientales y operará bajo condiciones hidráulicas distintas a las de diseño.

En este orden de ideas, es necesario que las concesiones de agua para sistemas de riego incluyan en su cálculo, además del área servida o la evapotranspiración potencial, un porcentaje de pérdidas en el sistema, como lo contempla la normatividad de agua potable.

El sistema formal estudiado opera de forma muy eficiente, con personal entrenado y con infraestructura actualizada; en sus buenas condiciones de operación, se encontró que sus pérdidas son del 19 % y, bajo las condiciones observadas, consideramos que es imposible disminuirlas; por tal razón, estimar un valor del 25 % como

valor permisible de pérdidas en los distritos de riego de zonas de ladera se considera un valor meta; cualquier valor por debajo de este número atenta contra la realidad de la mayor parte de sistemas de riego.

El sistema formal ofrece varias ventajas técnicas, el valor de suministro relativo de agua es casi tres veces superior al del sistema semiformal, en parte esto puede explicarse por un mejor control de las pérdidas hidráulicas que son de 19 %, frente a 23 % del sistema semiformal, e incluso por una menor intensificación agrícola.

Si bien es necesario reconocer la existencia de las pérdidas en el sistema, también es necesario disminuirlas a un valor alcanzable, pues esto implica menor presión sobre los ecosistemas y el aumento de disponibilidad de agua para los usuarios, pues aunque se capte la misma cantidad de agua, llegará una mayor cantidad a cada usuario, lo que permite ampliar el área cultivada por predio o incluso permitir la ampliación del número de usuarios.

El sistema formal estudiado provee varias estrategias orientadas hacia la disminución de las pérdidas; estas estrategias son de infraestructura y de gestión, mientras que las estrategias del sistema semiformal están orientadas casi exclusivamente a las de gestión. Entre las de infraestructura se encuentra la actualización y el cambio de las tuberías averiadas, la construcción de pasos a nivel, la instalación de controles de presión hidráulica y los planes de instalación de medidores. En las estrategias de gestión, compartidas por ambos sistemas, se destacan los recorridos periódicos por la red con el fin de identificar fallas y corregirlas, además de la coordinación entre usuarios para informar daños.

De lo anterior, podemos decir que ante una gestión semejante, la eficiencia del consumo de agua va a depender de la infraestructura. Sin embargo, un uso eficiente del agua requiere que tanto gestión como infraestructura estén coordinadas.

Las deficiencias técnicas con las que las autoridades ambientales soportan las decisiones del cálculo de caudales explican el sinnúmero de arreglos al interior de los distritos y las captaciones, estrategias que buscan asegurar un adecuado suministro de agua, acorde con la realidad, y subsanar las fallas normativas estatales.

Las falencias técnicas se suman a la descoordinación institucional evidenciada en la gran variabilidad de valores para calcular los módulos de consumos, cuyo soporte técnico, en muchos casos, los funcionarios son incapaces de explicar.

Los cálculos de las necesidades de los cultivos también deberán revisarse, pues la mayor parte de autoridades ambientales las definen como el promedio anual, lo que implica que los valores estén muy subdimensionados en periodos secos, desconociendo la realidad de la variabilidad hidroclimática.

La buena gestión solo es posible si se da acompañada de un fortalecimiento institucional, tanto de los usuarios de los distritos de riego como por parte de las autoridades ambientales, fortaleciendo su conocimiento técnico del medio y de las realidades locales; las decisiones deben soportarse no solo en un querer ser, sino en información confiable y aterrizada. Es necesario fortalecer la institucionalidad del agua.

Un gran tema pendiente es el de la estimación de los caudales ofertados por los ecosistemas; si bien en esta investigación calculamos los caudales mediante curvas adi-

mensionales regionalizadas, la exactitud de dichos valores está en entredicho; las pequeñas áreas de las cuencas de las cuales se abastecen la mayor parte de los sistemas de riego revisten una gran incertidumbre para la predicción de caudales, pues su pequeña área y altas pendientes hacen que las respuestas hidrológicas se reporten rápidamente y que la capacidad de regulación sea baja. Se espera que las investigaciones permitan avanzar en modelaciones para pequeñas cuencas de zonas de ladera. Mientras tanto, es necesario mejorar la instrumentación de estas con el fin de tener datos históricos al menos de caudales y de precipitaciones.

Esperamos que esta investigación dé elementos para mejorar las condiciones del campo colombiano en armonía con el ecosistema y que aporte elementos técnicos para acompañar la reforma rural integral.

Referencias

- Abdi, R. y Yasi, M. (2015). Evaluation of environmental flow requirements using eco-hydrologic-hydraulic methods in perennial rivers. *Water Science & Technology*, 72(3), 354. <http://doi.org/10.2166/wst.2015.200>
- Adams, W. M. (1990). How beautiful is small? Scale, control and succes in Kenyan irrigation. *World Development*, 18(10), 1309-1323.
- Aguilera Klink, F. (1994). Agua, economía y medio ambiente: interdependencias físicas y la necesidad de nuevos conceptos. *Revista de Estudios Agrosociales*, 167, 113-130.
- Alfaro, J., y Marin, V. (1990). Uso de agua y energía para riego en América Latina. En Seminario Internacional de Uso Eficiente del Agua. México.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., y Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: FAO. <http://doi.org/M-56>
- Angeliaume-Descamps, A. (2010). Conflits et gestion de la ressource en eau d'irrigation dans le Parc national de la sierra nevada Venezuela. *EDYTEM*, 10, 1-14.
- Angeliaume-Descamps, A. y Oballos, J. (2009). Le maraîchage intensif irrigué dans les hautes vallées andines vénézuéliennes : quelle remise en question ? *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 247, 439-468.
- Arenas, M., Velez, J. y Camacho, J. (2012). Evaluación de dos sistemas de riego por goteo en la producción y la calidad de la fruta de pera (*Pyrus communis* L.) variedad Triunfo de Viena. *Acta Agronómica*, 61, 1-9.
- Asociación de Ingenieros Agrícolas de Colombia. (2012). *Informe técnico de demanda de agua Asourenacer*. Fómeque: autor.
- Boelens, R. y Gelles, P. H. (2005). Cultural politics, communal resistance and identity in andean irrigation development. *Bulletin of Latin American Research*, 24(3), 311-327. <http://doi.org/10.1111/j.0261-3050.2005.00137.x>

- Boelens, R. y Hoogendam, P. (2002). Water rights and empowerment. Assen. Retrieved from <http://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=i3N04vHtvPIC&pgis=1>
- Bruijnzeel, L. y Proctor, J. (1995). Hydrology and biogeochemistry of tropical montane cloud forests: what do we really know? *Tropical Montane Cloud Forests. Ecological Studies*, 110, 38-78.
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B. y Cisneros, F. (2006). Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad. Recuperado de Ftp://ftp.Ciat.Cgiar.org/.../HIDROLOGIA_DEL_PARAMO
- Cai, X., Rosegrant, M. W. y Ringler, C. (2003). Physical and economic efficiency of water use in the river basin: Implications for efficient water management. *Water Resources*, 39(1), 1013.
- Camposano, O., Balsameda, C. y Proaño, J. (2015). Programación del riego del banano (*Musa paradisiaca*) en finca San José 2, Los Ríos, Ecuador Irrigation schedules of banana (*Musa paradisiaca*) in San José 2 ranch. *Los Ríos Province, Ecuador*, 24(2), 18-22.
- Castro Heredia, L. M., Carvajal Escobar, Y. y Monsalve Durango, E. A. (2006). Enfoques teóricos de caudales ambientales. *Ingeniería y Universidad*, 10(2), 179-195.
- Chambers, R. (1980). Basic concepts in the organization of irrigation. In E. J. Walter Coward (Ed.), *Irrigation and agricultural development in Asia* (pp. 28-50). London: Cornell Univ Press. Retrieved from <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=EcDRbOz32sYC&oi=fnd&pg=PA28&dq=Basic+Concepts+in+the+Organization+of+Irrigation&ots=NGgzdAjtEz&sig=MwXz-9URNbYOW3x6cnxDOybIBf8>
- Corporación Autónoma Regional del Guavio (Corpoguavio). (2006). *Plan de ordenamiento y manejo de las cuatro microcuencas tributarias del río guatiquía, fases diagnóstico, prospectiva y formulación (blanco y negro de fomeque)*. Gachala: autor.
- Corporación Autónoma Regional del Guavio (Corpoguavio). Resolución No. 345 DE 10 De junio de 2011 (2011). Colombia: autor.
- Dayton-Johnson, J. (2003). Small-holders and Water Resources: A review essay on the economics of locally-managed irrigation. *Oxford Development Studies*, 31(3), 315-339. <http://doi.org/10.1080/1360081032000111724>
- Dembélé, Y., Ouattara, S. y Keita, A. (2001). Application des indicateurs "approvisionnement relatif en eau" et "productivité de l'eau" à l'analyse des performances des petits périmètres irrigués au Burkina Faso. *Irrigation and Drainage*, 50(4), 309-321. <http://doi.org/10.1002/ird.21>
- Díaz, J. y Ruiz, H. (2007). Determinación de caudales ambientales confiables en Colombia: el ejemplo del río Palacé (Cauca). *Gestión y Ambiente*, 10(1)(4), 81-92.
- Díaz Granados, M. A., Navarrete Gonzáles, J. D. y Suárez Lopez, T. (2005). Páramos hidrosistemas sensibles. *Revista de Ingeniería*, 22, 64-75.

- Doll, P. y Siebert, S. (2002). Global modeling of irrigation water requirements. *Water Resources Research*, 38(4), 8-10. <http://doi.org/10.1029/2001WR000355>
- Estrada, V. y Pacheco, R. (2012). Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XXXIII(1), 94-105.
- Farley, M. y Trow, S. (2003). *Losses in water distribution networks* (2.º ed.). London: IWA Publishing.
- Forero, J. y Merchan, S. E. (2007). *Las brechas entre el campo y la ciudad en Colombia 1990-2003, y propuestas para reducirlas*. Bogotá: Cepal.
- Grupo de investigación en ingeniería de recursos hídricos y Universidad Nacional de Colombia. (2007). *Informe final - Grupo Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial - Dirección de Licencias -OEI- Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyecto licenciados*. Bogotá: autor.
- González, J. (2015). *Bitacoras de salidas de campo*. Fómeque.
- Gorantiwar, S. D. y Smout, I. K. (2005). Performance assessment of irrigation water management of heterogeneous irrigation schemes: 1. A framework for evaluation. *Irrigation and Drainage Systems*, 19(1), 1-36. <http://doi.org/10.1007/s10795-005-2970-9>
- Guevara, J. M. (2006). La fórmula de Penman-Monteith FAO 1998 para determinar la evapotranspiración de referencia, ETo. *Terra Nueva Etapa*, 22(31), 31-72.
- Gutiérrez-Malaxechebarría, A. (2013). Informal Irrigation in the Colombian Andes: Local practices, national agendas, and options for innovation. *Mountain Research and Development*, 33(3), 260-268. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-12-00116.1>
- Gutiérrez-Malaxechebarría, A. (2014a). Formal and informal irrigation in the Andean countries. An overview. *Cuadernos de Desarrollo Rural (International Journal of Rural Development)*, 11(74), 75-99. <http://doi.org/10.11144/javeriana.CRD11-74.fiac>
- Gutiérrez-Malaxechebarría, A. (2014b). *Viabilidad de la agricultura familiar con riego informal en montaña*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Gutiérrez-Malaxechebarría, Á. M., Revillion, C. y Prime, S. (2013). Irrigated family farming panorama in the Latin-American highlands. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 10(70, SI), 93-114.
- Harden, C. (2006). Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes. *Geomorphology*, 79, 249-263.
- Hernández, R., Jiménez, E., Montero, L., Sarmiento, O. y Guzmán, J. (2010). Resultados de diferentes alternativas de manejo del riego superficial tecnificado en el cultivo de la papaya maradol roja plantada con marco extradenso. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(3), 17-22.

- Howell, T. (2001). Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agron. J.*, 93, 189-281.
- Ingetec S.A. (s. f.). Estudio de hidrología, hidrogrología y línea base ambiental para el proyecto aurífero Angostura. Bogotá: autor.
- IWA. (2000). Water losses task force initiatives. Recuperado el 7 de febrero de 2017 de <http://www.fondazioneamga.org/public/brothersgemaggio06.pdf>
- Jain, S. K. (2012). Assessment of environmental flow requirements. *Hydrological Processes*, 26(22), 3472-3476. <http://doi.org/10.1002/hyp.9455>
- Jensen, M. E. (2007). Beyond irrigation efficiency. *Irrigation Science*, 25(3), 233-245. <http://doi.org/10.1007/s00271-007-0060-5>
- Kloezen, W. H. (1998). Measuring land and water productivity in a mexican irrigation district. *Water Resources Development*, 14(2), 231-247.
- Kumar, K., Satyal, G. S. y Kandpal, K. D. (2006). Farmer and state managed hill irrigation systems in Kumaun Himalayas. *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 5(1), 132-138.
- Laoubi, K. y Yamao, M. (2009). A typology of irrigated farms as a tool for sustainable agricultural development in irrigation schemes: The case of the East Mitidja scheme, Algeria. *International Journal of Social Economics*, 36(8), 813-831. <http://doi.org/10.1108/03068290910967091>
- Le Goulven, P. y Ruf, T. (1994). Funcionamiento del riego tradicional en los andes ecuatorianos. Recomendaciones para el Plan Nacional de Riego. En *Resúmenes de las comunicaciones presentadas en el ciclo de conferencias por los 20 años del Orstom en Ecuador* (pp. 99-105). Quito: Orstom.
- Lipton, M., Litchfield, J. y Faure's, J.-M. (2003). The effects of irrigation on poverty: A framework for analysis. *Water Policy*, 5(5), 513-527.
- Losada, A. (1994). Eficiencia técnica en la utilización del agua de riego. *Revista de Estudios Agro-Sociales*, 167, 131-154.
- Losada, A. (1997). Glosario sobre sistemas de riego. *Ingeniería del Agua*, 4(4), 55-68.
- Madrigal, R. (2004). La gestión local del uso del agua de riego en el asentamiento campesino Bagatzi, Costa Rica. *Revista Ciencias Sociales*, IV(106), 181-190.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2004). Resolución 865. Colombia: autor.
- Mejía, E., Palacios, E., García, A. y Santos, A. (2002). Problemas operativos en el manejo del agua en distritos de riego - Operative problems in water management in irrigation districts, 217-225.
- Mena, C., Ormazábal, Y., Llanos, J. L. y Díaz, J. (2007). Desarrollo de un sistema de información geográfica para mejorar la gestión del agua de riego del embalse Convento Viejo, Chile. *Agricultura Técnica*, 67(1), 49-59.

- Mesa, S. L. (2004). *Efecto del índice de agua no contabilizada en las tarifas para acueductos medianos y pequeños en Colombia*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Mesa de Conversaciones de la Habana. (2013). *Primer informe conjunto de la mesa de conversaciones entre el Gobierno de la República de Colombia y las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia-Ejército del Pueblo, FARC-EP*. Bogotá: autor.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2009). Resolución 2320. Bogotá: autor.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Gestión integral de recurso hídrico. Recuperado el 3 de mayo de 2015 de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico>
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000a). *Documentación técnico normativa del sector de agua potable y saneamiento básico*. Bogotá: autor.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000b). *RAS 2000*. Bogotá: autor.
- Mintegui Aguirre, J. Á. y Robredo Sánchez, J. C. (1994). Caracterización de las cuencas hidrográficas, objeto de restauración higrológico-forestal, mediante modelos hidrológicos. *Ingeniería del Agua*, 1(2), 13. <http://doi.org/10.4995/ia.1994.2637>
- Mirassou, S. (2009). *La gestión integral de los recursos hídricos: aportes a un desarrollo conceptual para la gobernabilidad del agua*. Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales.
- Molden, D., Sakthivadivel, R., Perry, C. J. y Fraiture, C. De. (1998). *Indicators for comparing performance of irrigated systems. Research report 20*. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- Montemayor, J., Gómez, A., Olague, J., Zermeno, A., Ruiz, E., Fortis, M., ... Aldaco, R. (2006). Efecto de tres profundidades de cinta de riego por goteo en la eficiencia de uso de agua y en el rendimiento de maíz forrajero. *Técnica Pecuaria en México*, 44(3), 359-364.
- Mutikanga, H. E., Sharma, S. K. y Vairavamoorthy, K. (April, 2012). Review of methods and tools for managing losses in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 181. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000245](http://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000245)
- Ocampo, I. y Escobedo, J. F. (2006). Manejo tradicional y estrategias campesinas para el manejo y conservación del agua de riego. *Ra Ximhai, Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable*, 2, 343-371.
- Ocampo, O. L. y Vélez, J. J. (2014). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña : caso del río Chinchiná. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(24), 43-58.
- Ochoa, L. y Bourguett, V. (2001). *Reducción integral de pérdidas de agua potable* (2ª ed.). México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2000). *El riego en América Latina y el Caribe en cifras. English*. Rome: FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2003). *World agriculture towards 2015/2030: An FAO perspective*. Rome/London: FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1990). Evapotranspiración de referencia (ET_o) Ecuación de FAO Penman-Monteith. En *Evapotranspiración del cultivo* (p. 86). Roma: FAO.
- Ortiz, J., Nikolskii, I., Palacios, O. y Acosta, R. (1999). Pérdidas de agua de riego por percolación profunda durante el proceso de infiltración. *Terra*, 17(2), 115-124.
- Özerol, G., Bressers, H. y Coenen, F. (2012). Irrigated agriculture and environmental sustainability: an alignment perspective. *Environmental Science & Policy*, 23, 57-67. <http://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.07.015>
- Palacios-Vélez, E. (2004). *La eficiencia en el uso del agua en los distritos de riego*. México: Colegio de Postgraduados, Montecillo.
- Palerm-Viqueira, J. (2010). A comparative history, from the 16th to 20th centuries, of irrigation water management in Spain, Mexico, Chile, Mendoza (Argentina) and Peru. *Water Policy*, 12(6), 779-797. Retrieved from <http://cat.inist.fr/?aMod=afficheN&cpsid=23531793>
- Pla Sentis, I. (1988). Irrigation and development of salt affected soils under tropical conditions. *Soil Technology*, 1(1), 13-35.
- Playán Jubillar, E. y Playan, E. (1994). Eficiencia en el aprovechamiento del agua por el regadío. Geórigica. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Recuperado de <https://digital.csic.es/handle/10261/21944>
- Presidencia de la República. (1974). Código Nacional de los Recursos Naturales. Colombia: autor.
- Ramírez J., J. (1999). *Ajuste estructural y estrategias campesinas de reproducción en el Valle de Puebla, México*. México: Campus Puebla-Colegio de Postgraduados.
- Redacción Bogotá. (2015). Mala infraestructura y robo de agua acelerarían racionamiento en 2025. *El Tiempo*. Recuperado de <http://www.eltiempo.com/bogota/agua-en-bogota-mala-infraestructura-y-robo-de-agua-acelerarian-rationamiento-en-2025/15791701>
- Rodríguez González, M., Santana Sotolongo, M., Brown Manrique, O. y Alonso de la Paz, F. (2013). Riego por surco con caudal intermitente asociado al cultivo de la cebolla y su eficiencia en las pérdidas de suelo y agua por escorrentía. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(4), 50-54. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542013000400008&lng=es&nrm=iso&tling=es

- Rutkowski, T., Raschid-Sally, L. y Buechler, S. (2007). Wastewater irrigation in the developing world-Two case studies from the Kathmandu Valley in Nepal. *Agricultural Water Management*, 88(1-3), 83-91. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.08.012>
- Sagardoy, J. A. , Bottrall, A. y Uittenbogaard, G. O. (1991). *Organización, operación y mantenimiento de los sistemas de riego*. FAO.
- Salomón, M., Loyola, L., Martini, C. y Sánchez, C. (2001). Proyecto de modernización de infraestructura y tecnologías para la gestión del sistema de riego Luján Oeste. Provincia de Mendoza, Argentina. En *Irrigation Symposium. International Society for Horticultural Science* (p. 18). Mendoza: International Society for Horticultural Science.
- Sánchez, L. D. y Viáfara, C. A. (2014). Impacto de los sólidos suspendidos totales sobre la obstrucción en emisores de riego localizado de alta. *Ingeniería y Competitividad*, 210(2), 199-210.
- Smakhtin, V., Revenga, C. y Döll, P. (2004). A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity. *Water International*, 29(3), 307-317.
- Smith, L. D. (2002). *Reforma y descentralización de servicios agrícolas un marco de políticas*. FAO. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/005/y2006s/y2006s00.htm>
- Sorooshian, S., Whitaker, M. P. L. y Hogue, T. S. (2002). Regional and global hydrology and water resources issues: The role of international and national programs. *Aquatic Sciences*, 64(4), 317-327. <http://doi.org/10.1007/PL00012589>
- Stadmuller, T. (1986). *Bosques nublados en el trópico humedo*. Turrialba: Universidad de las Naciones Unidas.
- Steinfeld, C. M. M., Kingsford, R. T., Webster, E. C. y Sharma, a. (2015). A simulation tool for managing environmental flows in regulated rivers. *Environmental Modelling & Software*, 73, 117-132. <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.08.006>
- Svendsen, M. y Small, L. E. (1990). Farmer's perspective on irrigation performance. *Irrigation and Drainage Systems*, 4, 385-402.
- Todini, E. (2008). Design, expansion and rehabilitation of water distribution networks aimed at reducing water losses. where are we? BT-10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference, WDSA 2008, August 17, 2008-August 20, 2008. In *Annual Water Distribution Systems Analysis Conference* (p. 18). South Africa: Water Distribution Systems Analysis. [http://doi.org/10.1061/41024\(340\)33](http://doi.org/10.1061/41024(340)33)
- Todini, T. (2009). *Design, expansion and rehabilitation of water distribution networks aimed at reducing water losses. where are we?* BT - 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference, WDSA 2008, August 17, 2008 - August 20, 2008. [http://doi.org/10.1061/41024\(340\)33](http://doi.org/10.1061/41024(340)33)
- Trawick, P. B. (2001). Successfully governing the commons: Principles of social organization in an andean irrigation system. *Human Ecology*, 29(1).

- Trawick, P. B. (2003). Against the privatization of water: An indigenous model for improving existing laws and successfully governing the commons. *World Development*, 31(6), 977-996. [http://doi.org/10.1016/S0305-750X\(03\)00049-4](http://doi.org/10.1016/S0305-750X(03)00049-4)
- Turrall, H., Svendsen, M. y Faures, J. M. (2010). Investing in irrigation: Reviewing the past and looking to the future. *Agricultural Water Management*, 97, 551-560. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.07.012>
- Urrutia Cobo, N. (2006). *Sustainable management after irrigation system transfer. Experiences in Colombia-the RUT irrigation district* (Tesis doctoral). Wageningen, Holland.
- Vanacker, V., Govers, G., Poesen, J., Deckers, J., Dercon, G. y Loaiza, G. (2003). The impact of environmental change on the intensity and spatial pattern of water erosion in a semi-arid mountainous Andean environment. *Catena*, 51, 329-347. [http://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00172-8](http://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00172-8)
- Vela, A., Martínez, F., García-Serra, J. y Pérez, R. (1994). Estrategias óptimas para la reducción de pérdidas de agua en sistemas de abastecimiento. *Fugas en Abastecimientos*, 1(1), 35-54.
- Villagómez Velázquez, Y. (2006). *Política hidroagrícola y cambio agrario en Tehuantepec, Oaxaca* (1ª ed.). Zamora, Michoacán: El Colegio de Michoacán.
- Wichelns, D. (1999). Economic efficiency and irrigation water policy with an example from Egypt. *International Journal of Water Resources Development*, 15(4), 543-560.
- Zimmerer, K. S. (2000). Rescaling irrigation in Latin America: The cultural images and political ecology of water resources. *Cultural Geographies*, 7(2), 150-175. <http://doi.org/10.1177/096746080000700202>
- Zimmerer, K. S. (2010). Woodlands and agrobiodiversity in irrigation landscapes amidst global change: Bolivia, 1990-2002. *The Professional Geographer*, 62(3), 335-356. <http://doi.org/10.1080/00330124.2010.483631>
- Zimmerer, K. S. (2011). The landscape technology of spate irrigation amid development changes: Assembling the links to resources, livelihoods, and agrobiodiversity-food in the Bolivian Andes. *Global Environmental Change*, 21(3), 917-934. <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.04.002>

Autores

Alvaro Martín Gutiérrez Malaxechebarría

Es doctor en Estudios Ambientales y Rurales de la Pontificia Universidad Javeriana, magíster en Ingeniería Civil en el área ambiental de la Universidad de los Andes e ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente, es docente de planta en el programa de ingeniería ambiental de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Ha sido profesor de pregrado y posgrado de otras prestigiosas universidades y además, en tres oportunidades ha sido profesor invitado de la Universidad de Toulouse Jean Jaurès en Francia. Entre sus áreas de interés se desatacan el manejo comunitario del agua y el desarrollo rural, las cuales ha combinado en su actividad investigativa, producto de lo cual ha publicado algunos artículos científicos, capítulos de libros y presentado varias ponencias en eventos nacionales e internacionales.

Jerson Leonardo González Umaña

Ingeniero ambiental de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, candidato a especialista en Educación y Gestión Ambiental de la misma universidad. En la actualidad se desempeña como profesional de Recurso Hídrico y Servicios Ecosistémicos del Parque Nacional Natural Chingaza. Entre sus áreas de trabajo se encuentra el agua y las relaciones que alrededor de su acceso, uso y gestión comunitaria se generan; actualmente, trabaja en la construcción de propuestas de investigación que profundicen en la relación biodiversidad-comunidad-agua. Ha sido asistente de investigación en las Universidades Distrital y Javeriana donde ha participado en la construcción de documentos finales de investigación y artículos divulgativos.

Este libro se terminó
de imprimir en abril de
2017 en Xpress Estudio
Gráfico y Digital S.A.
Bogotá, Colombia

Los sistemas de riego comunitario son extremadamente interesantes pues combinan infraestructuras, cuyos elementos no siempre pueden ser comprendidos por la ingeniería, y muy ricos y variados acuerdos para acceder al agua, la combinación de infraestructura e instituciones sociales permiten gestionar el agua. Este es uno de los pocos documentos que aborda de forma articulada elementos técnicos y de la organización social de sistemas comunitarios de agua. Para ello, los investigadores se centran en una localidad particular de la zona andina colombiana, cuyos resultados y reflexiones pueden extrapolarse para otras zonas montañosas del trópico.

Si bien este libro es resultado de un proyecto de investigación, está escrito de una forma amena buscando acceder a todo público interesado en el tema de los sistemas comunitarios de riego. Da indicadores de pérdidas de agua, de eficiencia de aplicación de riego, de los ricos acuerdos sociales en que se basan dichos sistemas y de las percepciones de los usuarios, así como de las terribles limitaciones de política y legales para responder efectivamente a la realidad tan bien comprendida por los regantes. Es decir que los autores dan luces acerca del funcionamiento y de los elementos de éxito que podrían ser replicados, así como algunas reflexiones acerca de cómo estos sistemas pueden mejorarse a partir de la acción de los mismos usuarios, de políticas públicas, del mejoramiento de la infraestructura y de otros elementos que favorezcan el desarrollo rural articulándose con la gestión del agua, particularmente en zonas campesinas del trópico alto.

UD
Editorial

ISBN 978-958-5434-28-8



9 789585 434288