

ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN COMUNIDADES ANDINAS BOLIVIANAS QUE
DEPENDEN DE GLACIARES TROPICALES

INFORME TÉCNICO FINAL

OFERTA Y DEMANDA DE AGUA Y BALANCE HÍDRICO EN LA GESTIÓN DEL AGUA DE LA CUENCA DEL RÍO SAJAMA, BOLIVIA



Freddy Soria Céspedes
Ana Paola Castel Díez

AGUA SUSTENTABLE

VERSIÓN FINAL

La Paz, marzo de 2013

CONTENIDO

	Página
1. ANTECEDENTES, JUSTIFICACIÓN Y ENFOQUE DEL ESTUDIO.	3
Justificación y área de estudio.	3
Enfoque del estudio.	4
Estrategia de análisis.	4
Oferta y demanda de agua.	5
Demanda de agua de los bofedales.	6
2. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS.	7
Cálculo de la demanda de agua.	7
Principio de análisis.	7
Métodos de cálculo.	7
Acerca del cálculo de la evapotranspiración potencial.	8
Consideraciones acerca del método de la FAO Penmann Monteith para el cálculo de la ETP.	8
Cálculo de la ETc a través de técnicas de teledetección.	9
Desagregación de la demanda en zonas con alta, media y baja de manda de agua.	10
Herramientas para el cálculo de la oferta de agua y para el análisis del balance hídrico.	10
Estructura del modelo matemático semidistribuido de balance hídrico.	11
Parámetros del modelo de balance hídrico.	12
Introducción de la demanda de los bofedales como variable del modelo.	12
Escenario con condiciones estándar de cultivo.	13
Índices de disponibilidad de agua.	15
Análisis de sensibilidad para los escenarios futuros.	15
3. RESULTADOS.	16
Potenciales impactos de la demanda de los bofedales en la cuenca del Río Sajama.	16
Potenciales impactos de posibles cambios futuros en la demanda, por subcuencas.	19
Potenciales impactos de la demanda: condiciones estándar de cultivo.	22
Índices de disponibilidad de agua.	24
Análisis de sensibilidad.	27
Herramienta ejecutiva: Mapas resumen de los resultados	30
4. CONCLUSIONES.	40
AGRADECIMIENTOS	41
5. REFERENCIAS	41

**OFERTA Y DEMANDA DE AGUA Y BALANCE HÍDRICO EN LA GESTIÓN DEL AGUA
DE LA CUENCA DEL RÍO SAJAMA, BOLIVIA
Freddy Soria, Ana Paola Castel**

1 ANTECEDENTES, JUSTIFICACIÓN Y ENFOQUE DEL ESTUDIO.

El estudio de escenarios de oferta y demanda para el análisis del balance hídrico en la cuenca del Río Sajama es un componente que resume una parte de los actuales y potenciales logros del proyecto titulado Adaptación al Cambio Climático en Comunidades Andinas Bolivianas que Dependen de Glaciares Tropicales. El presente estudio se realiza en cumplimiento de los Objetivos Específicos detallados en los Términos de Referencia adjuntos al contrato suscrito con Agua Sustentable en fecha 1 de noviembre de 2012. En base a los alcances allí definidos, el estudio utiliza y analiza elementos producidos en las consultorías de Estudio Socioeconómico (Canedo, 2011), Agroclimatología (García, 2012 a,b), Downscaling Climático (García, 2012c), Derechos de Acceso al Agua y Bofedales (Villaruel y Pérez, 2012), Estudio Hidrológico (Soria, 2013a) y en las pasantías de Teledetección (Buitrón y Fernández, 2012) y Demanda de Agua (Alanoca y Casas, 2013). A través de este conocimiento, el presente estudio pretende generar herramientas para el diseño de un futuro proceso de gestión del agua.

Justificación y área de estudio.

En la región Altoandina de Bolivia los sistemas productivos se basan fundamentalmente en la explotación de especies domésticas de camélidos sudamericanos, como recurso de alto potencial económico. En el Parque Nacional Sajama y sus alrededores, la actividad pecuaria sigue un sistema de producción extensivo durante todo el año, donde llamas y alpacas constituyen rebaños mixtos cuya nutrición depende casi exclusivamente del uso de praderas altiplánicas (bofedales, pajonales y tholares), formando ambos parte de un ecosistema frágil cuya estabilidad está influenciada por las variaciones del clima. Al respecto, es limitada la literatura que cuantifica los potenciales impactos de las variaciones en las tendencias climáticas sobre la disponibilidad del agua desde un punto de vista de balance hídrico con énfasis en el rol de la biomasa de los bofedales, aún siendo conocida la relevancia del tema debido a la relación directa con las actividades económicas locales. Bajo el marco presentado, el objetivo de la presente Consultoría es la investigación de la oferta y demanda de agua y del balance hídrico en la gestión del agua de la cuenca del Río Sajama, a través del estudio de escenarios definidos a escala de cuenca y subcuenca.

El área de estudio está contenida en el Parque Nacional Sajama, al pie de la Cordillera Occidental. En esta cadena de montañas resalta el Volcán Sajama, el símbolo del Parque al ser el pico más alto de los Andes en su travesía por Bolivia (altura del pico: 6542 msnm). En esta región de Bolivia, el contenido de humedad en la atmósfera entre mayo y septiembre es bajo, con heladas y nevadas ocasionales que surgen por la entrada de masas de aire polares transportadas por vientos del oeste (Vuille, 1999). Durante la época de lluvias (diciembre a marzo), los niveles específicos de humedad se incrementan debido al transporte de masas de humedad por los vientos del este (precipitación media anual de 350 mm); en este proceso, el transporte de humedad de la zona desde la Amazonía y el Chaco hacia la zona del Altiplano es simultáneamente obstaculizado por los vientos secos del oeste (Vuille, 1999). Como resultado de las mencionadas condiciones climáticas, en general los registros de las estaciones situadas en el área de influencia del Parque indican que a escala media mensual la evapotranspiración media de referencia sobrepasa la precipitación media (García, 2012a, b); a escalas menores, el conocimiento de la variabilidad

espacial de la relación oferta-demanda y su potencial impacto sobre el balance hídrico es aún muy limitado (Soria, 2013a).

De acuerdo al Servicio Nacional de Áreas Protegidas, el Parque Nacional Sajama tiene un área total estimada de 1002 km². Dentro de esta área, los ríos que definen la respuesta hídrica del Parque son el Río Sajama por el oeste del Volcán Sajama y el Río Tomarapi por el este del mismo Volcán. Varias razones justifican que el presente estudio se enfoque únicamente en la cuenca del Río Sajama en el tramo Manasaya-Puente Sajama. La primera razón es que las obras piloto instauradas por Agua Sustentable aprovechan la oferta de agua generada en ese tramo del Parque. La decisión de monitorear únicamente esta región también responde a razones prácticas: la respuesta hídrica del Parque es altamente heterogénea tanto espacial como temporalmente, por lo que el monitoreo de todo el Parque excede en demasía las capacidades del personal técnico disponible y la capacidad económica del proyecto. Es también por la última razón expresada que el tramo estudiado del Parque se monitoreó por subcuencas donde los cursos de río son permanentes. Mayores detalles acerca del área de estudio, la red de monitoreo y la heterogénea respuesta hídrica se desarrollan en extenso en Soria (2013a).

Enfoque del estudio.

El estudio de la relación entre la demanda y la oferta de agua y el balance hídrico entre ambas se realiza bajo un enfoque de cuenca en lugar de un enfoque por proyecto, en respuesta a la necesidad de reconocer que los recursos hídricos y los inherentes a los de la tierra son componentes de una unidad que debe ser estudiada y tratada como tal, particularmente bajo condiciones que demanden la necesidad de prevenir o en su caso resolver potenciales conflictos en relación al uso y aprovechamiento del agua (DHI, 2008).

Estrategia de análisis.

Existen varias formas de asignar derechos sobre el uso del agua. En el proceso, el principal reto es la asignación de tales de forma de satisfacer a todos los usuarios (HR Wallingford et al., 2003); sin embargo, en ocasiones cuando el agua disponible es aparentemente suficiente para satisfacer la demanda o cuando simplemente existe déficit latente y no existen reglas definidas para la asignación de derechos, es probable que el reto sea aún mayor dada la ausencia de parámetros matemáticos concretos que permitan establecer un punto de partida para definir estrategias para enfrentar un potencial conflicto futuro. La consecuencia de tal incertidumbre es un alto nivel de complejidad que podría dar lugar a múltiples escenarios potenciales. Ante este panorama, entre las escasas alternativas que existen para enfrentar este tipo de análisis está el estudio del balance hídrico resultante de la interacción entre las series temporales de la oferta de agua y series temporales de demanda de agua que se observan en el medio natural. En el presente estudio, el enfoque adoptado involucra la investigación del balance hídrico para el estudio de potenciales impactos de la interacción señalada, a través del análisis del comportamiento simulado a escala mensual de la variable caudal medida a la salida de la cuenca del Río Sajama. Este tipo de análisis lo realizamos tanto para el tiempo presente (2005-2010) como para la investigación de probables escenarios en un tiempo futuro (periodo 2046-2051).

Para el análisis de las condiciones del tiempo presente, el estudio de balance hídrico se realiza generando series de oferta de agua a través de un modelo de balance hídrico calibrado a la salida de la cuenca del Río Sajama (Puente Sajama) y a la salida de cinco subcuencas. En el tiempo presente, las series de demanda de agua se generan asumiendo que los usuarios principales son

los bofedales, debido a la ausencia de actividades agrícolas. Se asume que la demanda de los principales usuarios (los bofedales) está adecuadamente representada por la evapotranspiración. Bajo estas condiciones se define el primer escenario (simulación del tiempo presente), donde se identifica tres usuarios: bofedales con alta demanda de agua (bofedales con alta vitalidad), bofedales con demanda media de agua y bofedales con baja demanda de agua (bofedales con baja vitalidad). Otros usos tales como la demanda de agua potable se omiten en el estudio, porque su comportamiento es intermitente en comparación al comportamiento de la demanda del usuario principal; usos adicionales son también omitidos debido a la falta de información y la consiguiente incertidumbre existente en referencia a su estado actual y debido a la consiguiente alta incertidumbre respecto a su evolución futura. Para la simulación del tiempo presente, se introduce un segundo escenario que simula un estado donde se mejora las condiciones biofísicas de los bofedales y se amplía la extensión de las superficies cubiertas por estos usuarios; en este escenario se simula los potenciales impactos de incrementar la demanda del usuario con baja demanda a los niveles del usuario con demanda alta; se realiza lo propio con la demanda del usuario con demanda media; la demanda del usuario con demanda alta se mantiene invariable; de esta manera se alcanzan condiciones estándar para los tres usuarios para la simulación del tiempo presente.

El tercer escenario involucra la simulación del tiempo futuro. Aunque en nuestro estudio no se considera herramientas de modelación del tipo estocástico, se tiene presente que los escenarios futuros implican rangos de incertidumbre. Estos escenarios para el caso de las series de oferta de agua son generados a través de series predichas de oferta de agua que son a su vez generadas a partir de series climáticas futuras predichas mediante el modelo LARS de Semenov y Barrow (2002). Para el caso de las series de demanda de agua las predicciones de series climáticas futuras se realizan también a través del modelo LARS, asumiendo que la demanda de los principales usuarios (los bofedales) está adecuadamente representada por la evapotranspiración. Luego, debido a que existe un rango de incertidumbre en el balance hídrico resultante, el asesoramiento de tal incertidumbre se presenta a través de un estudio de la sensibilidad global a variaciones en las series de oferta y demanda. El análisis de sensibilidad global se realiza a través de superficies de respuesta (Beven, 2004) y experimentos Monte Carlo, siguiendo el enfoque presentado en Soria (2013a) y Soria y Kazama (2011). Bajo el marco conceptual desarrollado en los párrafos precedentes, a continuación se expone la justificación de la estrategia de análisis propuesta, se explica el significado de los principales conceptos involucrados en el estudio y se amplía la explicación de las herramientas utilizadas.

Oferta de agua y demanda de agua.

En congruencia con el enfoque del estudio, se entiende por serie de oferta de agua a la secuencia temporal que indica la cantidad de agua disponible para los diferentes usos a escala de cuenca hidrográfica. Esta serie es una de las dos principales entradas para el análisis de balance hídrico. La segunda entrada al modelo de análisis de balance es la serie de la demanda, la cual contiene la información que indica la cantidad de agua consumida por los usuarios designados.

La serie de oferta de agua se genera a través de variables climáticas observadas y se calibra para el tiempo presente con observaciones del caudal a la salida de la cuenca. La serie de oferta de agua para el estudio de los potenciales impactos de los escenarios climático predichos (tiempo futuro), se simula en base a los parámetros de calibración del tiempo presente asumiendo que los mecanismos que definen la respuesta de la cuenca no cambian en el tiempo. Dado que el periodo de monitoreo es corto (un único año hidrológico), la serie de oferta de agua se amplía dentro del

periodo presente a través de un modelo determinístico precipitación-escorrentía. Se entiende por periodo presente al periodo histórico para el cual se tiene registros medidos de información hidroclimática; en nuestro caso el periodo histórico es del año 2005 al año 2010. La estructura matemática para ampliar y predecir la serie de oferta de agua en los tiempos presente y futuro es el modelo semidistribuido de balance hídrico de Collick et al. (2009) debido a que la limitada disponibilidad de información hidro-climática no permite la aplicación de modelos hidráulicos detallados o de modelos hidrológicos distribuidos.

Las series de demanda de agua tienen el objetivo de representar el comportamiento espacio temporal de todo usuario que abstrae y consume la oferta de agua entregada y que eventualmente la retorna hacia la fuente. Este concepto está frecuentemente disgregado del concepto uso, debido a la posibilidad de que ambas cantidades no coincidan numéricamente cuando se dan lugar escenarios eventuales o permanentes de déficit o conflicto. Desde una perspectiva técnica, el cálculo de la demanda en la cuenca del Río Sajama (en el tramo estudiado) es mucho más complejo que el cálculo de la oferta, debido a la ausencia de información histórica y paradójicamente debido a la sencillez de la estructura organizacional de la asignación de usos y derechos de acceso al agua. Este último aspecto constituye la diferencia entre el presente estudio y los cálculos de la demanda realizados en otras cuencas de la región andina y subandina de Bolivia (e.g., Cruz, 2008; Molina y Cruz, 2008). Al respecto, la interpretación del estudio de Villarroel y Pérez (2012) sugiere que aquella sencillez en la organización de la asignación de los derechos sobre los usos del agua se origina en que en la actualidad si bien existen conflictos originados en el carácter semiárido de la cuenca, los mismos aún no son cuantificables desde una perspectiva ingenieril principalmente debido a la ausencia de comunidades que practiquen la agricultura. En palabras simples, Villarroel y Pérez (2012) sugiere que aquella ausencia de comunidades agrícolas da lugar a que en la zona de estudio todos tengan derecho a acceder a la fuente de agua que esté disponible. De esta manera, aunque Villarroel y Pérez (2012) apuntan a las sayañas (las unidades económicas del ayllu) como una probable subunidad de gestión de los recursos naturales, la ausencia de reglas estrictas de asignación de agua al interior de las comunidades origina un conflicto para aquél que desee definir la estructura de un modelo matemático de gestión hídrica, debido a que en teoría se otorga una libertad inmensurable en la definición de los probables múltiples escenarios que darían lugar a un potencial conflicto y a sus probables soluciones. Tal libertad induce a un rango de incertidumbre imposible de definir o cuantificar, simultáneamente invalidando cualquier intento de modelación de la relación oferta-demanda.

En relación a la demanda de agua potable de los pobladores de Sajama (del pueblo Sajama), en el presente documento se omite su consideración explícita dentro de la estructura matemática adoptada, debido a que este tipo de uso demanda volúmenes mucho menores a los demandados por los usuarios principales; la ausencia de información histórica detallada de este tipo de uso constituye una razón adicional para omitir su modelación matemática. La dificultad en obtener tal información tiene origen en causas externas y causas propias del sistema de abastecimiento. Las causas externas se originan principalmente en la ausencia de datos específicos acerca de los procesos de inmigración hacia otras ciudades y países limítrofes (Chile y Argentina) (Canedo, 2011). Entre las causas propias al sistema de abastecimiento, la muy limitada información existente se debe a que las fuentes de agua para este uso no son fuentes fijas. En referencia al último comentario, Villarroel y Pérez (2012) indica que el agua potable para Sajama se obtiene de vertientes con caudal irregular e intermitente; estas vertientes no son únicas y eventualmente dejan de fluir, obligando a los pobladores a buscar nuevas fuentes para satisfacer su demanda.

Demanda de agua de los bofedales.

Aunque no existen derechos preferenciales por el acceso al agua al interior de las comunidades, sí existe una delimitación de los derechos de acceso al bofedal, debido a que el mismo es un recurso escaso y esencial para la principal actividad productiva de la zona (Villarroel y Pérez, 2012). Sin embargo, por interpretación del texto de Villarroel y Pérez (2012) se ratifica que aún dentro de este marco no existen reglas que definen el acceso al agua, lo cual obstaculiza las tareas de modelación matemática al ampliar a un nivel inmensurable el rango de incertidumbre respecto al número de probables escenarios. En el presente documento, para solucionar el problema de tener una multitud de escenarios se decide identificar al bofedal como el principal usuario, se define que su demanda está adecuadamente representada por la evapotranspiración (Salazar et al., 2000) y sus correspondientes escenarios para el tiempo futuro se definen en función a potenciales cambios climáticos proyectados por el modelo LARS de Semenov y Barrow (2002); de esta manera, reducimos el rango de incertidumbre porque el análisis se concentra en el medio natural.

Un bofedal o "turbera de altura" es un tipo de vegetación interzonal de la zona altoandina y puneña (Andes) que se desarrolla sobre suelos orgánicos. El bofedal tiene material fibroso y esponjoso, y por su color verde intenso resalta del entorno de praderas gramíneas de las zonas altas (Estenssoro, 1991). En el área de estudio, los bofedales se ubican en áreas con humedad permanente, saturadas o no, tanto en las zonas altas como en las zonas bajas. En estas áreas la característica común es la baja pendiente topográfica que permite la acumulación y el transitorio encharcamiento del agua que fluye a través de las corrientes superficiales y subsuperficiales. Molina y Cruz (2008) citando a Orsag et al. (2007) y Salazar et al (2000) indica que los bofedales se desarrollan sobre suelos expansivos con problemas de drenaje, que dan lugar a condiciones hidromórficas y al dominio de procesos óxido-reducción que impiden su uso con fines agrícolas.

La importancia de los bofedales en los Andes es ecológica y pecuaria y particularmente en el área de estudio su relevancia es alta para el desarrollo de las actividades productivas. Todos estos aspectos y características asignan a los bofedales el derecho de constituirse en un usuario de agua (ver también Molina y Cruz, 2008; Salazar, et al., 2000). Tal derecho otorga la justificación de asumir que para los fines presentes, los bofedales sean los usuarios más relevantes para un estudio desde una perspectiva de balance hídrico; esta razón justifica el énfasis que el documento presente sitúa en la estimación de su demanda. Nuestro estudio se desarrolla alrededor de las ideas expresadas.

2 DESCRIPCION DE LOS MÉTODOS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS.

2.1 Cálculo de la demanda de agua.

Principio de análisis.

Como una adecuada aproximación inicial, la demanda de agua de los bofedales se asume igual a la evapotranspiración (Molina y Cruz, 2008; a partir de información publicada en Salazar et al., 2000). Tal conclusión se obtiene bajo el razonamiento de que en los bofedales de Isluga y Chungará, este último situado en la cuenca contigua a la cuenca del Río Sajama, la evapotranspiración tiene valores cercanos a valores de demanda estimados a través del balance hídrico en los meses agosto, septiembre y enero para coeficientes de cultivo estimados (Salazar et al., 2000). En el trabajo citado la evapotranspiración de referencia se calculó a través del método de Penman-Monteith, para el K_c se determinó una variación en el rango de 1.0 para la vegetación

tipo cojín y 1.15 para las lagunas, y luego la evapotranspiración del cultivo se calculó en el rango 0.40 a 0.58 L/s/ha; en comparación, la demanda estimada a través de un balance hídrico se situó en el rango 0.36 a 0.52 L/s/ha.

Métodos de cálculo.

La serie histórica de la demanda de agua de los bofedales (tiempo presente, 2005-2010) se infiere a partir de valores de evapotranspiración del cultivo, los cuales son a su vez calculados mediante valores de la evapotranspiración de referencia (*ET_o*) estimados a partir de datos climáticos y valores de coeficientes de cultivo (*K_c*). La *ET_o* se calculó a través del método de la FAO Penmann-Monteith (Allen et al., 1998) en la estación de Sajama para el periodo 2005-2010 a partir de información proporcionada por variables climáticas medidas a escala diaria. Estos valores son obtenidos de García (2012 a, b). Se omiten los datos de la estación Chungará debido a que sus datos son registrados a una altitud elevada en relación a la altitud de la parte baja de la cuenca del Río Sajama. Para el periodo 2005-2010, la distribución espacial de la evapotranspiración del cultivo (*ET_c*) para meses específicos de la época de estiaje y para la época húmeda en algún caso, se calculó mediante inferencia de valores de *K_c* como parámetro representativo de las propiedades biofísicas de los cultivos. El cálculo de *K_c* se realiza a través de técnicas de teledetección utilizando imágenes Landsat con resolución horizontal de 30 m. El preprocesamiento y tratamiento de las imágenes se explica en Alanoca y Casas (2013), la técnica de cálculo del *K_c* se explica en detalle en la literatura (e.g., Cuesta et al., 2005; Ferrara et al., 2010) y los principios del cálculo se resumen en párrafos subsecuentes. Para el tiempo futuro, la ausencia de información acerca de la distribución espacial del *K_c* nos obliga a asumir que los valores medios de este parámetro permanecen constantes; luego, mediante series predichas de *ET_o* producidas a través del modelo LARS en García (2012c), se infieren series de *ET_c* como parámetro representativo de la demanda futura en el periodo 2045-2051.

Acerca del cálculo de la evapotranspiración potencial.

La evaporación del agua hacia el medio ambiente es una de las fases principales del ciclo hidrológico. La combinación de la evaporación a través de la pérdida de agua del suelo y la pérdida de agua mediante la transpiración de las plantas ocurre simultáneamente y su cálculo por separado es complejo, por lo que para su cuantificación se recurre al estudio del proceso combinado denominado evapotranspiración (*ET*) (Allen et al., 1998). La evaporación desde una superficie cultivada se determina a través de la porción de radiación solar que alcanza al suelo, razón por la cual los valores medidos de la variable disminuyen a medida que el cultivo crece debido a la disminución de la superficie del suelo expuesta a la incidencia directa de la radiación solar (Allen et al., 1998). Es por aquello que las unidades de la variable evapotranspiración se expresan en unidades de lámina de agua (mm) o en unidades de energía por unidad de área (e.g., MJ m⁻²); por una razón derivada de este concepto, las técnicas de teledetección se convierten en herramientas útiles para la inferencia de la distribución espacial de la evapotranspiración.

Consideraciones acerca del método de la FAO Penmann Monteith para el cálculo de la *ETP*.

Para la estimación de la *ETP* en el sitio de estudio se adopta el método de FAO Penmann-Monteith. La justificación para considerar este método se presenta García et al. (2004) y García (2012 a, b). Los detalles del cálculo se presentan en García (2012 a, b) y algunos conceptos importantes para entender los principios del método se recapitulan a continuación:

i) Evapotranspiración de un cultivo de referencia (ET_0). Representa la evapotranspiración de una superficie vegetal estandarizada (en general, ryegrass). Únicamente parámetros climáticos afectan a la ET_0 , por lo cual su estimación se realiza solamente considerando datos climáticos; no se considera las características del cultivo ni las características del suelo. La ET_0 expresa el poder evaporante de la atmósfera, en un sitio específico, en un momento específico del año. Para su cálculo, Allen et al. (1998) señala al método de FAO Penmann-Monteith como el único recomendado. A pesar de que la FAO a través del documento de Allen et al. (1998) no aconseja introducir el término evapotranspiración potencial debido a ambigüedades con el concepto de la ET_0 , en el presente documento se asume que ambos términos son intercambiables.

ii) Evapotranspiración bajo condiciones estandarizadas (ET_c). Representa la evapotranspiración de un cultivo que se desarrolla sobre una superficie grande, con condiciones óptimas del contenido de agua en el suelo, condiciones óptimas de manejo y medioambientales, y alta productividad bajo las condiciones climáticas dadas (Allen et al., 1998).

iii) Requerimiento de agua del cultivo. Es la cantidad de agua requerida por el cultivo (es la cantidad de agua que debe ser proporcionada) para compensar los efectos de las pérdidas por evapotranspiración. Este concepto es diferente a la cantidad requerida para irrigación, pues la misma constituye la diferencia entre el requerimiento de agua del cultivo y la precipitación efectiva (Allen et al., 1998).

iv) Coeficiente de cultivo (K_c). Es el cociente entre el ET_c y el ET_0 (es el factor de proporcionalidad entre los dos parámetros). Integra las características que distinguen el cultivo actual del cultivo de referencia. Representa cuatro características distintivas: la altura del cultivo, el albedo de la superficie suelo-cultivo, la resistencia del follaje o manto de las hojas, y la evaporación del suelo expuesto. El K_c puede ser utilizado para el cálculo del ET_c en función al ET_0 (ver Allen et al., 1998). El razonamiento de este método se basa en que el K_c está limitado únicamente a un cierto rango climático (la mayoría de los efectos climáticos son asumidos por el ET_0), por lo cual el parámetro se define básicamente de acuerdo a las características del cultivo y su variación estacional durante el periodo de crecimiento. Estos aspectos permiten que en general se acepte valores de K_c estandarizados para ciertos climas y tipos de cultivos (Allen et al., 1998).

Cálculo de la ET_c a través de técnicas de teledetección.

Las técnicas de teledetección son probablemente en la actualidad los únicos medios disponibles para estudiar la evolución histórica y la distribución espacial de las variables que explican el balance energético superficial en cuencas remotas (Bastiaanssen, 2000; Li et al., 2009). En el presente estudio la ET se calcula como un residual del mencionado balance energético a través del estudio de la relación indirecta entre el K_c y el estado de desarrollo vegetativo de los cultivos. Para el estudio del último parámetro mencionado, el presente estudio considera la potencial relación lineal existente entre el K_c y el Índice Diferencial Normalizado de Vegetación $NDVI$ reportada en la literatura (e.g., Cuesta et al., 2005; Ferrara et al., 2010) y la traslada a nuestro sitio de estudio. Como resultado se obtiene las expresiones presentadas en las ecuaciones 1a y 1b, donde la primera es la ecuación operacional para la determinación de K_c en la época inicial, de crecimiento y meseta de los cultivos y la segunda ecuación se utiliza para el cálculo de K_c en la estación de invierno (época de estiaje). En ambas ecuaciones el $NDVI$ fue obtenido mediante procesamiento de imágenes Landsat (Tabla 1); en la ecuación 1a los puntos de anclaje considerados son K_c mínimo igual a 0.4 para el $NDVI$ mínimo de 0.16 y K_c máximo de 1.2 correspondiente al $NDVI$ máximo de 0.80; en la ecuación 1b los puntos de anclaje considerados son K_c mínimo igual a 0.1

para el *NDVI* mínimo de 0.10 y *Kc* máximo de 1.2 correspondiente al *NDVI* máximo de 0.80; para ambas ecuaciones se asume que para valores de *NDVI* menores a cero, el *Kc* correspondiente es 0.65 (Alanoca y Casas, 2013). El procedimiento para el cálculo de índice *NDVI* se describe en la literatura (e.g., Liang, 2004).

$$Kc_{(inicial, \text{ crecimiento, meseta})} = 1.250 \text{ NDVI} + 0.200 \quad (1a),$$

$$Kc_{(estación \text{ de invierno})} = 1.571 \text{ NDVI} - 0.057 \quad (1b).$$

Los valores de *Kc* se determinan para una fecha específica de captura de las imágenes de satélite, se asumen como el valor medio para el día estudiado, y a partir de allí se obtiene valores distribuidos de *ETc* considerando los valores diarios de *ETo* calculados para la misma fecha en la estación Sajama. Para inferir la distribución histórica mensual de los valores de la *ETc* se asume que los *Kc* inferidos a través de técnicas de teledetección son representativos de los valores medios de la estación durante la cual la imagen fue adquirida (e.g., si el *Kc* fue adquirido en julio, se asume que este valor es constante para toda la estación de invierno).

Tabla 1. Imágenes Landsat procesadas para el cálculo del *NDVI*. En la Tabla, L5 hace referencia a la plataforma Landsat 5 (resolución horizontal de 30 m).

Año de adquisición de la imagen	Época húmeda (Plataforma_Fecha de adquisición)	Época seca (Plataforma_Fecha de adquisición)
2005	L5_20041206	L5_20050616
2006	L5_20060406	L5_20060603
2007	L5_20070129	L5_20070724
2008	L5_20080320	L5_20080811
2009	L5_20090323	L5_20090611
2010	L5_20100411	L5_20100817

Desagregación de la demanda en zonas con alta, media y baja demanda de agua.

La demanda de los principales usuarios de agua considerados en nuestro estudio no son superficies con características biofísicas homogéneas. Estudios previos identificaron que a escala espacial horizontal media (30 m), los mismos pueden dividirse en tres niveles: bofedales con alta vitalidad (*NDVI* alto), bofedales con vitalidad media (*NDVI* medio) y bofedales con baja vitalidad (*NDVI* bajo) (Buitrón y Fernández, 2012). Debido a que el enfoque presente considera una relación lineal entre la biomasa y los coeficientes de cultivo *Kc*, en congruencia con el estudio previamente citado, para el estudio de la demanda en el tiempo presente (periodo 2005-2010) se identificó tres usuarios principales en función al nivel de vitalidad de la vegetación: usuarios con alta demanda de agua (con valores altos de *NDVI*; *Kc* en el rango de 0.9 a 0.99), usuarios con un nivel medio de demanda de agua (con valores medios de *NDVI*; *Kc* en el rango de 0.59 a 0.62) y usuarios con baja demanda de agua (con valores bajos de *NDVI*; *Kc* en el rango de 0.35 a 0.37). Para el análisis de la demanda en tiempo futuro (periodo 2046-2051), el registro es muy corto para definir mediante un análisis estocástico valores que permitan inferir el comportamiento futuro de los tres usuarios; por esta razón, en los escenarios climáticos futuros los tres usuarios se agregan en una sola unidad de vegetación.

2.2 Herramientas para el cálculo de la oferta de agua y para el análisis del balance hídrico.

Para el análisis de balance hídrico se utilizó el modelo semidistribuido de Collick et al. (2009). Este mismo modelo se utilizó para la generación de las series de oferta de agua, y dado que la

evapotranspiración es uno de sus principales parámetros de entrada, el análisis de balance hídrico resultante es básicamente un análisis de sensibilidad del modelo matemático. Aunque los modelos de gestión (e.g., el modelo Mike Basin, DHI, 2008) tienen alto potencial para el análisis de las implicaciones en la asignación de usos y derechos de acceso al agua, en el presente documento se sugiere omitir el modelo de gestión Mike Basin (DHI, 2008) debido a la ausencia de reglas definidas en los usos para riego y otros que demanden la asignación de derechos con prioridades establecidas. La alta complejidad y heterogeneidad de la respuesta hídrica de la cuenca estudiada es también una razón para decidir omitir el uso de una herramienta de gestión. Una razón adicional para omitir el uso de otro tipo de modelo matemático es que, por ejemplo en el caso del Mike Basin, la estructura para resolver el análisis de balance hídrico a cada paso de tiempo difiere de la estructura del modelo de Collick et al. (2009), lo cual podría causar conflictos al momento de generar los productos. De esta manera, aunque son varias las razones que justifican el no haber utilizado un modelo de gestión, no se descarta que su uso podría proveer una perspectiva interesante ni se descarta su posible uso en futuros emprendimientos.

En referencia al modelo semidistribuido de balance hídrico superficial de Collick et al. (2009), el mismo es también la herramienta para predecir las series de oferta de agua fuera del periodo de medición en campo, a través de las series de variables climáticas históricas (periodo 2005-2010) y a través de series climáticas predichas mediante el modelo LARS (periodo 2045-2051). El modelo semidistribuido de balance hídrico fue calibrado con mediciones de caudal realizadas en el periodo marzo 2012 a enero 2013 y aunque las series no fueron validadas debido al corto periodo de duración del estudio, Soria (2013a) presentó un estudio breve acerca de la incertidumbre predictiva del modelo para asesorar al usuario en el grado de confiabilidad de las predicciones. El lector se remite a la referencia citada por detalles acerca del estudio.

2.3 Estructura del modelo matemático semidistribuido de balance hídrico.

La estructura del modelo así como sus ecuaciones se describen en detalle en Collick et al. (2009) y su aplicación se presenta en detalle en Soria (2013a) y sus respectivos anexos. Debido a su relevancia en los alcances del presente documento a continuación se recapitula una vista general al modelo.

a) **Modelo perceptual.**- Se basa en la expresión general del balance de humedad en el suelo (Ojha y Singh, 2002). Su modelo conceptual está basado en un esquema de reservorios horizontalmente desagregados en cordones altitudinales (Collick et al., 2009). El modelo perceptual asume que el escurrimiento superficial ocurre por exceso de saturación del suelo.

b) **Balance de humedad en el suelo.**- La expresión general es (Ojha and Singh, 2002):

$$dS / dt = (P - AET - Q) \quad (2),$$

donde el volumen de almacenamiento de agua por unidad de área S [L] durante un paso de tiempo t , está determinado por la precipitación mensual medida P [$L T^{-1}$], la evapotranspiración actual calculada AET [$L T^{-1}$], y el escurrimiento total de la cuenca Q [$L T^{-1}$].

Datos diarios y en algún caso horarios medidos en las estaciones Sajama (4255 msnm) y Chungará (4563 msnm), con el apoyo de información climática medida en la estación Comisario (4340 msnm), se utilizan para generar las series de P y AET . La P se obtiene por agregación de los registros diarios, mientras que la AET es en realidad la evapotranspiración del cultivo, calculada a partir de la ET_o la cual es estimada a su vez a partir del método de Penmann Montheit utilizando

información climática disponible. Las series de información climática fueron previamente procesadas mediante control de las condiciones de homogeneidad y consistencia a través de métodos estadísticos descritos en detalle en García (2012a, b). Se omite la consideración de registros de otras estaciones debido a las lagunas de información presentes (García, 2012 a, b). En referencia a la variación altitudinal de P y AET , en el modelo matemático se asume una distribución lineal.

c) **Balance hídrico del reservorio vertical.**- La respuesta de cada reservorio horizontal depende del contenido efectivo de humedad del suelo S_{max} , el cual se entiende como la diferencia entre el contenido de agua en el suelo al momento que el escurrimiento superficial ocurre y la capacidad mínima de almacenamiento de agua en el suelo (Soria y Kazama, 2011). El balance hídrico del reservorio vertical se explica mediante la siguiente ecuación, donde Q_{SE} [$L T^{-1}$] es el escurrimiento superficial por exceso de saturación, y $Perc$ [$L T^{-1}$] es la percolación:

$$dS / dt = (P - AET - Perc - Q_{SE}) \quad (3).$$

El exceso de agua que se convertirá en Q_{SE} o $Perc$ se determina a través de un coeficiente Cse . Luego, la contribución de $Perc$ al reservorio subterráneo (S_{GW}) se estima a través de la relación presentada a continuación, donde Q_{GW} [$L T^{-1}$] es el flujo subterráneo por unidad de área:

$$dS_{GW} / dt = (Perc - Q_{GW}) \quad (4).$$

2.4 Parámetros del modelo de balance hídrico.

El parámetro S_{max} se infiere a partir de valores referenciales de abstracciones calculadas mediante el método empírico del SCS. El método se conoce en el ámbito ingenieril como el método del número de curva CN , y su cálculo se describe en la literatura (e.g., ver Chow et al., 1998). Para el estudio presente, los parámetros para el cálculo de abstracciones se representan mediante valores de retención potencial máxima S'_{max} estimados utilizando información de Navarro y Ferreira (2007). La descripción de la distribución altitudinal de las comunidades de vegetación y los valores referenciales del CN se presentan en Soria (2013a). En referencia al potencial de escurrimiento directo, el modelo de balance hídrico considera que existe menor potencial en los taludes laterales y en las áreas con pendientes bajas que no están cubiertas por bofedales; por otro lado, en la zona cubierta por bofedales el modelo considera que la superficie es poco permeable y con mayor potencial de escurrimiento. De esta manera, al asumir que los valores iniciales del parámetro S_{max} a través de S'_{max} pueden inferirse a partir de información obtenida de mapas temáticos, el único parámetro a calibrar es el parámetro Cse , el cual regula la recarga a los acuíferos subterráneos y define la porción del exceso de humedad en el suelo que se convierte en escurrimiento superficial (eventualmente, retención superficial). Los gradientes hidráulicos medidos a través del monitoreo de los piezómetros constituyen la referencia inicial para estimar de manera empírica las tasas de contribución permanente de los manantiales regulados por bofedales (reservorios subsuperficiales) hacia la red hídrica principal.

2.5 Introducción de la demanda de los bofedales como variable del modelo.

Entre las dos formas posibles para introducir la ETc como variable representativa de la demanda de un usuario en un modelo de balance hídrico, se eligió representar la misma en unidades de lámina de agua en mm/mes para cada uno de los tres usuarios (usuario con alta, media y baja demanda). Dado que el modelo de balance hídrico superficial está estructurado en reservorios

horizontales cuyas áreas son introducidas explícitamente por el usuario, el modelo de balance hídrico considera en su simulación la variabilidad de las superficies cubiertas por cada uno de los tres usuarios; es decir, implícitamente la demanda se considera en las dimensiones [$L^3 T^{-1} L^{-2}$] en concordancia con otros estudios (e.g., Salazar et al. 2000; Molina y Cruz, 2008). Bajo estas consideraciones, la diferencia entre la estructura considerada en Soria (2013a) y la estructura considerada para el estudio presente, es que el número de reservorios se incrementan en número en el sector de la planicie de la cuenca donde se desarrollan los bofedales por debajo de los 4500 msnm, dando lugar a la siguiente configuración:

- **Reservorio 4 (R4):** De 5001 msnm a 6543 msnm. Para este Reservorio se calculó una retención potencial máxima S'_{max} de 149 mm.
- **Reservorio 3 (R3):** De 4501 msnm a 5000 msnm. Para este Reservorio se calculó un S'_{max} de 120 mm.
- **Reservorio 2 (R2):** De 4120 msnm a la salida de la cuenca hasta 4500 msnm. Para este Reservorio se calculó un S'_{max} de 120 mm.
- **Reservorio 1 (R1):** Comprende la región de la cuenca con bajas pendientes donde se desarrollan las unidades de vegetación bofedales alto andinos y vegas y humedales. Este Reservorio 1 se desarrolla desde la salida de la cuenca a 4120 msnm en dirección aguas arriba hasta una cota de aproximadamente 4340 msnm. No se consideran parte del Reservorio 1 a las superficies de bofedales que se desarrollan en la parte alta perimetral de la cuenca al pie de formaciones glaciares. Los valores de S'_{max} varían de 31 mm a 104 mm para la época de estiaje y 51 mm para la época húmeda. Para estudiar la variabilidad de la demanda, este reservorio se subdivide en tres sub reservorios (uno por usuario) cuyas áreas se calculan desde las imágenes de satélite:
 - **R1a:** Usuario con baja demanda de agua.
 - **R1b:** Usuario con demanda media de agua.
 - **R1c:** Usuario con baja demanda de agua.
 - **R1d:** Comprende la superficie sin bofedal que ocupa el Reservorio 1 que no está siendo ocupada por los usuarios R1a, R1b, ó R1c.

Tal como se indicó anteriormente, al considerar la configuración sugerida lo que en realidad se está haciendo es generar una estrategia para llevar a cabo un análisis de sensibilidad que permita estudiar escenarios para investigar probables cambios de la demanda natural de agua de los bofedales y su probable impacto en la oferta de agua total a la salida de la cuenca del Río Sajama, tanto para el tiempo presente (escenarios con tres usuarios y escenarios bajo condiciones estándar de cultivo) como para el tiempo futuro. Este enfoque es similar al de otros estudios (e.g., Molina y Cruz, 2008) con la diferencia de que en el caso presente se utiliza los mismos modelos perceptual y conceptual para generar la oferta natural, lo cual desde nuestra perspectiva excluye fuentes de incertidumbre que podrían introducirse al estudiar este sistema bajo otro tipo de modelo perceptual. Es por esta razón que consideramos que nuestro enfoque es apropiado para el caso de un estudio de las variaciones de la demanda natural. En el caso de haberse incluido usuarios externos no naturales y de haberse definido reglas de asignación de uso y derechos de acceso al agua, es muy probable que un modelo de gestión hubiese sido mucho más apropiado.

Para el caso de los escenarios de la demanda futura no se cuenta con series lo suficientemente densas y extensas que permitan inferir las tendencias de la variabilidad de las áreas ocupadas por los usuarios de los reservorios R1a, R1b y R1c. Por esta razón se decidió asumir que sus respectivas áreas podrían permanecer constantes e iguales al área media medida en el periodo de monitoreo (2005-2010). El mismo enfoque es considerado para el cálculo del K_c futuro; es decir, se

asume que los K_c son iguales a los valores medios observados en las correspondientes estaciones (e.g., en la simulación futura el K_c de invierno se asume igual al valor promedio de los K_c medidos en las escenas capturadas en invierno durante el tiempo presente). En base a esta información y a series de ET_o generadas por el modelo LARS (García, 2012c) se obtienen series de ET_c para el análisis de la probable evolución futura de la demanda para el estudio de sus potenciales impactos en el balance hídrico.

En referencia a la herramienta utilizada para las predicciones futuras, el modelo LARS genera series estocásticas de precipitación y evapotranspiración que no representan fechas específicas (ver García, 2012c). Este aspecto introduce un problema de tipo práctico y conceptual en el análisis debido a que el modelo para estudiar el balance hídrico no es un modelo estocástico, y demanda series con información explícita acerca de la fecha de ocurrencia de un punto de la serie de la variable. Por esta razón, para el estudio de los impactos futuros de la demanda se decidió tomar una muestra al azar de la población generada por el modelo LARS. Estos aspectos deben ser tomados en cuenta al interpretar los productos presentados en este documento.

2.6 Escenario con condiciones estándar de cultivo.

Estas condiciones pretenden simular las potenciales consecuencias de la recuperación de bofedales degradados a través de la introducción de un escenario donde toda el área cubierta por bofedales (la superficie total cubierta por los tres usuarios) tiene condiciones estándar de cultivo. Se entiende por condiciones estándar de cultivo a aquellas condiciones donde no se establecen restricciones para el crecimiento del cultivo, donde no existen restricciones para la evaporación del agua almacenada en los suelos, donde la fertilidad del suelo no es un factor limitante, ni donde la existencia de enfermedades afecten a los cultivos (Allen, et al., 1998). En nuestro estudio, este escenario se introduce al esquema de modelación asignando a los tres usuarios volúmenes de agua suficientes para alcanzar las condiciones estándar; se asume que los bofedales cubren la mayor de todas las superficies observadas en las escenas Landsat para el periodo 2005-2010 y que el mayor K_c observado en las imágenes de satélite representa las condiciones estándar. Se toma el enfoque explicado para obtener los valores de K_c debido a la muy limitada información encontrada en la literatura en bofedales andinos. Para este escenario, la ET_c se calcula en base a los valores de ET_o calculados para la estación Sajama. El análisis se realiza para el tiempo presente (2005-2010).

2.7 Índices de disponibilidad de agua.

Considerando a la cuenca como la unidad de análisis y tomando en cuenta que los principales usuarios son los bofedales, el asesoramiento del potencial de la fuente de agua disponible en función a la demanda estimada se realiza a través de índices de disponibilidad de agua (CNA, 2002; Velasco, 2007). El método se basa en el cálculo del balance entre la oferta y la demanda, cuando ambos componentes se calculan por separado (Velasco, 2007). En congruencia con nuestro estudio, la oferta de agua está representada por los registros de caudal medidos o simulados a la salida de la cuenca o subcuenca. La demanda de agua es medida en el sitio donde se sitúa el último usuario en la dirección aguas abajo, de modo que aquella demanda sea la acumulada de los volúmenes parciales; Velasco (2007) nombra esta demanda como la demanda total del sistema hidrológico. De esta manera, el índice de disponibilidad relativa (Dr_i) para una subcuenca i es (Velasco, 2007):

$$Dr_i = \frac{Cp_i + Ar_i}{Uc_i + R_{xy}} \quad (5),$$

donde Cp_i es el escurrimiento u oferta de la subcuenca, Ar_i es el aporte desde la subcuenca situada aguas arriba, Uc_i es el uso del agua dentro la subcuenca, y R_{XY} es el caudal reservado de una cuenca X para una cuenca Y situado aguas abajo. El Uc_i es la demanda bruta de riego (D_{BRUTA}) [$L^3 T^{-1}$] calculada mediante la siguiente expresión (e.g., Salazar, 2011):

$$D_{BRUTA} = \frac{(ETc - P_e) \cdot A}{Eficiencia} \quad (6),$$

donde la ETc está en [$L T^{-1}$], P_e [$L T^{-1}$] es la precipitación efectiva estimada a través del método del SCS, A [L^2] es el área de riego, y $Eficiencia$ es la eficiencia del sistema asumida es del 70% asumiendo únicamente pérdidas por infiltración (Salazar, 2011). En la expresión anterior, el término $ETc - P_e$ es el requerimiento de riego (RR) en [$L T^{-1}$]; a su vez, el producto entre RR y A es la demanda neta (D_{NETA}) en [$L^3 T^{-1}$]. Para los tres grupos de escenarios considerados en nuestro estudio, los índices de disponibilidad de agua se construyen también para un escenario adicional que asume que la oferta de agua de la cuenca se aprovecha en términos medios mensuales en un 80% ($R_{XY} = 0.8$ del caudal mínimo estiaje a nivel medio mensual) a través de la implementación de obras de toma y otras obras para el aprovechamiento del agua del río; este porcentaje de aprovechamiento se establece a partir de las recomendaciones Ley del Medio Ambiente 1333 (HCN, 1992), asumiendo los caudales medios mensuales medidos en representación de los máximos diarios. Para la interpretación de los índices, se considera que los valores de los mismos representan el porcentaje de la demanda cubierta por la oferta (la cual incluye en cierto caso a los caudales reservados); a diferencia de Velasco (2007) se omite la categorización de los índices en varios rangos debido a la incertidumbre que la misma representa.

2.8 Análisis de sensibilidad para los escenarios futuros.

El análisis de sensibilidad se realiza bajo un enfoque Monte Carlo (Saltelli, 2000), con una muestra $n = 3584$ generada con el esquema Sobol para la generación de muestras para índices de sensibilidad de primer orden y orden total (Sobol, 1994). Aunque el interés es observar la sensibilidad del sistema a variaciones en la demanda de los bofedales, los experimentos computacionales consideran dos factores adicionales que de acuerdo a Soria y Kazama (2011) definen la respuesta del modelo matemático seleccionado: el parámetro Cse y las variables de entrada ETc y P a escala mensual. El rango de incertidumbre que se asume para cada parámetro es +/- 20%. Una vez definidos los rangos de incertidumbre se genera la muestra asumiendo funciones de distribución de probabilidad del tipo uniforme (i.e., se asume ignorancia en la respuesta del modelo). Esta muestra generada con tamaño n se introduce en el modelo de balance hídrico; luego, un igual número n de resultados son obtenidos. Finalmente, son construidas superficies de respuesta bidimensionales (Beven, 2004) en base a cuyos resultados las conclusiones son generadas. Las superficies de respuesta para cada factor son del tipo descarga específica (i.e., la variable respuesta) vs. factor del modelo (i.e, la variable explicadora). Para la interpretación de las superficies de respuesta se considera que todo factor cuya superficie tenga una tendencia que da lugar a superficies con formas identificables, implica que este factor es dominante sobre el sistema. Los experimentos se generan para la observación más húmeda, considerando que es durante este periodo cuando se observan las relaciones más fuertes entre el modelo y las condiciones climáticas (Yapo et al., 1996). La **Tabla 2** resume los valores calibrados y observados considerados en los experimentos.

Tabla 2. Valores calibrados y observados para la generación de los rangos de incertidumbre.

Reservorio horizontal	Valores calibrados		Valores observados	
	$S_{Tm\acute{a}x}$ [mm]	Cse [---]	P [mm]	ETc [mm]
R1a	41	0.2	156	36
R1b	41	0.2	156	60
R1c	41	0.2	156	93
R1d	41	0.2	156	64

3 RESULTADOS.

3.1 Potenciales impactos de la demanda de los bofedales en la cuenca del Río Sajama.

Es muy complejo estudiar las interacciones y probables reglas de asignación entre los usuarios situados aguas arriba y los usuarios situados aguas abajo, debido a que a lo largo del tramo entre ambas zonas se desarrollan usuarios (bofedales) al oeste del Río Sajama que están alimentados por manantiales aislados y transitorios con poca evidencia (mensurable) de interconexión con los bofedales situados al este del Río Sajama. Estos bofedales al este de la cuenca dan lugar a cursos superficiales que no tienen flujo permanente que pueda ser monitoreado a través métodos de medición tradicionales. Debido a tal heterogeneidad en la respuesta hídrica, los potenciales impactos de la variabilidad de la demanda se estudian a la salida de la cuenca, en el punto de monitoreo del Puente Sajama, tomando como factor de análisis al caudal de salida de la cuenca como parámetro que expresa la respuesta de la cuenca a partir de una perspectiva agregada. Los potenciales impactos de las variaciones en la demanda en la oferta de agua de las subcuencas son analizados en el subtítulo siguiente, tomando también como referencia de análisis a los caudales a simulados a la salida de aquellas unidades geográficas.

Previo al análisis, para calibrar el modelo perceptual se comparan los balances resultantes del escenario para un único usuario contra un escenario con tres usuarios (usuarios con alta, media y baja demanda de agua). Como resultado, se comprueba que la respuesta de la estructura propuesta en Soria (2013 a, b) no varía de manera relevante, validando la propuesta inicial. Las Figuras 1a, b presentan los resultados de esta etapa. A partir de allí se genera el estudio de los potenciales impactos de la demanda a través de escenarios climáticos futuros. Las conclusiones son una consecuencia de este análisis.

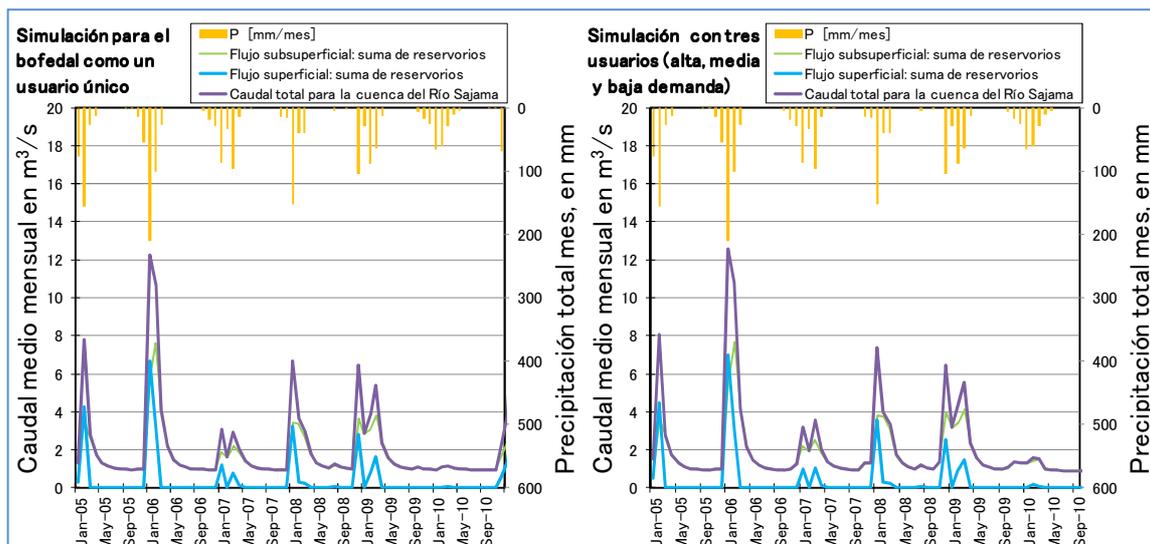


Figura 1a. Balances hídricos expresados en términos de caudal medio mensual en la cuenca Río Sajama, para simulaciones con esquemas de un solo usuario y para tres usuarios.

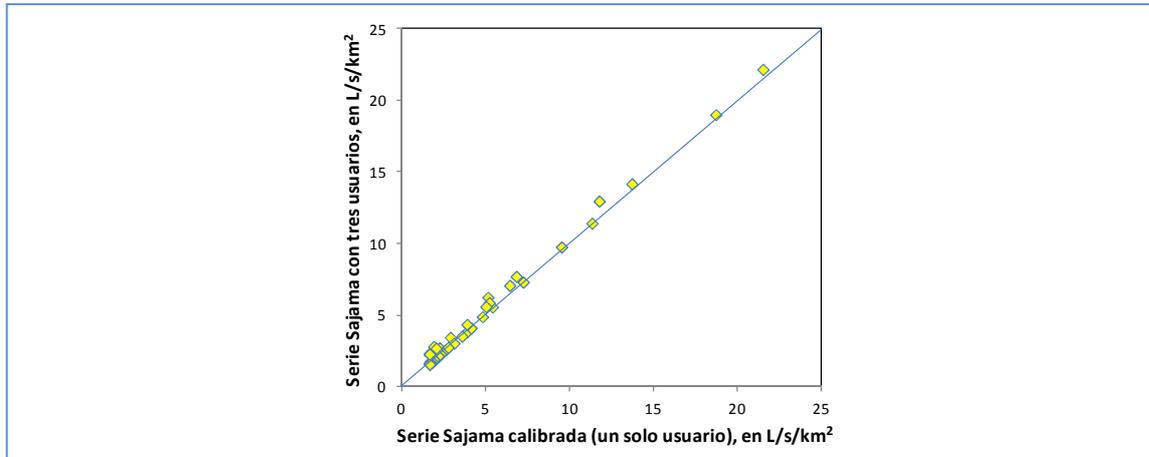


Figura 1b. Balances hídricos expresados en términos de caudal específico medio mensual en la cuenca Río Sajama, para simulaciones con esquemas de un solo usuario y para tres usuarios.

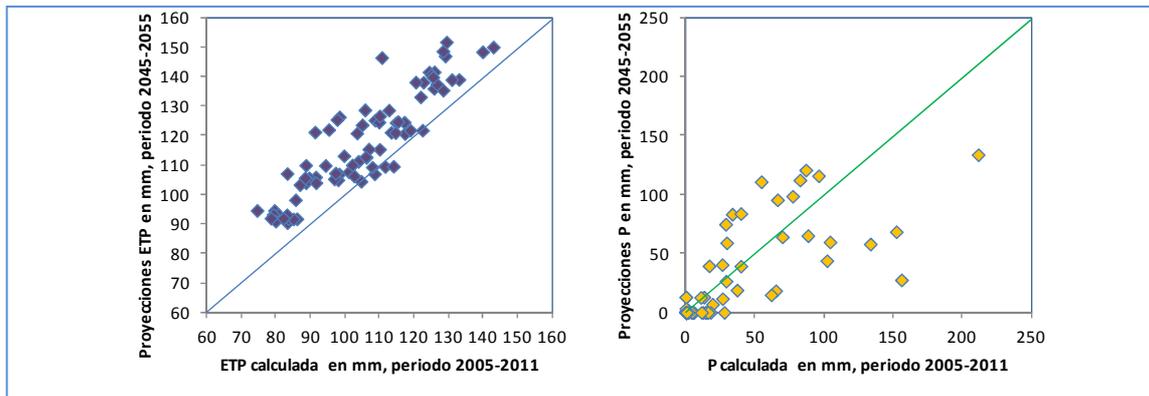


Figura 2. Series de ETP media mensual y P mensual para el tiempo actual (2005-2011) y serie de una muestra del universo generado para el tiempo futuro (2045-2055). La Figura es construida en base a datos generados en García (2012c) (Figura extraída de Soria, 2013a).

Las proyecciones de demanda de agua generadas en referencia a proyecciones de ET_c del modelo LARS sugieren incrementos de la evapotranspiración para una gran parte de los meses proyectados en el periodo 2045-2055 (Figura 2), y un comportamiento sin una tendencia particular en la variable precipitación medida también a escala mensual. A escala anual las predicciones sugieren un incremento de 12 mm en promedio para la variable evapotranspiración; por el contrario, se observa un decremento de 52 mm en promedio para la variable precipitación. Las consecuencias de estos escenarios en el balance hídrico superficial se analizan en los siguientes párrafos a través de los resultados presentados en las Figuras 3 y 4. Los resultados se analizan en referencia a los caudales simulados a la salida de la cuenca asumiendo que esta variable sintetiza adecuadamente la respuesta total de la cuenca.

En general, las mayores diferencias entre los potenciales impactos de un probable incremento en la demanda de agua se observan en el grupo de datos de las estaciones húmedas (diciembre a marzo) y de la estación de transición (abril, mayo, octubre, noviembre), mientras que el comportamiento de las series de datos del invierno (junio a agosto) sugieren que los impactos del incremento de la demanda de agua sobre la oferta son poco relevantes debido a los bajos valores

de caudales específicos registrados (Figuras 3 y 4). En la época húmeda, los resultados muestran una disminución del caudal específico para los escenarios climáticos en un rango medio de 1.6 L/s/km² y decrementos en la desviación estándar y los valores mínimos y máximos registrados que explica la atenuación en la variabilidad interanual mostrada en la serie de las series de valores ordenados secuencialmente. Al comparar las f.d.a. Gamma se observa un desplazamiento en el sentido vertical de las función de la distribución del tiempo futuro con respecto a la función del tiempo presente. Aquel desplazamiento sugiere que un potencial impacto del incremento de la demanda bajo los escenarios delineados es una disminución de la oferta, expresada en la disminución en la frecuencia de ocurrencia de caudales medios hasta valores de 14 L/s/km². En el caso se las curvas correspondientes de la estación de transición son notorios dos tramos; el primero sugiere un decremento en la frecuencia de ocurrencia de valores menores a los 2 L/s/km² aproximadamente, y un posterior incremento en la frecuencia de ocurrencia para caudales mayores (el máximo caudal específico simulado es 5.3 L/s/km²). Para el invierno, la curva del tiempo futuro se desarrolla en general por debajo de la curva del tiempo presente, sugiriendo un incremento en la oferta de agua.

Tabla 3. Medidas estadísticas simples para comparar el comportamiento entre las series generadas por el balance hídrico calculado para el tiempo presente y el tiempo futuro.

	Estación húmeda		Estación de transición		Estación seca	
	Tiempo presente (2005-2011)	Tiempo futuro (2045-2055)	Tiempo presente (2005-2011)	Tiempo futuro (2045-2055)	Tiempo presente (2005-2011)	Tiempo futuro (2045-2055)
Promedio, en L/s/km ²	5.17	3.54	1.49	1.32	0.88	0.90
Desviación estándar, en L/s/km ²	4.47	3.28	0.84	1.11	0.17	0.19
Valor mínimo, en L/s/km ²	0.82	0.77	0.67	0.77	0.67	0.77
Valor máximo, en L/s/km ²	18.39	13.85	3.35	5.27	1.26	1.60

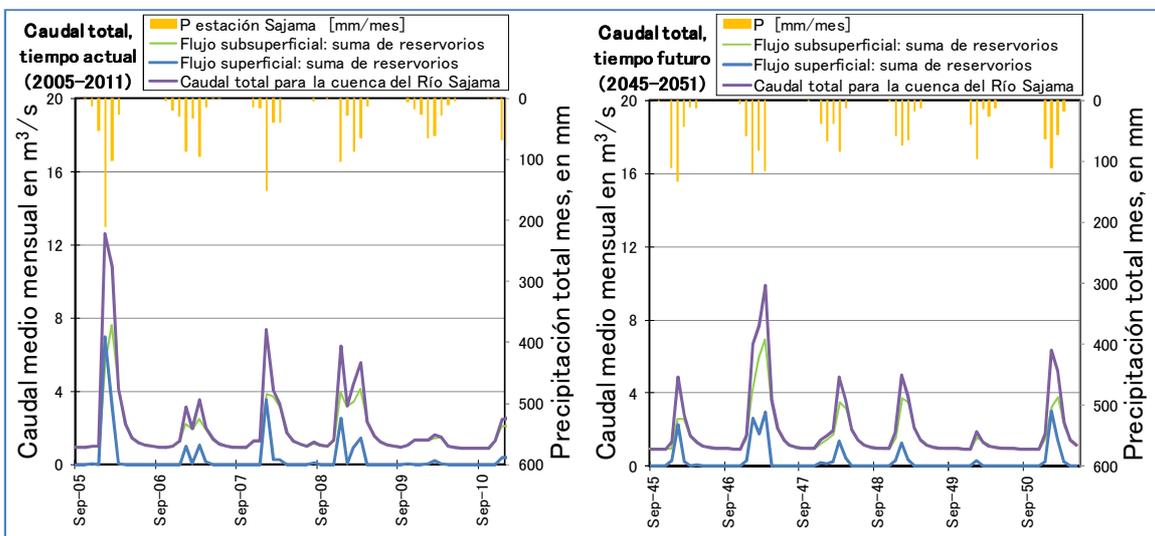


Figura 3. Simulación para el tiempo presente (2005-2010) y el tiempo futuro (2045-2051), para un escenario con tres usuarios en la cuenca del Río Sajama (Puente Río Sajama).

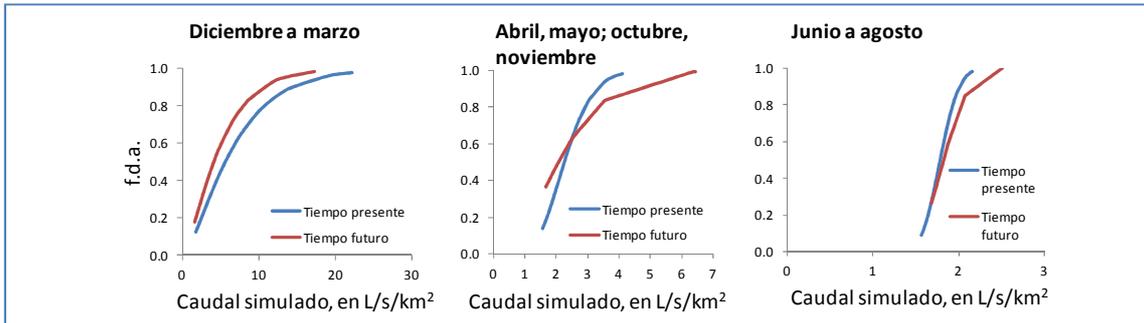


Figura 4. Funciones de probabilidad Gamma acumuladas (f.d.a.) para el tiempo presente (2005-2010) y el tiempo futuro (2045-2051), para un escenario con tres usuarios en la cuenca del Río Sajama (Puente Río Sajama).

3.2 Potenciales impactos de posibles cambios futuros en la demanda, por subcuencas.

Los potenciales impactos de la demanda se representan en la **Figura 5** mediante comparación de las corridas del modelo de balance hídrico, obtenidas por aplicación de las condiciones descritas por los escenarios con tres usuarios para el tiempo presente y el escenario con un incremento de la demanda futura predicha. La respuesta agregada en la cuenca del Río Sajama (Puente Sajama) analizada en los párrafos precedentes tiene un comportamiento similar al observado en las subcuencas, con tendencia a la disminución en la probabilidad de ocurrencia de los caudales específicos altos simulados para el tiempo presente, para las épocas húmeda, de transición y época seca. En el tramo aguas arriba se encuentra la subcuenca monitoreada de mayor superficie Sajama@Manasaya, con comportamiento mutuamente comparable con aquel descrito por la cuenca Río Sajama-Puente Sajama; ambas tienen los menores rangos de caudales específicos simulados, en consecuencia presentan los menores potenciales impactos de las variaciones en la demanda en comparación a los impactos observados en otras subcuencas del área de estudio. Para esta subcuenca las curvas f.d.a. sugieren una disminución de los caudales específicos para las tres épocas simuladas, con mayores impactos durante la época húmeda. En esta región, las simulaciones sugieren una disminución en el ancho del rango de los caudales específicos de 12 L/s/km² para el tiempo presente a 9 L/s/km² para el tiempo futuro. En las subcuencas hacia el sur, se sostiene la disminución del rango de caudales específicos como principal impacto potencial de un cambio en las tendencias de la demanda de agua de los bofedales, con los mayores impactos simulados para la cuenca Taypijahuirá la cual tiene los menores valores de caudal base medidos. Los siguientes párrafos describen una a una la situación esperada (simulada) en las subcuencas del sistema donde existe un curso principal con flujo permanente a lo largo del año.

Subcuencas Manasaya y Géiser.

Al sur de la subcuenca Sajama@Manasaya, las subcuencas Manasaya y Géiser son tributarias que desembocan en el Río Sajama por el oeste. En el tiempo presente, Manasaya es la subcuenca con el mayor rango de variación de caudales específicos entre las subcuencas monitoreadas, tanto durante la época húmeda como en la época de estiaje. Durante la época húmeda, aquel rango tiene un ancho de aproximadamente 22 L/s/km² que disminuye a 17 L/s/km² para el escenario del tiempo futuro. El impacto de un incremento de la demanda de agua es mayor para la época seca, con una disminución de la amplitud del rango desde 3 L/s/km² a menos de 1 L/s/km² para los escenarios presente y futuro, respectivamente.

Hacia el sur, la subcuenca Géiser tiene un rango de variación de caudales específicos mucho más alto que el esperado para Manasaya, con una disminución durante la época húmeda de 19 L/s/km² a menos de 8 L/s/km² para los escenarios presente y futuro, respectivamente. La tendencia a la

disminución del ancho del rango de caudales específicos se repite en la época de transición (de 11 L/s/km² a menos de 3 L/s/km²) y en la época seca (de 2 L/s/km² a menos de 1 L/s/km²). Ambas subcuencas, Manasaya (42 km²) y Géiser (21 km²) tienen topografía similar pero el área de la primera tiene el doble de extensión que la segunda; sin embargo, el potencial hídrico de la subcuenca Géiser es alto debido a los relevantes aportes de sus manantiales (la subcuenca en sí no es responsable de generar los aportes al río).

Subcuencas Taypijahuirá y Pizrrata.

El comportamiento de Taypijahuirá es similar al de Géiser, con una respuesta hídrica de la subcuenca dependiente de los caudales base que se refleja en la baja variabilidad de los caudales específicos mostrada en las f.d.a. de las tres épocas estudiadas. En la subcuenca Pizrrata los potenciales efectos de la variabilidad en la demanda se traducen en una disminución del ancho del rango de variabilidad desde 16 L/s/km² a aproximadamente 14 L/s/km², con una respuesta hídrica que es menos dependiente de los caudales base en comparación a la respuesta esperada para la subcuenca Taypijahuirá.

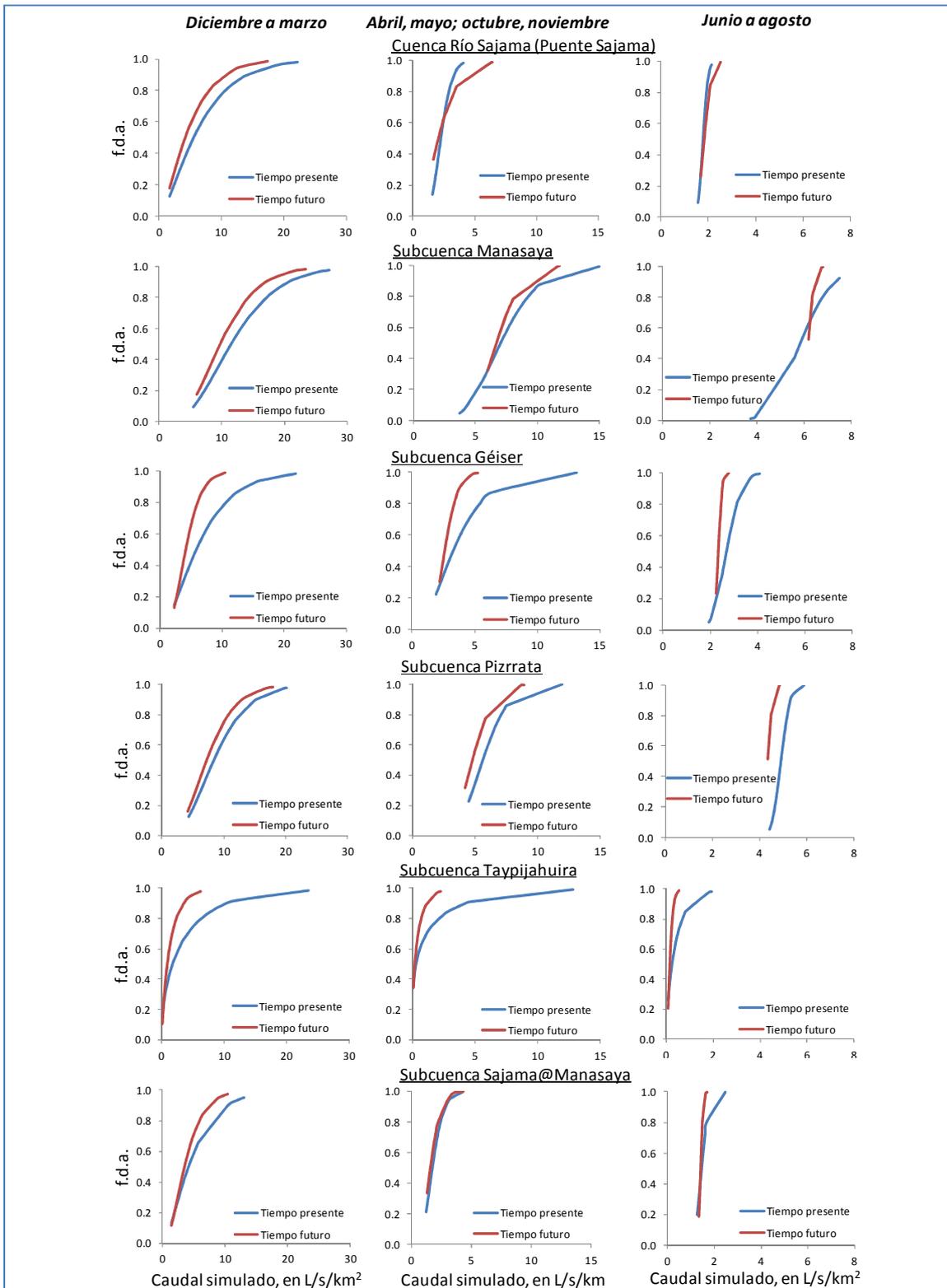


Figura 5. Potenciales impactos de la demanda, por subcuencas. Se muestra los resultados de la simulación con tres usuarios en el tiempo presente y los escenarios para la simulación del tiempo futuro. Los últimos se generan en base a predicciones realizadas bajo un enfoque estocástico; los resultados se comparan bajo el mismo enfoque para permitir la mutua comparación. En la Figura, f.d.a. significa función de distribución acumulada (distribución Gamma).

3.3 Potenciales impactos de la demanda: Condiciones estándar de cultivo.

Asumiendo un escenario donde los tres usuarios alcanzan condiciones estándar, es decir, para un escenario donde no se establecen restricciones para el crecimiento del cultivo, no se establecen restricciones para la evaporación del agua almacenada en los suelos, ni se establecen otro tipo de restricciones relacionadas al medio biofísico (fertilidad de suelos, enfermedades de los cultivos, etc), los resultados presentados en las Figuras 6 y 7 muestran el desplazamiento hacia la izquierda de las f.d.a. que sugiere un decremento en la frecuencia de ocurrencia y un decremento en la altura de las láminas de escurrimiento, como producto de la disminución en los valores de los parámetros de forma y escala debido a su vez a una disminución en los valores de las medias y desviaciones estándar de las muestras. Aquel desplazamiento de las f.d.a. tiene como consecuencia la disminución en la amplitud de los rangos respectivos, con mayor impacto potencial en las subcuencas con menor superficie (Manasaya y Géiser). El desplazamiento en las f.d.a. de las subcuencas Pizrrata y Sajama@Manasaya es poco perceptible, sugiriendo que en este sitio son irrelevantes los potenciales impactos de incrementar la demanda hacia el logro de condiciones estándar de cultivo. Aquel cambio en la demanda sobre la cuenca Taypijahuirra se podrían clasificar como intermedios, entre los observados en las cuencas Manasaya y Géiser, y las subcuencas Pizrrata y Sajama@Manasaya, con los mayores impactos potenciales representados principalmente por un decremento en la amplitud del rango de los caudales específicos, desde 23 L/s/km² a 19 L/s/km² para la época húmeda en referencia al rango mayor.

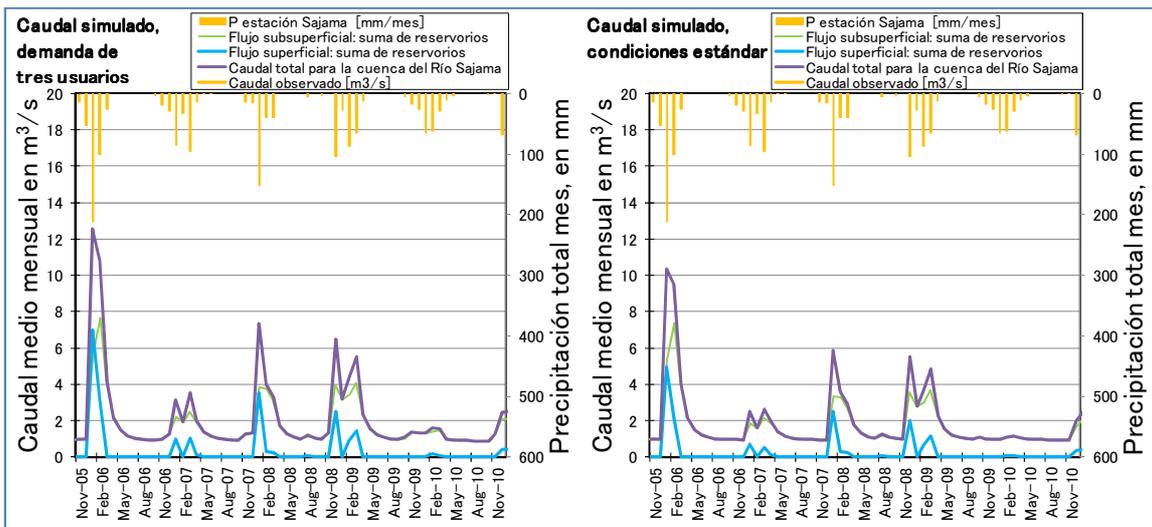
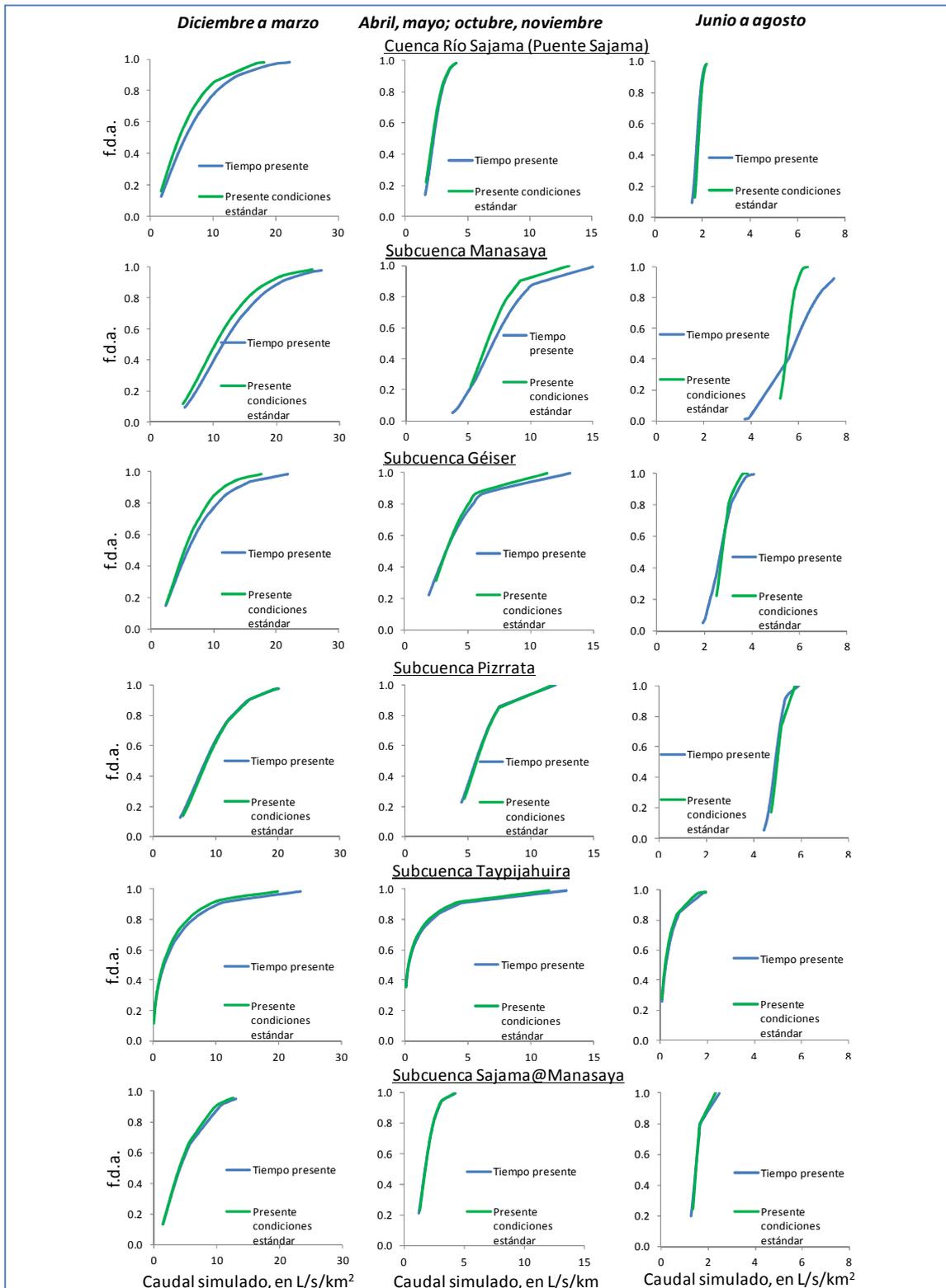


Figura 6. Comparación de los resultados de la simulación de los potenciales impactos de la demanda de tres usuarios con los resultados de la simulación del escenario bajo condiciones estándar para la cuenca del Río Sajama. Ambos escenarios se generan para la simulación del tiempo presente.



3.4 Índices de disponibilidad de agua.

Para la demanda bruta presentada en las Figuras 8 y 9, el análisis toma como referencia el valor $Dr = 1$ (las líneas punteadas de las Figuras 10 y 11) que implica que el 100% de la demanda es satisfecha por la oferta de agua de la cuenca. A través de este parámetro, la simulación del escenario donde las subcuencas monitoreadas utilizan el 20% del caudal mínimo disponible generado por la cuenca a través de la instauración de obras de toma y otras obras para el aprovechamiento del agua (Figura 10), sugiere que en general los potenciales impactos esperados de un escenario con condiciones estándar de cultivo son mayores a los potenciales impactos esperados por el escenario del tiempo futuro. Particularmente, los resultados sugieren que en la cuenca del Río Sajama (Puente Río Sajama) se espera que la demanda sea satisfecha en promedio durante el periodo húmedo enero a marzo ($Dr > 1$); esta observación es válida para la simulación del tiempo presente y para la simulación del tiempo futuro bajo las condiciones de modelación descritas en nuestro documento. Para los meses restantes, con excepción de diciembre, la demanda supera la oferta de agua de la cuenca. Durante la simulación del escenario de cultivos con condiciones estándar, los resultados sugieren que bajo los parámetros de modelación considerados la demanda no estaría satisfecha por la oferta de agua de la cuenca en ninguno de los meses.

Desagregando el análisis hacia las subcuencas monitoreadas dentro la cuenca del Río Sajama, para el escenario donde se consideran caudales reservados (Figura 10) los resultados de la simulación de la respuesta hídrica en el tiempo presente sugiere las condiciones más favorables en la subcuenca Manasaya, donde la demanda se satisface en proporciones que superan al menos en un 26% al aporte de la subcuenca correspondiente. Por el contrario, las condiciones más desfavorables para la simulación del tiempo presente se esperan en Taypijahuirá, donde se espera la demanda sea superada durante periodos cortos (probablemente durante un solo mes al año). Condiciones intermedias se esperan en las subcuencas Pizrrata y eventualmente en la subcuenca Géiser. En contraste a la simulación del tiempo presente, la simulación del tiempo futuro complica el panorama descrito, al sugerir condiciones donde la demanda es en promedio satisfecha únicamente para los meses más húmedos (la subcuenca Géiser presenta condiciones deficitarias para todo el año). En comparación a los dos resultados previamente descritos, la simulación para condiciones estándar de cultivo sugiere condiciones con mayor estrés hídrico, donde los altos valores de demanda asignados a los usuarios dan lugar a condiciones donde la demanda no es satisfecha para la mayor parte de las subcuencas estudiadas; allí, únicamente los meses más húmedos en Manasaya y Pizrrata presentan condiciones donde la demanda es superada por la oferta.

Para el escenario que no considera caudales reservados (Figura 11), las relaciones demanda-oferta expresadas por los índices Dr proponen condiciones optimistas. Para los escenarios del tiempo presente y tiempo futuro, los resultados sugieren condiciones favorables donde la demanda es satisfecha por la oferta de agua en promedio durante todo el año en Manasaya y Pizrrata. Los resultados de la simulación en la cuenca del Río Sajama (Puente Río Sajama) y en la subcuenca Géiser sugieren condiciones intermedias, donde el escenario del tiempo futuro sugiere que la demanda se satisface únicamente en meses húmedos (enero a marzo en Río Sajama-Puente Río Sajama, y febrero a marzo en Géiser). Por otro lado, la simulación sugiere que las condiciones más desfavorables se esperan en Taypijahuirá, donde la demanda es satisfecha únicamente durante el mes más húmedo (probablemente, enero). Tal como ocurrió en la simulación del escenario con caudales reservados, el escenario donde se representa condiciones estándar de cultivo sugiere

potenciales impactos mayores a los del escenario en tiempo futuro, donde se espera que la demanda mensual sea superada únicamente en Manasaya y Pizrrata.

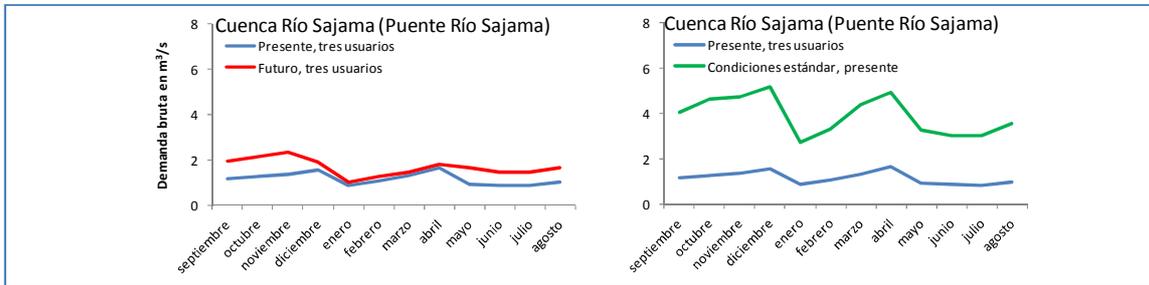


Figura 8. Demanda bruta, cuenca Río Sajama (Puente Río Sajama).

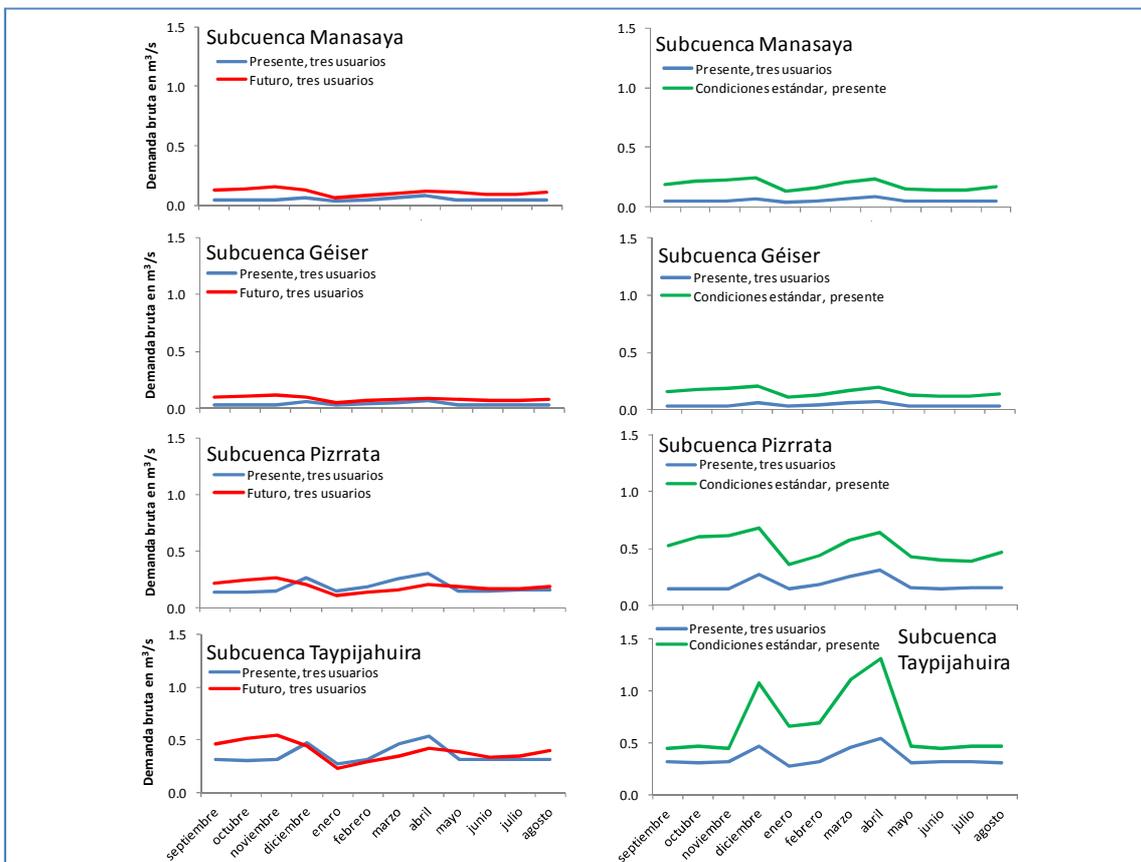


Figura 9. Demanda bruta, por subcuenca.

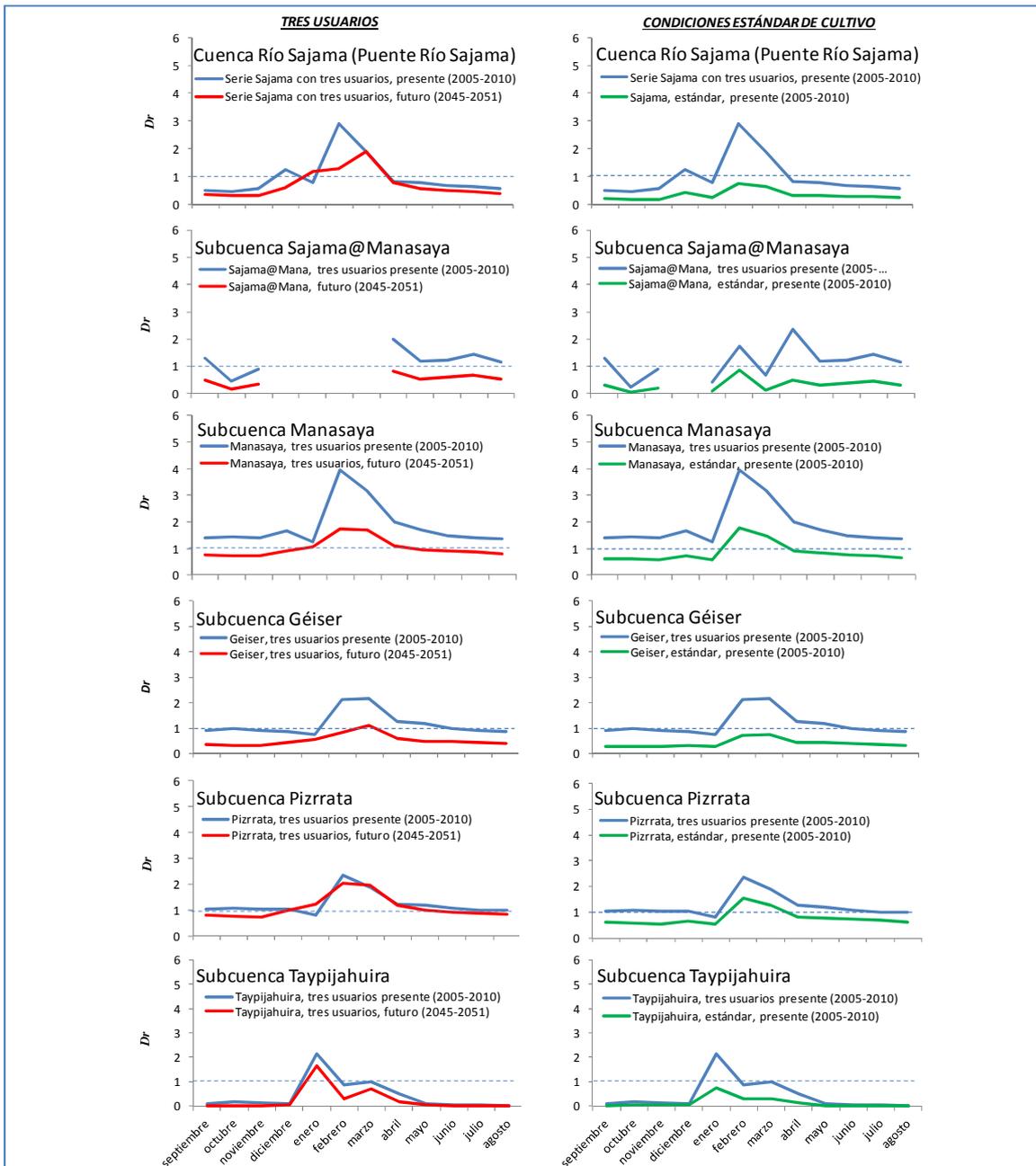


Figura 10. Índices de disponibilidad de agua (D_r , adimensional) para condiciones actuales (columna de la izquierda) y para un escenario con condiciones estándar de cultivo (columna de la derecha; estándar), en las subcuencas monitoreadas. En todos los casos se consideran caudales reservados igual al 80% del mínimo caudal medio mensual simulado; es decir, se asume el aprovechamiento del caudal del río a través de obras de toma, etc, con uso de volúmenes no mayores al 20% del caudal mínimo medio mensual.

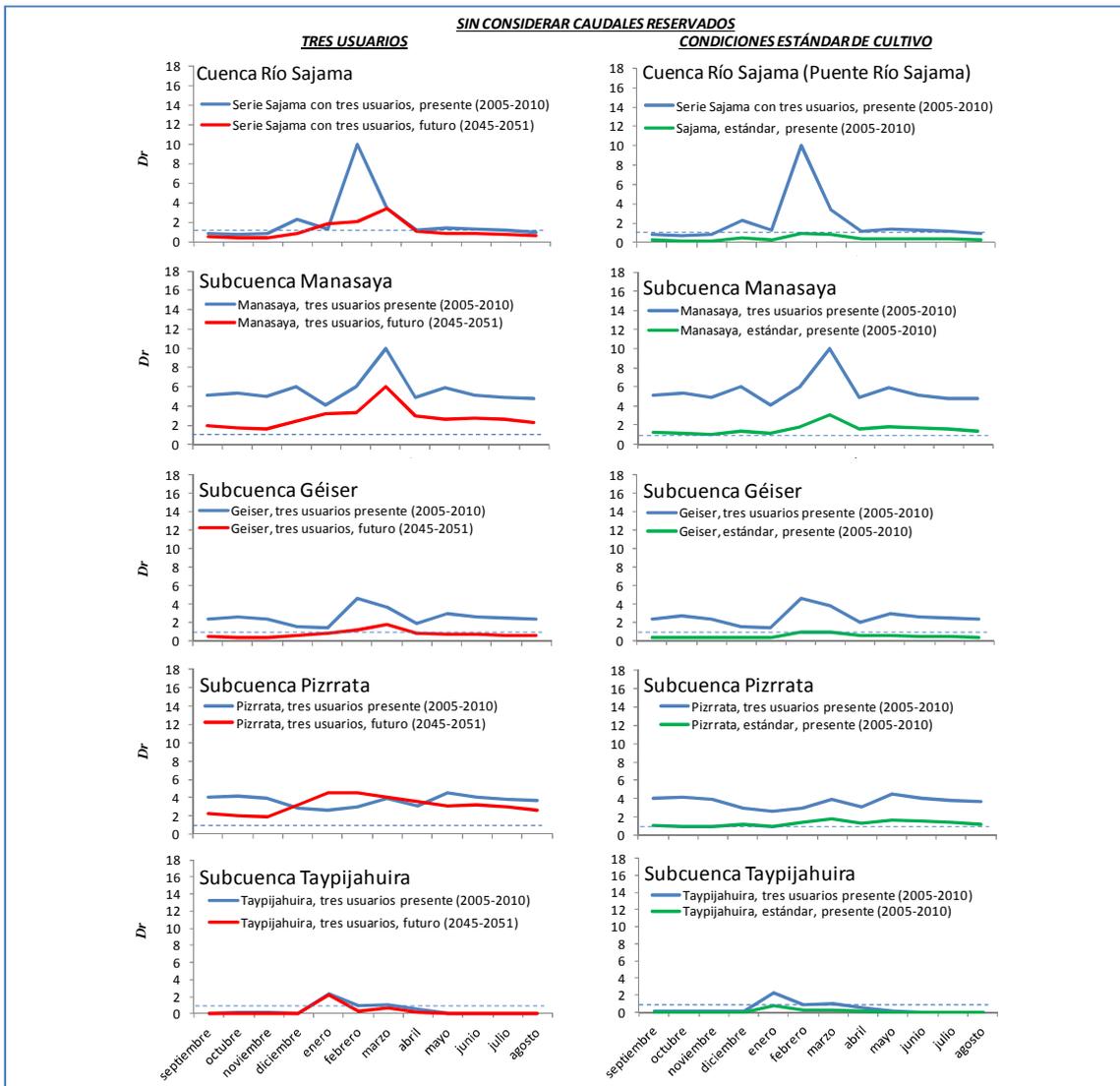


Figura 11. Índices de disponibilidad de agua (Dr , adimensional) sin considerar caudales reservados, para condiciones actuales (columna de la izquierda) y para un escenario con condiciones estándar de cultivo (columna de la derecha). En la columna de la izquierda, se omiten los índices de la cuenca Sajama@Manasaya porque sus valores superan el rango mostrado en el sentido positivo debido a que la demanda bruta respectiva tiene valores bajos.

3.5 Análisis de sensibilidad.

Un análisis de sensibilidad sencillo fue implícitamente realizado en las gráficas precedentes al comparar las simulaciones con un usuario único y con usuarios con demanda alta, media y baja (tres usuarios). Los resultados sugirieron que no existe una sensibilidad relevante al simular el sistema con ambos esquemas, dando lugar a la necesidad de investigar de forma más profunda la respuesta del sistema a través de un esquema de análisis que permita la investigación de las interacciones entre los tres factores más importantes del modelo (identificados como importantes luego del estudio de Soria y Kazama, 2011). Para el análisis se aplicó un esquema Monte Carlo a los escenarios del tiempo futuro, y los resultados se presentan en la **Figura 12**.

Para la interpretación de las superficies de respuesta se considera que un factor es dominante sobre la respuesta del sistema cuando su superficie de respuesta tiene forma definida. En el proceso de reconocer la dominancia de un factor es también importante que su superficie de respuesta tenga un rango de incertidumbre con ancho pequeño. En base a estas consideraciones, los resultados sugieren que en general en los reservorios estudiados, la variación en la demanda representada por las superficies de la variable ET_c no es tan relevante en la respuesta hídrica como lo es la precipitación. De la misma forma, los procesos internos de la cuenca que definen la respuesta hídrica, representados por el parámetro C_{se} , no alcanzan la relevancia que la variabilidad en la precipitación o la variabilidad en la demanda tienen sobre la respuesta hídrica de la cuenca medida en unidades de caudal específico. Esto se cumple tanto para los tres usuarios como para un probable tercer usuario situado sobre una superficie sin bofedales, en la zona baja de la cuenca donde se desarrollan las planicies (debajo de los 4500 msnm).

Para analizar la relevancia de la variabilidad en la demanda sobre la respuesta hídrica de la cuenca se consideran dos criterios: i) se analiza qué tan identificables son las superficies de respuesta de un factor comparado con la superficie de otro factor, y ii) se analiza qué tan amplio es el rango de incertidumbre originado por las variaciones forzadas en el factor estudiado. En las superficies de respuesta descritas por los factores, la comparación de los patrones para los tres usuarios no otorga mucha información porque los tres casos tienen similares configuraciones y tendencias. Por otro lado, la comparación de los rangos de incertidumbre sí muestra diferencias que otorgan medios para analizar los potenciales impactos de la demanda de los tres usuarios. Particularmente, de los tres usuarios identificados, el usuario que tiene baja demanda (R1a) tiene el menor rango de incertidumbre para la precipitación (rango de incertidumbre de 5 L/s/km^2); esto significa que para este usuario R1a, debido a que allí la relevancia de la precipitación sobre la respuesta hídrica es la mayor de los tres observados, los potenciales impactos de la relevancia de las variaciones en su demanda es menor a los potenciales impactos que ocasionarían las variaciones en la demanda de los dos usuarios restantes. A medida que la demanda de los usuarios crece, los resultados muestran que el rango de incertidumbre de la precipitación se incrementa hasta un valor promedio de 9 L/s/km^2 , sugiriendo un decrecimiento de su relevancia respecto a la relevancia de los otros factores; mientras, el rango de incertidumbre de la demanda permanece aproximadamente constante implicando que su dominio sobre la respuesta del sistema se incrementa debido a la simultánea disminución del carácter dominante de la precipitación.

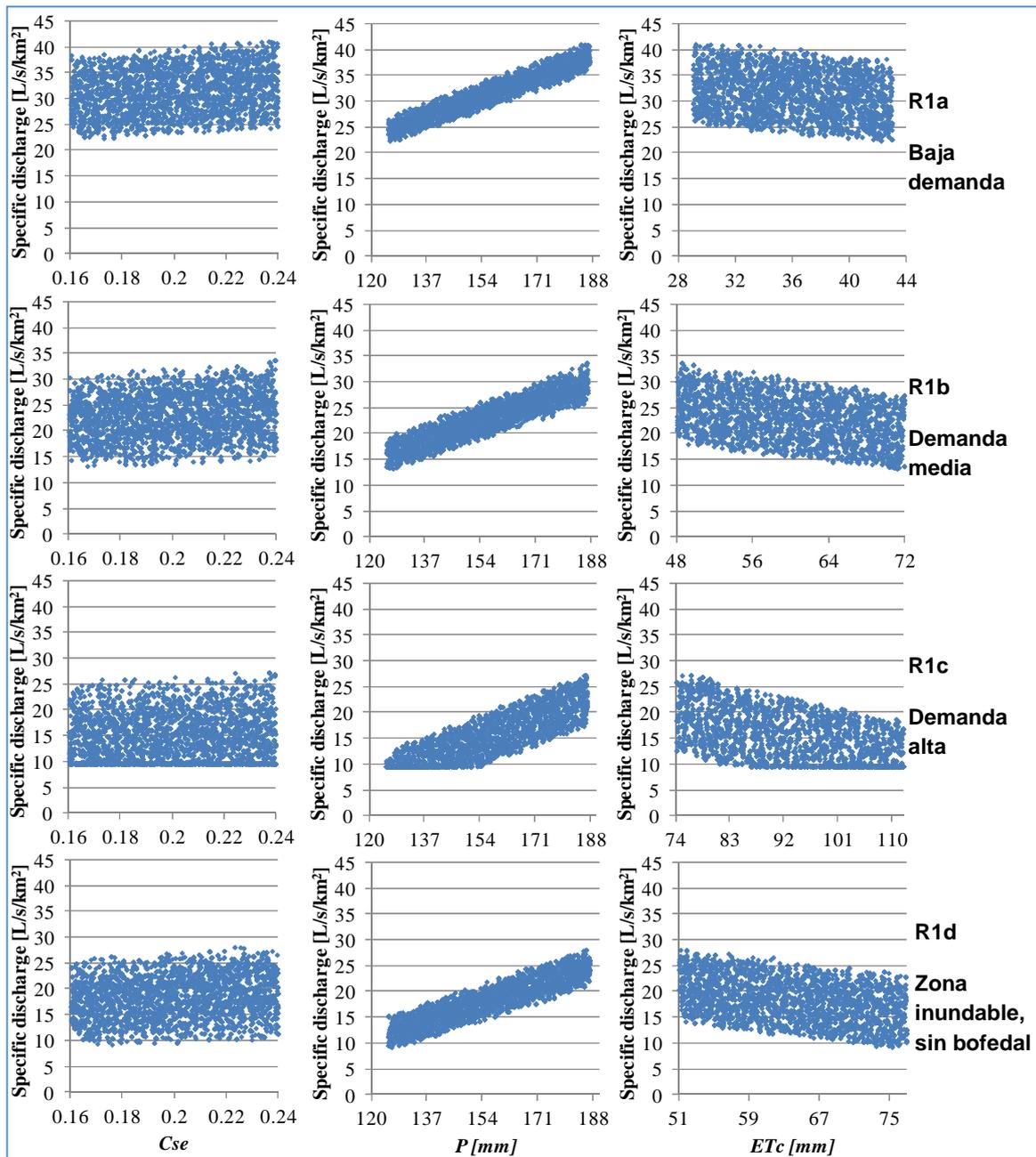


Figura 12. Sensibilidad de la respuesta del balance hídrico a variaciones en la demanda de agua de los bofedales para el escenario futuro.

3.6 Herramienta ejecutiva: Mapas resumen de los resultados.

Como herramienta ejecutiva para la gestión del agua, los resultados generados con excepción de los resultados del análisis de sensibilidad se resumen en las Figuras 13 a 22, donde se muestra la distribución espacial de los principales manantiales mapeados en sitio, la ubicación de los sitios desde donde se realiza la aducción del agua potable para Sajama, Caripe y Lagunas, los sitios donde durante el periodo 2011-2012 se implementaron obras para el aprovechamiento de agua, la ubicación de las subcuencas donde se monitoreó caudales y los sitios donde se monitoreó periódicamente las variaciones de los niveles de almacenamiento de agua en la superficie y en los suelos saturados de los bofedales en el mismo periodo de tiempo y un resumen de la variabilidad mensual de las variables monitoreadas. En las Figuras se presenta también información que indica la variación media mensual de las principales variables climáticas monitoreadas en las estaciones de la cuenca. La herramienta ejecutiva se complementa con información de la relación entre la demanda de agua y la oferta expresada a través de los índices de disponibilidad de agua construidos en los subtítulos precedentes.

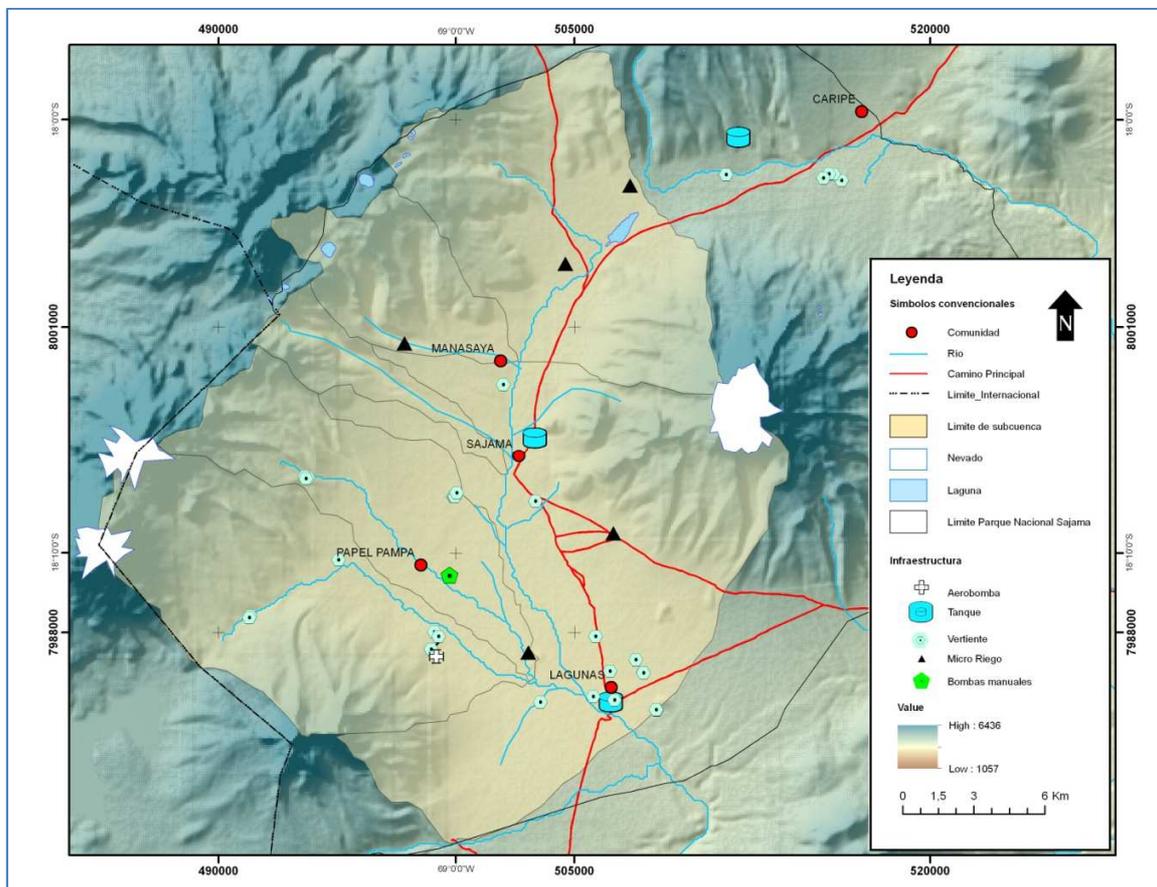


Figura 13. Mapa con la ubicación de los principales manantiales, fuentes para el abastecimiento de agua potable para Sajama, Caripe y Lagunas, obras piloto de microriego y aerobombas.

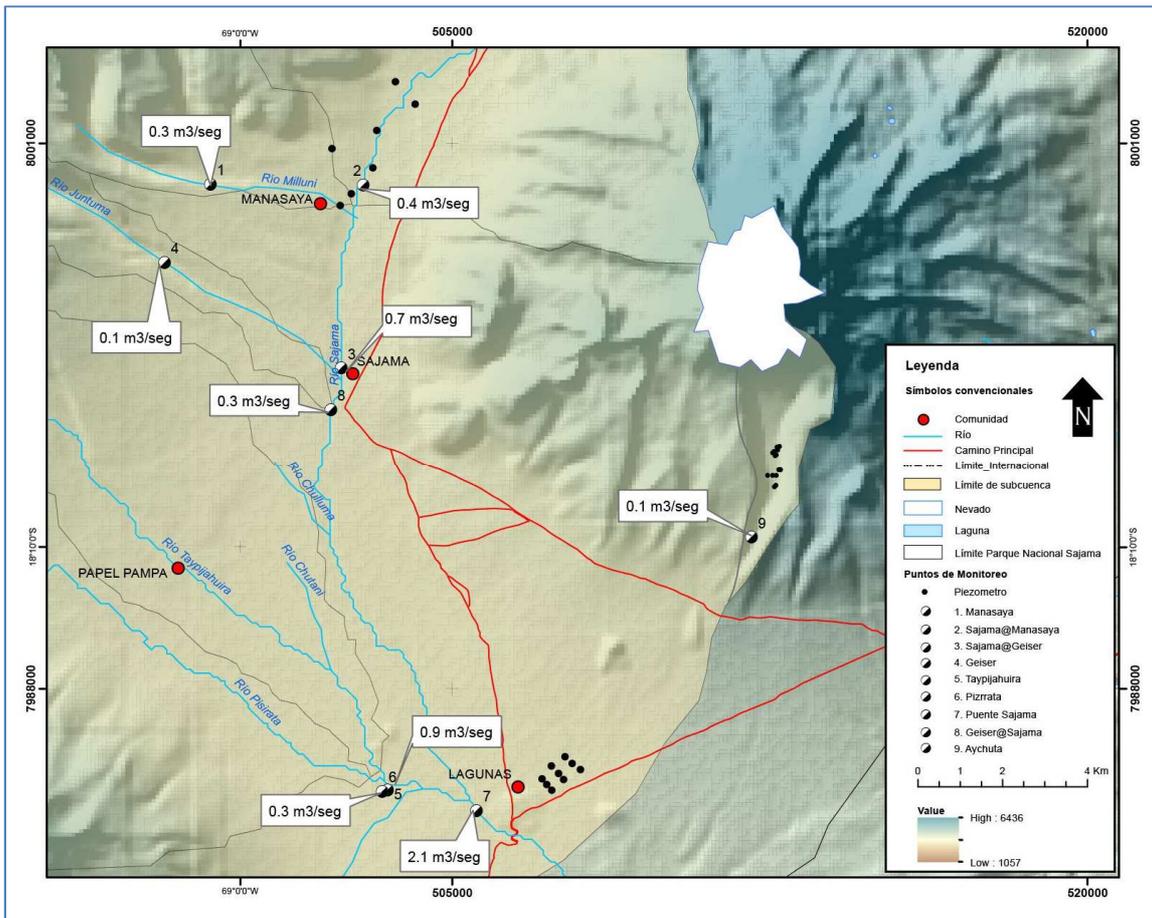


Figura 14. Mapa con la ubicación de los sitios de monitoreo de caudales en los ríos principales y monitoreo de niveles en los bofedales. Los cuadros pequeños indican el caudal medio anual medido en los sitios mostrados para el periodo 2012-2013.

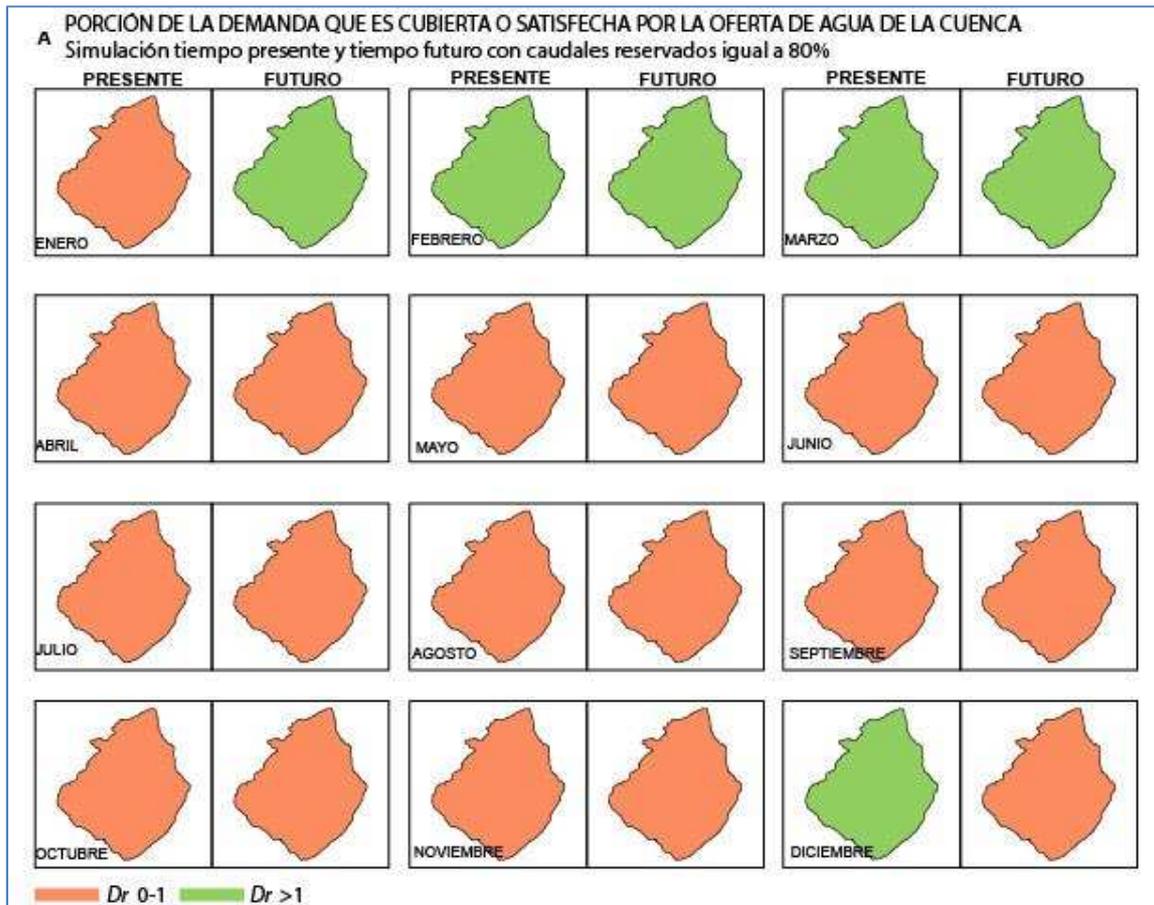


Figura 15. Índices de disponibilidad de agua en la cuenca del Río Sajama para la simulación con caudales reservados. Comparación entre la simulación para el tiempo presente (tres usuarios) y la simulación para el tiempo futuro (tres usuarios).

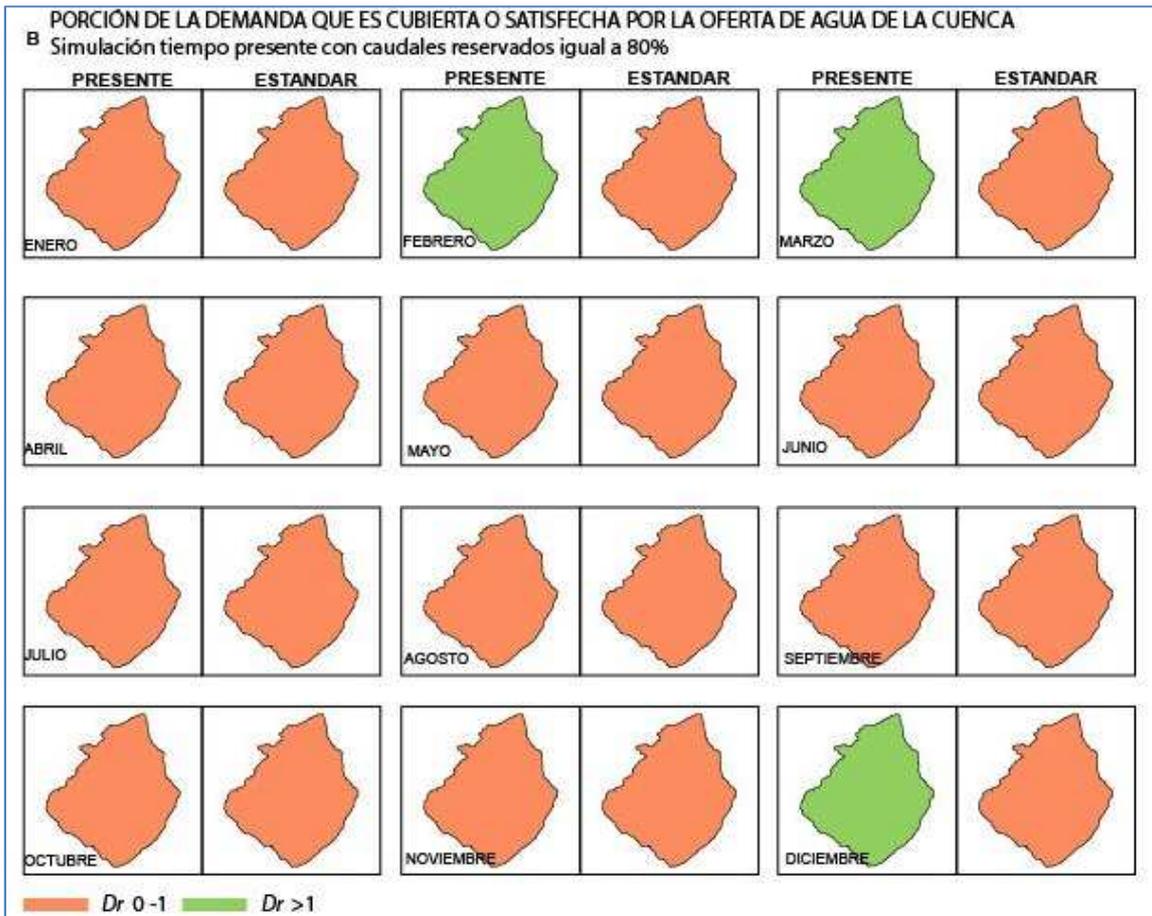


Figura 16. Índices de disponibilidad de agua en la cuenca del Río Sajama, para la simulación con caudales reservados. Comparación entre la simulación para el tiempo presente (tres usuarios) y la simulación bajo condiciones estándar de cultivo.

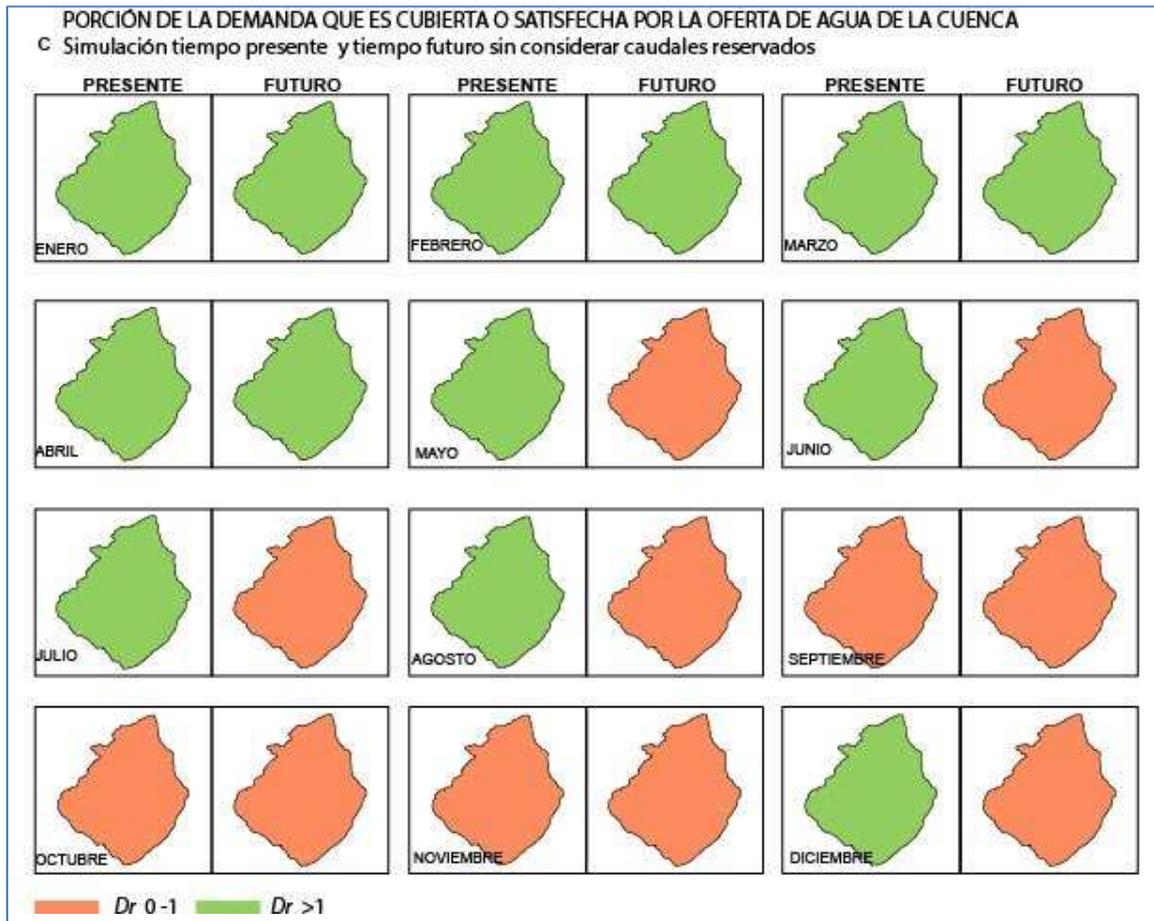


Figura 17. Índices de disponibilidad de agua en la cuenca del Río Sajama, para la simulación sin caudales reservados. Comparación entre la simulación para el tiempo presente y la simulación para el tiempo futuro.

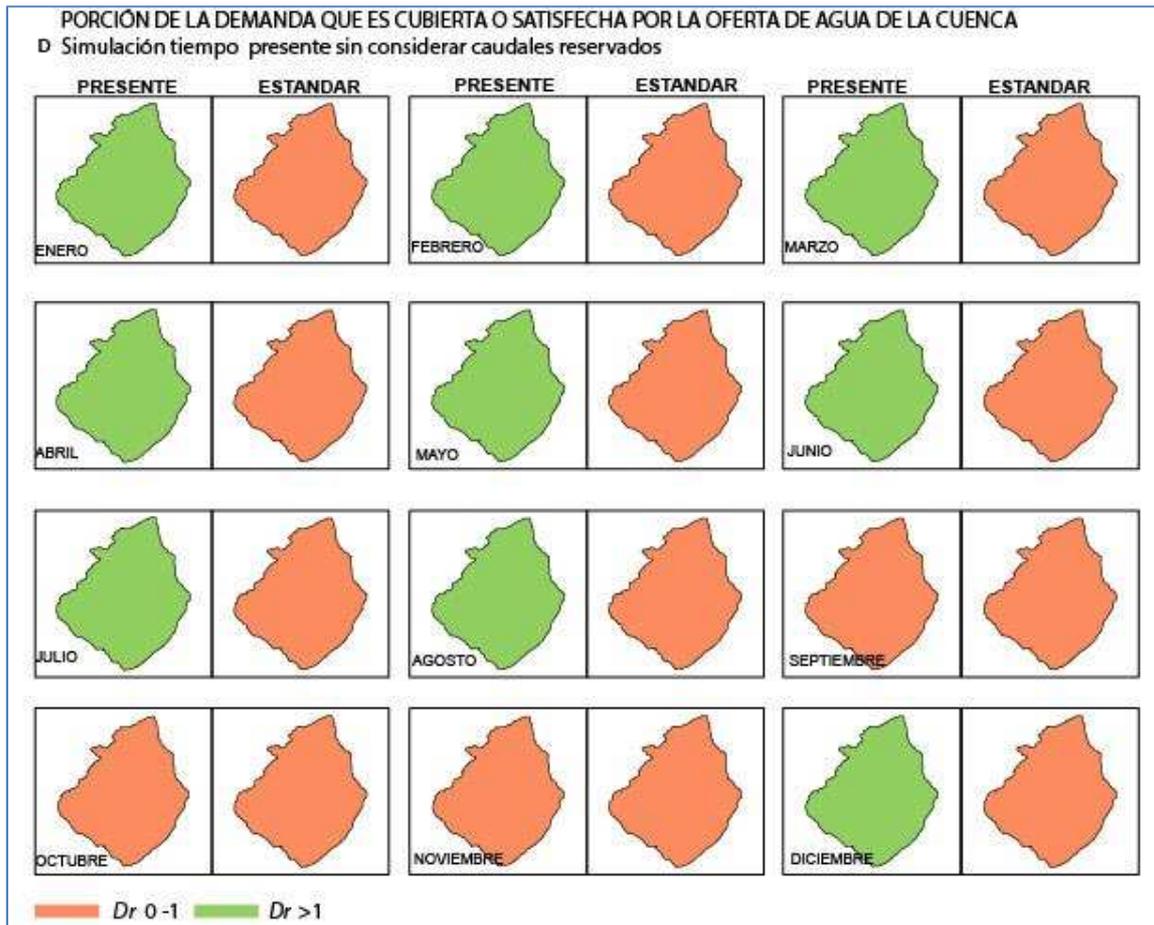


Figura 18. Índices de disponibilidad de agua en la cuenca del Río Sajama, para la simulación sin caudales reservados. Comparación entre la simulación para el tiempo presente y la simulación bajo condiciones estándar de cultivo.

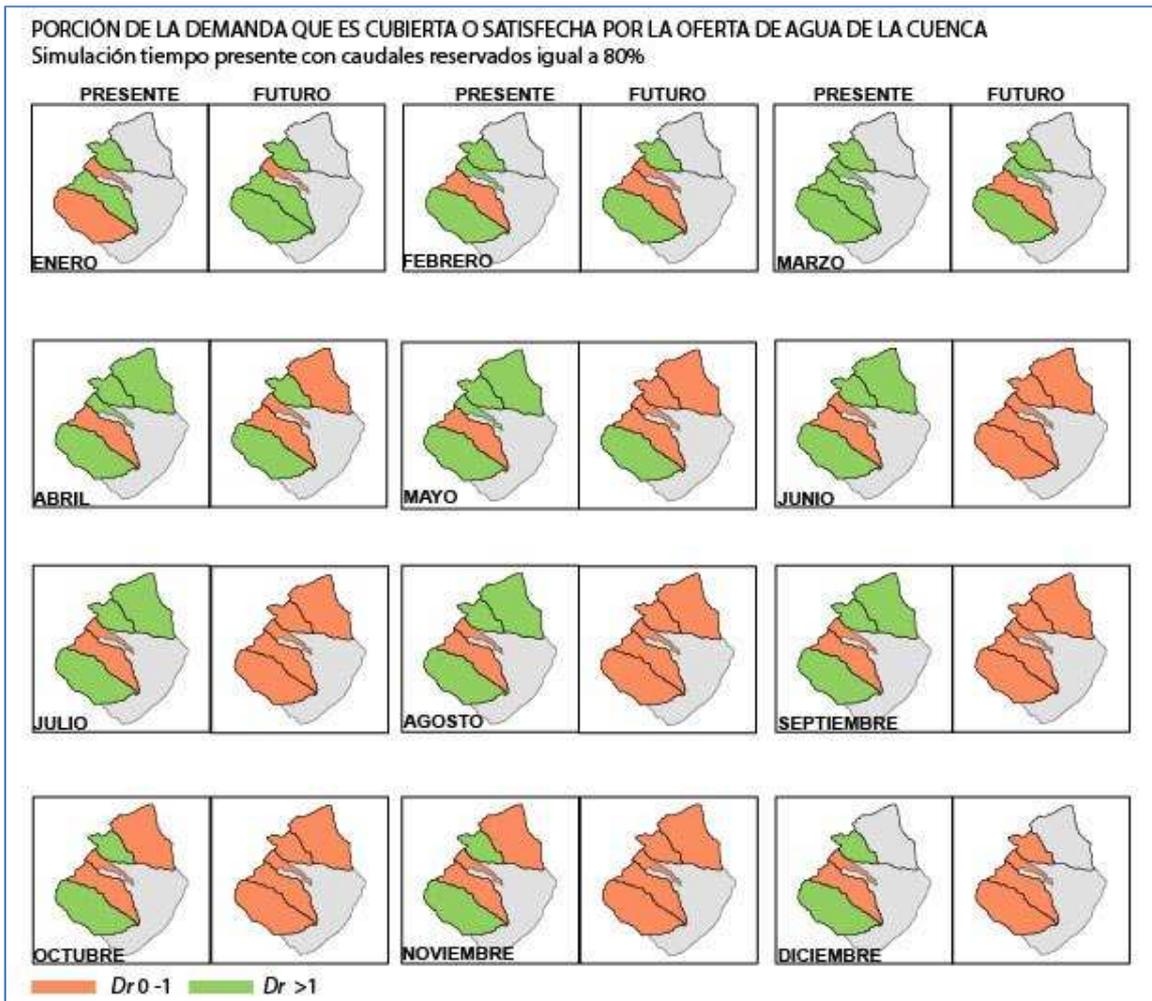


Figura 19. Índices de disponibilidad de agua en microcuencas de la cuenca del Río Sajama para la simulación con caudales reservados. Comparación entre la simulación para el tiempo presente (tres usuarios) y la simulación para el tiempo futuro (tres usuarios). En algunos gráficos se omitió el cálculo de los índices debido a que la demanda de la misma tiene niveles bajos ocasionando que la relación demanda vs oferta no tenga valores numéricos definidos.

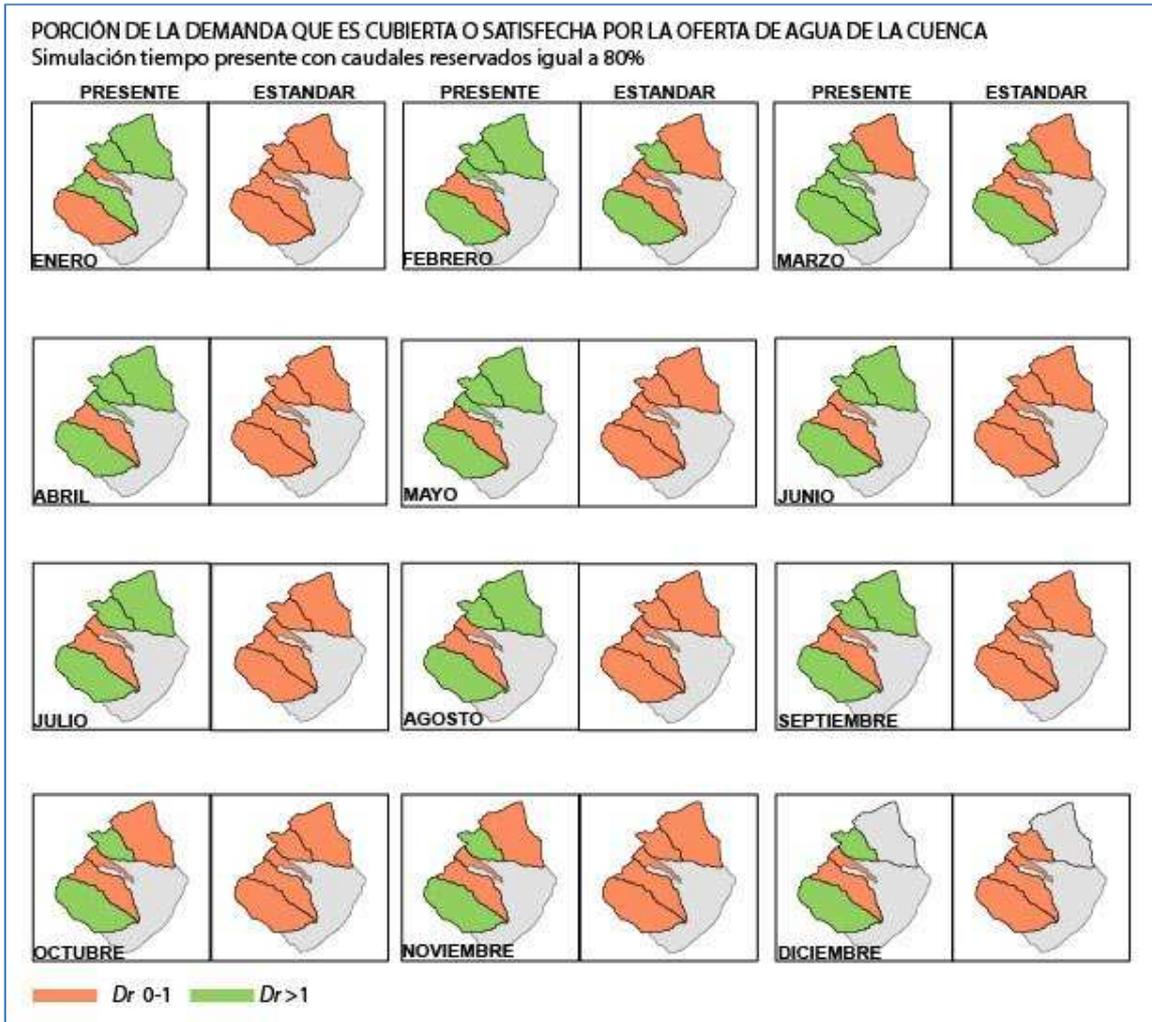


Figura 20. Índices de disponibilidad de agua en microcuencas de la cuenca del Río Sajama, para la simulación con caudales reservados. Comparación entre la simulación para el tiempo presente (tres usuarios) y la simulación bajo condiciones estándar de cultivo.

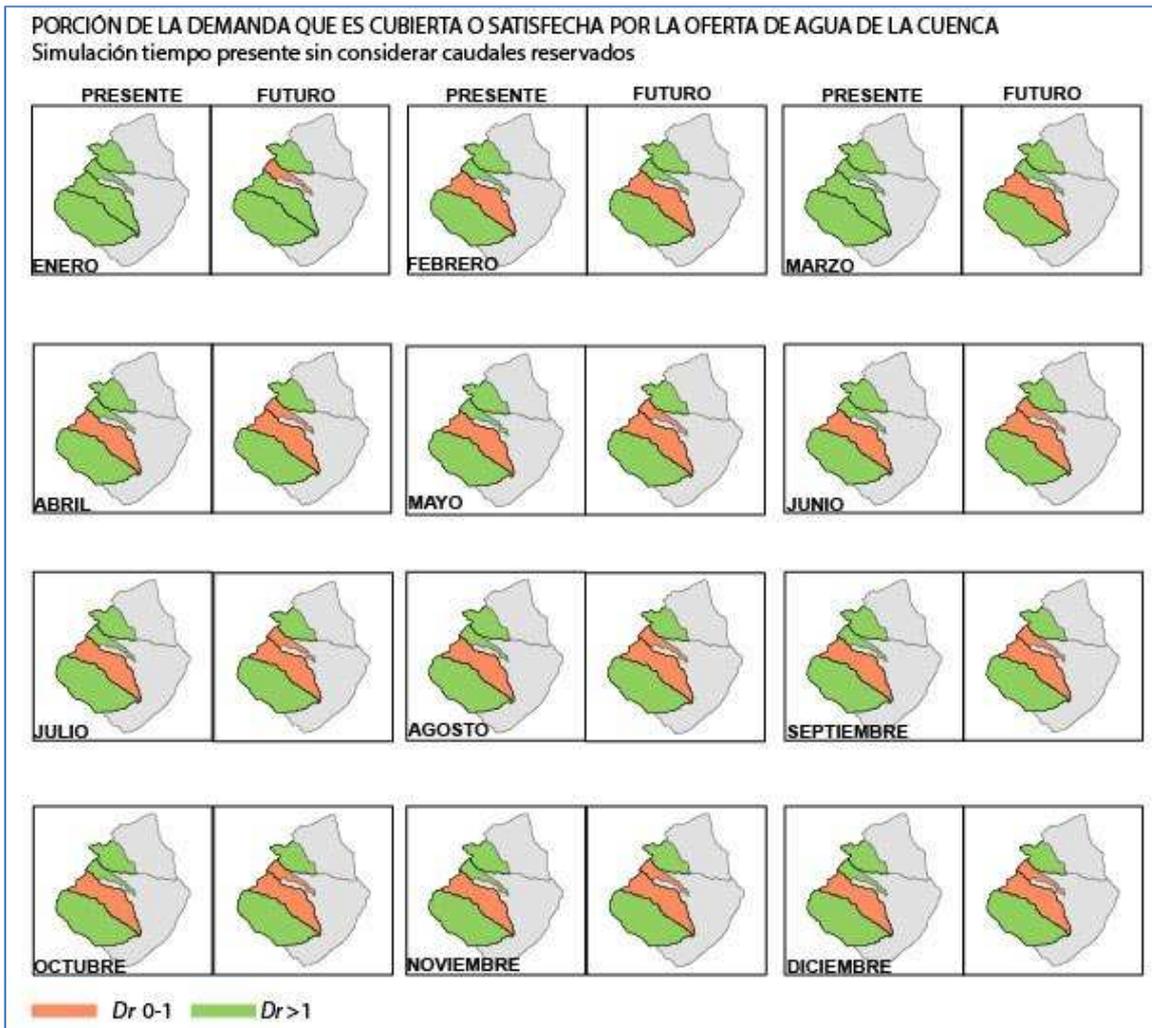


Figura 21. Índices de disponibilidad de agua en microcuencas de la cuenca del Río Sajama, para la simulación sin caudales reservados. Comparación entre la simulación para el tiempo presente y la simulación para el tiempo futuro. En algunos gráficos se omitió el cálculo de los índices debido a que la demanda de la misma tiene niveles bajos ocasionando que la relación demanda vs oferta no tenga valores numéricos definidos.

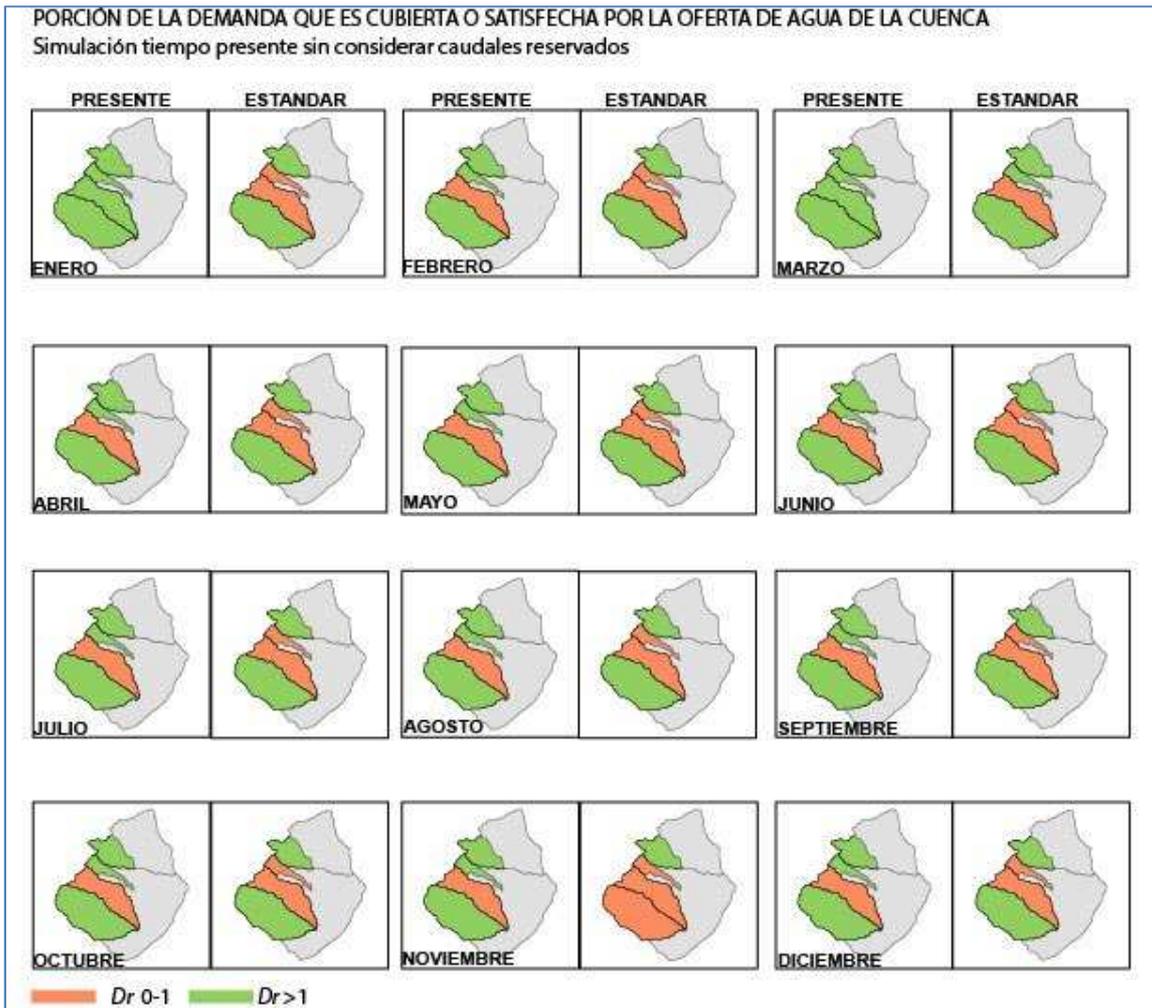


Figura 22. Índices de disponibilidad de agua en microcuencas de la cuenca del Río Sajama, para la simulación sin caudales reservados. Comparación entre la simulación para el tiempo presente y la simulación bajo condiciones estándar de cultivo. En algunos gráficos se omitió el cálculo de los índices debido a que la demanda de la misma tiene niveles bajos ocasionando que la relación demanda vs oferta no tenga valores numéricos definidos.

4 CONCLUSIONES.

A partir de escenarios futuros que sugieren un incremento general de la demanda de agua y una tendencia general de la precipitación sin dirección definida, el estudio presente sugiere que como producto del estudio de balance hídrico se espera una disminución general del caudal de salida de la cuenca para los meses de la época húmeda (diciembre a marzo), tanto para el escenario futuro considerado en nuestro estudio como para el escenario donde se pretende simular los potenciales impactos de condiciones estándar de cultivo. Para el caso del primer escenario citado, a partir de una muestra tomada de la información climática predicha por el modelo LARS, se estima una disminución en la frecuencia de ocurrencia de caudales medios hasta valores de 14 L/s/km². Para la época seca (junio a agosto) nuestro estudio sugiere que se debe esperar un incremento general en la frecuencia de ocurrencia de caudales medios. Para la época de transición (los meses restantes) nuestro estudio sugiere un comportamiento mixto, con decrementos en la frecuencia de ocurrencia de valores menores a los 2 L/s/km² aproximadamente, e incrementos en la frecuencia de ocurrencia para caudales mayores (el máximo caudal específico simulado es 5.3 L/s/km²). Debido a que el LARS es un modelo estocástico, los autores del presente estudio no consideran prudente proporcionar valores particulares para un paso de tiempo específico para cuantificar los cambios en la respuesta hídrica esperada a la salida de la cuenca.

Al cuantificar la relación demanda-oferta los índices de disponibilidad de agua sugieren que en comparación a los potenciales impactos derivados del escenario del tiempo futuro, los potenciales impactos sobre la relación demanda-oferta de agua son mayores cuando se simula un escenario donde los tres usuarios (usuarios con alta, media y baja demanda de agua) demandan volúmenes de agua bajo condiciones estándar de cultivo. Específicamente, nuestros experimentos numéricos sugieren que para un escenario donde se asume que no se establecen estructuras para el aprovechamiento del agua (obras de toma, canales de regadío, etc), la demanda de agua se satisface únicamente en las subcuencas Manasaya y Pizrrata donde los índices de disponibilidad de agua varían en el rango 1 a 3 aproximadamente. Al establecer estructuras para el aprovechamiento del agua generada por la cuenca la situación se convierte en desfavorable aún para las dos subcuencas mencionadas para la mayor parte del año con excepción de los meses más húmedos (febrero y marzo).

En referencia a los potenciales impactos de las variaciones en la demanda de los tres usuarios considerados, inferidos a través del análisis de sensibilidad presentado en los resultados, se concluye que las variaciones en la demanda del usuario con mayores requerimientos de agua es el que origina mayores impactos potenciales en el balance hídrico resultante. Este incremento tiene como resultado la disminución del dominio de la precipitación sobre la respuesta hídrica. Para todos los experimentos realizados, el dominio de la precipitación y la demanda sobre la respuesta hídrica son preponderantes sobre la relevancia de los procesos internos de la cuenca.

Los resultados presentes se generaron con herramientas calibradas de la mejor manera con la información disponible. Los mismos no presentan una vista definitiva de lo que ocurrirá en el futuro, pero sí otorgan herramientas para entender cómo funciona el sistema y cómo podría responder en caso de alterarse sus entradas, en función al modelo perceptual propuesto. Los resultados deben interpretarse desde aquella perspectiva. En referencia a los trabajos futuros, se tiene planificado ampliar el presente estudio mediante la aplicación de modelos de gestión para la generación de índices para el asesoramiento de la disponibilidad de agua (e.g., Velasco, 2007), como medio para incrementar la utilidad de la iniciativa presentada.

AGRADECIMIENTOS.

El presente trabajo fue realizado a solicitud de Agua Sustentable. Se agradece el valioso apoyo técnico de CUSO-Canadá a través del voluntario Mathieu Beaulieu, quien participó activamente en la implementación y diseño de la red de monitoreo, el monitoreo en campo y el procesamiento de información para el estudio de la oferta de agua. Se agradece también el trabajo de Magalí García por la generación de las series climáticas; es también importante realzar el trabajo de Carola Buitrón y de las pasantes Viviana Casas y Vilma Alanoca en el estudio de la demanda de agua.

5 REFERENCIAS.

Alanoca, V., y Casas V. 2013. Estudio de los potenciales impactos de la variabilidad climática en la oferta de agua y estudio de la demanda de agua en microcuencas situadas en una región del Parque Nacional Sajama. Agua Sustentable, La Paz. 12p.

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M. (1998) Evapotranspiración de los cultivos - Guías para el cómputo de los requerimientos de agua de los cultivos. Documento de Irrigación y Drenaje de la FAO 56. FAO - Organización del Alimento y la Agricultura de las Naciones Unidas, Roma.

Bastiaanssen, W., 2000. Método SEBAL para el cálculo del calor sensible y el calor latente en la cuenca irrigada de Gediz, Turquía. Revista de Hidrología 229, 87–100.

Beven, K. 2004. Modelación precipitación escurrimiento - Referencia general. John Wiley: Chichester; 235.

Buitrón, C. y Fernández, J., 2012. Estudio Espacial Multitemporal de Variaciones en Superficie Observadas a través de Imágenes Satelitales Landsat en una Región del Parque Nacional Sajama, Bolivia. Informe Final de Consultoría, Agua Sustentable, La Paz. 29p, con anexos.

Canedo, G. 2011. Estudio socio-económico de las comunidades andinas bolivianas que dependen de glaciares tropicales del área del Parque Nacional Sajama. Agua Sustentable, La Paz, 21p. más anexos.

Chow, V., Maidment, D., Mays, L. 1998. Hidrología aplicada. McGraw-Hill: Nueva York. CNA, 2002.

HCN (Honorable Congreso Nacional), 1992. Reglamento de la Ley 1333 del Medio Ambiente. Honorable Congreso Nacional, La Paz. Artículo 48º.

Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, 2002. Conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Comité Consultivo Nacional de Normalización del Sector Agua, México.

Collick, A., Easton, Z., Ashagrie, T., Biruk, B., Tilahun, S., Adgo, E., Awulachew, S., Zeleke, G., Steenhuis, T., 2009. Un modelo semi distribuído de balance hídrico para las tierras altas de Etiopía. Procesos Hidrológicos (23), pp. 3718-3727.

Cruz, R. 2008. Uso y asignación del agua en el Valle de Palca. Agua Sustentable, La Paz. 37p. más anexos.

Cuesta, A., Montoro, A., Jochum, A., López, P., Calera, A. 2005. Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. Revista ITEA (101) 3, 212-224.

DHI, 2008. Mike Basin - Una herramienta versátil para el asesoramiento de decisiones en el manejo integral de recursos hídricos; Guía de Iniciación.

Estenssoro, E. 1991. Los bofedales de la cuenca alta del Valle de La Paz. En: Historia Natural de un Valle de Los Andes: La Paz. Forno, E., Baudoin, M. Eds. Instituto de Ecología, UMSA, La Paz.

Ferrara, R., Fiorentino, C., Martinelli, N., Garofalo, P., Rana, G. 2010. Comparación de diferentes metodologías de mediciones de campo del NDVI para la evaluación de propiedades biofísicas de los cultivos. *Revista Italiana de Agronomía* 5, 145-154.

García, M., Raes, D., Allen, Herbas, C., 2004. Dinámicas de la evapotranspiración de referencia en las tierras altas de Bolivia (Altiplano). *Agricultural and Forest Meteorology* 125, 67–82.

García, M., 2012a. Caracterización agroclimática del Parque Sajama. Primer Informe Técnico de Consultoría de Agroclimatología – Evaluación de la información agroclimática de la zona. Agua Sustentable, La Paz. 11p.

García, M., 2012b. Caracterización agroclimática del Parque Sajama. Segundo Informe Técnico de Consultoría de Agroclimatología – Evaluación de la información agroclimática de la zona. Agua Sustentable, La Paz. 19p.

García, M., 2012c. Consultoría de downscaling climático - Proyecto Sajama. Cuarto Informe de Avance. Agua Sustentable, La Paz. 14p.

HR Wallingford [et al.], 2003. Manual para el asesoramiento de la demanda y uso de agua en cuencas. Wallingford, UK : HR Wallingford. 37 p.

Li, Z., Tang, R., Wan, Z., Bi, Y., Zhou, C., Tang, B., Yan, G., Zhang, X., 2009. Revisión de metodologías actuales para la estimación de evapotranspiración regional a partir de datos remotamente adquiridos. *Sensores*, 3801–3853.

Liang, S., 2004. Teledetección cuantitativa de la superficie de la tierra. Wiley, New Jersey.

Molina, J. y Cruz, R. 2008. Escenarios de uso y asignación del agua en la cuenca de los ríos Mauri y Desaguadero. Agua Sustentable, La Paz. 133p más anexos.

Semenov, M. y Barrow, E., 2002. LARS-WG: Un generador de clima estocástico para uso en estudios de impacto climático. - Manual del usuario. Tech. rep., Rothamsted Research, Harpenden, Hertfordshire, UK.

Ojha, C. y Singh, V., 2002. Modelos de balance hídrico en cuencas pequeñas. En: Aplicaciones y modelos matemáticos de la hidrología de cuencas pequeñas, Singh, V., Frevert, D.K. (eds.), Publicaciones en Recursos Hídricos, LLC, Colorado.

Salazar, C., Rojas, L., Lillo, A., Aguirre, E. 2000. Análisis de requerimientos hídricos de vegas y bofedales en el Norte de Chile. *Revista Vertiente*, Santiago.

Salazar, D., 2011. Estudio de la demanda de agua en la cuenca Mauri Desaguadero. Agua Sustentable, La Paz. 41p más anexos.

Saltelli, A., 2000. Qué es un análisis de sensibilidad?. En: Análisis de Sensibilidad (ed. por Saltelli A, Chan K, and Scott E), 174-195. John Wiley, Chichester.

Sobol, I., 1994. Guía Fundamental para el Método Monte Carlo. CRC Press, Tokyo.

Soria, F., y Kazama, S., 2011. Análisis de incertidumbre de un modelo de balance hídrico en una cuenca aguas abajo de la Cordillera Real en Bolivia. Actas de la Conferencia Tohoku Shibu, JSCE. Sendai.

Soria, F., 2013a. Estudio de la oferta de agua en una región del Parque Nacional Sajama, Bolivia. Agua Sustentable, La Paz. 58p, con anexos.

Soria, F., 2013b (enviado). Relevancia de la incertidumbre en inferencias de evapotranspiración para proyecciones de balance hídrico en cuencas montañosas. Libro rojo del IAHS.

Velasco, I., 2007. Asesoramiento de índices de disponibilidad de agua en cuencas hidrológicas: caso de estudio en México. Manejo de Recursos Hídricos IV 103, 91-100.

Villarreal, E. y Pérez, J. 2012. Informe sobre derechos de acceso al agua y bofedales - Mapeo de derechos. Agua Sustentable, La Paz. 39p, con anexos.

Yapo, P., Gupta, H., Sorooshian, S., 1996. Calibración automática de modelos conceptuales precipitación-escorrentía: sensibilidad a los datos de calibración. Revista de Hidrología 181, 23-48.