PROYECTO: LOS BOFEDALES COMO UN ALIADO EN LA RESILIENCIA Y MITIGACIÓN EN EL CAMBIO CLIMÁTICO

INFORME FINAL

PASANTÍA: ESTUDIO DE RELACIONES PRECIPITACIÓN-ESCURRIMIENTO EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS SAJAMA (PUENTE RÍO SAJAMA), PISIRATA, TAYPIJAHUIRA Y JUNTUMA

Aqua Sustentable

Realizado por: Vilma Alanoca Santalla

Fecha de entrega: 27 de mayo del 2014

LA PAZ - BOLIVIA

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 1
2. OBJETIVOS 2
2.1. Objetivo general 2
2.2. Objetivos específicos 2
3. REVISIÓN DE LITERATURA 2
3.1. Modelo hidrológico 2
3.2. Balance hídrico 2
3.3. Estructura del modelo semidistribuido 3
3.3.4. Definición de calibración 5
3.3.5. Definición de validación 5
4. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO 5
5. MATERIALES Y METODOS 8
5.1. Estaciones de registros meteorológicos 8
5.2. Análisis exploratorio de los datos climatológicos faltantes 8
5.3. Simulación de oferta de agua mediante el modelo semidistribuido 11
5.3.3. Parámetros climáticos 13
5.3.4. Calibración y validación del modelo 13
6. RESULTADOS 13
6.1. Análisis de la precipitación y evapotranspiración de referencia 13
6.2. Análisis de caudales observados y caudales medios mensuales 15
6.3. Balance hídrico superficial 20
6.3.1. Modelación hidrológica de la cuenca del rio Sajama 20
6.3.2. Modelación hidrológica de la cuenca del rio Pisirata 22
6.3.3. Modelación de oferta de agua futura (2046-2055) 25
7. CONCLUSIONES 25
8. BIBLIOGRAFÍA 26
9. ANEXOS 28
Anexo 1. 28
Anexo 2. 34
Anexo 4. 36
Anexo 5. 37
Anexo 6. 39
Anexo 7. 40

AGRADECIMIENTOS

La presente pasantía fue financiada por Agua Sustentable, mediante el proyecto "Los bofedales como un aliado en la resiliencia y mitigación en el cambio climático" en ejecución, se agradece a todo el personal de la institución, en especial al hidrólogo Freddy Soria por la supervisión al trabajo, sus consejos a la hora de desarrollar el modelo hidrológico y también por las sugerencias y comentarios que ayudaron a mejorar el manuscrito. También se agradece a Lic. Horacio Lorini por el apoyo técnico en el monitoreo.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio del movimiento del agua dentro de una cuenca, es un proceso importante y determinante para el aprovechamiento del recurso hídrico. Las condiciones climáticas y las características físicas de la cuenca son factores que determinan la dinámica del ciclo hidrológico; la aplicación de modelos matemáticos permite describir de manera simplificada tales procesos, por lo que constituyen una herramienta importante. Entre los tipos de modelos, los de balance hídrico parten del principio de continuidad y permiten predecir, entre otros, en el largo y mediano plazo, la capacidad de producción de agua (Londoño et al, 2010).

Los modelos hidrológicos son una herramienta para simular los fenómenos que ocurren en la realidad. Entre sus aplicaciones está su capacidad para pronosticar la oferta hídrica para un período de tiempo futuro; sin embargo, a pesar de los recientes avances en ciencia y tecnología, no existe un modelo hidrológico que simule a la perfección los complejos procesos que involucra la hidrología debido a la presencia de errores de diferente origen (Cabrera, 2011).

Con la finalidad de poder responder a la creciente demanda actual de información sobre el agua y los conocimientos necesarios para el desarrollo sostenible, el balance hídrico superficial no es únicamente una herramienta para calcular la respuesta de una cuenca; el balance hídrico es una herramienta indispensable para conocer el comportamiento de las diversas variables que intervienen en el ciclo hidrológico (precipitación, evapotranspiración, caudal) (Segura et. al, 2010), por tanto su estudio es valioso desde varias perspectivas.

El presente informe de avance cumple con el indicador 8 a 10 de la pasantía, donde se desarrolla el modelo matemático de balance hídrico para las cuencas de estudio, y su aplicación a escala mensual, desde la perspectiva de la estructura general del modelo semidistribuido descrita en Collick et al (2009). El enfoque considera modelos con estructuras y esquemas de discretización distintos a las consideradas en Soria (2012), como aporte al conocimiento científico-técnico del sistema estudiado. La estructura del modelo se calibra en base a mediciones del monitoreo 2012-2014 del río Sajama. El periodo fue seleccionado de acuerdo a la disponibilidad de información.

El uso de modelos de generación de datos climáticos es una herramienta con el potencial de otorgar medios para responder a la creciente demanda actual y futura de información sobre el agua y los conocimientos necesarios para el desarrollo sostenible. Para aquello, es indispensable conocer el comportamiento de las diversas variables que intervienen en el ciclo hidrológico (precipitación, evapotranspiración, caudal) a través del enfoque del balance hídrico superficial. Esto último justifica su consideración en el presente estudio.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- ✓ Estudiar la oferta de agua superficial y cuantificar la variabilidad de la respuesta hídrica de las cuencas de los ríos Sajama – puente, Pisirata, y Taypijahuira mediante el modelo semidistribuido calibrado en su versión preliminar.

2.2. Objetivos específicos

- ✓ Establecer y actualizar una base de datos meteorológicos con series mensuales completas de las principales variables climatológicas (precipitación y evapotranspiración de referencia) que cubra toda el área del estudio.
- ✓ Determinar caudal medio mensual para un periodo de 2012 a 2013 mediante las curvas Altura – Caudal de las cuencas de estudio.
- ✓ Analizar las posibles respuestas de las relaciones precipitación-escurrimiento a potenciales cambios en variables climáticas.
- ✓ Generar predicciones estocásticas de probables cambios en la precipitación, la temperatura media del aire definido en base a registros de la estación Sajama para un intervalo de tiempo contenido en el periodo 2046 a 2055.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

La revisión bibliográfica se presentó en el primer y segundo Informe de Avance, pero debido a su relevancia en los alcances del presente documento se resume brevemente a continuación.

3.1. Modelo hidrológico

Un modelo se define como una representación de la simulación de procesos de transporte de agua en una cuenca, mediante expresiones matemáticas basadas en ecuaciones físicas que rigen el comportamiento de los parámetros del modelo (Cortes, 2010).

3.2. Balance hídrico

Se entiende como balance hídrico, el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo, en un tiempo determinado. Se considera como sistema a la cuenca hidrográfica y las principales variables asociadas son la precipitación, la evapotranspiración, la escorrentía y el agua almacenada en el suelo (Hernández, 2005).

3.3. Estructura del modelo semidistribuido

El modelo conceptual está basado en un esquema de reservorios horizontalmente discretizados en unidades geomofológicas agrupadas en cordones altitudinales. Este esquema representa una interpretación del modelo de Collick *et al.*, (2009). A continuación se detalla la estructura del modelo.

3.3.1. Balance de humedad del suelo

El modelo estima el volumen de almacenamiento de agua por unidad de área S, utilizando la precipitación *P*, la evapotranspiración real *AET*, escorrentía superficial *R*, percolación profunda *Perc*, y el tiempo de almacenamiento anterior $S_{t-\Delta t}$. La ecuación para el balance de humedad del suelo para un intervalo de tiempo Δt es el que sigue (Collick *et al.* 2009):

$$S_t = S_{t-\Delta t} + (P - AET - R - Perc)\Delta t \qquad (1).$$

Donde el volumen de almacenamiento de agua por unidad de área *S* (L) durante un paso de tiempo *t,* está determinado por la precipitación *P* (L/T), la evapotranspiración actual o real *AET* (L/T) y el escurrimiento total de la cuenca *Q* (L/ T) que es la contribución de la recarga de agua mediante la percolación profunda *Perc* y el escurrimiento superficial *R*. Se debe considerar que R es inexistente bajo condiciones áridas o suelos con alta tasa se infiltración y *Perc* se determina a través de un coeficiente *Cse* (Soria, 2012).

3.3.2. Evapotranspiración real AET

La ecuación para el cálculo de la evapotranspiración real *AET,* es la siguiente (Collick *et al.* 2009):

$$AET = PET\left(\frac{S_t}{T_{max}}\right) \qquad (3).$$

Donde la evapotranspiración actual *AET*, está determinado por la evapotranspiración potencial *PET,* la humedad de almacenamiento S_t y la capacidad de almacenamiento disponible en el suelo por unidad de área *Tmax* (L).

Durante la época de lluvias, cuando las precipitaciones superan la evapotranspiración (P> PET) o el contenido de humedad está por encima de la capacidad de campo, la humedad de almacenamiento S_t, se determina a partir de la adición de la humedad del día anterior $S_{t-\Delta t}$ (L) a la diferencia entre *P* y *PET*, durante el paso de tiempo.

En la época seca, cuando la evaporación excede la precipitación (P<PET) y el contenido de humedad del suelo está por debajo de la capacidad de campo, la evapotranspiración real *AET* (L/T) disminuye linealmente a partir de la tasa potencial en capacidad de campo a cero en el punto de marchitez (Thornthwaite y Mather 1955, citado por Collick *et al.* 2009). Cuando la evaporación

excede la precipitación (P <PET), la humedad de almacenamiento durante un paso de tiempo *t* puede escribirse como una función exponencial (Lyon et al. 2004, citado por Collick et al, 2009):

$$S_t = S_{t-\Delta t}\left[exp\left(\frac{(P-PET)\Delta t}{T_{max}}\right)\right] \qquad (4).$$

Cuando la lluvia excede la evaporación (P> PET), se añade la precipitación neta al almacenamiento del día anterior (Collick *et al*. 2009).

$$S_t = S_{t-\Delta t} + (P - PET)\Delta t \qquad (5).$$

3.3.3. Contribución de la percolación y escorrentía superficial

Cuando la precipitación satura completamente el suelo, el agua en exceso Ex_m se convierte en escorrentía superficial o se filtra a los acuíferos (percolación profunda). Considerando que la humedad existente en el suelo S_t es igual que la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo T_{max} (ecuación 7), el exceso de agua después de la saturación del suelo se puede determinar mediante la siguiente ecuación (Collick *et al*. 2009), pero en la aplicación del modelo esta ecuación fue modificada porque no considera el exceso, porque cuando la precipitación y la cantidad de agua almacenada en suelo cubren la demanda de agua (PET) y el suelo se satura llegando a cubrir la capacidad máxima de almacenamiento el restante es el excedente de agua, entonces la ecuación se modifica de la siguiente manera:

$$Ex_m = S_{t-\Delta t} + P - PET \longrightarrow Ex_m = S_{t-\Delta t} + P - PET - Tmax \quad (6).$$

$$S_t = T_{max} \qquad (7).$$

Por encima del valor umbral T_{max} el exceso de humedad se divide entre percolación y escorrentía (Collick *et al*. 2009).

$$Perc = \beta Ex_m \qquad (8).$$

$$R = (1 - \beta)Ex_m \qquad (9).$$

Donde $\boldsymbol{\beta}$ es utilizado como un parámetro de calibración. La percolación contribuye a un deposito de flujo base *RS* (L/P), en un paso de tiempo (Easton *et al.* 2007, citado por Collick *et al*. 2009).

$$RS_t = RS_{t-\Delta t} + (Perc_t - BF_{t-\Delta t})\Delta t \qquad (10).$$

Donde BF_t es la cantidad modelado de flujo base (L/T) y se calcula usando un modelo de yacimiento lineal siguiente:

$$BF_t = RS_t \frac{[1-exp(-a\Delta t)]}{\Delta t} \qquad (11).$$

Donde α (1/T) es el coeficiente de recesión, una propiedad del acuífero y puede ser calibrado del flujo base de la curva de recesión y Δt es el paso del tiempo (Easton *et al.* 2007, citado por Collick *et al*. 2009).

3.3.4. Definición de calibración

La calibración del modelo es el proceso por el cual los valores de los parámetros del modelo son identificados para su uso en una aplicación particular. Consiste en el uso de datos de lluvia y escurrimiento, y un procedimiento para identificar los parámetros del modelo que provean la mejor concordancia entre los flujos simulados y los registrados. La identificación de los parámetros puede ser llevada a cabo manualmente, por prueba y error, o automáticamente utilizando técnicas de optimización matemática (Ponce, 1989).

3.3.5. Definición de validación

Refsgaard y Knudsen (1996) definen la validación de un modelo como “el proceso de demostración que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico determinado para períodos fuera del período de calibración”. Un modelo ha sido validado si su precisión y capacidad predictiva en el período de validación muestran errores o límites aceptables.

Por lo general las simulaciones se validan con el criterio clásico de Nash, donde los valores de Nash iguales o superior a 0.5, las simulaciones de gasto son "aceptables". Cuando el criterio de Nash es igual a 1, no existe error en la simulación del modelo. Este valor de Nash igual a 50% es considerado como el umbral de aceptabilidad para evaluar la capacidad de la estructura del modelo para simular la transformación lluvia-escurrimiento en una cuenca en condiciones reales.

4. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

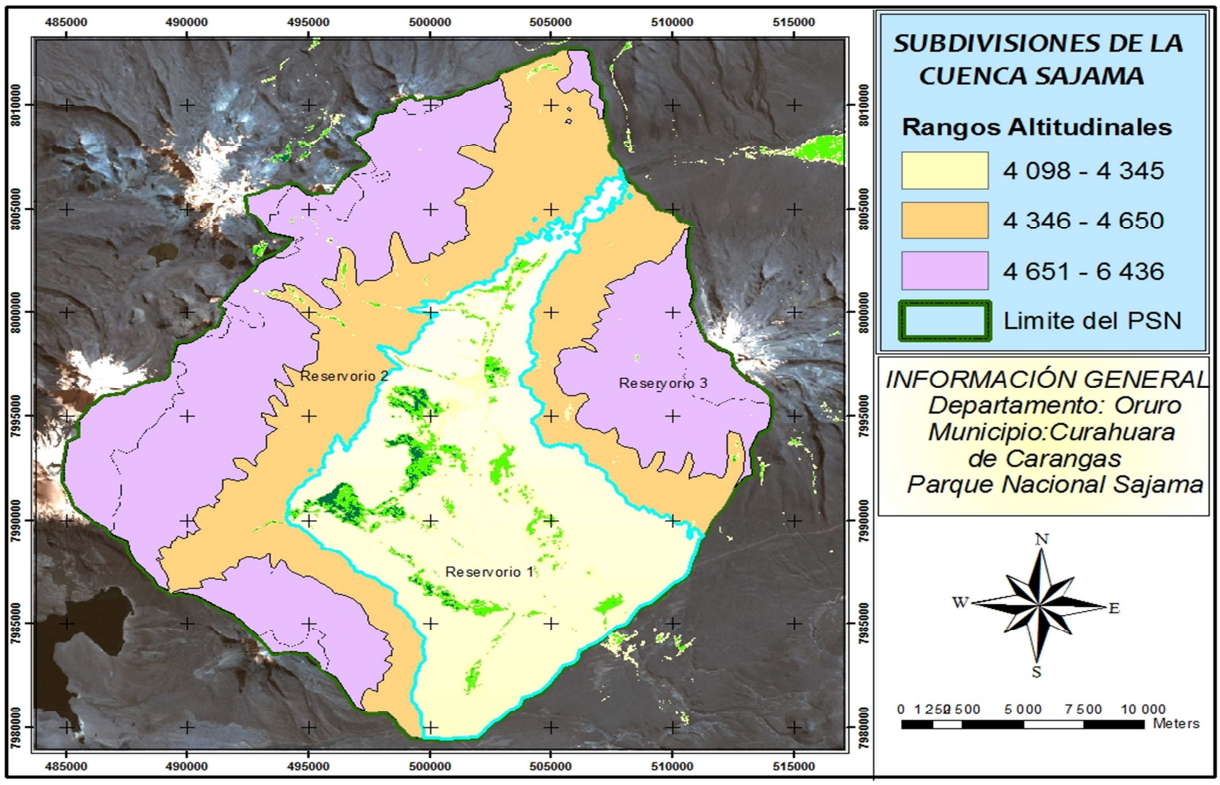
La zona de estudio localizada en el Parque Nacional Sajama. Limita con el Departamento de La Paz al norte y al oeste con el parque Lauca de Chile, dentro de la región de cordilleras Altas y Altiplano, en la eco región Puna sureña y en la subregión puna desértica con pisos nivales y subnivales de la cordillera occidental. Debido a la topografía accidentada, el nivel de pluviosidad varía entre 320 a 366 mm/año. El régimen hidrológico está caracterizado por una estación seca, con fuertes niveles de aridez de junio a octubre y una estación húmeda de enero a marzo (Agua Sustentable, 2013).

El área de estudio se enfoca en la cuenca del rio Sajama, y subcuencas Taypijahuira, Pisirata y Juntuma aguas arriba considerando que la cuenca del rio Sajama fue modelada preliminarmente en el Informe de avance 2 de la pasantía. Es importante indicar que el comportamiento del rio Juntuma aguas arriba presenta un fluyo fluctuante durante el ciclo hidrológico sin presentar un pico en los

meses húmedos y es influenciada por actividad volcánica (geiser), en este sentido, la cuenca de este rio no se considero para la modelación precipitación - escurrimiento.

La superficie de la cuenca del rio Sajama es de aproximadamente 599 km^2 y dadas las características geomorfológicas de la zona con una topografía irregular y pendiente, las altitudes que oscilan entre los 4098 m.s.n.m. y 6436 m.s.n.m. (nevado Sajama) como se puede observar en la siguiente Figura.

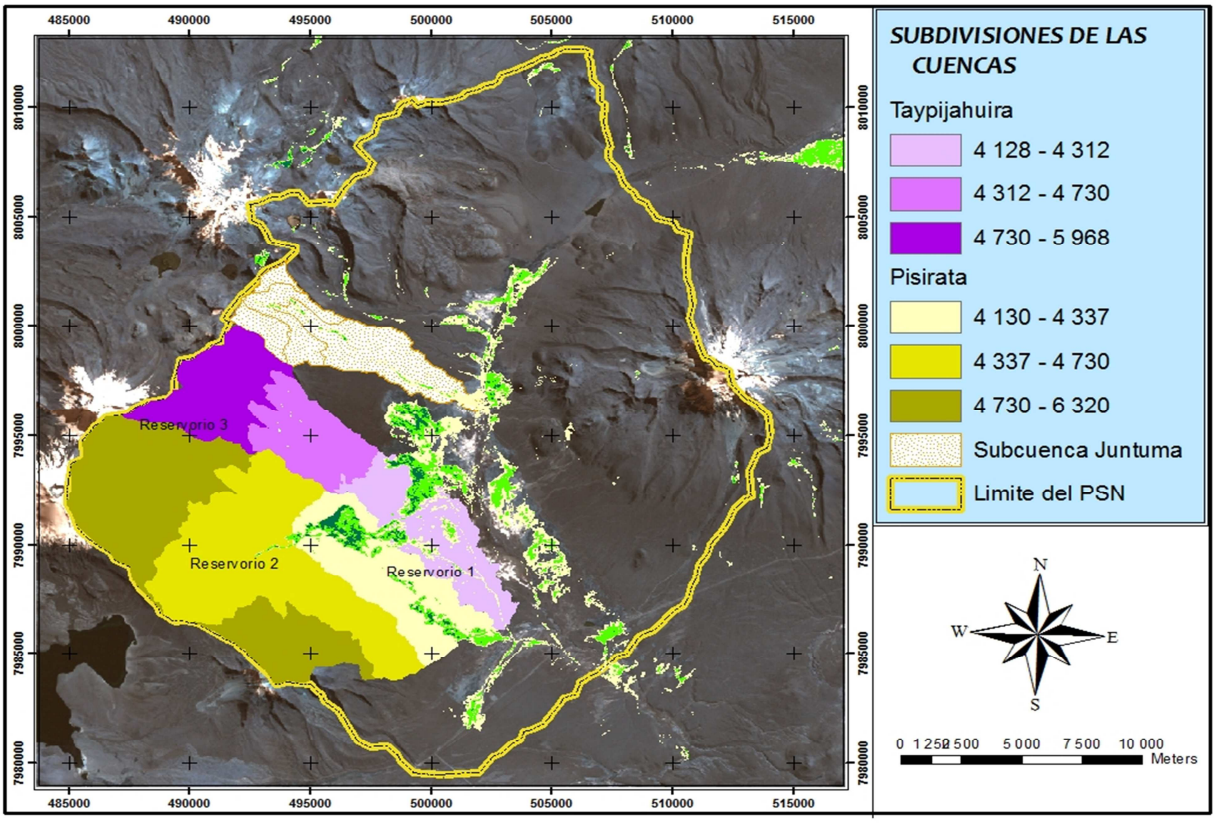
Figura 1. *Zona de Estudio: Mapa de los límites de los reservorios establecidos a partir de altitudes y heterogeneidad de la vegetación en la cuenca del río Sajama*



La superficie de la cuenca del rio Taypijahuira es de aproximadamente 55.95 km^2, las altitudes que oscilan entre los 4130 m.s.n.m. y 6320 m.s.n.m. La superficie de la cuenca del rio Pisirata es de aproximadamente 121.8 km^2, las altitudes que oscilan entre los 4130 m.s.n.m. y 6320 m.s.n.m., como se muestra en la Figura 2.

Para el desarrollo del modelo, las cuencas se dividieron en tres reservorios en función a la altitud con la finalidad de clasificar áreas homogéneas. Las tres zonas determinadas para cada cuenca (alta, media y baja), rangos de altitud, estaciones meteorológicas correspondientes para cada reservorio y sus respectivas áreas de las cuencas de estudio, se resumen en el cuadro 1.

Figura 2. *Mapa de los límites de los reservorios establecidos a partir de altitudes y heterogeneidad de la vegetación en las cuencas Taypijahuira y Pisirata*



Cuadro 1. *Descripción de la estratificación de las subcuencas Pisirata y Taypijahuira*

Nombre de cuenca	*Estrato*	*Alturas (msnm)*		*Área m^2*	*Área km^2*	*Estaciones meteorológicas*	
		Min	***Máx.***			***Nombre***	***Altitud***
Pisirata	Alta	4.730 - 6.320		48254676.56	48.25	Chungará	4585
	Media	4.337 - 4.730		47290021.06	47.29	Comisario	4379
	Baja	4.130 - 4.337		26256415.18	26.25	Sajama	4255
	Total				**121.8**		
Taypijahuira	Alta	4.730 - 5.968		18197902.52	18.20	Chungará	4585
	Media	4.312 - 4.730		15499084.60	15.50	Comisario	4379
	Baja	4.128 - 4.312		22257042.12	22.26	Sajama	4255
	Total				**55.95**		
Sajama	Alta	4.650 - 6.436		223630000.00	223.63	Chungará	4585
	Media	4.345 - 4.650		166200000.00	166.20	Comisario	4379
	Baja	4.098 - 4.345		177800000.00	177.80	Sajama	4255
	Total				**31.63**		

5. MATERIALES Y METODOS

5.1. Estaciones de registros meteorológicos

Se han considerado tres estaciones meteorológicas ubicadas dentro del área de influencia del área de estudio. La información analizada comprende series de temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y velocidad del viento, entre las más importantes, como factores importantes para la calibración y validación del modelo hidrológico.

En el ámbito de influencia de la unidad hidrográfica de la cuenca, existe la estación Meteorológica Sajama operada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), que proporcionó una serie de datos climáticos actualizada hasta marzo 2014. La estación meteorológica Comisario fue monitoreada por Agua Sustentable durante el periodo noviembre 2011 a mayo 2013; la misma tiene registros que presentan algunas lagunas de información, entre las cuales la más importante es la que corresponde a la época de lluvias del año 2011-2012. La estación Chungará Ajata se sitúa en un sitio con similares características geomorfológicas, fisiográficas y latitudinales a las del reservorio 1 para todas las cuencas modeladas; esta estación dispone de seis años de información climática y por problemas varios, es difícil acceder a series climáticas recientes.

5.2. Análisis exploratorio de los datos climatológicos faltantes

A partir de la información disponible, se completaron y extendieron datos faltantes de precipitación y evapotranspiración para el periodo enero de 2005 a marzo de 2014, generando datos climáticos faltantes en las estaciones meteorológicas de Chungara y Comisario, utilizando el método racional deductivo descrito por Guevara (2003). Esta referencia, sugiere rellenar hasta un máximo de once datos faltantes por año, apoyándose en la información que brindan los años con información completa.

Para la generación de datos de precipitación y evapotranspiración de referencia, inicialmente se asumió una tendencia en función a la altitud, obteniendo así ecuaciones que permitieron estimar datos utilizando las ecuaciones se muestran en las figuras 2 y 3. En el proceso, se estableció la relación lineal con una serie de datos climáticos de siete años comunes entre las estaciones de Chungará Ajata y Sajama. Este enfoque se sustenta en el trabajo de Espinha-Marques *et al.* (2006), donde se generaron medidas de correlación entre la precipitación mensual y la altitud para obtener series diarias de precipitación, con resultados interesantes para calibrar un enfoque de balance hídrico.

Figura 3. *Tendencia lineal de precipitación en función a la altitud, en función a valores acumulados anuales*

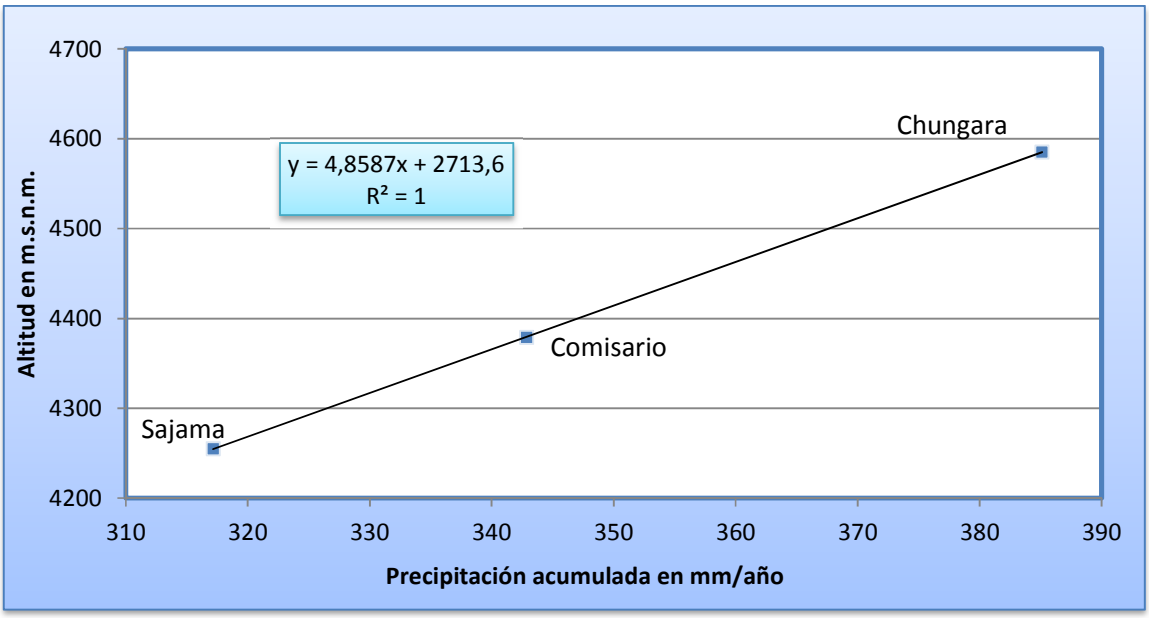
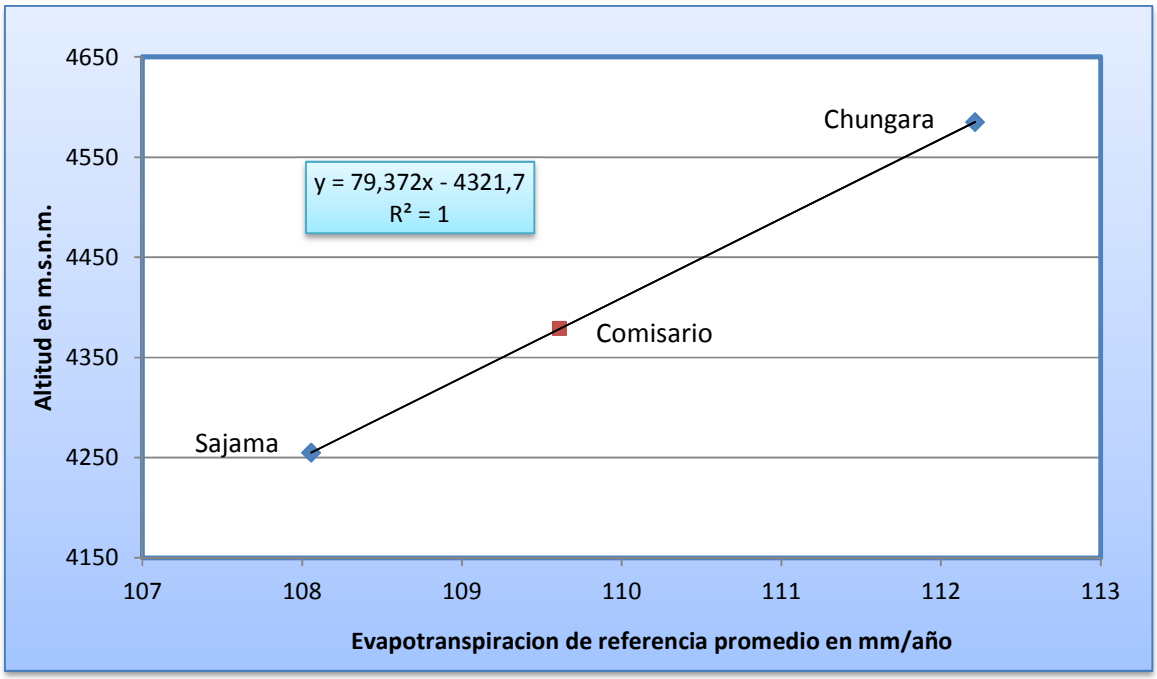


Figura 4. *Tendencia lineal de la evapotranspiración de referencia en función a la altitud, en base a valores medios anuales*



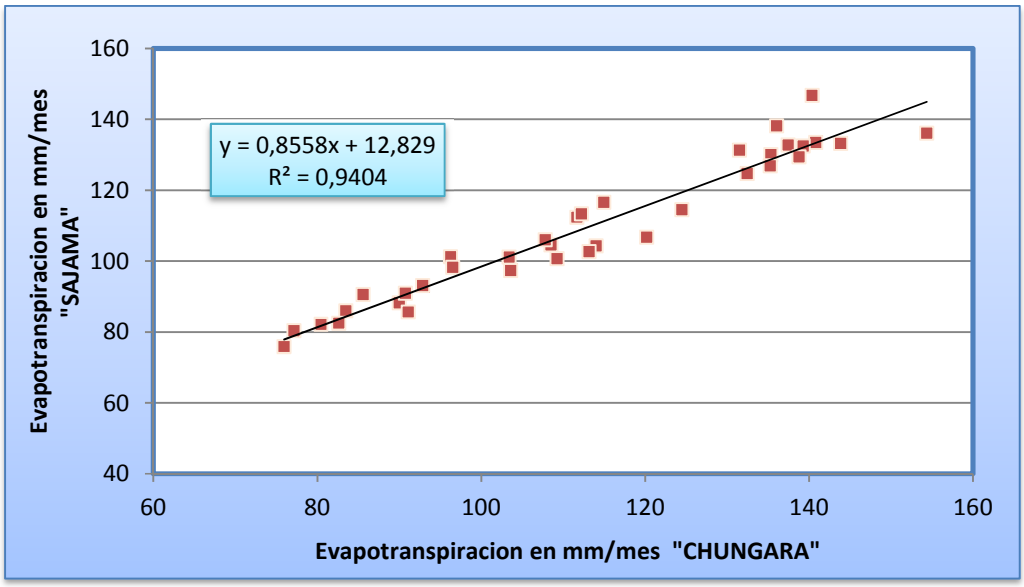
Como presentan las figuras 3 y 4, el coeficiente de correlación encontrado es adecuado, bajo la lógica de que el ajuste lineal sugiere una relación precipitación anual – altitud para la zona de estudio. A través de esta relación de precipitación – altitud se generaron valores de precipitación y evapotranspiración para otro punto (Comisario) como se muestra en el cuadro 2.

Cuadro 2. *Datos de precipitación y evapotranspiración de referencia estimados a partir de la relación lineal entre Sajama y Chungara*

Nombre de la estación	*Altitud m.s.n.m.*	*ETo promedio mm/año*	*Precipitación promedio mm/año*
Chungará	4585	112.22	344.37
Sajama	4255	108.06	385.12
Comisario	4379	**109.61**	**342.87**

Al no disponer con series datos de evapotranspiración de Chungara para el periodo de enero de 2012 a marzo 2014, se extrapolaron datos con el fin de completar la serie en función a la correlación lineal entre las estaciones de Chungara y Sajama. La ecuación y el coeficiente de regresión se presentan en la Figura 5.

Figura 5. *Correlación de evapotranspiración de las estaciones Chungara y Sajama*



De la manera descrita en los párrafos precedentes se obtuvieron series de datos de precipitación y evapotranspiración para las tres estaciones para el periodo enero de 2005 a marzo de 2014. Las series de datos completas y actualizado se muestran en el Anexo 1.

A partir de series de datos meteorológicos de las estaciones Sajama y Chungara se generaron series de precipitación y evapotranspiración futura (2046-2055) mediante el enfoque de Semenov (xxx), Los datos generados así como también mediante la relación lineal entre altitud y precipitación; altitud y ETo generados para la estación Comisario se muestran en el Anexo 1.

5.3. Simulación de oferta de agua mediante el modelo semidistribuido

El esquema general para el modelo de balance hídrico superficial está basado en la expresión general descrita por Collick et al. (2009).

5.3.1. Parámetros del modelo

a) *Capacidad máxima de almacenamiento (Tmax).-* Este valor se puede obtener en base a información de un mapa de suelos o clase textural. Bajo esta premisa, existe un nivel de incertidumbre difícil de determinar al calcular el parámetro Tmax a través de la capacidad de campo; en ese sentido, las estimaciones están sujetas a correcciones posteriores.

b) *Coeficiente de escorrentía (Cse).-* Este parámetro define la porción del exceso de humedad en el suelo que se convierte en escurrimiento superficial o en percolación. Existen varios métodos para determinar Cse. Para los fines presentes, en el cálculo se utilizo la formula de

de Nadal; los valores obtenidos se ajustaron para cada reservorio durante el proceso de calibración.

c) *Flujo base (FB).-* Para cada reservorio se considero como flujo base St_i a los caudales mínimos medidos en campo. Al respecto, para el reservorio 1 el caudal mínimo del río Sajama fue de 1.39 m^3/s; para el reservorio 2, el caudal mínimo del rio Sururía fue de 0.17 m^3/s. Debido al limitado conocimiento específico de la dinámica de los reservorios horizontales, se debe considerar que estos valores están sujetos a corrección en base a la respuesta global de la cuenca. Para el caso particular, considerando que los resultados de la modelación sugirieron la existencia de aportes adicionales a los computados por el modelo, se adicionó el aporte de un reservorio sub superficial de aporte permanente.

d) *Coeficiente de recesión (a).- S*e define como la pendiente, por tramos, del hidrograma de caudales medidos en campo. Los valores varían entre 0 y 1. El coeficiente se determinó a partir del hidrograma del registro de caudales para dos periodos diferenciados entre si, el primero para el ciclo hidrológico 2012 – 2013 (año normal); y el segundo para ciclo hidrológico 2013 – 2014 (año seco).

5.3.2. Descripción general de características de los reservorios horizontales

a) *Reservorio 1.-* Se encuentra en un rango altitudinal bajo. La vegetación en este piso está gobernado por bofedales, vegas y por especies herbáceas como pajonales y tholas. Para este reservorio la Tmax se estima mediante calibración del modelo. El comportamiento climatológico del reservorio se describió a través de los datos de la estación meteorológica Sajama.

b) *Reservorio 2.-* Se encuentra en un rango altitudinal intermedio. Para este reservorio la Tmax fue calibrada para cada cuenca. El reservorio se caracteriza por la presencia de bofedales al pie de los nevados, pajonales, arbustos y especies arbóreas. Los datos de la estación meteorológica Comisario se utilizaron para describir el comportamiento del reservorio.

c) *Reservorio 3.-* Se encuentra en un rango altitudinal alto. El reservorio se caracteriza por la presencia de vegetación geliturbada subnival. Los datos de la estación meteorológica Chungará Ajata fueron utilizados para describir el comportamiento del reservorio.

Los rangos altitudinales, la capacidad máxima de almacenamiento del suelo, coeficiente de escurrimiento calibrados para cada cuenca se describen en el cuadro 3.

Cuadro 3. *Facores considerados en el proceso de modelación hidrológica*

Cuenca	Código	Nombre de estación	Tmax mm/m^2	CSE1 β	Área m^2	FB m^3/s	FB $mm/mes*m^2$
Sajama	Alta	Chungara	39	0.10	223630000	0.30	3.5
	Media	Comisario	180	0.30	166200000	0.20	3.1
	Baja	Sajama	219	0.20	177800000	0.60	8.7
Pisirata	Alta	Chungara	50	0.10	48254677	0.20	10.7
	Media	Comisario	200	0.30	47290021	0.28	15.3
	Baja	Sajama	180	0.20	26256415	0.40	39.5
Taypijahuira	Alta	Chungara	20	0.16	18197903	0.01	1.4
	Media	Comisario	180	0.20	15499085	0.028	4.7
	Baja	Sajama	200	0.30	22257042	0.02	2.3

CSE1 es el coeficiente de escorrentía; Tmax es la capacidad máxima del suelo y FB es flujo base

5.3.3. Parámetros climáticos

Los principales parámetros climáticos que definen o caracterizan el clima de una cuenca son la precipitación y la evapotranspiración. Su análisis en el estudio hidrológico es de mucha importancia, dado que los eventos meteorológicos y los procesos hidrológicos están fuertemente ligados y debido a que su análisis ayuda a caracterizar el comportamiento climatológico de la zona.

Las estaciones meteorológicas para el análisis cuentan con registro histórico de precipitación y ETo en intervalos variables durante el periodo de enero de 2005 a marzo de 2014. Los registros históricos de las precipitaciones de las estaciones meteorológicas y la evapotranspiración empleados en el análisis, a escala mensual se muestran en el Anexo 1. Para las tres cuencas modeladas se utilizaron datos de las mismas estaciones.

5.3.4. Calibración y validación del modelo

La calibración y validación se realizaró al nivel medio mensual (julio de 2012 a marzo de 2014). En la evaluación del comportamiento del modelo se utilizaron los indicadores: eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF), concordancia visual entre las gráficas de caudales observados versus modelados. Se considera que el modelo funciona mejor en la medida que EF se acerca más al valor unitario (1), y en la medida que la gráfica indique una buena correspondencia entre los caudales modelados y observados.

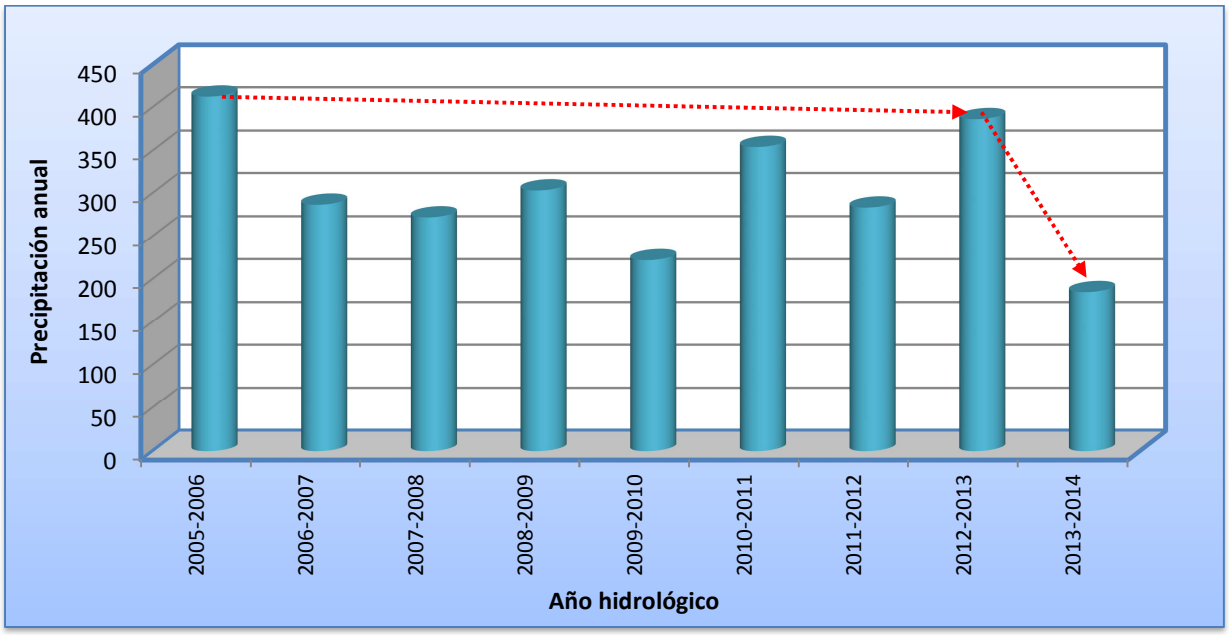
6. RESULTADOS

6.1. Análisis de la precipitación y evapotranspiración de referencia

En referencia al gradiente espacial en los cambios detectados sobre la precipitación anual (Figura 2), se observó una tendencia al incremento de la lluvia anual a medida que la altitud se incrementa. La tendencia lineal de la precipitación anual, coinciden con estudios realizados por Pabón, (2003) y

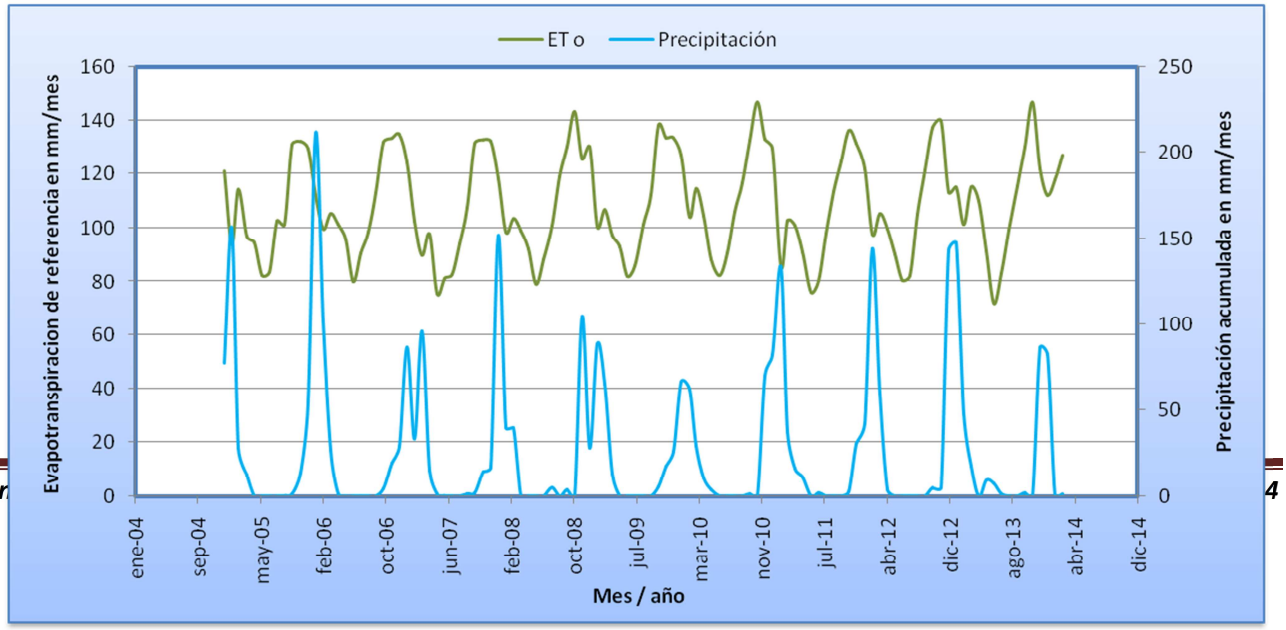
Bedoya et al., (2010), en el periodo 1971-2000, donde se argumentó que dichas variaciones están ligadas en gran parte a la variabilidad topográfica y a la exposición que tienen las diferentes regiones a las corrientes de aire cargadas de humedad.

Figura 6. *Fluctuaciones de la precipitación acumulada anual (año hidrológico) (2005 a 2014)*



La representación grafica de las variables climáticas registradas en la estación Sajama , a escala anual (2005 a 2014) ilustrada en la Figura 6, muestra fluctuaciones entre años hidrológicos. Destaca el año 2013-2014, con 43 % de decremento a comparación del año precedente. Los años hidrológicos 2005-2006 y 2012-2013 presentan mayor acumulación de precipitación en referencia a los previamente citados, seguido de 2010-2011.

Figura 7*. Comportamiento de la evapotranspiración de referencia y precipitación a escala mensual*



a partir de información registrada por la estación de Sajama

La evapotranspiración presenta un ligero incremento desde 2005 a 2014. En comparación con la precipitación, los valores de la evapotranspiración son de mayor magnitud. También se observa que únicamente en febrero de 2006 la precipitación cubre la demanda de agua. Se presento el mayor déficit en los años 2009-2010 y 2013-2014 (Figura 7).

6.2. Análisis de caudales observados y caudales medios mensuales

En base a los caudales observados del periodo de monitoreo (julio 2012 a abril 2014), se generaron series de caudales instantáneos mediante curvas altura – caudal determinadas en el primer informe de avance. En el presente estudio se desarrollaron curvas H-Q para el periodo octubre 2013 a abril 2014, actualizando la información previamente presentada. Las ecuaciones de las curvas de caudales de los puntos de aforo Puente- rio Sajama, Taypijahuira, Pisirata y Juntuma aguas arriba se muestran en el Anexo 2.

En el punto de control rio Sajama-puente, los caudales instantáneos medidos en campo muestran valores altos en el mes de enero. Destacan los bajos caudales del año hidrológico 2013-2014, en coincidencia con la baja precipitación registrada en enero de 2014. En cuanto a los caudales medios mensuales estimados a través de alturas de nivel de agua registradas por el sensor instalado en el punto de aforo, el comportamiento es similar, aunque en el mes de enero los valores son mayores en un 40%, aproximadamente. También destaca un pico en el mes de abril que supera el caudal medio de enero 2014. Este evento podría atribuirse a factores externos que no se lograron identificar, que influyeron en el incremento del nivel de agua y directamente al caudal.

***Figura 8**. Fluctuación de caudales observados en un periodo de monitoreo de julio 2012 a abril 2014; y caudales medios mensuales del rio Sajama*

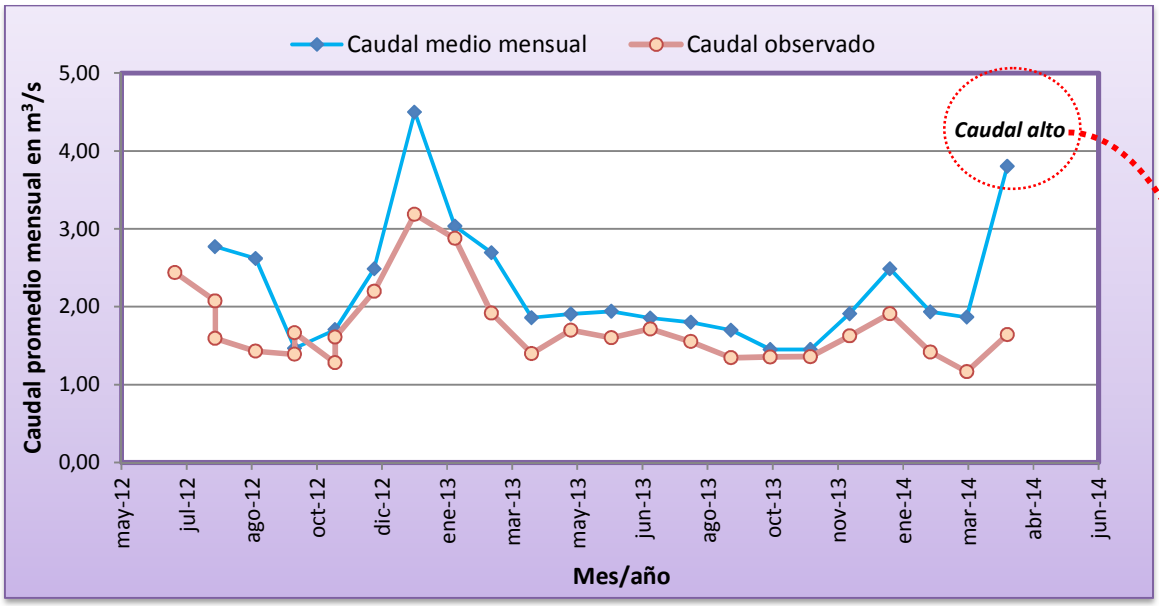
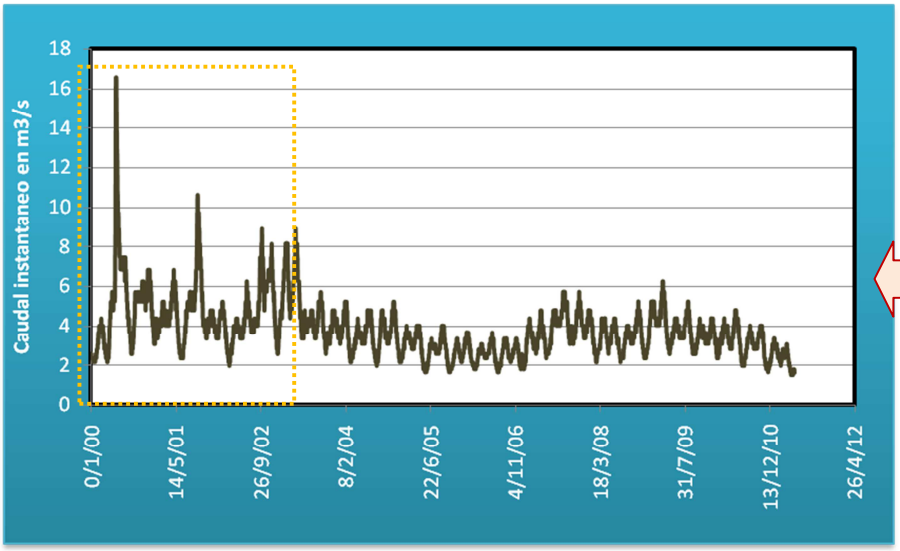


***Figura 9.** Fluctuación de caudales instantáneos del mes de abril de 2014*



La figura 10, muestra el comportamiento de los caudales medidos y promedios del la subcuenca Pisirata. Existe una notoria fluctuación en los caudales medios mensuales con respecto a los caudales instantáneos (medidos); los recuadros muestran los caudales con mayor desfase. Realizando un análisis en los datos instantáneos estimados por el sensor (Figura 11), se aprecia un comportamiento inusual en los meses de mayo a septiembre. Revisando la pluviometría en estos meses, con el fin de explicar la variación, se encontraron registros de precipitación en mayo, junio y

julio de 9.75, 7.75 y 1.75 mm respectivamente; en los meses de agosto y septiembre no se registraron eventos de precipitación; en conclusión, no se lograron identificar los factores que provocaron esta fluctuación.

***Figura 10**. Fluctuación de caudales observados en el periodo de monitoreo de julio 2012 a abril 2014; y caudales medios mensuales del rio Pisirata*

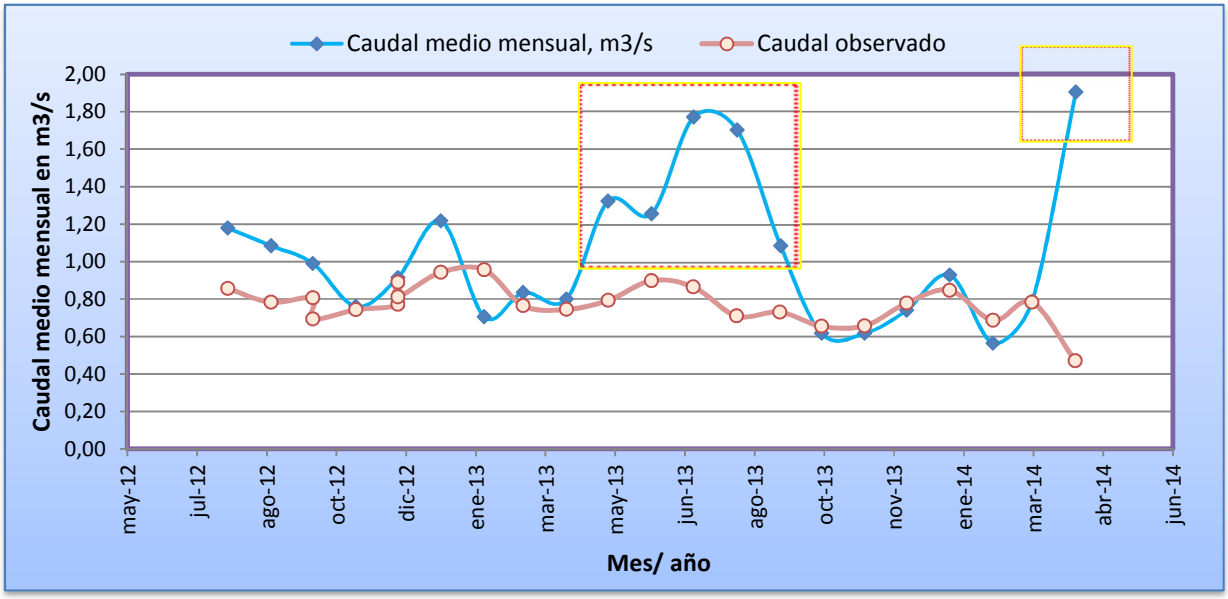


***Figura 11.** Fluctuación de caudales instantáneos en los meses de mayo a septiembre de 2014*

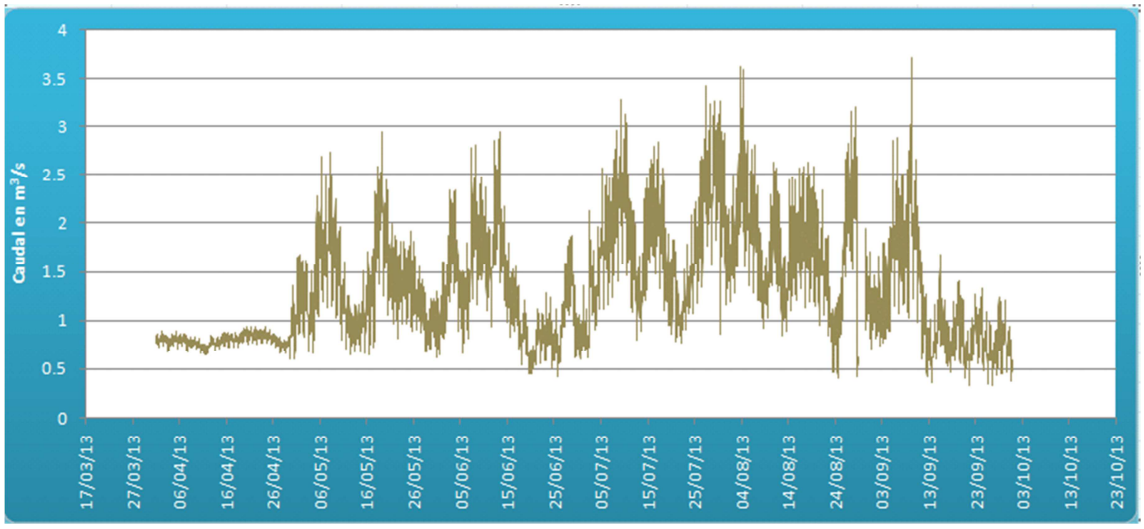
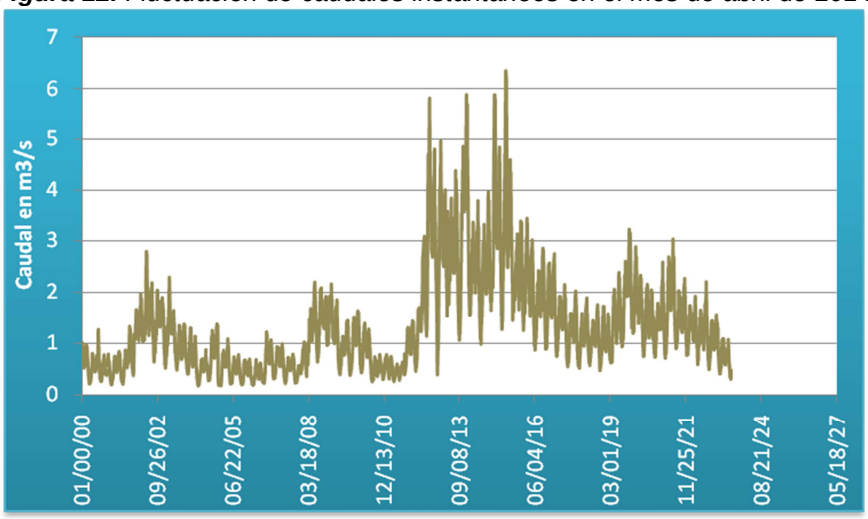


Figura 12. *Fluctuación de caudales instantáneos en el mes de abril de 2014*



La Figura 13 muestra la evolución de caudales observados y los medios mensuales. En general se aprecia que ambos hidrogramas son similares, con picos de los caudales medios mensuales que superan al pico de caudales medidos en un 60% a 75% aproximadamente (ver los recuadros en la Fig. 13). Los caudales instantáneos estimados en los meses enero 2013 y 2014 tienden a ser altos, tal como se observa en las Figuras 14 y 15, diferenciándose de la magnitud y tiempo, es decir, en enero de 2013 los caudales altos están alrededor de13 m^3/s durante poco tiempo (2-3 días) en cambio entre diciembre de 2013 y enero de 2014 los caudales varían entre 3 a 5 m^3/s, durante un tiempo más prolongado (medio mes). Un factor importante que influyo es la precipitación.

Figura 13*. Fluctuación de caudales observados en un periodo de monitoreo de julio 2012 a abril 2014; y caudales medios mensuales del rio Taypijahuira*

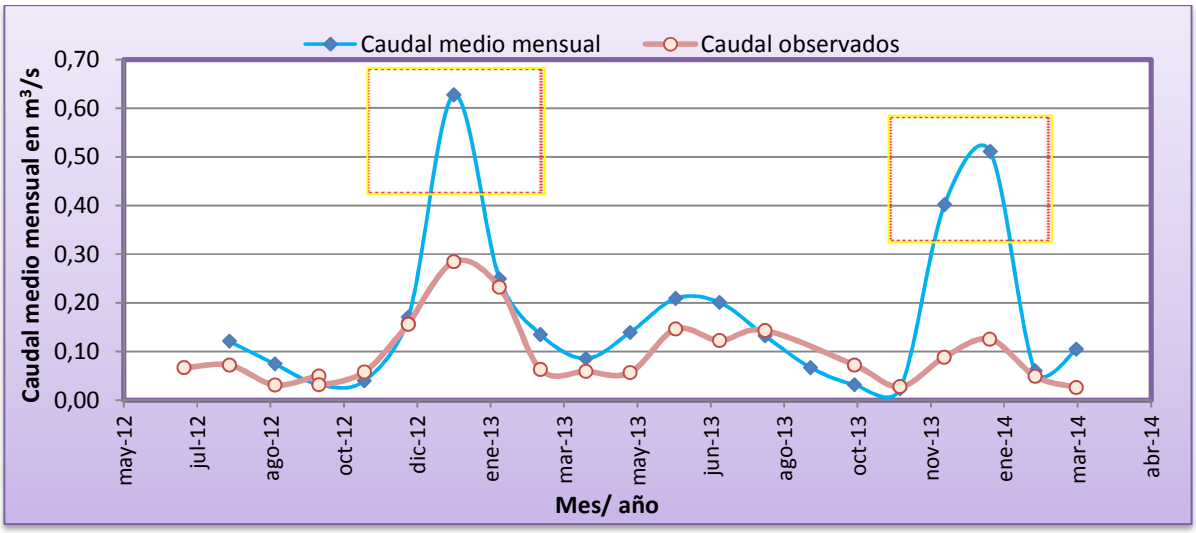


Figura 14. *Fluctuación de caudales instantáneos del mes de enero de 2013*

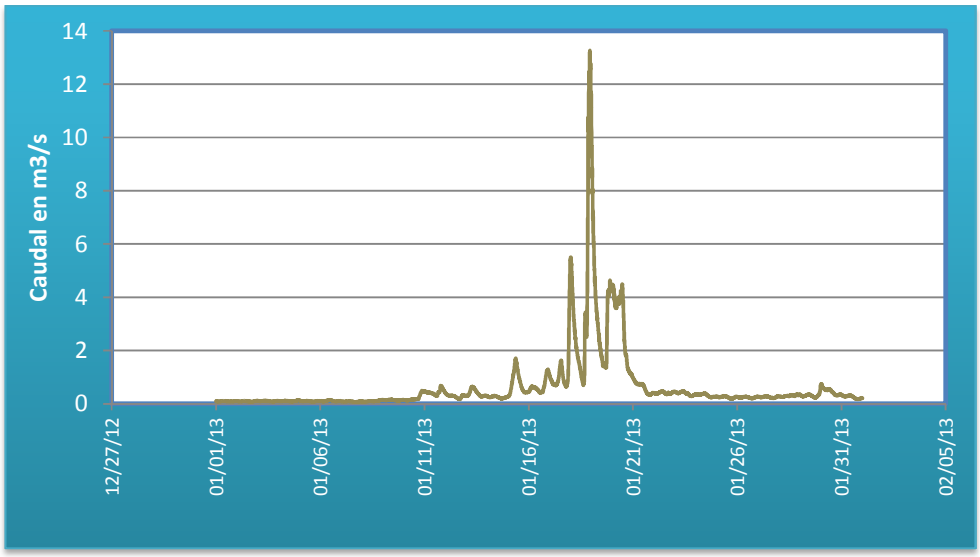
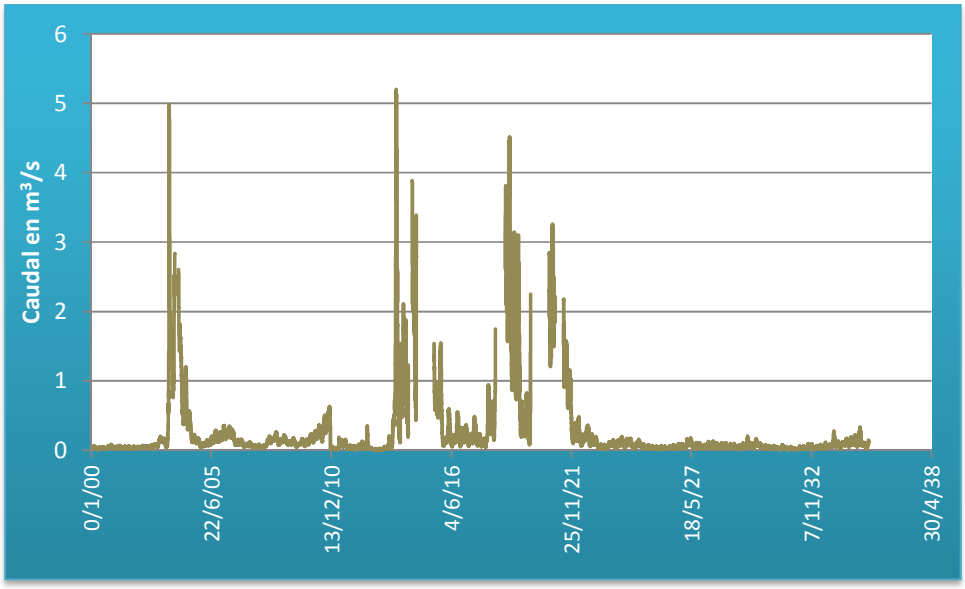
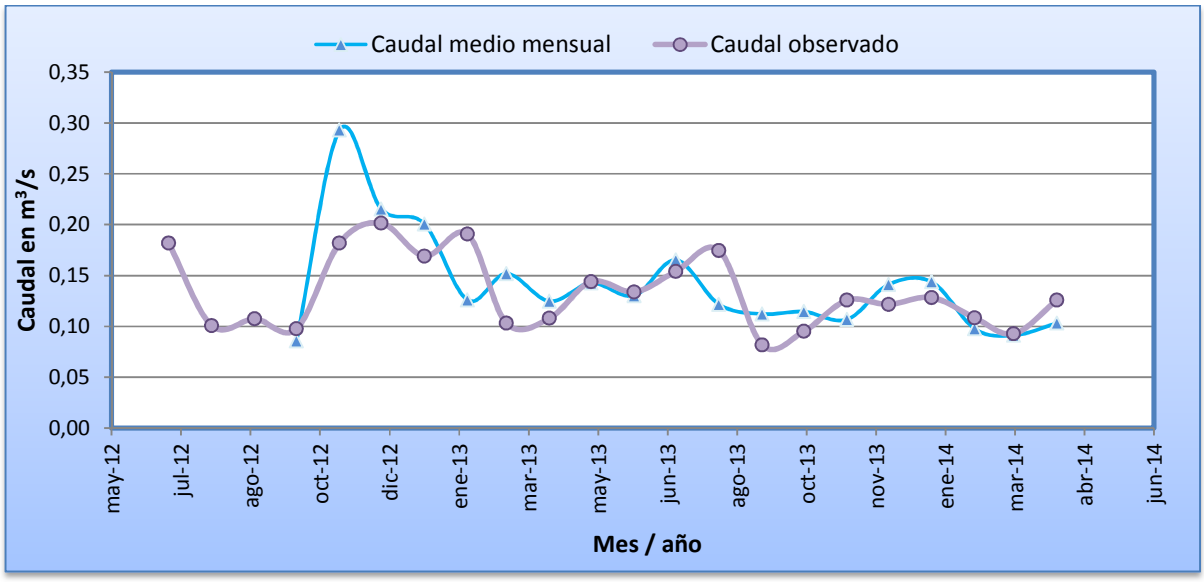


Figura 15. *Fluctuación de caudales instantáneos de los meses de diciembre de 2013 a enero de 2014*



En general los caudales observados y medios mensuales son casi homogéneos, solo en el mes de noviembre existe un desfase de 50% aproximadamente. El comportamiento no destaca picos característicos de descarga de una cuenca.

***Figura 16**. Fluctuación de caudales observados en un periodo de monitoreo de julio 2012 a abril 2014; y caudales medios mensuales del rio Juntuma aguas arriba*



6.3. Balance hídrico superficial

El modelo propuesto sigue la estructura descrita en Collick (2009), adecuando los parámetros para cada cuenca de estudio, la modelación de las cuencas se describen en los siguientes subtítulos.

6.3.1. Modelación hidrológica de la cuenca del rio Sajama

El modelo es altamente sensible al parámetro Tmax; la variación en sus valores modifica la magnitud del pico del hidrograma. El coeficiente de escurrimiento se calibró para el reservorio 2, bajo la lógica de que esta zona presenta pendientes que dan lugar a que el escurrimiento superficial sea mayor a la percolación en una proporción de 7:3; como resultado, se asignó un coeficiente de escorrentía de 0.3. Para el reservorio 1, el Cse calculado es 0.2. Este coeficiente está en función al excedente de agua y a su vez de la precipitación pp y la ETo, en otras palabras, si la evapotranspiración es mayor que la precipitación, el modelo interpreta que no existe escurrimiento superficial en la cuenca. En este caso, el coeficiente no tendrá relevancia en el modelo, lo cual explica el porqué en el reservorio 1 no se presenta escurrimiento superficial. Para corregir este aparente error se adicionó un reservorio vertical que aporta flujo sub superficial de manera permanente, tomando como referencia de calibración el caudal base del rio Sajama.

Para calibrar los cálculos de la oferta de agua, se compararon las magnitudes de los picos de los hidrogramas simulado y observado, durante el periodo hidrológico julio 2012 a mayo 2013. Para la validación del modelo mediante los datos del último periodo de monitoreo (2013-2014), se utilizó un

ajuste en el coeficiente de recesión. El criterio clásico de Nash indicó un valore de 0.85, lo que indica que la simulación de gasto para la cuenca Sajama es aceptable.

Figura 17. *Ajuste del caudal observado y el caudal simulado mediante el modelo semidistribuido*

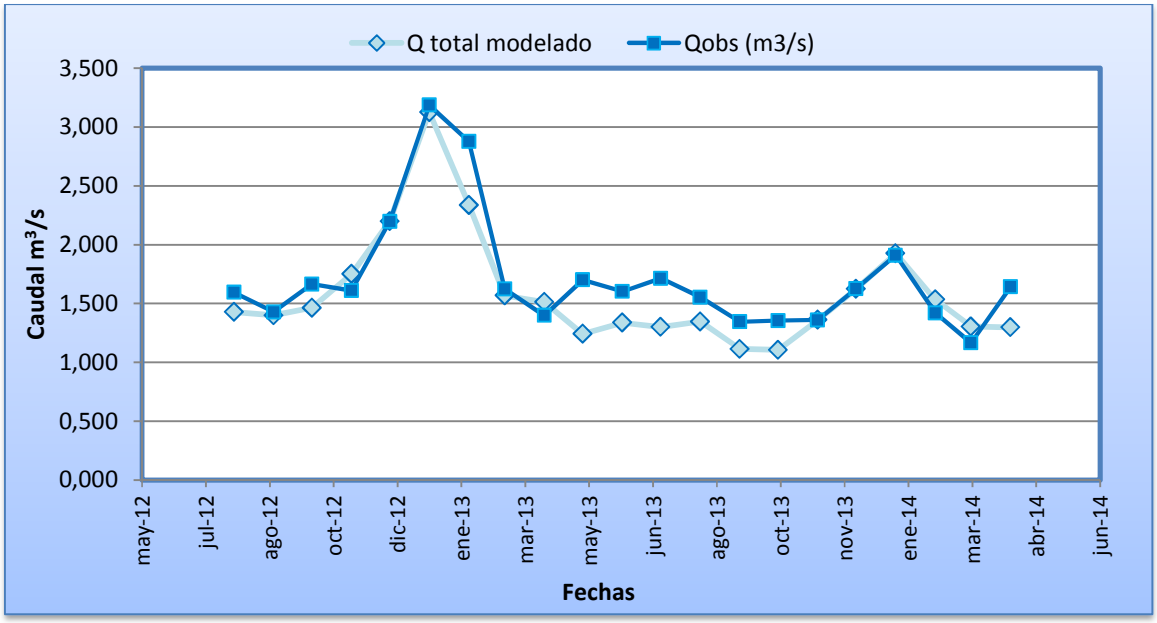
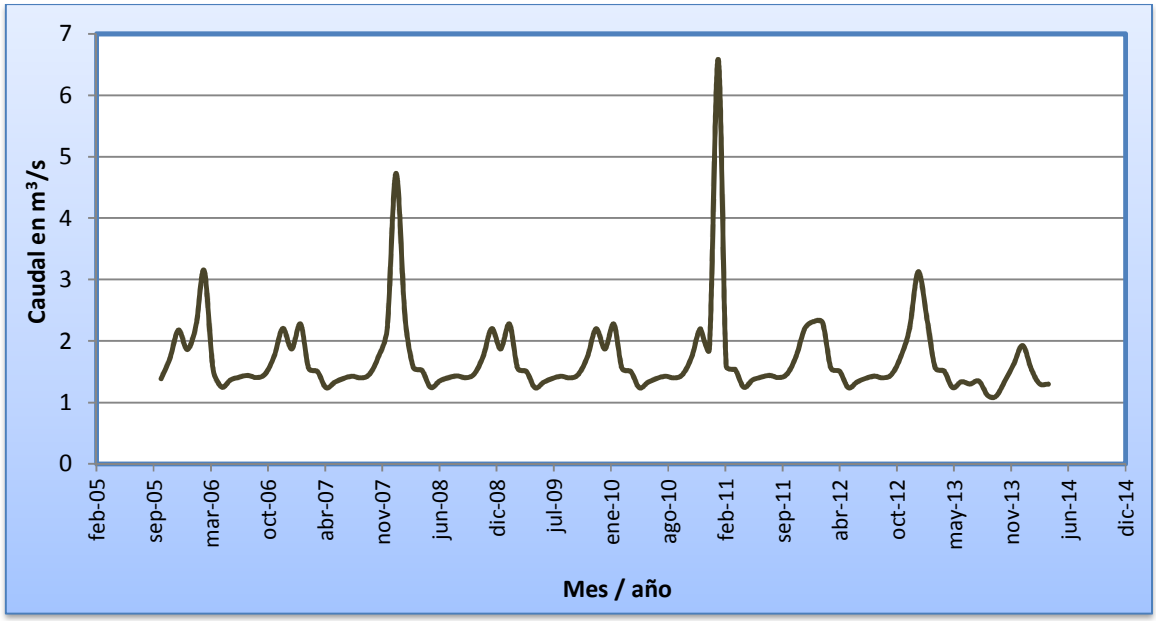


Figura 18. *Comportamiento del caudal modelado desde de 2005 a abril de 2014*



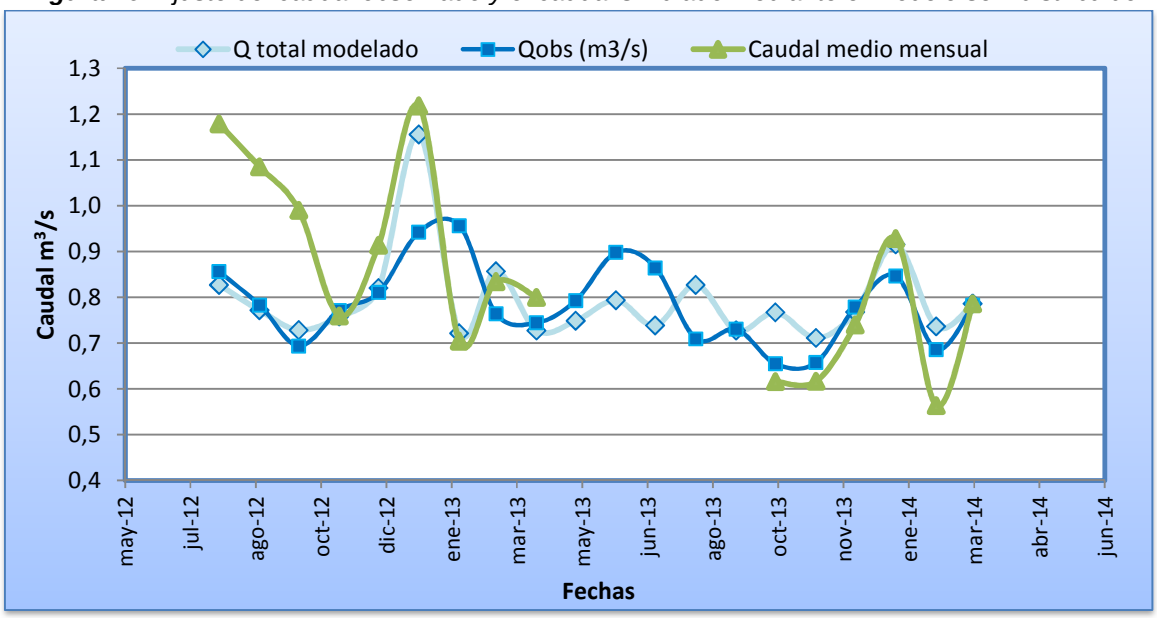
Al realizar la simulación de caudales de años anteriores, donde no se cuenta con caudales observados, se observó un comportamiento histórico variable. Los resultados de la modelación sugieren que en años normales, el caudal máximo puede haber alcanzado los 3 m^3/s, mientras que

es probable que los caudales mínimos hubiesen alcanzado magnitudes de 1 m^3/s. Una discrepancia a este comportamiento se observó en enero de 2008 y febrero de 2011, donde el valor máximo de caudal total calculado alcanzó magnitudes entre 4.7 y 6.5 m^3/s. Revisando los datos de entrada (ETo y pp) para explicar este comportamiento, se observó que para enero de 2008, la precipitación medida fue notoriamente más alta que la de otros periodos; por otro lado, la evapotranspiración fue más baja a la de otros periodos. Algo similar ocurrió en febrero 2011. Como guía para interpretar estos resultados, Collick (2009) indica que su modelo a menudo subestima la descarga generada de eventos de lluvia superiores a los 50 mm/día.

6.3.2. Modelación hidrológica de la cuenca del rio Pisirata

Los parámetros calibrados para la modelación se detallan en el cuadro 3, particularmente el balance calibrado para el periodo 2005-2014 de forma manual, ajustando los caudales mensuales simulados con los caudales medios mensuales en el punto de aforo del rio Pisirata. En el mes de enero, el modelo subestima las aportaciones (Figura 19), lo que podría deberse a la precipitación estimada para la estación de Chungara. El ajuste del modelo con los caudales medios mensuales es medianamente aceptable con un coeficiente de Nash de 0.65.

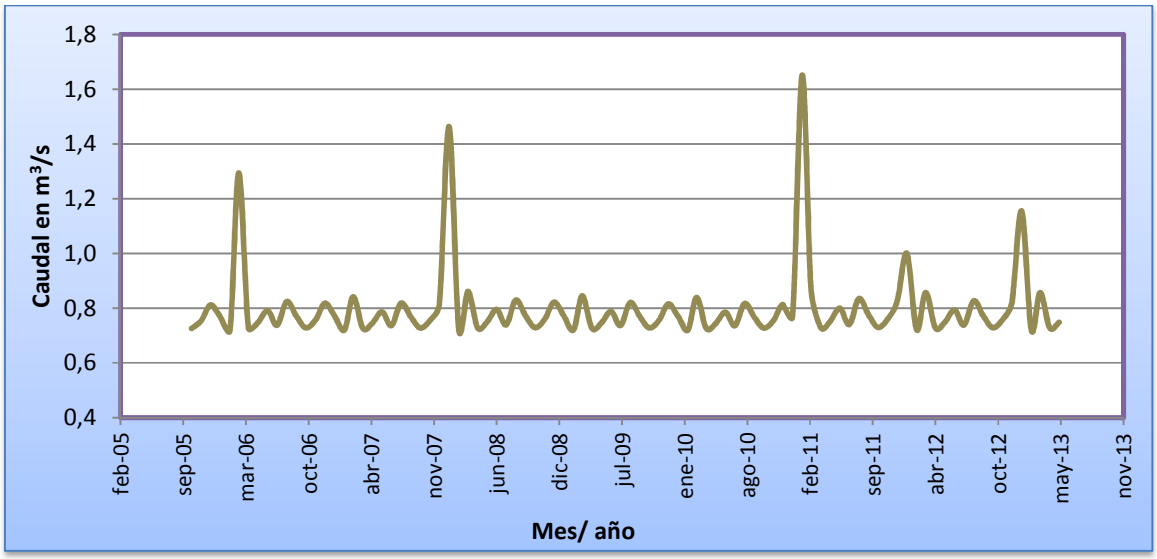
Figura 19. *Ajuste del caudal observado y el caudal simulado mediante el modelo semidistribuido*



La simulación de caudales del periodo de 2005 a 2011, años sin datos de caudales observados, y en base a parámetros calibrados, otorga los caudales simulados de la Fig. 20. Los resultados de la modelación sugieren que en el año 2008-2009 y 2009-2010 hubo poco aporte de la cuenca, con un caudal mínimo en el mes de enero 2009 y 2010 de 0.85 m^3/s, seguido de caudal simulado para año hidrológico 2011-2012 de 1 m^3/s; por otro lado, las predicciones sugieren que el caudal máximo

puede haber alcanzado los 1.6 m^3/s. Revisando los datos de entrada (ETo y precipitación) para explicar tal comportamiento, se observó que para enero de 2009 y 2010, la precipitación medida fue notoriamente baja que la de otros periodos; por otro lado. En febrero 2011 presento precipitación alta que pudo influir en el aporte de agua.

Figura 20. *Comportamiento del caudal modelado desde de 2005 a abril de 2014*



Los parámetros calibrados para la modelación de la subcuenca Taypijahuira se muestran en el cuadro 3, el balance calibrado de forma manual para el periodo 2005-2013, ajustando los caudales mensuales simulados con los caudales observados solo hasta diciembre de 2013, debido al desvío de fluyo a un canal de riego, que se evidencio en diciembre de 2013 (Ver imagen 1).

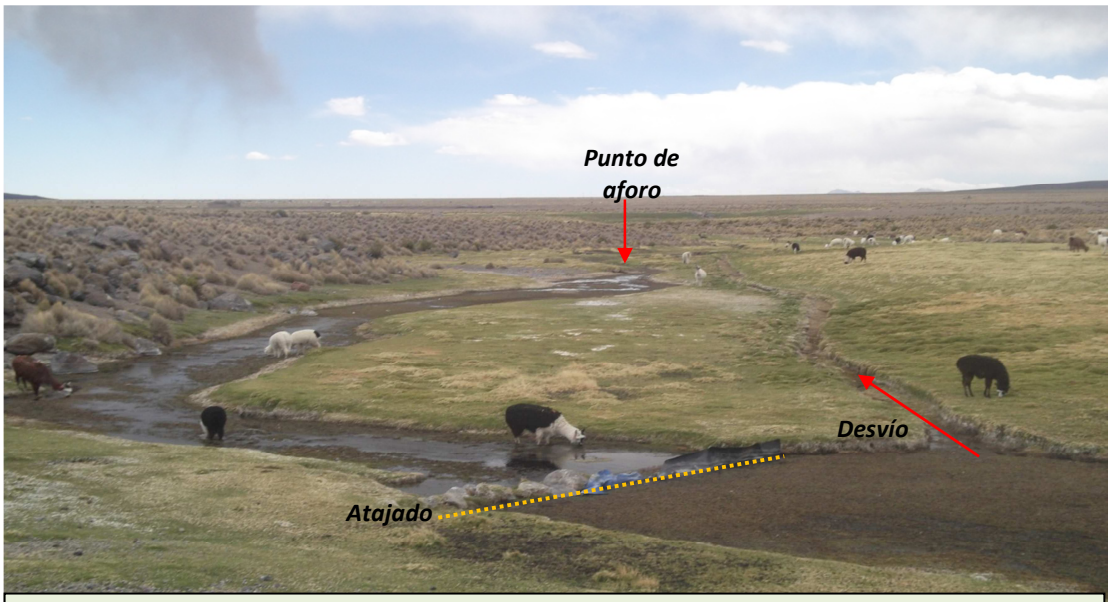
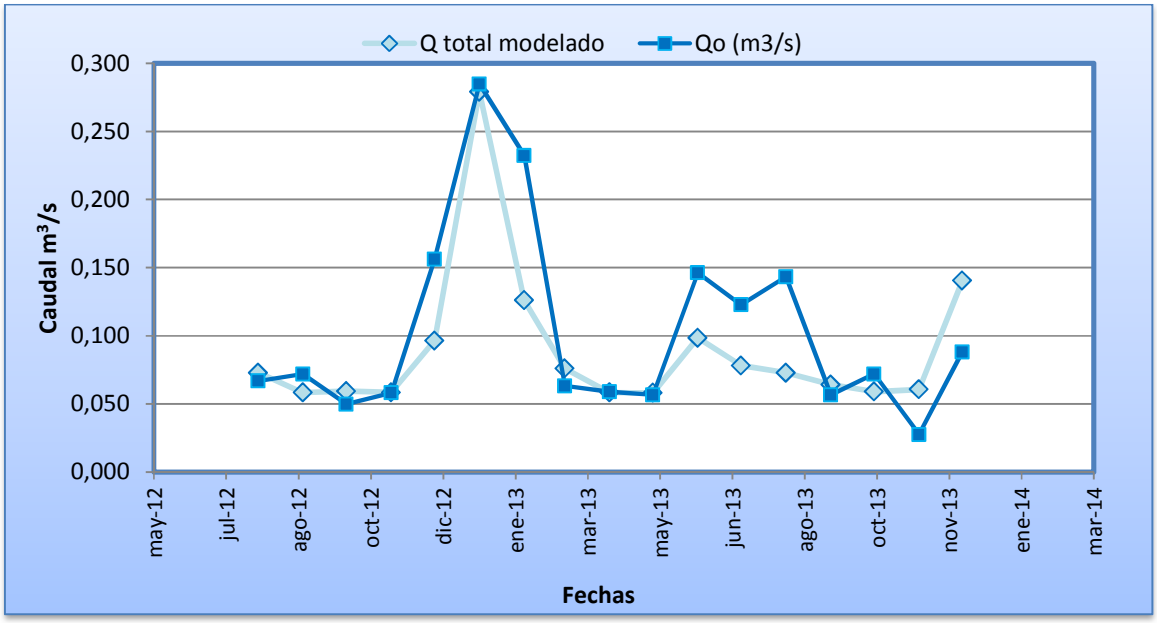


Imagen 1. Fotografía del desvío del rio Taypijahuira en diciembre de 2013

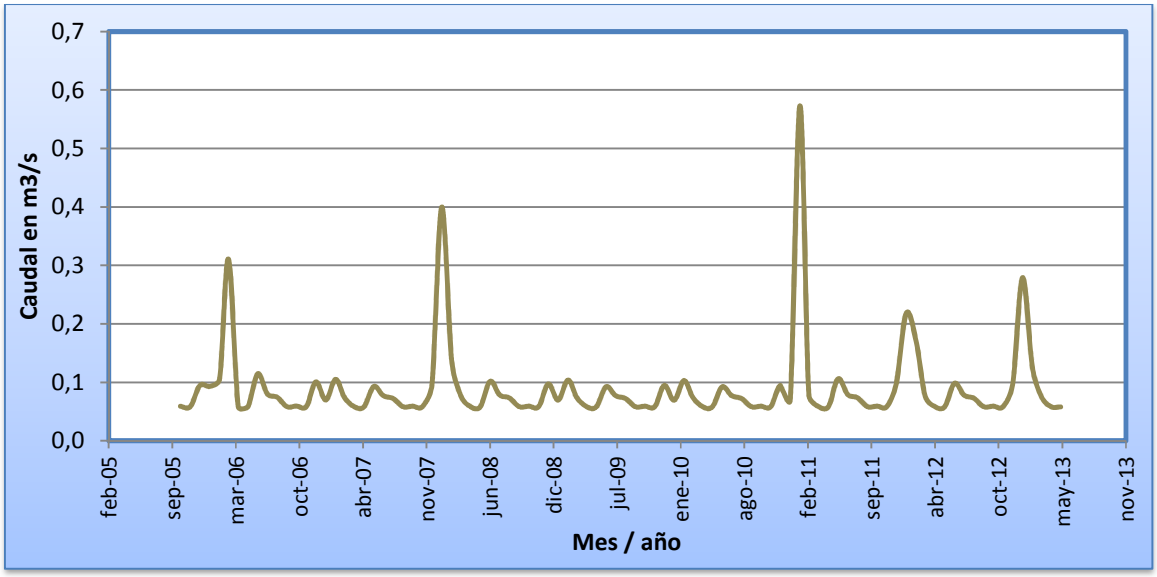
El ajuste del modelo con los caudales simulados con los observados es aceptable con un coeficiente del criterio de Nash de 0.80.

Figura 21. *Ajuste del caudal observado y el caudal simulado mediante el modelo semidistribuido*



Los resultados de la modelación para el periodo 2005-2011, muestran años hidrológicos con mayor caudal simulado en 2005-2006, 2007-2008 y 2010-2011 alcanzando picos 0.3; 0.4 y 0.58 m^3/s. Estos años hidrológicos presentaron mayores magnitudes de lluvias, influyendo en la interpretación que realiza el modelo, subestimando el aporte de agua. En los demás años presentaron menor caudal entre 0.1 y 0.25 m^3/s.

Figura 22. *Comportamiento del caudal modelado desde de 2005 a 2013*

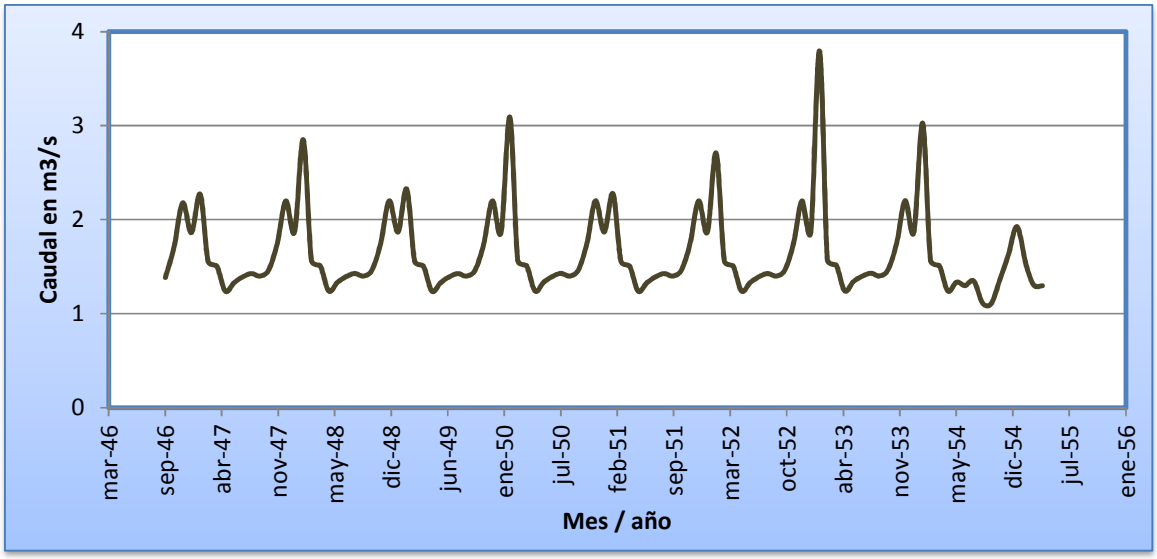


6.3.3. Modelación de oferta de agua futura (2046-2055)

En base a los parámetros calibrados para la cuenca del rio Sajama, se realizo la modelación para un periodo futuro con los datos de entrada de precipitación y evapotranspiración de referencia obtenida a través modelo estocástico LARS bajo escenario intermedio entre pesimista y optimista.

La oferta de agua futura se muestra relativamente homogénea, alcanzando valores de caudal entre 2 a 3.8 m^3/s. Conforme al comportamiento mostrado en la Fig. 23, el caudal disponible podría disminuir. Ante tal escenario, es probable que caudal tan altos como 3.8 m^3/s podrían ocurrir.

Figura 23. *Comportamiento del caudal modelado para periodo futuro de 2046 a 2055*



7. CONCLUSIONES

El modelo semidistribuido considerado, se basa en un concepto donde los suelos que alcanzan un contenido de humedad crítico, empiezan a contribuir a la escorrentía superficial, subsuperficial y a la recarga del acuífero. La cantidad de lluvia a llegar a este umbral de contenido de humedad varía a lo largo la cuenca. Para el estudio, se dividió las cuencas en tres estratos o reservorios, cada una con su característica de contenido de humedad. Posteriormente, se realizó un balance hídrico para cada una de las regiones, considerando valores de precipitación y evapotranspiración de referencia como entradas principales.

El modelo hidrológico fue calibrado, comparando el caudal simulado por el modelo y caudales instantáneos medidos en campo en el período 2012- marzo de 2014, evidenciándose dos eventos diferentes. Por esta razón, el éxito de la calibración se base en estimar coeficientes de recesión distintos para cada evento. Se describió el comportamiento de la oferta hídrica durante el periodo de

2005 a 2014. Los resultados obtenidos mediante el modelo de Collick et al (2009) representan el comportamiento hidrológico de las series en la zona de estudio, y se consideran aptos para la reconstrucción de las series de caudal y para la simulación de series en cuencas con similitud hidrológica a las calibradas, bajo los parámetros conceptuales manejados bajo tales esquemas.

Entre los aspectos específicos relativos a la modelación, el valor encontrado para la capacidad máxima de almacenamiento *Tmax*, a nivel mensual, para todos los reservorios, sugieren mantener abierta la discusión acerca del límite superior de este parámetro. Esta pregunta podría responderse conforme se realice la aplicación del modelo en otras cuencas, con características climáticas y geomorfológicas diferentes.

La modelización hidrológica de las subcuencas plantea numerosos desafíos. Debido a las fuertes variaciones espaciales de las condiciones físicas y meteorológicas hacen que la hidrología de estas zonas sea muy compleja.

8. BIBLIOGRAFÍA

Agua Sustentable, 2013. Plan de Adaptación al cambio Climático del Parque Nacional Sajama. Primera edición. Bolivia. Pág. 15 – 20.

Bedoya, M., Benavides H.O., Cabrera, M., Carrillo, H., Ceballos, J.L., Contreras, C., Cuervo, C., Duarte, M., Dorado, J., Gomez, C., Jaramillo, R., Lamprea, P.S., León, G.E., Lozano, R.J., Mayorga, R., Moreno, G., Osorio, S., Pava, J., Piñeros, A., Ruiz, F. y Tobón, E.A., 2010. Vulnerabilidad. Capitulo 4 en segunda comunicación Nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. Sistema de Información Ambiental, Bogotá D.C., Colombia, pág. 320.

Cabrera J., 2011. Calibración de Modelos Hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil. 7p.

Collick, A., Easton, Z., Ashagrie, T. Biruk, B., Tilahun, S. Adgo E., Awulachew S., Zeleke G. y Steenhuis T., 2009. A simple semi-distributed water balance model for the Ethiopian highlands. Hydrological processes. 10p.

Duran A., Rocha R., Soto L. y Pardo W., 2002. Evaluación de los coeficientes de cultivo (kc) y evapotranspiración de referencia (ETo) en valles de Cochabamba. Bolivia, pág. 11.

Espinha-Marques J, Samper J, Pisani B, Álvares D, Vieira GT, Mora C, Carvalho JM, Chaminé H, Marques J, Sodré Borges F., 2006. Avaliação de recursos hídricos através de modelação hidrológica: aplicação do programa VISUAL BALAN v2.0 a uma bacia hidrográfica na Serra da Estrela (Centro de Portugal), Cadernos Lab. Xeoloxico de Laxe, Vol. 31. Pag. 43-65.

Guevara, J., 2003. Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos. Imprenta Universidad Central de Venezuela, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, Dirección de Hidrología y Meteorología, Mérida, 9 p.

Hernández V., 2005. Análisis de aforo de la estación Hidrométrica Obrajillo. Perú. 20 p.

Londoño R., Ortiz C., Carvajal L. y Mesa O., 2010. Un modelo de balance hídrico a escalas mensual y diaria en cuencas colombianas. XXIV Congreso latinoamericano de hidráulica Punta del Este, Uruguay. 14 p.

Pabon J.D., 2003. El Cambio Climático Global y su Manifestación en Colombia, Cuadernos de Geografía, XII, pág. 111-119.

Segura, E., 2010. Estudio de Balance HídricoCuenca del Río Santo Tomás. Programa Gestión integral y adaptativa de recursos ambientales para minimizar vulnerabilidades al cambio climático en microcuencas altoandinas. Cusco – Perú. 64 p.

Soria F., 2012. Estudio Hidrológico de los Potenciales Impactos del Cambio Climático en la Oferta de Agua en Microcuencas Seleccionadas Situadas en el Parque Nacional Sajama. Estudio de la Oferta de Agua en una Región del Parque Nacional Sajama-Bolivia. 64 p.

9. ANEXOS

Anexo 1. *Información climática histórica completada para tres estaciones meteorológicas a través de correlaciones lineales y series de datos de precipitación y evapotranspiración futura.*

	Precipitación			Evapotranspiracion		
Mes / año	Chungará	Comisario	Sajama	Chungará	Comisario	Sajama
ene-05	105.70	87.94	77.25	126.42	122.96	120.88
feb-05	152.80	154.80	156.00	113.48	101.27	93.91
mar-05	55.90	38.33	27.75	113.59	114.09	114.38
abr-05	23.20	16.52	12.50	100.00	98.17	97.07
may-05	0.00	0.00	0.00	92.01	93.55	94.48
jun-05	0.00	0.00	0.00	81.43	81.96	82.28
jul-05	4.50	1.69	0.00	81.81	82.90	83.56
ago-05	0.00	0.00	0.00	96.17	100.22	102.66
sep-05	5.50	2.38	0.50	108.50	103.93	101.18
oct-05	0.00	0.94	1.50	132.95	131.68	130.91
nov-05	12.00	13.25	14.00	144.27	136.59	131.97
dic-05	59.40	56.34	54.50	150.51	137.32	129.39
ene-06	161.50	192.71	211.50	137.57	121.55	111.91
feb-06	98.40	100.65	102.00	108.93	103.13	99.64
mar-06	172.60	81.40	26.50	113.65	108.48	105.38
abr-06	30.50	12.55	1.74	101.68	101.34	101.13
may-06	0.00	0.00	0.00	93.11	94.90	95.97
jun-06	0.00	0.00	0.00	84.08	81.64	80.17
jul-06	0.00	0.00	0.00	89.37	90.17	90.65
ago-06	0.00	0.00	0.00	98.19	98.34	98.43
sep-06	0.00	0.00	0.00	113.78	113.45	113.25
oct-06	5.00	4.84	4.75	135.67	133.32	131.90
nov-06	29.70	23.18	19.25	138.96	135.48	133.38
dic-06	41.50	34.01	29.50	144.38	138.30	134.64
ene-07	108.00	94.73	86.75	133.15	127.47	124.05
feb-07	51.30	40.19	33.50	110.13	105.31	102.41
mar-07	64.10	84.01	96.00	113.46	98.80	89.97
abr-07	9.00	12.75	15.00	100.97	99.06	97.92
may-07	0.00	0.78	1.25	83.58	78.59	75.58
jun-07	0.00	0.31	0.50	80.35	80.97	81.34
jul-07	0.00	0.00	0.00	92.24	86.25	82.64
ago-07	0.00	0.00	0.00	94.03	94.20	94.30

sep-07	0.00	1.09	1.74	112.48	109.54	107.76
oct-07	7.50	4.14	2.13	134.32	132.50	131.41
nov-07	29.50	19.98	14.25	139.94	135.42	132.70
dic-07	30.50	21.92	16.75	140.69	135.27	132.00
ene-08	203.00	171.32	152.25	128.23	121.92	118.13
feb-08	13.00	29.70	39.75	110.18	102.98	98.65
mar-08	44.50	41.53	39.75	109.41	105.67	103.42
abr-08	0.00	0.00	0.00	101.83	100.14	99.13
may-08	0.00	0.00	0.00	91.87	92.05	92.16
jun-08	0.00	0.00	0.00	86.48	81.83	79.03
jul-08	0.00	0.00	0.00	84.07	86.64	88.19
ago-08	0.00	3.28	5.25	94.58	98.49	100.85
sep-08	2.36	0.89	0.00	111.31	116.19	119.12
oct-08	6.06	4.62	3.75	135.18	132.16	130.34
nov-08	0.00	0.00	0.00	137.66	141.04	143.07
dic-08	95.00	101.09	104.75	141.11	131.39	125.54
ene-09	38.50	32.10	28.25	135.39	132.04	130.03
feb-09	122.50	101.12	88.25	109.32	103.95	100.72
mar-09	59.50	62.93	65.00	120.21	111.83	106.79
abr-09	21.50	16.19	13.00	103.65	99.73	97.37
may-09	0.00	0.00	0.00	92.87	93.04	93.15
jun-09	0.00	0.00	0.00	80.48	81.49	82.10
jul-09	0.00	0.00	0.00	83.52	85.05	85.97
ago-09	0.00	0.00	0.00	96.32	99.38	101.23
sep-09	25.00	9.39	0.00	111.71	112.11	112.35
oct-09	33.00	15.99	5.75	136.08	137.36	138.14
nov-09	48.00	29.12	17.75	140.86	136.27	133.50
dic-09	36.00	29.91	26.25	143.89	137.25	133.25
ene-10	57.70	63.04	66.25	135.30	130.06	126.91
feb-10	72.80	65.90	61.75	114.04	107.93	104.26
mar-10	16.80	24.42	29.00	124.51	118.27	114.51
abr-10	5.70	9.01	11.00	108.53	106.04	104.55
may-10	6.30	4.86	4.00	90.05	88.91	88.22
jun-10	0.00	0.00	0.00	82.67	82.54	82.46
jul-10	2.00	0.75	0.00	85.61	88.72	90.59
ago-10	1.00	0.38	0.00	107.86	106.72	106.04
sep-10	0.00	0.00	0.00	114.99	115.98	116.58
oct-10	0.80	1.39	1.75	139.32	135.06	132.49
nov-10	0.10	0.35	0.50	140.41	144.36	146.74
dic-10	52.00	63.08	69.75	137.49	134.54	132.76
ene-11	86.70	84.08	82.50	138.82	132.98	129.47

feb-11	182.00	151.72	133.50	91.13	87.72	85.66
mar-11	23.40	31.89	37.00	113.20	106.64	102.70
abr-11	32.10	22.05	16.00	103.44	101.98	101.10
may-11	13.20	11.98	11.25	90.79	90.89	90.95
jun-11	0.40	0.15	0.00	75.96	75.93	75.91
jul-11	8.10	4.29	2.00	77.18	79.15	80.33
ago-11	0.00	0.00	0.00	96.57	97.60	98.22
sep-11	0.10	0.04	0.00	112.27	112.97	113.39
oct-11	0.10	0.04	0.00	132.51	127.63	124.70
nov-11	7.80	13.20	2.66	154.38	148.10	136.10
dic-11	120.70	135.20	30.50	131.54	156.07	131.25
ene-12	172.30	153.40	42.45	127.73	130.67	122.03
feb-12	102.66	91.40	144.28	99.53	100.75	97.92
mar-12	109.65	97.62	59.32	108.27	126.42	105.39
abr-12	5.63	5.01	4.03	101.68	118.13	99.76
may-12	0.00	0.00	0.00	90.40	103.95	90.12
jun-12	0.00	0.00	0.00	79.22	76.88	80.55
jul-12	0.00	0.00	0.00	81.32	95.27	82.35
ago-12	0.22	0.20	0.00	108.14	109.57	105.28
sep-12	0.22	0.20	0.00	127.21	133.44	121.58
oct-12	5.84	5.20	5.00	145.48	143.62	137.20
nov-12	0.00	0.00	5.25	148.34	129.95	139.65
dic-12	130.97	116.60	143.50	117.47	139.20	113.26
ene-13	174.32	155.20	147.75	119.58	138.01	115.06
feb-13	57.96	51.60	47.75	103.40	123.12	101.23
mar-13	22.91	20.40	17.75	119.59	131.49	115.07
abr-13	0.00	0.00	0.00	113.56	107.44	109.92
may-13	7.64	6.80	9.75	92.13	98.89	91.59
jun-13	12.63	11.24	7.75	69.10	68.32	71.90
jul-13	1.34	1.19	1.75	82.08	75.87	83.00
ago-13	0.00	0.00	0.00	101.37	87.09	99.49
sep-13	0.00	0.00	0.00	120.29	98.09	115.67
oct-13	2.28	2.03	2.25	137.32	107.99	130.23
nov-13	0.00	0.00	0.00	156.61	119.20	146.72
dic-13	160.79	143.15	86.50	127.59	102.33	121.91
ene-14	152.79	136.04	82.25	116.08	95.63	112.06
feb-14	0.00	0.00	0.50	122.90	99.60	117.90
mar-14	0.40	0.36	1.25	133.56	105.80	127.01

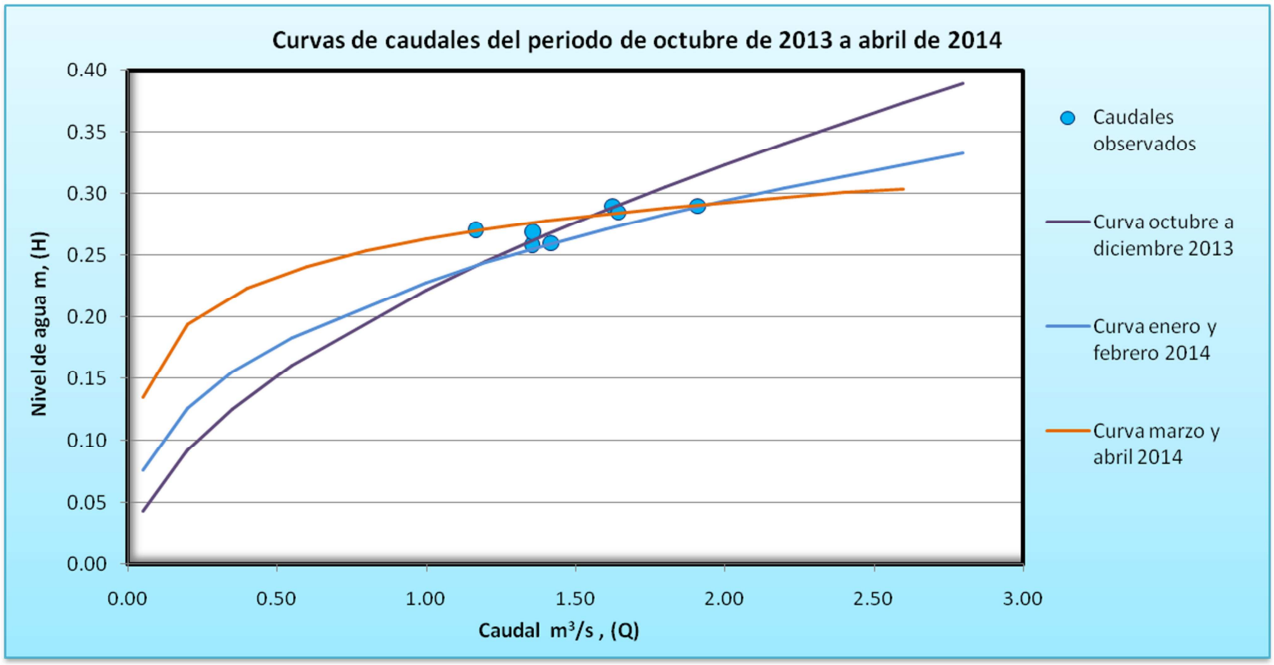
Precipitación futuro				ETo futuro		
periodo	Chungará	Comisario	Sajama	Chungará	Comisario	Sajama
ene-46	55.20	85.29	103.40	152.95	171.48	182.64
feb-46	111.50	59.81	28.70	118.80	146.99	163.95
mar-46	16.30	6.12	0.00	127.78	147.12	158.76
abr-46	16.90	6.35	0.00	109.52	135.60	151.30
may-46	1.40	0.53	0.00	93.72	120.99	137.41
jun-46	0.80	0.30	0.00	84.79	108.31	122.47
jul-46	17.50	6.58	0.00	84.34	114.00	131.85
ago-46	0.70	0.26	0.00	105.71	130.26	145.04
sep-46	0.10	0.04	0.00	121.67	153.97	173.42
oct-46	0.10	8.22	13.10	147.47	174.64	190.99
nov-46	0.00	0.00	0.00	159.03	185.51	201.45
dic-46	53.10	40.80	33.40	137.01	178.84	204.02
ene-47	66.00	66.31	66.50	146.78	169.22	182.73
feb-47	78.70	31.51	3.10	121.41	149.62	166.60
mar-47	29.10	37.84	43.10	123.11	146.24	160.17
abr-47	4.30	1.62	0.00	109.28	131.51	144.89
may-47	4.90	1.84	0.00	92.23	118.16	133.77
jun-47	0.80	0.30	0.00	88.85	115.62	131.73
jul-47	1.80	0.68	0.00	86.99	114.65	131.30
ago-47	1.00	0.38	0.00	111.30	129.97	141.21
sep-47	0.00	0.00	0.00	126.79	155.73	173.14
oct-47	0.60	0.23	0.00	144.00	179.34	200.60
nov-47	3.50	8.31	11.20	157.82	189.40	208.41
dic-47	57.10	35.38	22.30	148.54	176.91	193.99
ene-48	44.20	85.28	110.00	146.89	167.32	179.62
feb-48	154.40	77.99	32.00	108.49	145.33	167.51
mar-48	24.10	37.71	45.90	126.69	153.01	168.85
abr-48	6.70	10.45	12.70	114.90	135.13	147.32
may-48	10.20	3.83	0.00	91.06	115.30	129.89
jun-48	0.40	0.15	0.00	89.62	107.60	118.42
jul-48	1.30	0.49	0.00	88.51	111.43	125.23
ago-48	0.00	0.00	0.00	108.17	131.92	146.22
sep-48	0.00	0.00	0.00	131.73	157.74	173.40
oct-48	0.50	0.19	0.00	141.49	181.90	206.23
nov-48	6.90	11.77	14.70	157.18	191.91	212.81
dic-48	29.90	41.70	48.80	153.13	173.05	185.04

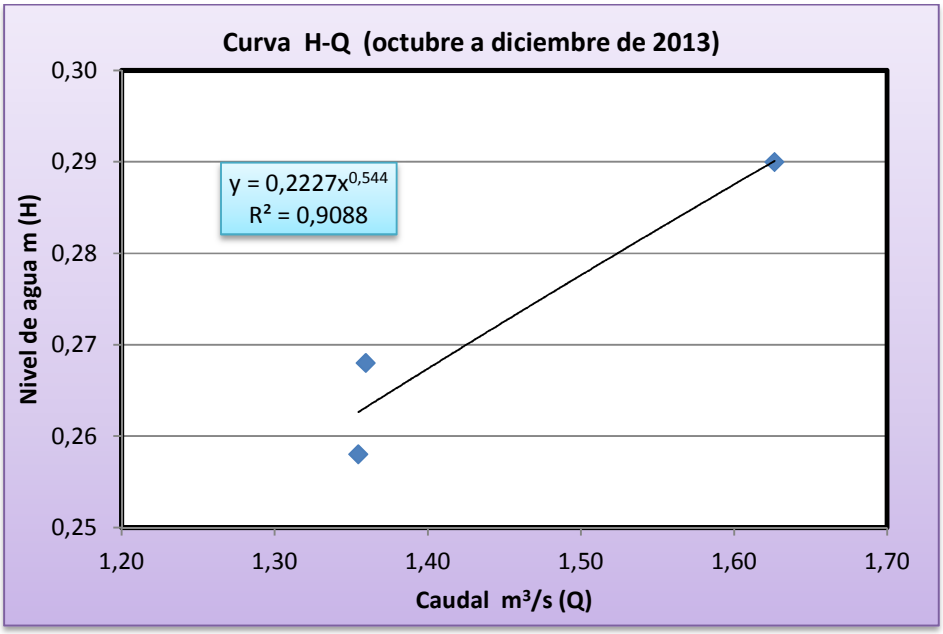
ene-49	58.90	36.86	23.60	146.03	171.20	186.35
feb-49	149.50	62.48	10.10	109.89	142.57	162.24
mar-49	18.90	20.34	21.20	123.21	148.07	163.04
abr-49	48.40	18.19	0.00	111.44	131.22	143.12
may-49	10.20	3.83	0.00	94.25	120.59	136.44
jun-49	0.80	0.30	0.00	86.30	104.65	115.69
jul-49	3.40	1.28	0.00	87.97	110.81	124.56
ago-49	1.40	0.53	0.00	111.08	134.75	149.00
sep-49	0.00	0.00	0.00	118.54	149.86	168.71
oct-49	0.50	0.19	0.00	142.61	180.75	203.71
nov-49	0.00	0.00	0.00	159.04	189.11	207.21
dic-49	60.70	72.25	79.20	136.12	177.23	201.98
ene-50	96.40	42.47	10.00	142.05	172.18	190.32
feb-50	152.20	127.60	112.80	103.38	138.81	160.14
mar-50	13.60	9.73	7.40	122.89	141.67	152.98
abr-50	7.60	2.86	0.00	111.13	134.03	147.81
may-50	1.70	0.64	0.00	97.40	123.94	139.92
jun-50	0.80	0.30	0.00	87.09	110.06	123.89
jul-50	7.80	2.93	0.00	86.80	110.26	124.39
ago-50	0.90	0.34	0.00	107.61	132.27	147.12
sep-50	0.00	0.00	0.00	124.39	156.45	175.74
oct-50	0.70	7.63	11.80	146.02	176.52	194.87
nov-50	0.00	0.00	0.00	165.55	182.15	192.14
dic-50	61.00	30.91	12.80	142.82	174.64	193.80
ene-51	64.50	71.80	76.20	150.39	172.94	186.50
feb-51	107.30	63.17	36.60	114.33	144.80	163.13
mar-51	19.60	43.38	57.70	125.57	147.98	161.46
abr-51	23.30	8.76	0.00	111.62	130.95	142.59
may-51	10.00	3.76	0.00	94.99	120.57	135.97
jun-51	0.80	0.30	0.00	83.65	112.77	130.29
jul-51	11.20	4.21	0.00	90.64	117.44	133.58
ago-51	1.10	36.68	58.10	107.05	131.07	145.52
sep-51	0.00	0.00	0.00	125.33	152.10	168.22
oct-51	0.60	0.23	0.00	144.68	175.44	193.96
nov-51	11.40	16.02	18.80	157.88	184.47	200.48
dic-51	75.90	54.43	41.50	140.91	178.99	201.91
ene-52	81.20	94.50	102.50	147.83	170.68	184.43
feb-52	154.60	66.27	13.10	110.38	134.90	149.66
mar-52	19.30	43.27	57.70	124.86	148.24	162.32
abr-52	13.20	4.96	0.00	106.17	131.20	146.27
may-52	1.50	0.56	0.00	93.05	121.23	138.20

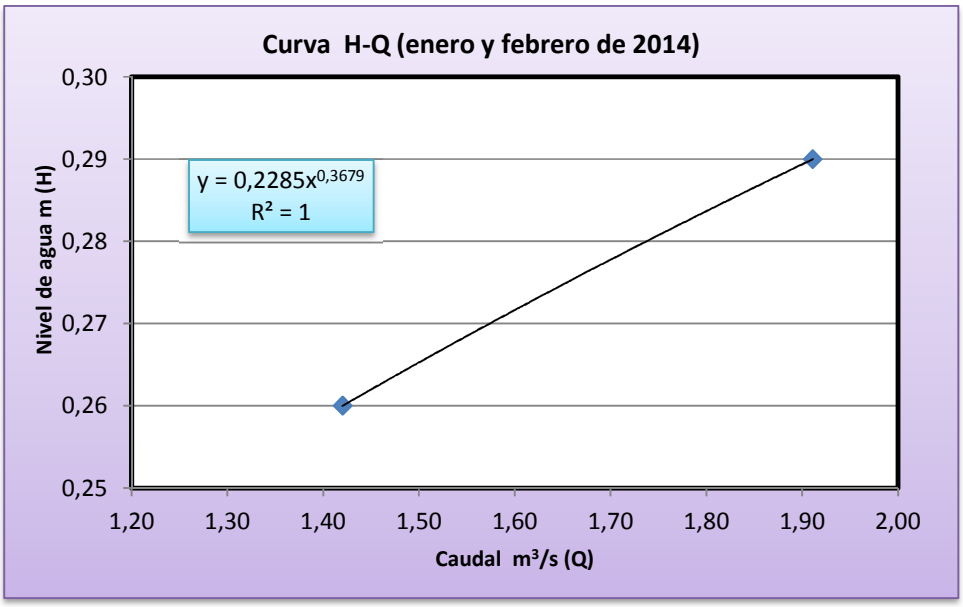
jun-52	0.00	0.00	0.00	85.22	108.00	121.72
jul-52	1.70	0.64	0.00	86.91	111.42	126.18
ago-52	0.70	36.53	58.10	105.95	132.88	149.09
sep-52	0.10	0.04	0.00	117.85	148.95	167.67
oct-52	0.20	0.08	0.00	149.17	179.98	198.53
nov-52	5.80	4.18	3.20	162.36	193.03	211.49
dic-52	62.20	89.17	105.40	150.22	174.05	188.39
ene-53	70.70	129.25	164.50	151.78	164.43	172.04
feb-53	170.90	91.31	43.40	113.62	143.73	161.85
mar-53	17.40	22.33	25.30	122.46	144.43	157.66
abr-53	17.80	6.69	0.00	108.95	134.39	149.70
may-53	3.70	1.39	0.00	94.61	123.44	140.79
jun-53	0.80	0.30	0.00	85.57	112.40	128.55
jul-53	1.40	0.53	0.00	87.86	111.16	125.19
ago-53	1.40	0.53	0.00	107.53	131.40	145.76
sep-53	0.00	0.00	0.00	121.08	150.03	167.46
oct-53	0.40	7.33	11.50	141.50	175.27	195.60
nov-53	0.00	28.78	46.10	157.82	188.57	207.07
dic-53	63.60	38.26	23.00	141.78	169.77	186.62
ene-54	67.90	92.93	108.00	145.82	168.94	182.86
feb-54	155.40	88.36	48.00	107.37	141.04	161.31
mar-54	14.60	34.51	46.50	125.88	151.13	166.33
abr-54	9.60	3.61	0.00	109.35	135.73	151.61
may-54	3.80	1.43	0.00	93.54	121.78	138.78
jun-54	0.40	0.15	0.00	82.77	113.17	131.47
jul-54	0.90	0.34	0.00	86.83	116.14	133.79
ago-54	0.00	0.00	0.00	107.29	131.92	146.75
sep-54	0.00	0.00	0.00	122.68	150.31	166.93
oct-54	0.40	0.52	0.60	144.81	180.53	202.03
nov-54	1.80	12.10	18.30	162.54	181.48	192.88
dic-54	83.20	78.64	75.90	149.97	175.24	190.44
ene-55	68.90	59.60	54.00	152.24	169.40	179.74
feb-55	146.40	123.99	110.50	110.28	140.27	158.31
mar-55	21.80	55.13	75.20	127.78	145.80	156.64
abr-55	19.60	7.36	0.00	109.12	133.78	148.61
may-55	3.60	1.35	0.00	93.82	123.42	141.24
jun-55	0.00	0.00	0.00	88.90	115.46	131.44
jul-55	0.00	0.00	0.00	87.31	113.18	128.75
ago-55	0.00	0.00	0.00	109.60	134.95	150.20
sep-55	0.00	0.00	0.00	122.35	150.28	167.09
oct-55	0.50	2.75	4.10	139.41	177.80	200.91

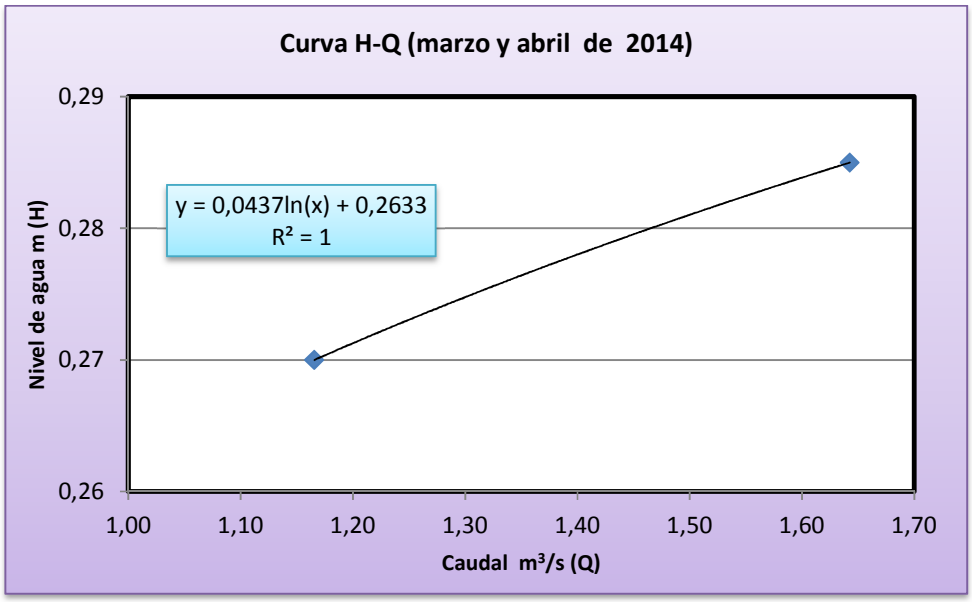
nov-55	0.00	0.00	0.00	156.64	178.91	192.32
dic-55	45.30	17.02	0.00	148.56	177.60	195.08

Anexo 2. *Representación grafica de las tres curvas de calibración de caudales construidas para el periodo octubre de 2013 a abril de 2014, en el punto de control rio Sajama- Puente y detalle de datos extrapolados. Los puntos de tamaño grande indican datos medidos.*

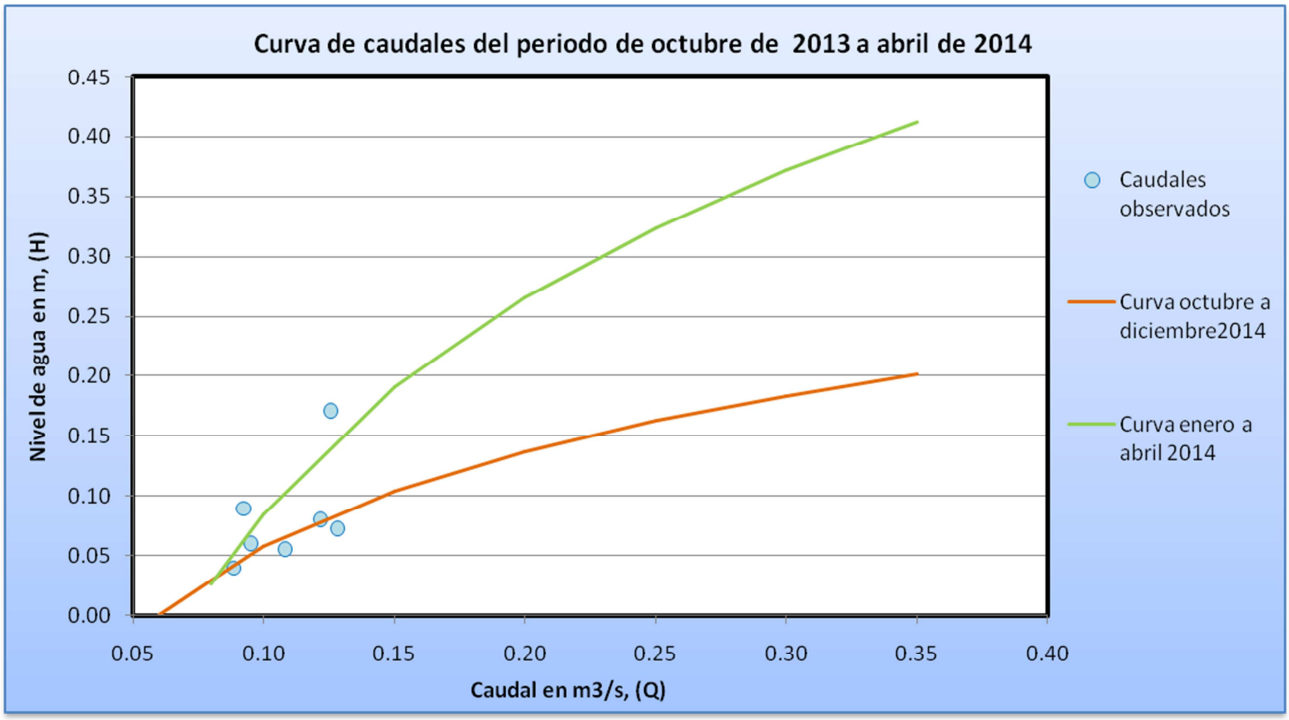


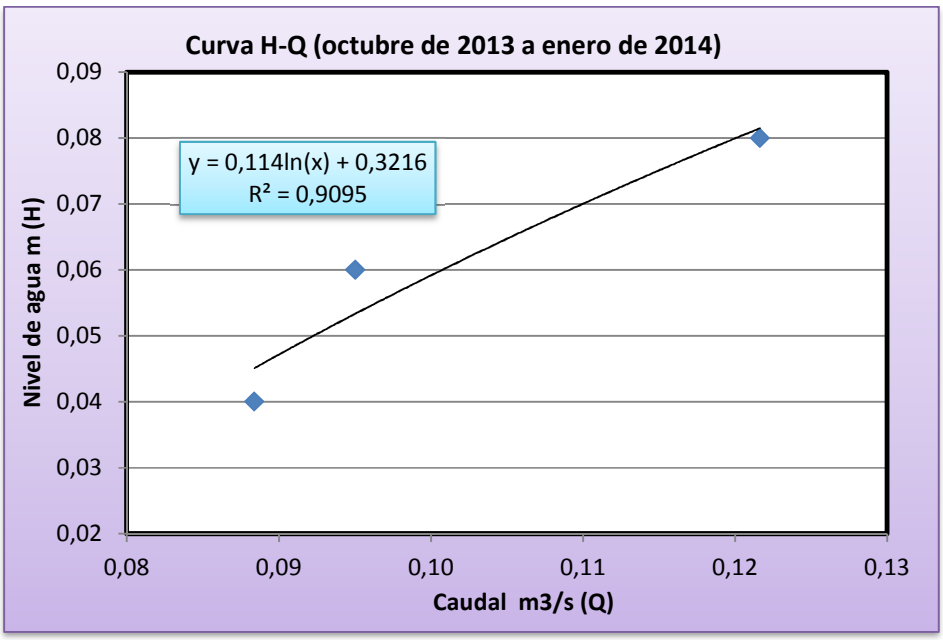


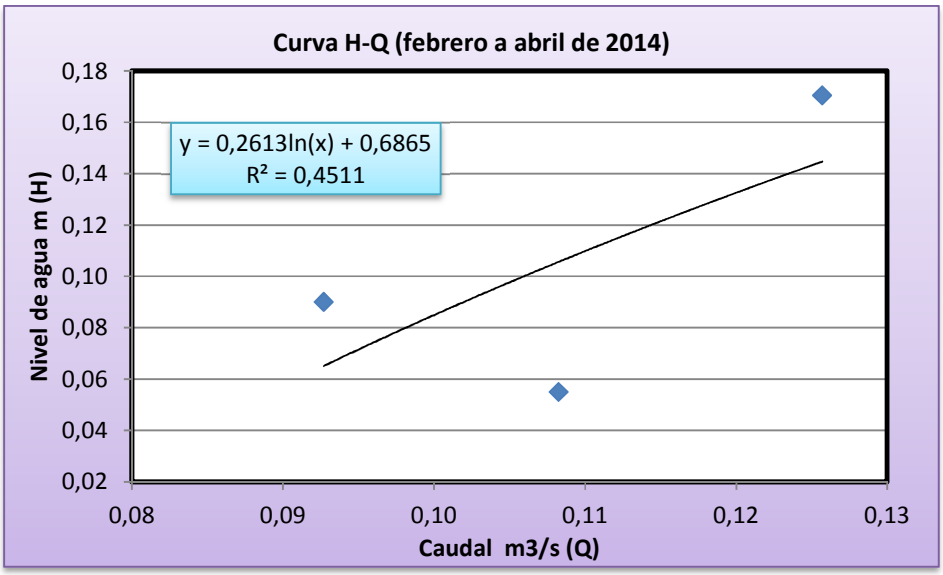

Curva H-Q (enero y febrero de 2014)
y = 0,2285x^0,3679
R² = 1
Nivel de agua m (H)
0,30
0,29
0,28
0,27
0,26
0,25
1,20
1,30
1,40
1,50
1,60
1,70
1,80
1,90
2,00
Caudal m³/s (Q)


Curva H-Q (marzo y abril de 2014)
y = 0,0437ln(x) + 0,2633
R² = 1
Nivel de agua m (H)
0,29
0,28
0,27
0,26
1,00
1,10
1,20
1,30
1,40
1,50
1,60
1,70
Caudal m³/s (Q)

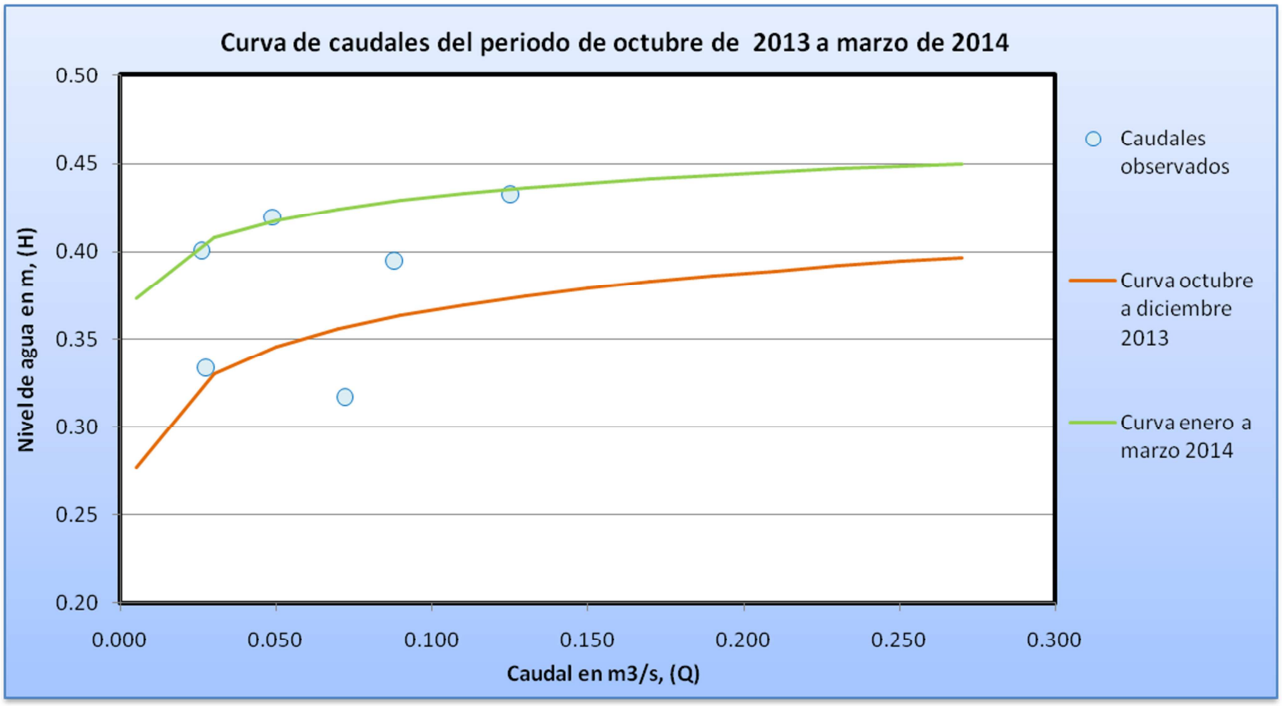
Anexo 4. *Representación grafica de las dos curvas de calibración de caudales construidas para el periodo octubre de 2013 a abril de 2014, en el punto de control rio Juntuma aguas arriba y detalle de datos extrapolados. Los puntos de tamaño grande indican datos medidos.*

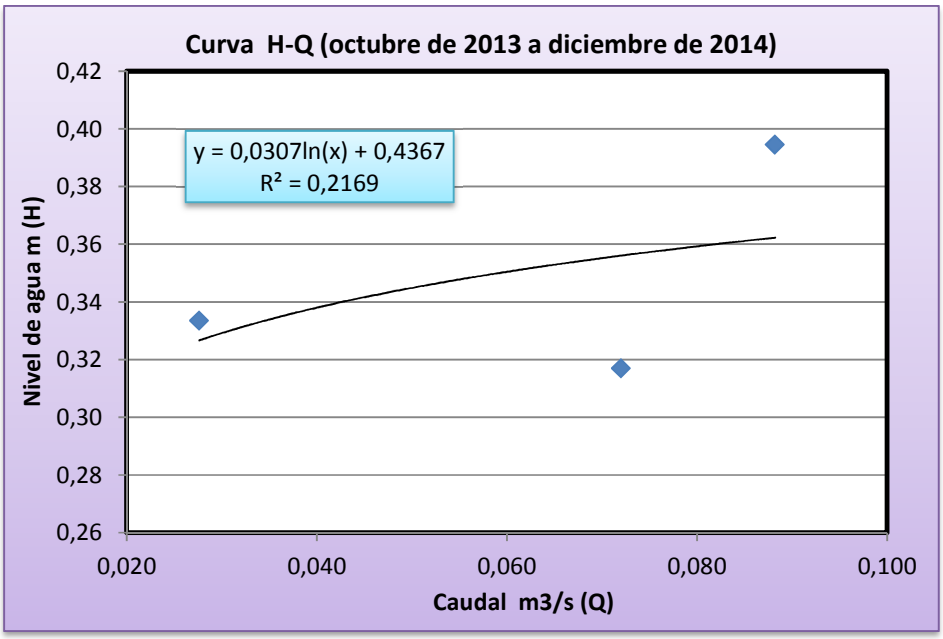


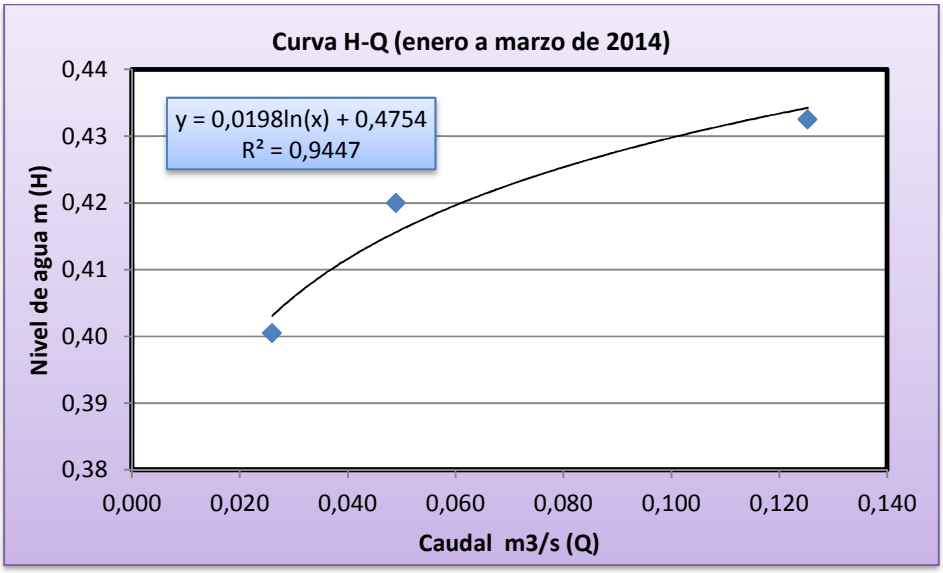




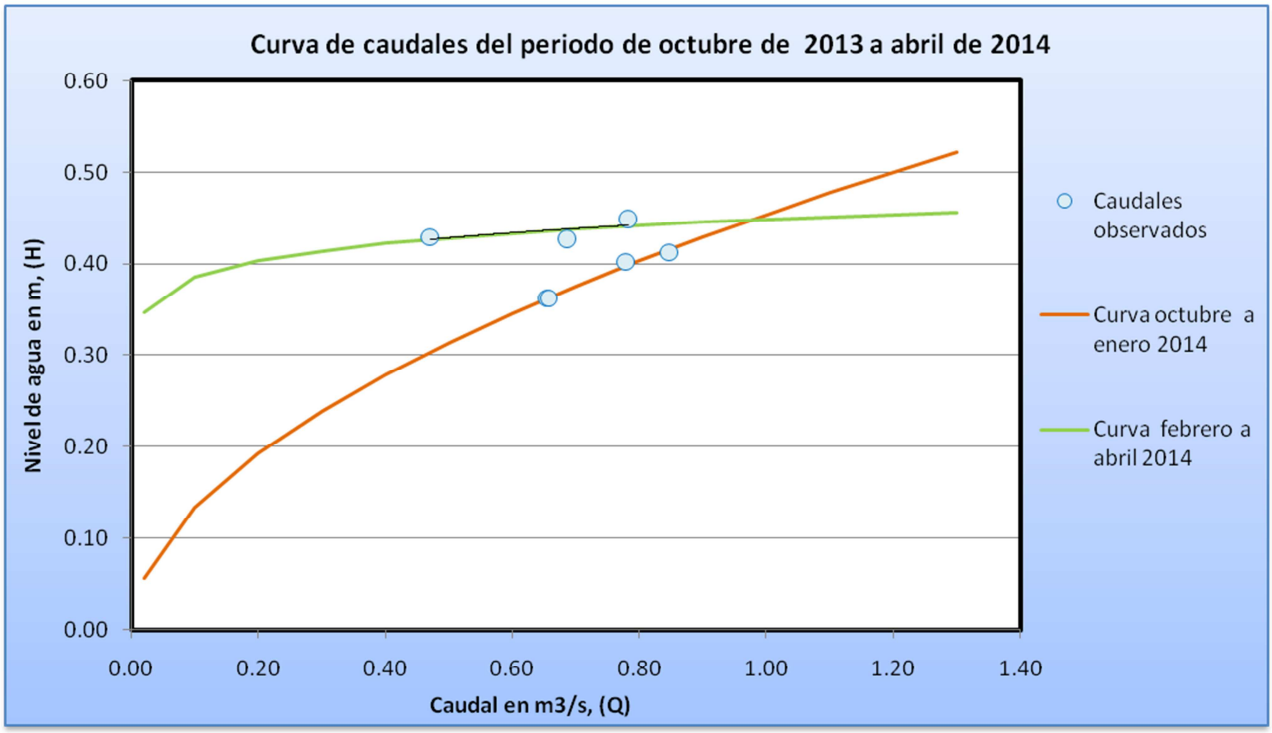
Anexo 5. *Representación grafica de las dos curvas de calibración de caudales construidas para el periodo de octubre de 2013 a abril de 2014, en el punto de control rio Taypijahuira detalle de datos extrapolados. Los puntos de tamaño grande indican datos medidos.*

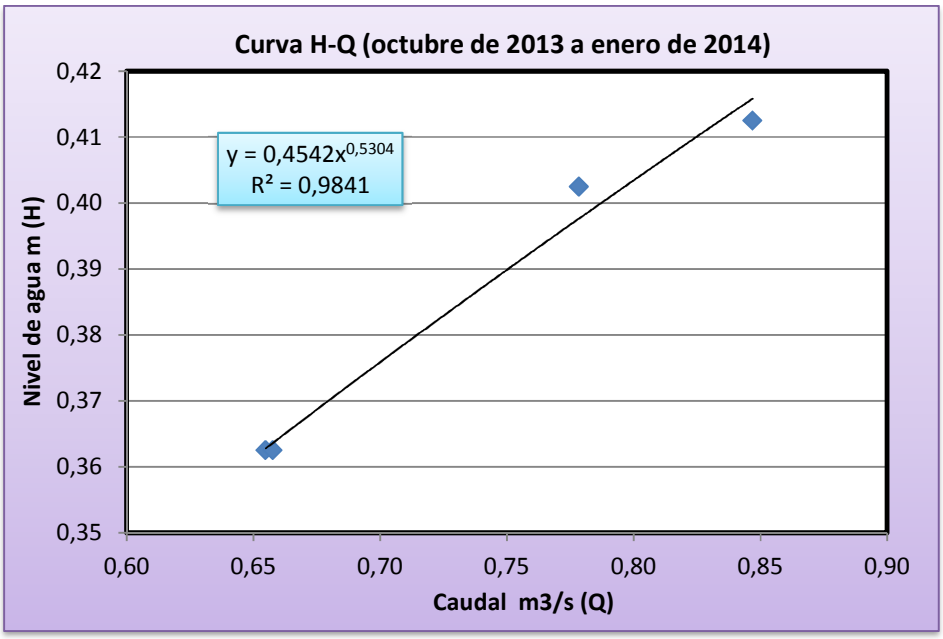


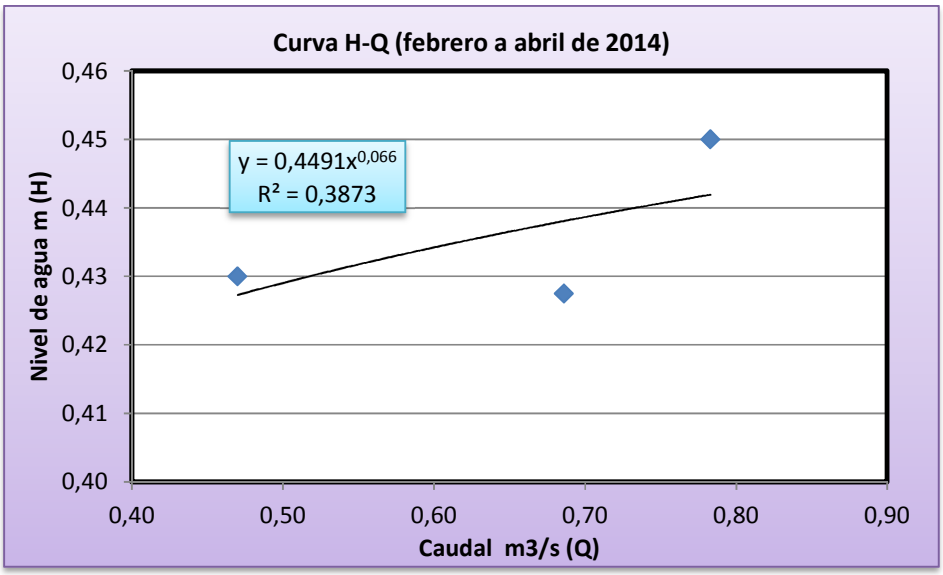

Curva H-Q (octubre de 2013 a diciembre de 2014)
y = 0,0307ln(x) + 0,4367
R² = 0,2169
Nivel de agua m (H)
0,42
0,40
0,38
0,36
0,34
0,32
0,30
0,28
0,26
0,020
0,040
0,060
0,080
0,100
Caudal m3/s (Q)


Curva H-Q (enero a marzo de 2014)
y = 0,0198ln(x) + 0,4754
R² = 0,9447
Nivel de agua m (H)
0,44
0,43
0,42
0,41
0,40
0,39
0,38
0,000
0,020
0,040
0,060
0,080
0,100
0,120
0,140
Caudal m3/s (Q)

Anexo 6. *Representación grafica de las dos curvas de calibración de caudales construidas para el periodo de octubre de 2013 a abril de 2014, en el punto de control rio Pisirata detalle de datos extrapolados. Los puntos de tamaño grande indican datos medidos.*







Anexo 7. *Fotografías de los puntos de control de las subcuencas del presente estudio.*

Imagen 1. Fotografía del punto de aforo del rio Taypijahuira, y ubicación el tubo que contiene el sensor

Imagen 2. Fotografía del punto de aforo del rio Sajama – Puente, y ubicación el tubo que contiene el sensor

Imagen 3. Fotografía del punto de aforo del rio Pisirata, y ubicación el tubo que contiene el sensor