PROYECTO: ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN COMUNIDADES ANDINASBOLIVIANAS QUE DEPENDEN DE GLACIARES TROPICALES

ANEXO AL INFORME FINAL

Nordic Climate Facility

La Paz, Bolivia

ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LOS POTENCIALES IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA OFERTA DE AGUA EN MICRO CUENCAS SELECCIONADAS SITUADAS EN EL PARQUE NACIONAL SAJAMA:

PRODUCTO F – INFORME FINAL

ESTABLECIMIENTO DE LA RED DE MONITOREO EN MICROCUENCAS DEL PARQUE NACIONAL SAJAMA, BOLIVIA

FREDDY SORIA CESPEDES
Ingeniero civil-ambiental (M Ing., PhD)

CONSULTOR INDEPENDIENTE, ONG AGUA SUSTENTABLE

LA PAZ, NOVIEMBRE DE 2012

CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCION.	3
Acerca de la sostenibilidad de la red	3
2. RED DE MONITOREO HIDROLÓGICO PROPUESTA: ESQUEMA Y JUSTIFICACIÓN.	4
Fuentes de aporte de agua a la cuenca del Río Sajama	4
3. INSTRUMENTOS INSTALADOS.	5
4. CUENCA PILOTO: ESTADO DE LA RED DE MONITOREO.	6
Lisímetros	6
Piezómetros	7
Vertederos en la cuenca piloto y sensor de nivel de agua a la salida de la cuenca piloto	7
5. ESTACIÓN CLIMÁTICA CERRO COMISARIO	8
AGRADECIMIENTOS	9
6. REFERENCIAS	9
ANEXO 1. Un corto manual para aforar caudales usando el método tradicional de área-velocidad.	10
ANEXO 2. Calidad de los datos adquiridos por los sensores.	16

ESTABLECIMIENTO DE LA RED DE MONITOREO
EN MICROCUENCAS DEL PARQUE NACIONAL SAJAMA, BOLIVIA

Freddy Soria Céspedes

1 INTRODUCCION.

El "Estudio hidrológico de los potenciales impactos del cambio climático en la oferta de agua de micro cuencas seleccionadas situadas en el Parque Nacional Sajama" es componente importante para el logro de los alcances y objetivos del proyecto titulado "Adaptación al Cambio Climático en Comunidades Andinas Bolivianas que Dependen de Glaciares Tropicales", ejecutado por Agua Sustentable. Para el objeto, en cumplimiento del Objetivo Específico F, se realiza *la implementación y establecimiento de la red de monitoreo de las micro cuencas del área de estudio*. El objetivo de la red de monitoreo hidro-climático se explica a través del título que da lugar a la implementación de la presente Consultoría. Para el logro del Objetivo Específico F fue fundamental el soporte económico del Proyecto, el apoyo logístico de la ONG Agua Sustentable, el apoyo técnico en gabinete y en campo de CUSO International a través de Mathieu Beaulieu, y el apoyo y asesoramiento eventual del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI-Bolivia. Como producto de aquel trabajo conjunto, el presente Informe muestra los resultados de la implementación de la red presentando el esquema de la distribución de los instrumentos que constituyen la red, la correspondiente justificación del tipo de red de monitoreo instalada y el tipo de instrumentos instalados en la red. El presente documento concluye presentando series de tiempo de la información hasta el momento obtenida.

La información generada tiene alta relevancia desde una perspectiva práctica-ingenieril y científica hacia la planificación en el uso de los recursos hídricos de la zona y su área de influencia. El objetivo principal de este emprendimiento es el de incrementar el potencial del conocimiento generado para el estudio de los potenciales efectos del cambio climático en cuencas Andinas y zonas de montaña, y el fomento del estudio y planificación de las correspondientes medidas de adaptación y mitigación, tanto para el tiempo presente como para un eventual tiempo futuro bajo escenarios de cambio climático.

Acerca de la sostenibilidad de la red

En noviembre de 2012, el personal de Agua Sustentable evaluó los resultados obtenidos a través de la red de monitoreo instaurada y concluyó que debido al alto valor de la información recopilada, la inversión realizada justifica y demanda desde todo punto de vista el desarrollo de un plan que asegure la sostenibilidad de la red. Es a través de aquel análisis que en noviembre de 2012 se decidió continuar con la campaña de monitoreo instaurada a inicios del proyecto. Tal mejora incluye la instauración de una estación hidrométrica automática a la salida de la cuenca en el Puente Sajama, la ampliación del tiempo de monitoreo de la red con el objetivo de capturar los picos del hidrograma del año hidrológico 2012-2012, y además la extensión del apoyo técnico para el estudio de aquellos resultados como herramienta de evaluación de las herramientas que están siendo desarrolladas para el estudio de la oferta de agua de la cuenca del Río Sajama. Adicionalmente con el objeto de asegurar la sostenibilidad de la red de monitoreo implementada y principalmente con el objeto de incrementar el potencial de la valiosa información generada, se procederá a entrenar al personal de Guarda Parques para el monitoreo periódico de la red de monitoreo instaurada. Los resultados de esta última etapa tiene alta relevancia en el presente

proyecto y la evaluación de sus resultados serán presentados como Anexo al presente Informe luego de la entrega del mismo.

2 RED DE MONITOREO HIDROLOGICO PROPUESTA: ESQUEMA Y JUSTIFICACION.

El aspecto más interesante y a la vez el más complejo en la tarea de describir la respuesta hídrica superficial y sub superficial de la cuenca del Río Sajama es la heterogeneidad espacio-temporal de aquella respuesta, inducida por la compleja configuración geológica y geomorfológica evidenciada a través de cartas geológicas y de visitas realizadas al lugar. Tal heterogeneidad introduce alta complejidad en el proceso de regionalización de los resultados, obliga al profesional encargado de su estudio a monitorear cada una de las fuentes de agua a partir de las cuales se desarrollan los tributarios respectivos, y justifica el porqué para el presente proyecto se propuso el diseño de una red de monitoreo espacialmente extensa.

Fuentes de aporte de agua a la cuenca del Río Sajama

Se propone realizar el estudio de la oferta de agua desde una perspectiva de cuenca, tomando la cuenca del Río Sajama como la unidad que representa la respuesta hídrica del sistema. El monitoreo se realiza en campo, en los tributarios que presentan cursos permanentes de agua superficial, omitiendo el monitoreo de cursos superficiales transitorios debido a limitada información acerca del régimen hídrico superficial y sub superficial. La implementación de la red de monitoreo se realiza bajo los lineamientos propuestos en guías especializadas (OMM, 1994; MESI, 2009). Bajos las consideraciones descritas, las principales fuentes de aporte de agua al sistema se describen brevemente a continuación.

i) Manantiales de los bofedales de la parte baja del valle.- Constituyen fuentes naturales de agua que brotan en sitios aislados a lo largo del perímetro que define los bordes de los bofedales andinos de la parte baja del valle. Estos bofedales también almacenan las aguas de origen pluvial que escurren por las laderas del Volcán Sajama y la cadena montañosa representada por los cerros Parinacota (glaciar), Pomerape, y Condoriri. Adicionalmente, es probable que una parte de los aportes de los glaciares, en forma de agua líquida, también escurra y se almacene en los bofedales.

ii) Géiseres y manantiales que nacen en los cerros de la cadena montañosa del cerro Parinacota.- Constituyen aportes que brotan a través de las fallas características de aquellas formaciones volcánicas. La importancia de tales aportes es que, a diferencia de otras zonas de la región de estudio donde existe ausencia de cursos superficiales permanentes que escurran por las laderas, en la zona de los géiseres y manantiales de altura se desarrollan cursos superficiales permanentes que transportan agua desde las partes altas del valle (en las intersecciones de los cerros), hasta la parte baja del valle donde se desarrollan los bofedales.

iii) Río Sajama y otros tributarios.- El Río Sajama constituye el colector principal de los aportes de la cuenca. Este Río recibe aportes desde los manantiales que alimentan los bofedales (agua precipitada más el aporte glaciar) los cuales se espera sean a su vez regulados por los mismos bofedales, desde los aportes de los cursos permanentes originados en los géiseres y manantiales, y probablemente desde acuíferos subsuperficiales cuyas tasas potenciales de aporte son desconocidas.

3 INSTRUMENTOS INSTALADOS.

Los instrumentos para el monitoreo fueron seleccionados en función a experiencias previas, a las características del área de estudio, a la velocidad de la respuesta hídrica esperada y a la distancia entre el sitio de monitoreo y las poblaciones cercanas. A continuación se presenta una breve descripción de los instrumentos de monitoreo junto con un esquema de su distribución espacial (Figura 1).

i) En cursos superficiales de agua donde la velocidad de la respuesta hídrica esperada es rápida, es decir donde se espera variaciones en los niveles de agua a escala horaria, se instalaron sensores de nivel de agua de registro automático cada 10 min del tipo HOBO U20 Water Level Logger. El sensor mide valores de presión absoluta que por consideraciones simples propios de la ley hidrostática de presiones se convierten a valores de nivel de agua.
Los sensores fueron colocados en nueve sitios, dentro de tubos de fierro fundido de 10 cm de diámetro, para proteger al sensor contra material flotante y para aislar las fluctuaciones causadas por la turbulencia de los ríos. El tubo de fierro fundido tiene perforaciones cada 10 cm, distribuidas circularmente para permitir el ingreso del agua. Para evitar la entrada de material fino, el tubo se protegió con malla milimétrica doble. Los tubos son instalados en el lecho del río o canal mediante hincado manual.

ii) En cursos superficiales de agua donde la velocidad de la respuesta hídrica esperada es lenta, es decir donde se espera que las variaciones del nivel del agua ocurran en intervalos de tiempo mayores a seis horas, se instalaron inicialmente únicamente reglas limnimétricas plásticas graduadas al milímetro. Las tres reglas instaladas fueron fijadas a tubos de fierro fundido de 10 cm de diámetro, hincados manualmente en el lecho del río. La frecuencia de lectura de las reglas es de una vez al mes.

iii) Para el monitoreo de la variabilidad de los niveles del agua almacenada sobre la superficie y entre las capas de suelo saturadas de los bofedales que se desarrollan en valle principal del área de estudio, se instalaron ocho piezómetros para el estudio del gradiente hidráulico. Para el efecto, siguiendo el esquema de instalación para la cuenca piloto del bofedal de altura (cuenca piloto), se instalaron piezómetros distribuidos en tres transversales. La primera transversal estará situada en una sección aguas arriba de la planicie (donde en teoría se sitúa el área de recarga), la segunda transversal situada en la sección media del bofedal, y la tercera transversal situada en la sección aguas debajo de la planicie. En ausencia del apoyo de comunarios para la lectura de los mismos, el monitoreo se realiza con frecuencia mensual a través del personal técnico de Agua Sustentable.
La transformación de los niveles de agua medidos por los sensores automáticos instalados en el lecho de los ríos se realiza mediante aforos con molinete, en campañas realizadas cada 15 a 30 días a partir de marzo de 2012.

iv) Adicionalmente a los instrumentos señalados, para el monitoreo de las variaciones del nivel de agua en la cuenca piloto se cuenta con una red de 12 piezómetros y 9 lisímetros instalados por los responsables de Consultorías paralelas e independientes a la presente Consultoría. Igualmente, trabajos previos a la ejecución de la presente Consultoría procedieron a construir tres vertederos en la cuenca piloto, cuyo funcionamiento no logró efectivizarse debido a obstáculos introducidos por las condiciones fluviogeomorfológicas locales. Breves comentarios al respecto se presentan luego en este documento.

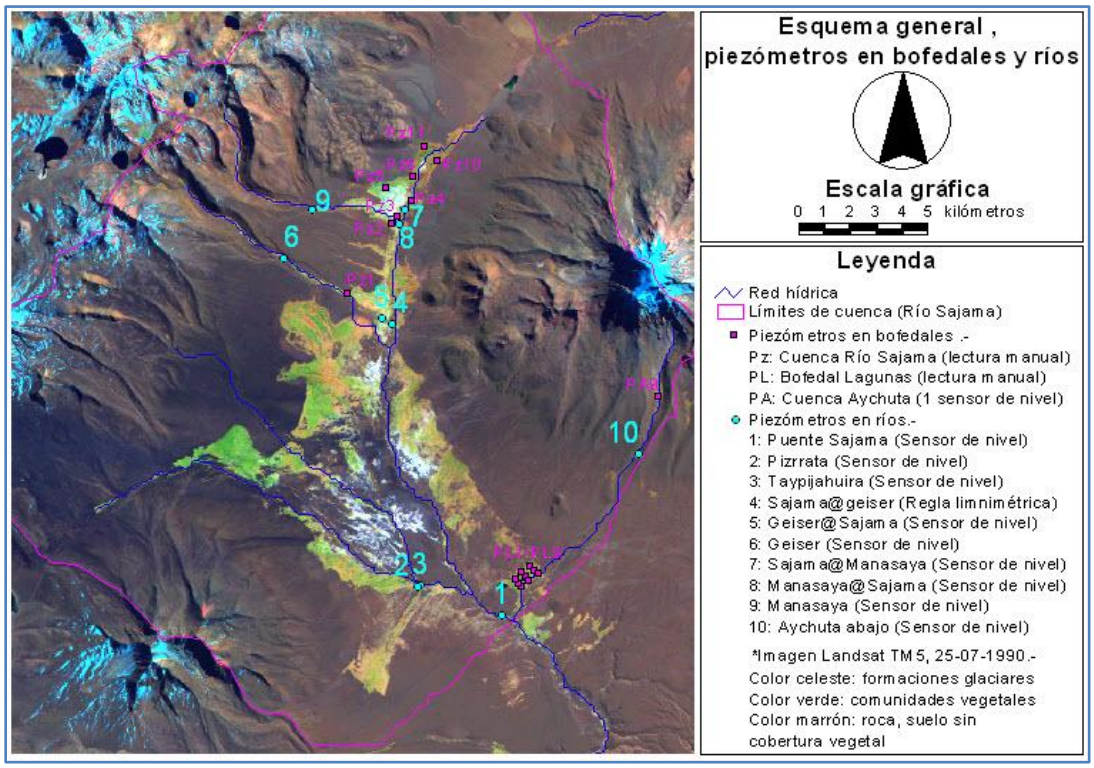


Figura 1. Esquema de la red de monitoreo instalada. En la red se observan los sensores, reglas limnimétricas y piezómetros instalados en bofedales y ríos tributarios de la cuenca del Río Sajama.

4 CUENCA PILOTO: ESTADO DE LA RED DE MONITOREO.

La cuenca Aychuta se sitúa en la parte alta del área de estudio. Esta cuenca fue el primer sitio donde se instalaron los instrumentos de monitoreo debido a que es probablemente la única que presenta un curso fluvial permanente que se desarrolla desde el término del glaciar hasta el pié de la montaña que acoge los glaciares del Sajama. De acuerdo a información proporcionada por técnicos de Agua Sustentable, los instrumentos de monitoreo se instalaron entre el periodo marzo de 2011 a octubre de 2011. Los instrumentos instalados en la cuenca así como los criterios bajo los cuales se realizó la instalación se describe a continuación.

4.1 Lisímetros.

Por comunicación de los técnicos de Agua Sustentable, se conoce que se instalaron 9 lisímetros. en la consultoría realizada por Horacio Lorini (sin referencia), con el objetivo de *caracterizar la respuesta de bofedales a los cambios climáticos a través del tiempo y su participación en el balance hídrico del Parque Nacional Sajama, comparando su importancia en el ciclo hidrológico en relación a otras comunidades vegetales*. Los criterios de selección de los equipos y los criterios de su instalación se describen en el documento del consultor mencionado, cuya publicación aún no fue efectiva. En comunicación con el consultor, se conoció que la lectura de los instrumentos se realiza con frecuencia mensual (en fecha 30 de cada mes). El periodo de monitoreo es de noviembre de 2011 al presente y se espera conocer los resultados finales una vez entregado el informe final de la consultoría correspondiente.

4.2 Piezómetros.

Por comunicación de los técnicos de Agua Sustentable, se conoce que en Aychuta se instalaron 9 piezómetros el año 2011. Los instrumentos están distribuidos en 3 transversales, con tres piezómetros instalados por transversal. La primera transversal está situada aguas arriba del bofedal (cerca del término del glaciar), la segunda se sitúa en la parte media del bofedal, y la tercera se sitúa aguas abajo del bofedal. Los piezómetros fueron instalados para estudiar el rol de los bofedales en la regulación hídrica de la cuenca Aychuta, justificando la distribución espacial de los instrumentos.

Los piezómetros están constituidos por tubos de PVC de aproximadamente 2.5 m de longitud, introducidos mediante hincado manual en los bofedales de la cuenca. Debido a que la cuenca se encuentra en un lugar remoto, se dispuso la instalación de dos sensores de presión para medir el nivel de agua en uno de los piezómetros. Por razones económicas, se dispuso que en los restantes ocho piezómetros, las lecturas piezométricas se realicen manualmente, mediante la introducción de reglas graduadas hasta llegar al nivel donde se encuentre el nivel de agua. De acuerdo a los técnicos de Agua Sustentable, los ocho piezómetros que no contienen sensores de presión se leen con frecuencia mensual. Se espera que los resultados permitan estudiar el gradiente hidráulico y la direcciones de flujo una vez que los resultados parciales del monitoreo sean analizados una vez entregado el informe final de la consultoría correspondiente.

4.3 Vertederos en la cuenca piloto y sensor de nivel de agua a la salida de la cuenca piloto.

Por comunicación de técnicos de Agua Sustentable, en noviembre de 2011 se terminaron de instalar tres vertederos de cresta ancha en los principales cursos de agua superficiales de la cuenca. El objetivo de los vertederos fue el monitoreo de los caudales en tres cursos de agua, mediante sensores automáticos de nivel de agua. En visita realizada en fecha 15 de mayo de 2012, se evidenció que ninguno de los vertederos cumple sus funciones debido a la colmatación de sus estructuras, dificultando la creación de una sección de control. En consecuencia, tales estructuras no fueron aprovechadas y fueron abandonadas debido a que no fue posible recolectar argumentos válidos que justifiquen su reconstrucción. Para solucionar tal problema, a la salida de la cuenca a aproximadamente 1.5 km aguas abajo del vertedero 3 se instaló un sensor de nivel de agua bajo las mismas consideraciones de los instrumentos instalados en la parte baja de la cuenca del Río Sajama.

Figura 2. Vertedero en la cuenca piloto. La alta carga de material de arrastre de fondo y en suspensión inutilizó la estructura. (Fotografía: M. Beaulieu, 2012).

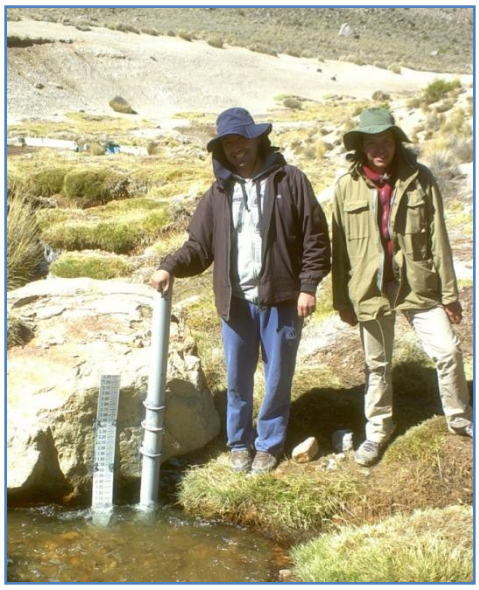


Figura 3. Estación de monitoreo de niveles de agua (mediante piezómetro), instalada por un proyecto ajeno al presente. Al fondo (izquierda, aguas abajo) se observa el vertedero No. 3. La distancia aproximada entre el vertedero y el piezómetro mostrado es de 50 m (Fotografía: M. Beaulieu, 2012).

5 ESTACION CLIMÁTICA, CERRO COMISARIO.

Dentro de la cuenca del Río Sajama existen dos estaciones climáticas. La primera es la estación situada en el pueblo Sajama a una altitud aproximada de 4255 msnm, monitoreada por el SENAMHI-Bolivia, con registros disponibles para el periodo 1978-1985 y 2005-2012. La segunda estación fue instalada por Agua Sustentable sobre el cerro Comisario, a una altitud aproximada de 4350 msnm, a 8 km en dirección sud-oeste del término del glaciar situado aguas arriba de la cuenca piloto Aychuta, y registros disponibles desde noviembre de 2011. De acuerdo a información

proporcionada por los técnicos de Agua Sustentable, el emplazamiento de la estación se realizó en una colina elevada situada frente a la cuenca Aychuta, en dirección sud-oeste del Nevado Sajama, debido a que el objetivo inicial del estudio estaba concentrado en la descripción de las condiciones hidro-climáticas de aquella cuenca. Las variables climáticas medidas en aquel sitio tienen gran utilidad debido a la ausencia de registros similares que permitan establecer de manera aproximada los gradientes adiabáticos, por ejemplo. Esta estación de marca Hobo es de captura automática de datos, con capacidad de registro de información de las siguientes variables (cada 60 min):

a) Temperaturas máximas y mínimas.
b) Humedad relativa de ambiente.
c) Precipitación total.
d) Dirección y velocidad del viento.
e) Radiación global.

La estación no adquiere información de presión barométrica.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado a solicitud de la ONG Agua Sustentable. La ejecución se realizó con el apoyo del personal técnico de la ONG, y el valioso apoyo técnico y logístico de CUSO-Canadá a través del voluntario Mathieu Beaulieu. La descripción detallada de las personas involucradas en el mismo es extensa, por lo cual los agradecimientos son generales. Los detalles acerca de las fuentes de financiamiento pueden consultarse en la Propuesta del Proyecto.

6 REFERENCIAS

MESI (Ministry of Environment, Science and Information), 2009. Estándar hidrométrico de British Columbia. Resources Information Standards Committee, British Columbia.

Organización Meteorológica Mundial (OMM), 1994. Guía de prácticas hidrológicas. Quinta edición, WMO-No. 168.

ANEXO 1. Un corto manual para aforar caudales usando el método tradicional de área-velocidad.

Un corto manual para aforar caudales usando el método tradicional de área-velocidad

Preparado para los técnicos de campo de Agua Sustentable, Bolivia

Preparado por: Mathieu Beaulieu, M.Sc. hidrólogo

Revisión técnica y corrección a la traducción:

Freddy Soria, M.Ing., PhD, Ingeniero civil e hidrólogo

Mayo 2012

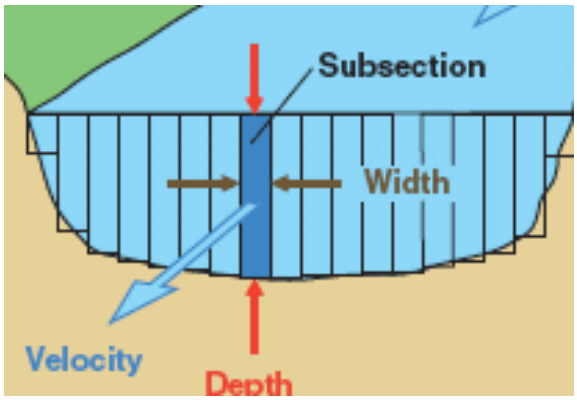
Teoría.

La medición del flujo mediante el método "área-velocidad" es uno de los más utilizados. Los principios del método son simples pero es importante comprenderlo bien. Básicamente, la velocidad del agua (usualmente medida con un molinete) se multiplica por el área de la sección en estudio; el resultado de la multiplicación es el caudal (Q) en la sección donde se midió la velocidad. En este método se asume que el flujo, representado por vectores de velocidad, es un flujo **"laminar"** (i.e., cada capa que fluye por la sección se desplaza una sobre otra, lámina sobre lámina); por esta razón, las secciones con flujo turbulento (con muchas ondas), irregulares (con muchas rocas y flujo en ángulo) y con mucha energía cinética (velocidad del agua demasiado alta) son indeseables. Si encontrase una sección que usted juzga indeseable, la mejor solución es buscar una mejor sección – comúnmente podría encontrar una mejor sección a solamente 2 minutos de caminata. Bajo este contexto, es fácil entender que el cálculo de Q considera la siguiente ecuación:

$$Q\ (m^3 \cdot s^{-1}) = \text{área}\ (m^2) \cdot \text{velocidad}\ (m \cdot s^{-1}) \qquad \textbf{Ec.1}$$

Si la velocidad del agua en el río es perfectamente uniforme y la sección es exactamente rectangular, los datos para hallar Q son pocos: la profundidad multiplicada por el ancho de flujo (igual al área), y la velocidad del agua medida en un punto. Desafortunadamente para los técnicos del campo, esas secciones ideales no pueden existir en la naturaleza. El flujo es frecuentemente irregular; la velocidad del agua también, porque ella es directamente proporcional a la geomorfología fluvial (forma y ángulo de flujo, rocas sumergidas, rugosidad de los sedimentos, etc). Bajo esas condiciones, es necesario medir la profundidad y la velocidad del agua en muchos puntos para lograr calcular el caudal de manera precisa. Esos puntos son en realidad secciones verticales o "paneles". Entonces, la ecuación 1 se debe calcular para cada panel. La suma aritmética de los caudales parciales medidas en todos los paneles (Q_i) es igual al caudal total Q_T:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \ldots + Q_i = Q_T \qquad \textbf{Ec.2}$$

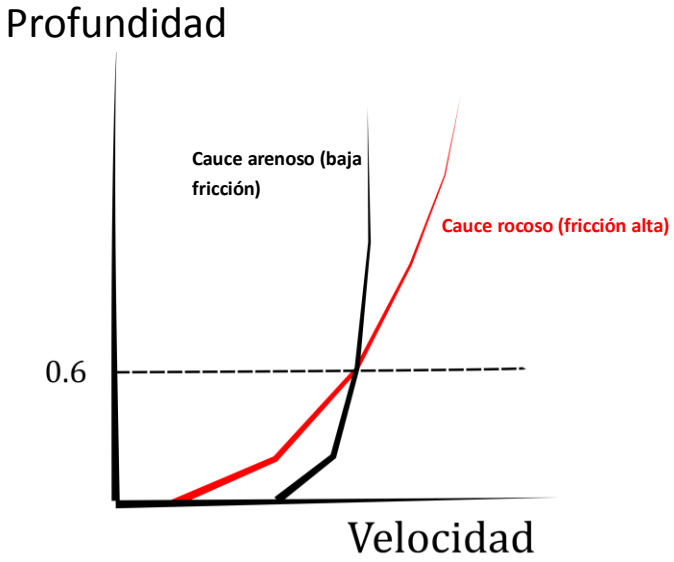


Como se puede ver en la figura de arriba, se necesita medir muchos paneles para llegar a un resultado preciso. Los paneles en el medio del cauce van a ser mas angostos que los paneles cerca de las orillas porque la velocidad del agua y la profundidad son típicamente mayores (para los cursos en forma de "U"). Normalmente, **el objetivo teórico es tener un máximo de 10% del flujo en un panel**. Bajo esta consideración, la regla general es que el ancho de los paneles en el medio del río (o en la parte mas profunda – depende de la forma del cauce) son aproximadamente la mitad del ancho de los paneles que se

encuentran cerca de la orillas, cuando la velocidad es más o menos uniforme a través del curso del río. Una vez más, el discernimiento en cada caso es esencial cuando usted divide el cauce en paneles de ancho variable.

Perfil Vertical de la Velocidad

La velocidad del agua disminuye con la profundidad debido a la fricción que existe entre el agua y el fondo del cauce. Para algunos ríos donde el flujo es muy dinámico, la velocidad del agua en la superficie puede ser fácilmente el triple de la velocidad sobre el fondo del cauce. Experiencias en laboratorios de hidráulica demuestran que cuando la profundidad de flujo total es inferior a 0.75 m, sin tener en cuenta del tipo de material que forma el cauce (ej. rocoso vs arenoso; ver la próxima ilustración), la velocidad medida a 0.6 de la profundidad de flujo (un poco mas abajo del medio del tirante de flujo medido) es generalmente un buen indicador de la velocidad media del agua en la sección estudiada. Cuando la profundidad de flujo en la sección es superior a 0.75 m, es más preciso calcular el promedio de las velocidades medidas a 0.2 y 0.8 de la profundidad de flujo total. Tomar en cuenta que las alturas mencionadas (0.6, 0.2, 0.8) son medidas respecto a la superficie o "espejo" de agua.



Aplicación del método en el parque de Sajama

Los materiales necesarios para aforar caudales son:

- Molinete (con un "beeper" o contador, dependiendo del tipo de molinete; en nuestro caso, los molinetes tienen un contador).
- Cronómetro.
- Cintas métricas o winchas (~ 30 m).
- Un lápiz y un cuaderno de notas (al final del documento encontrarán un modelo de la planilla a ser llenada).
- Regla portátil para leer el nivel del agua sobre la barra instalada que encontrarán en el fondo del cauce.
- Equipo personal (botas, botas de pescador).

Los caudales que nosotros monitoreamos en el parque Sajama son muy variables en magnitud. A continuación les presentaremos algunas indicaciones generales para medir diferente tipos de caudales. Siempre traten de medir la cantidad de paneles indicados abajo (preferentemente), pero en caso de que la disponibilidad de tiempo sea muy poca, traten de medir al menos la cantidad mínima indicada.

Caudales de < 1.5 m de ancho: Preferentemente medir en **10** paneles**; 5** paneles como mínimo. La distancia minima entre paneles es de 10 cm.

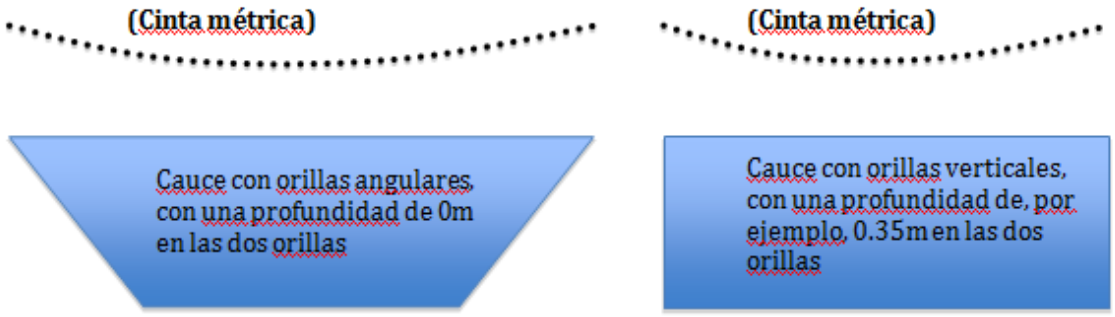
Caudales entre 1.5 m y 5 m de ancho: Preferentemente medir en **20** paneles; **10-15** paneles como mínimo (10 paneles para cursos de ~1.5 m y 15 para cursos de ~5 m).

Caudales de más de 5 m de ancho: Preferentemente medir en **25** paneles; **18** paneles como mínimo.

Las mediciones del nivel de agua deben realizarse antes de comenzar a aforar el caudal y al finalizar el aforo (registrando la hora a la cual se realizaron las mediciones respectivas). Para realizar dichas mediciones, lean y registren el nivel del agua observando la regla fija que está instalada en el cauce; adicionalmente, leer y registrar el nivel de agua colocando la regla portátil sobre la parte superior de una barra que encontrarán introducida en el fondo del cauce. La barra se instaló debido a la necesidad de contar con una referencia fija para realizar nuestras mediciones de nivel de agua. Notarán que en algunas secciones solamente encontrarán un tubo, sin una regla fija; en esas secciones también deberán leer y registrar el nivel de agua colocando la regla portátil sobre la barra que está instalada en el fondo del cauce. El nivel de agua debe ser leído colocando la regla portátil lo más vertical posible. La verticalidad de la regla la pueden confirmar amarrando una piedra a una cuerda, a manera de plomada.

Los tipos de cauces (geometría de los cauces).

Entender la geometría de los cauces (tipo de orillas, ver figura abajo) es muy importante para definir con precisión el caudal en los bordes del canal o río. Hay dos tipos de orillas: verticales y en ángulo:



La mayoría de los cursos en la cuenca del Río Sajama tienen orillas más verticales que angulares. Por esta razón, para todos los paneles es importante anotar la profundidad exacta de las orillas (conjuntamente con su localización). El primero y el último panel deberán estar situados a 10 - 15cm de las orillas.

Aforo de la sección, panel por panel.

Es una buena práctica medir los paneles en orden ascendente (de 0m a Xm en oposición a Xm to 0m), colocando la cinta métrica paralela al espejo de agua (ver fotografía en la carátula de este documento). Primero, se debe decidir los anchos de los intervalos de medición para las partes con menos flujo y luego los anchos de los intervalos de medición para las partes con mayor flujo (ej. cada 0.3 m cerca de los orillas y 0.15 m en el medio para un cauce de 3 m de ancho). No se olvide que el objetivo es medir la cantidad de paneles correspondientes al tipo de cauce.

Luego se procede a leer la profundidad del agua en cada panel, para poder conocer a qué profundidad se ajustará el molinete. La profundidad del molinete de puede ajustar utilizando los soportes desmontables de largo variable disponibles, a fin de obtener las mediciones de velocidad a 0.6 de la profundidad de cada panel. A continuación aforar el panel por **40** segundos.

Después de realizar la medición, leer una última vez el nivel de agua con la regla portátil, tal como se explicó más arriba.

Comentarios técnicos.

- La presencia de hielo en el curso debe ser explícitamente descrita en el cuaderno de notas (ej. "Se observó presencia de hielo solamente cerca de las orillas, se estima que el espesor fue de…, etc).
- Anotar la existencia de remansos que puedan provocar el aumento del nivel de agua (no del caudal) debajo de la regla fija (o barra) (ej. transporte de sedimentos en el flujo, plantas en el fondo, rocas que obstaculizan el flujo, una llama muerta, etc).
- Anotar otras observaciones que consideren pertinentes (ej. erosión en las orillas, medición realizada durante la ocurrencia de una lluvia tenue o tormenta, etc).

Imprimir o construir la hoja de campo mostrada a continuación, a objeto de uniformizar las mediciones hechas por los diferentes equipos de trabajo. En la hoja mencionada, P hace referencia al molinete de plástico; AA hace referencia al nuevo caudalímetro que Agua Sustentable adquirirá en el curso del presente mes; B hace referencia al caudalímetro con bastón telescópico ("bazooka"); Primera med. nivel agua y Ultima med. nivel de agua son respectivamente las alturas de nivel de agua medidas antes y después de realizar el aforo en la sección de interés (se sugiere hacer las mediciones en metros; "@(HH:MM)" es la hora a la cual se realizó la lectura de nivel de agua); el caudal total será calculado en gabinete.

Caudal:			**Fecha:**	
Primera med. nivel agua: ……m @ (HH:MM)			**Técnico:**	
Ultima med. nivel agua: ……m @ (HH:MM)			Tipo de molinete: **P AA B**	
Ancho total cauce: …… m		Hielo: **Si No**	Maleza: **Si No**	Erosión: **Si No**
Paneles	**Posición (m)**	**Profundidad (m)**	**Revoluciones**	**Segundos**
Orillas ___				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24				
25				
Orillas ___				
Comentarios al reverso de esta hoja				

ANEXO 2. CALIDAD DE LOS DATOS ADQUIRIDOS POR LOS SENSORES.

La red hidroclimática está constituida por dos estaciones climáticas situadas dentro del área de estudio más una estación de apoyo (Chungará) situada en la frontera de la cuenca. Adicionalmente, la red está constituida por tres grupos de piezómetros instalados en los bofedales para monitorear las variaciones en los niveles de agua (un grupo en Aychuta, otro en la comunidad Lagunas, y otro en la parte central de la cuenca del Río Sajama aguas arriba del Puente Sajama), y dos grupos de sensores de presión para la medición de las variaciones en los niveles de agua (un grupo en Aychuta y otros grupo en la parte central de la cuenca del Río Sajama, aguas arriba del Puente Sajama). A continuación en el presente Anexo se presenta un análisis cualitativo de la calidad de los datos adquiridos. A la escala temporal a la cual los datos se presentan, no se realiza un análisis de consistencia, homogeneidad ni estacionareidad debido a la corta duración de las series de datos.

A2-1 Estación Puente Sajama.

En los datos recopilados por el sensor se observa la presencia de quiebres o desplazamientos en la información presentes en la fecha donde se realiza la descarga de los datos. La serie de tiempo sugiere que al parecer, el sensor necesita un tiempo para que sus lecturas se estabilicen. De cualquier manera, una vez alcanzada la estabilidad de las lecturas ocurre un quiebre permanente en la serie de observaciones, tal como se muestra en la Figura A2-1. En el caso del sensor instalado en la estación Puente Sajama, el tiempo transcurrido entre la instalación y la estabilización de las lecturas fue de 15/05/2012 12:00:00 p.m. a 16/05/2012 03:40:00 p.m. (aproximadamente 15 h). El tiempo de estabilización de las lecturas en este sensor es el más largo de todos los registrados en los otros sensores instalados, ante lo cual no fue posible encontrar una explicación lógica. Ante la ausencia de herramientas adicionales que indiquen cuál es el valor real de una medición de un sensor (un termómetro o un barómetro común podría no tener la precisión del instrumento; la comparación obligatoriamente debería ser realizada con un "instrumento de calibración" similar), se decidió corregir el quiebre mediante desplazamiento empírico de la serie, asumiendo que el primer periodo de medición como el referencial. En referencia a las lecturas de temperatura del agua, es extraño no observar un quiebre tan claro como el que fue observado para la variable presión absoluta (Figura A2-1).

A2-2 Estación Pizrrata (Río Pizrrata).

El quiebre observado en la serie de datos de presión barométrica (Figura A2-2) es difícil de corregir debido a es altamente probable que esté influenciada por la carga de sedimentos que enterró al sensor. Únicamente la serie a partir del 16/05/2012 se considera útil.

A2-3 Estación Taypijahuira.

El sensor fue reinstalado el 16/05/2012 debido a la alta carga de sedimentos en el sitio. Únicamente la serie desde esta fecha es útil (Figura A2-3). A partir de la fecha de reinstalación del sensor, el quiebre observado es debido a la reinstalación del sensor.

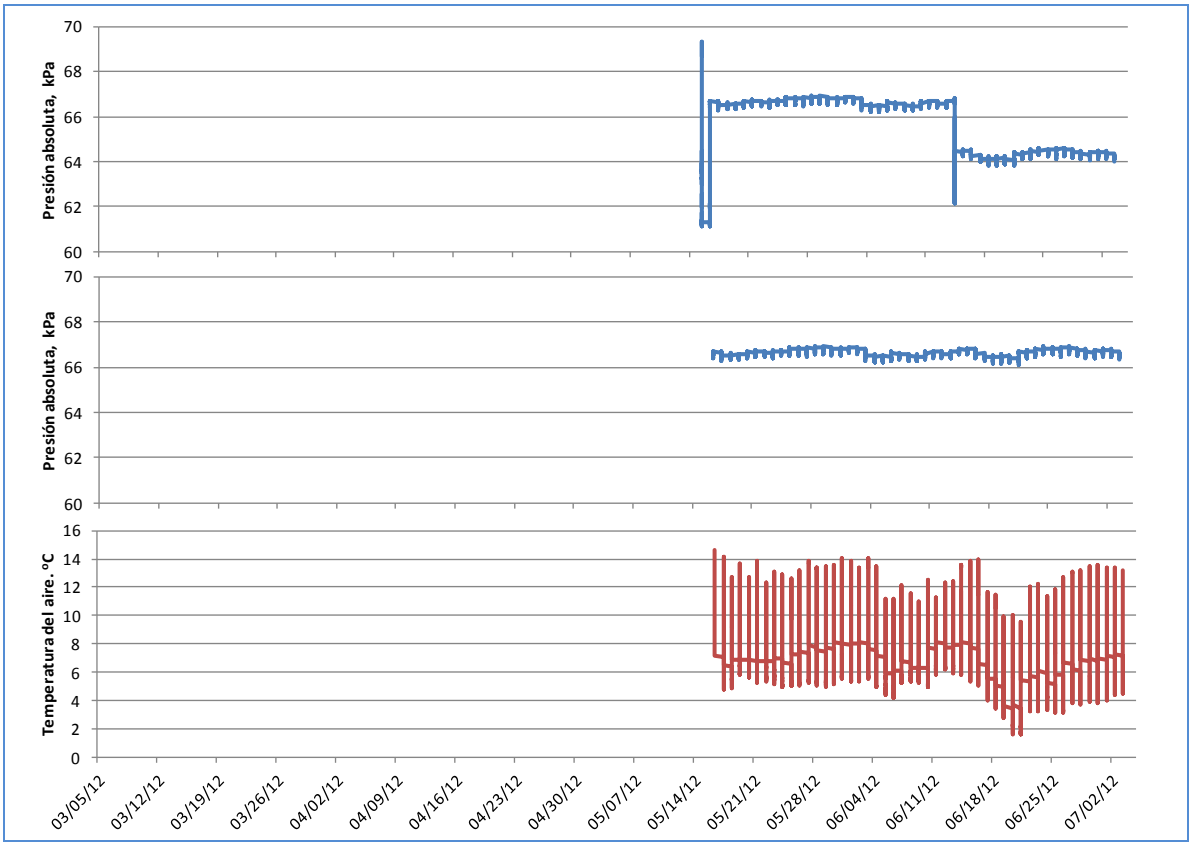


Figura A2-1. Serie de datos registrada en la estación Puente Sajama. Se observa un quiebre en la serie de presión absoluta ocurrida en las fechas donde se procedió a la descarga de la información. Las dos figuras superiores comparan la serie de presión absoluta antes y después de la corrección empírica del quiebre. Por otro lado, la variable temperatura del agua no presenta un quiebre tan amplio como el encontrado para las series de presión.

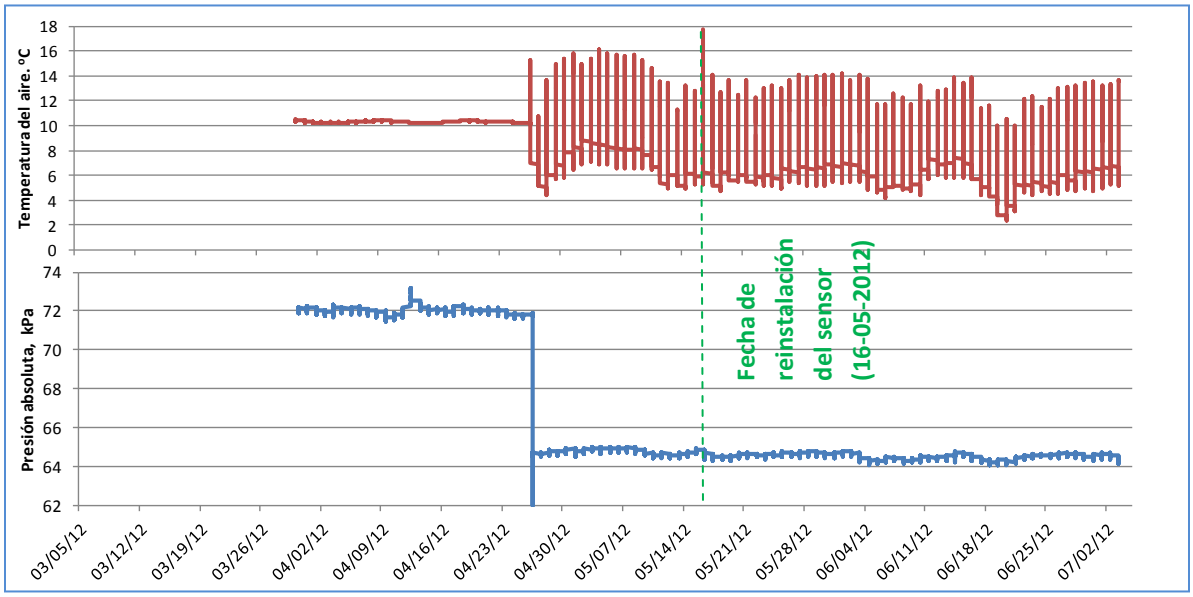


Figura A2-2. Serie de datos registrada en la estación Pizrrata. Arriba, la serie de temperatura del agua; abajo, la serie de presión absoluta. Debido a la alta carga de sedimentos, únicamente la serie a partir del 16/05/2012 es útil.

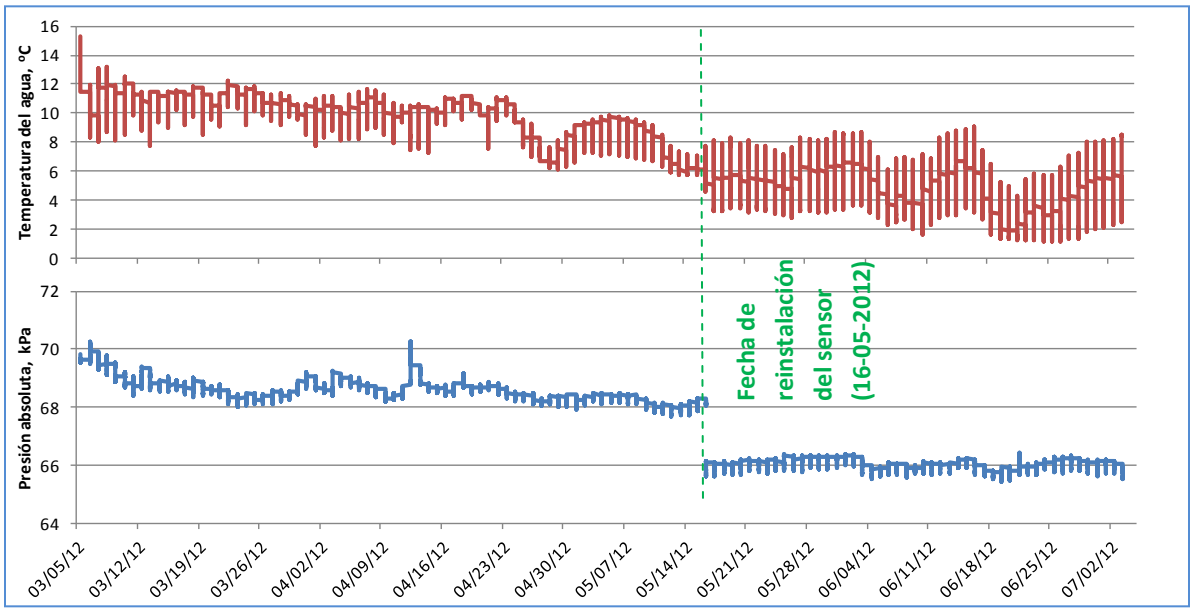


Figura A2-3. Serie de datos registrada en la estación Taypijahuira. Arriba, la serie de temperatura del agua. Abajo la serie de presión absoluta. Debido a la alta carga de sedimentos, únicamente la serie a partir del 16 de mayo es útil. El quiebre observado se debe a la reinstalación del sensor, por lo que se decide no corregir el desplazamiento.

A2-4 Estación geiser@Sajama.

Se miden dos variables: presión atmosférica y temperatura del agua, en intervalos de 10 min. El sensor tiene el problema del quiebre en la fecha de descarga de los datos común a los sensores comentados en los subtítulos precedentes (Figura A2-4). Tal como se realizó con anterioridad, antes de utilizar los datos se procedió a una corrección empírica asumiendo que el primer periodo de medición es el correcto. En referencia a las series de temperatura, el error en el sensor es más severo, inutilizando los registros a partir de la fecha de descarga de datos (14/06/2012, 18:30). En la actualidad, el volumen de flujo por este sitio fue reducido notablemente por los comunarios, a través de desvíos cuyo fin es el de utilizar la oferta de agua para el riego de bofedales.

A2-5 Estación Sajama@Manasaya.

El sensor se reubicó el 01/06/2012 debido a que los procesos de sedimentación modificaron la fluviomorfología, lo cual a su ve situó al sensor en un sitio fuera del curso principal. Este proceso explica el quiebre observado en las series de la Figura A2-5 y los valores inusualmente constantes en la temperatura del agua hasta el 18/05/2012. Asumiendo que tal hipótesis es válida, únicamente los registros a partir del 01/06/2012 se consideran útiles.

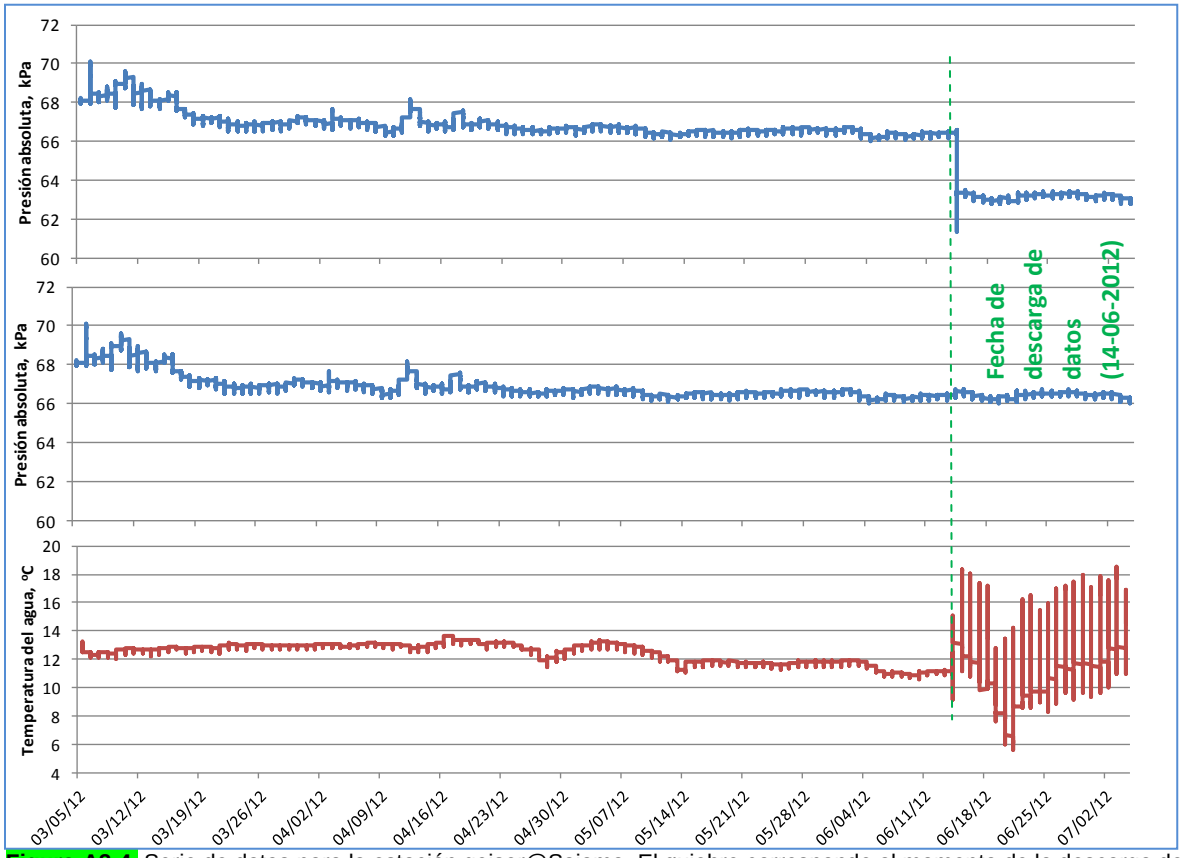


Figura A2-4. Serie de datos para la estación geiser@Sajama. El quiebre corresponde al momento de la descarga de datos (14/06/2012, 18:30). El quiebre en la serie de presión absoluta (gráficas superiores) es corregido por simple desplazamiento de la porción de la serie que se desplazó, asumiendo que la serie de referencia es la serie menos antigua. Para el caso de la serie de temperatura del agua (serie inferior), se omite cualquier tipo de corrección debido a que la variabilidad es aparentemente grande; allí se rechazan los datos a partir de 14/06/2012, 18:30.

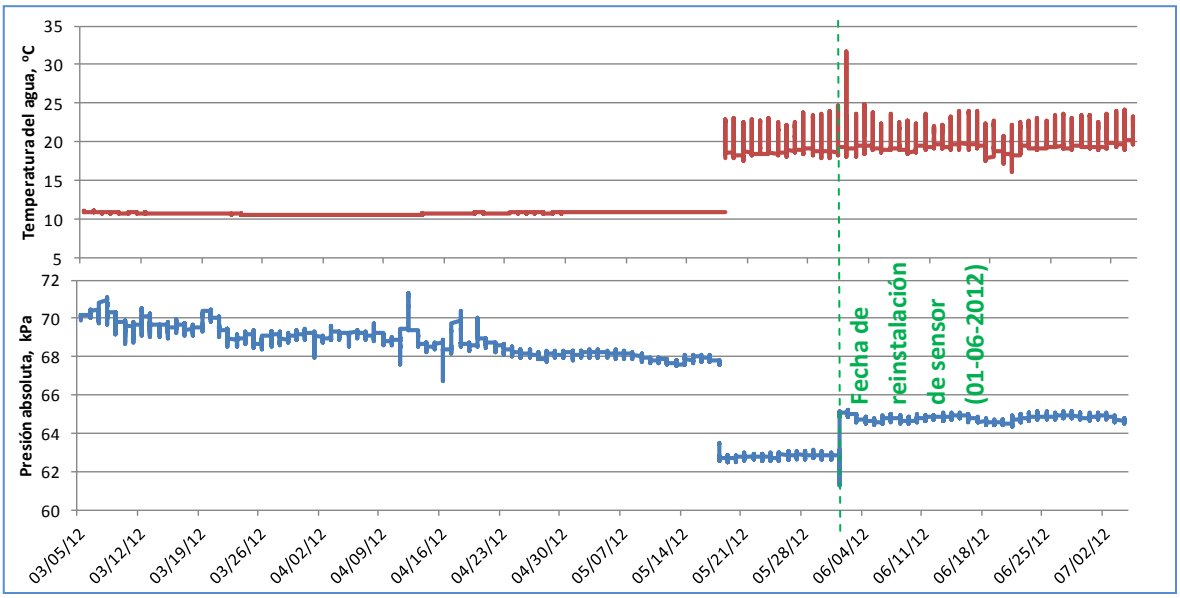


Figura A2-5. Serie de datos registrada en la estación Sajama@Manasaya. Arriba se muestra la serie de temperatura del agua; abajo se presenta la serie de presión absoluta. Los quiebres en la serie corresponden al momento de la descarga de los datos.

A2-6 Estación Manasaya@Sajama.

El sensor fue encontrado enterrado en sedimentos, aislado del curso principal, por lo cual se decidió su reinstalación el 18/05/2012. El quiebre mostrado en la Figura A2-6 muestra el efecto de la reubicación del sensor.

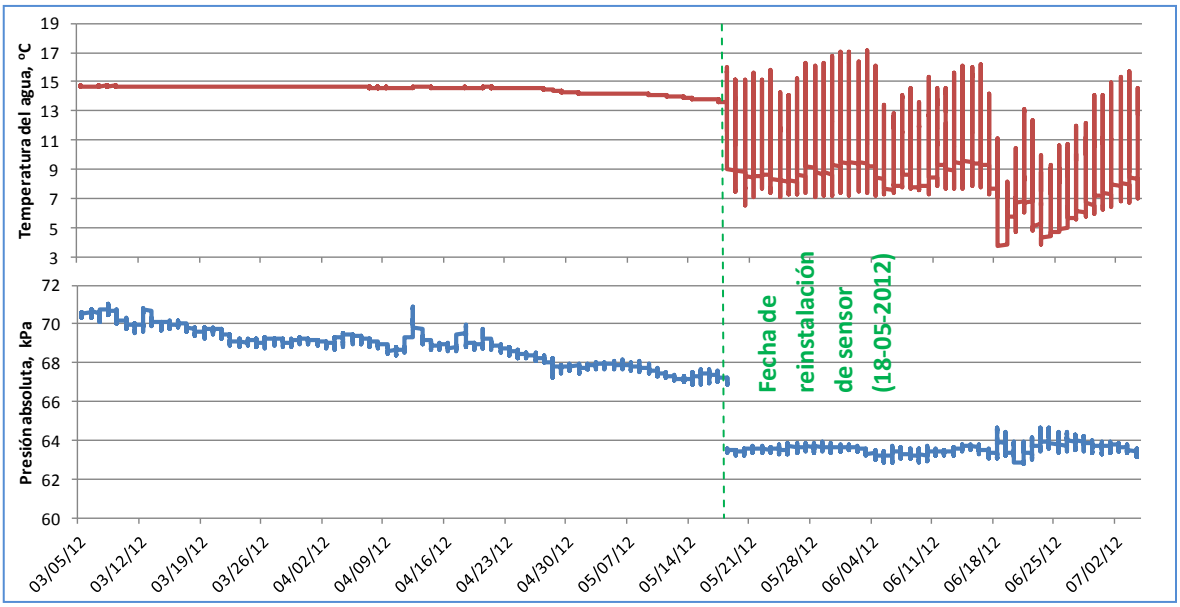


Figura A2-6. Serie de datos registrada en la estación Manasaya@Sajama. Arriba se muestra la serie de temperatura del agua y abajo la serie de presión absoluta. El quiebre es debido a la reinstalación del sensor.

A2-7 Estación Manasaya.

El sensor no tuvo problemas mayores de operación durante el periodo durante el cual realizó la adquisición de información, hasta el 27/06/2012. Durante aquel periodo, el único inconveniente observado se presentó debido a un error de programación del sensor, el cual fue instalado para adquirir información cada minuto, saturando la memoria del mismo con la consiguiente pérdida de los datos mostrados en la Figura A2-7. A partir del 27/06/2012 hasta el presente, la estación quedó fuera de servicio debido a la interferencia de una pequeña obra de toma construida en la sección donde se instaló el sensor.

A2-8 Estación Aychuta abajo.

Al observar los datos de esta estación (registros cada 15 min), la inestabilidad de las mediciones del sensor son evidentes y mayores a las registradas en otros sensores, principalmente en referencia a la variable presión absoluta (Figura A2-8). Las razones podrían ser complejas, difíciles de explicar debido al número de factores involucrados. Se estima que las principales razones son la turbulencia observada en este río de montaña y la alta carga de sedimentos de fondo y en suspensión.

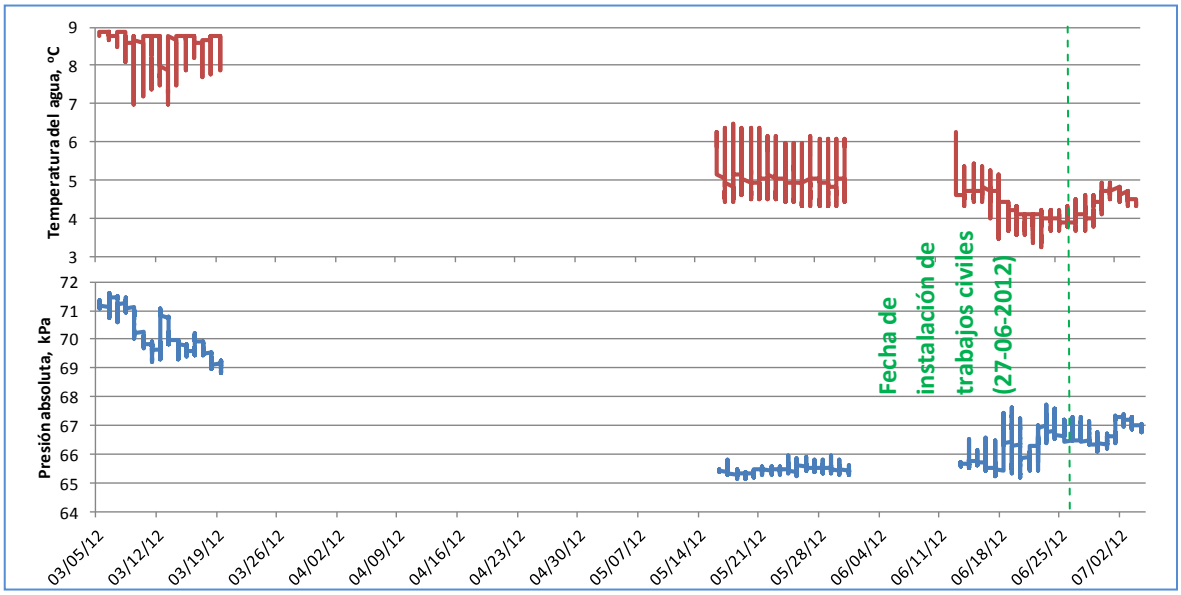


Figura A2-7. Serie de datos registrada en la estación Manasaya. Arriba se muestra la serie de temperaturas del agua, mientras que abajo se presenta los datos de presión absoluta. Esta estación es probablemente la única que presenta variaciones importantes en los niveles del río.

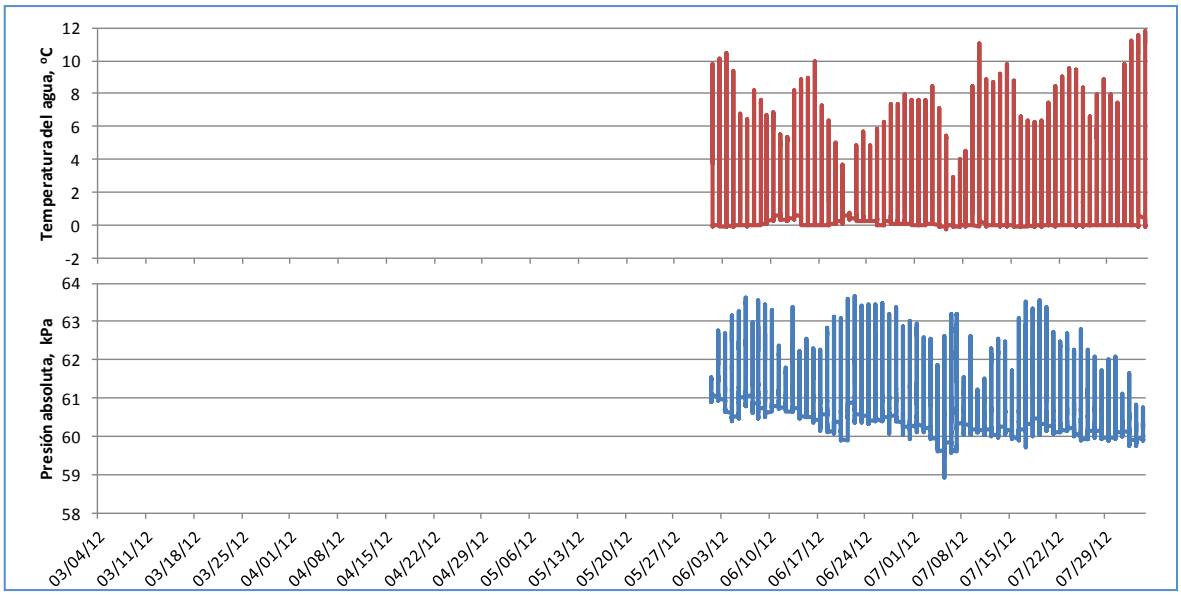


Figura A2-8. Serie de datos registrada en la estación Aychuta abajo. Arriba se muestra la serie de temperaturas del agua y abajo la serie de presiones absolutas.

A2-9 Sensor de presión absoluta y temperatura ambiente: Piezómetro bofedal Aychuta.

No se observan aquellos quiebres observados en otras estaciones (Figura A2-9), preliminarmente atribuidos al malfuncionamiento de los sensores al momento de comunicarse con la herramienta utilizada para descargar la información. En referencia a la variabilidad de la variable presión barométrica, la cual es de interés primario para alcanzar los objetivos de la consultoría, al comparar con valores medios de otras regiones en los Andes de Bolivia se observa una variación general de aproximadamente 1 kPa; este incremento en la presión atmosférica en términos de profundidad de agua observada en el piezómetro de Aychuta equivale a una diferencia de 10 cm (mediante análisis de sensibilidad simple, e.g., Saltelli, 2000). Este pequeño ejercicio sugiere dos cosas: i) no se aconseja la transposición de parámetros desde cuencas alejadas; ii) es altamente aconsejable incluir las variaciones en la presión barométrica con la altitud para la corrección de los niveles de agua.

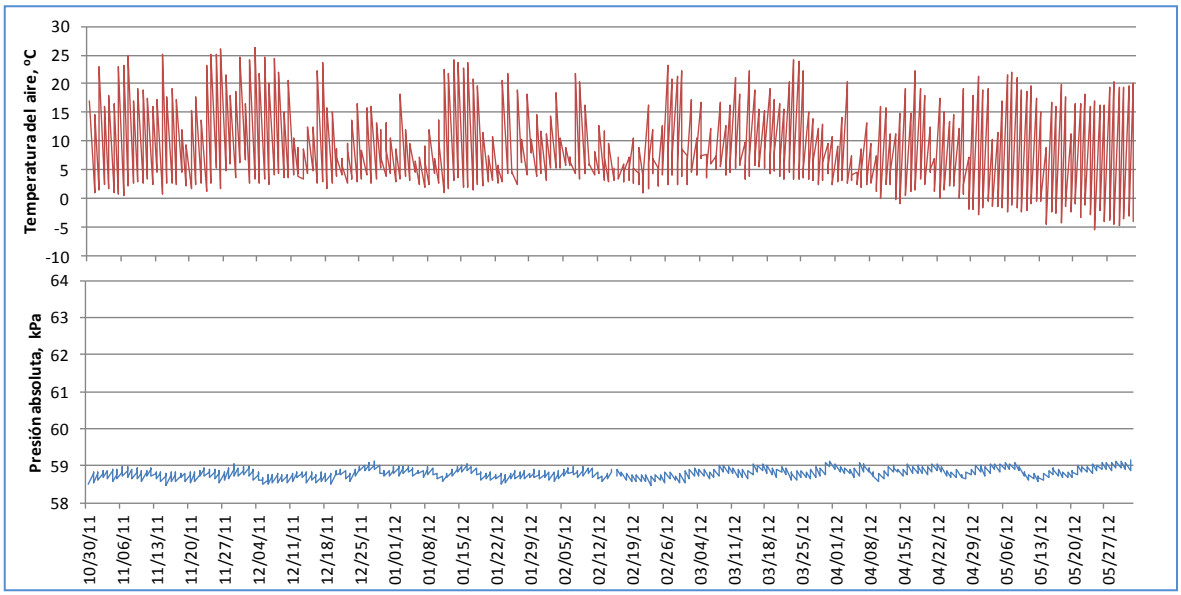


Figura A2-9. Serie de mediciones de temperatura ambiente dentro del piezómetro (gráfico superior) y presión barométrica (gráfico inferior) en el piezómetro del bofedal de Aychuta.

A2-10 Sensor de presión absoluta y temperatura ambiente: Aychuta, presión barométrica.

El sensor Aychuta se instaló en respuesta a la demanda del registros de presión barométrica para interpretar las lecturas de niveles de agua (ley de distribución de presiones hidrostáticas). Debido a la incertidumbre contenida en la extrapolación de los datos de la variable presión barométrica, se decidió instalar este sensor en fecha 01/06/2012, cubierto por un escudo de radiación para evitar interferencias no deseadas. La Figura A2-10 muestra los resultados del monitoreo. Allí, la variable temperatura del aire confirma la alta sensibilidad de los sensores a variaciones mínimas en la circulación local, erróneamente interpretadas mediante los picos de valores registrados. Tal como muestra la Figura A2-10, la corrección desde el punto de vista ingenieril es aparentemente simple mediante la aplicación de medias móviles. En el caso de la variable presión atmosférica, es menor la sensibilidad a variaciones en la circulación local, no se observan quiebres en la serie de datos y los valores son preliminarmente aceptados. En referencia a la precisión de los datos, en ausencia de instrumentos de calibración de similares características, al comparar con los registros del

piezómetro de Aychuta se observa que los valores son ligeramente menores; la media de los registros de presión barométrica en el piezómetro es de 58.8 kPa, mientras que la media en la morrena lateral es de 58.9 kPa (apreciar las diferencias en la Figura A2-10), ligeramente más alta a pesar de estar situada aproximadamente en un sitio 10-15 m más alto. La diferencia se atribuye a que inicialmente el sensor que se encontraba dentro del piezómetro estaba completamente cubierto por una tapa metálica, lo cual pudo haber incrementado ligeramente la presión interna. Se desestima un error debido al método empleado para medir la variable porque es el mismo sensor el que fue utilizado inicialmente dentro del piezómetro y luego fue instalado en la morrena latera.

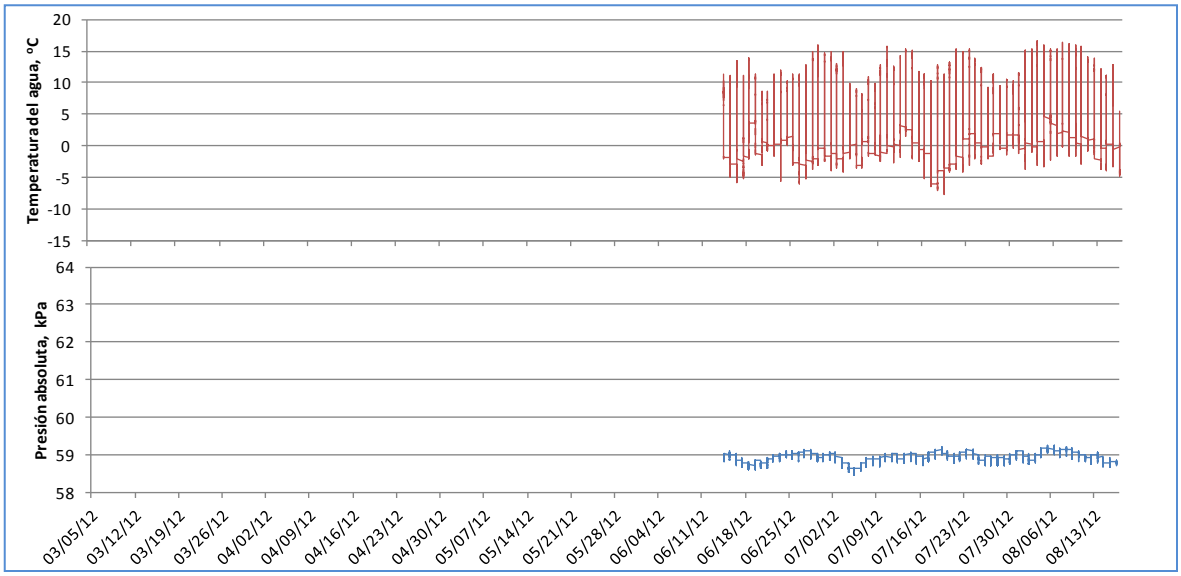


Figura A2-10. Serie de mediciones de temperatura ambiente (gráfico superior) y presión barométrica (gráfico inferior) en la morrena lateral al este del bofedal de Aychuta.

A2-11 Sensor de presión absoluta y temperatura ambiente: Pueblo Sajama.

El sensor Pueblo Sajama se instala una vez conocida la incertidumbre causada por la extrapolación de la variable presión barométrica. En la serie presentada en la Figura A2-11 se observa un quiebre en el periodo 07/19/2012 13:50 a 08/01/2012 15:40 ocasionado por el traslado del sensor desde exteriores hacia el interior de una vivienda. Es interesante observar que debido a este hecho (la protección del sensor en el interior de una vivienda), aparte del lógico incremento de la temperatura medida por el sensor, logró estabilizar las lecturas eliminando la amplia variabilidad registrada en todas los otros sensores instalados en el área de estudio. En referencia a las lecturas de presión barométrica, el traslado del sensor a la vivienda y el posterior traslado a la estación Sajama SENAMHI al parecer no ocasionó, desde el punto de vista ingenieril, impactos relevantes a las tendencias de la variable (Figura A2-11). Respecto a la calidad de los registros de presión barométrica, la referencia inmediata es entregada por las mediciones del sensor en el piezómetro del bofedal de Aychuta, donde el sensor registra una serie con media de 59 kPa (a 4580 msnm), el cual comparado con la media de 61.5 kPa registrado en la serie del sensor Pueblo Sajama (a 4290 msnm) sugiere un gradiente aproximado de 9 kPa por km, asumiendo una tendencia lineal en ausencia de registros precisos para delinear otro tipo de tendencia con mayor precisión. En ausencia de registros en estaciones cercanas que permitan definir un gradiente más preciso, la tasa de incremento de presión barométrica indicada se utiliza para el cálculo de niveles

de agua relativos a la profundidad de instalación de los sensores en las estaciones dentro del área de estudio.

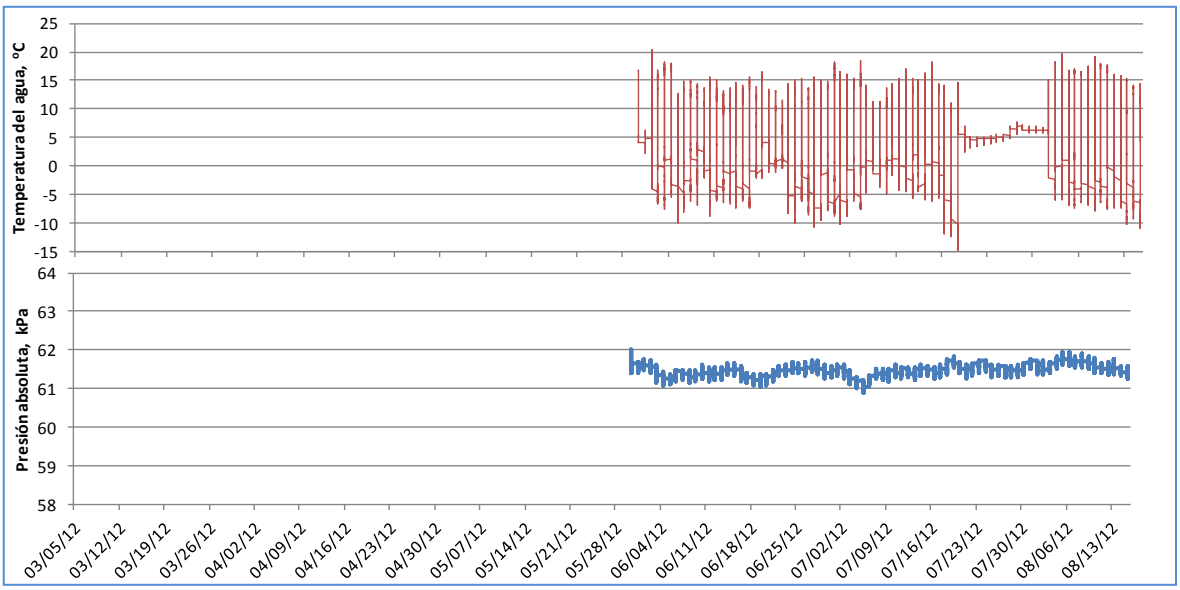


Figura A2-11. Serie de valores de temperatura ambiente (gráfico superior) y presión barométrica (gráfico inferior) en la estación Pueblo Sajama. No se observan quiebres anormales en la serie, pero sí se observa un incremento en la temperatura ambiente en el periodo 07/19/2012 13:50 a 08/01/2012 15:40, correspondiente al periodo durante el sensor fue colocado temporalmente bajo techo.

Aparte de las estaciones señaladas en la estación Sajama@geiser únicamente se instaló una regla limnimétrica debido a restricciones en presupuesto. Por otro lado en la estación geiser donde el sensor mide las variables presión absoluta y temperatura del agua, la serie cubre el periodo 15/06/2012 a 30/06/2012, y 04/07/2012 a 19/07/2012; allí, debido a la corta magnitud del monitoreo se omite el asesoramiento cuantitativo de la calidad de los datos.

A2-12 Variabilidad de la presión barométrica.

Al tratarse de mediciones absolutas de presión, se utiliza el principio fundamental de la hidrostática para corregir los valores medidos por los sensores. El inconveniente radica en la ausencia de estos datos para realizar aquella corrección debido a que las estaciones climáticas instaladas dentro del área de estudio no capturan esta variable. Para corregir este error, se instalaron dos sensores que miden la presión barométrica, uno situado en la morrena lateral-este de la cuenca Aychuta, y el otro situado en el pueblo Sajama. Los registros obtenidos son cortos, aproximadamente 4 meses; sin embargo, los datos registrados son de alto valor.

Para asesorar el nivel de incertidumbre involucrado en la consideración de valores medios constantes de presión barométrica, se tomaron dos alternativas. La primera es observar la forma en la que varían los valores de presión barométrica en otros sitios de monitoreo situados en los Andes de Bolivia, durante un periodo cercano al monitoreado en el área de estudio y la segunda es observar las implicaciones prácticas de asumir un valor constante de presión barométrica en la zona de estudio del Parque Nacional Sajama. En referencia a esta alternativa, mediante comunicación personal con investigadores que trabajan en aquellos lugares se conoce que en algunos sitios en la Cordillera Real el rango de variación calculado para el periodo junio de 2011 a junio de 2012 fue de 0.89 kPa (desviación estándar 0.13 kPa). Para estimar las consecuencias de

asumir valores constantes de presión barométrica, se compararon los valores calculados de profundidades de flujo (distancia entre el espejo de agua y la profundidad de instalación del sensor de presión) considerando los valores observados de presión barométrica, y los valores de profundidades de flujo considerando un valor medio asumido de presión barométrica calculado a partir de los valores reales observados. Al comparar las dos muestras, se observó que, para un rango de variabilidad de profundidad de flujo absoluta en el rango de 1.24 m a 0.34 m (respecto a la profundidad de instalación del sensor), la diferencia absoluta media medida para toda la serie es de aproximadamente 1 cm, valor que no excede el intervalo de confianza calculado respecto a la media con desviación estándar conocida para un nivel de confianza de 95%. Adicionalmente, aplicando un test F simple para comparar las dos series generadas, es aceptada la hipótesis nula de que ambas series pertenecen a la misma población.

A continuación se decidió asesorar la incertidumbre asumiendo valores de presión barométrica constantes en los sensores instalados en el área de estudio (Parque Nacional Sajama), tomando como referencia el cálculo de profundidades de flujo relativas a la profundidad de instalación del sensor. Para el efecto se tomó la metodología expresada en el párrafo anterior y se compararon, series de profundidad de flujo calculadas con series observadas de presión barométrica y series calculadas con un valor medio constante obtenido a partir de la serie de presiones barométricas. Para la comparación, se estimaron intervalos con nivel de confianza α del 95% para la serie de alturas de nivel de agua relativas. Se realizó el análisis tomando los datos del piezómetro del bofedal de Aychuta. Los resultados presentados en la Figura A2-12 sugieren que desde el punto de vista estadístico (test F, α=95%), es aceptable la presunción de que ambas series pertenecen al mismo espacio muestral. El término "ambas series" se refiere a la serie construida con observaciones reales de presión barométrica y la construida asumiendo un valor medio constante de presión barométrica. En consecuencia, los resultados sugieren que desde el punto de vista práctico sí es posible asumir un valor de presión barométrica constante para las inferencias de profundidad de flujo. Por otro lado, los resultados sugieren que aquel valor de presión barométrica debe ser cuidadosamente elegido. Para demostrar aquella última afirmación se realizó un simple experimento de sensibilidad (Saltelli, 2000), mediante el cual se asume la transposición de valores de un sitio en la Cordillera Real, donde la presión barométrica media observada varía en 1 kPa en referencia a la presión barométrica medida en Aychuta. El resultado de aquel sencillo experimento se presenta en la Figura A2-12, de donde se concluye que la presunción errónea de aquel valor medio, en términos de profundidad de nivel de agua podría implicar variaciones en los resultados de 10 cm. Aquel error es relevante desde la perspectiva considerada en la presente consultoría, y en lo posible será evitado.

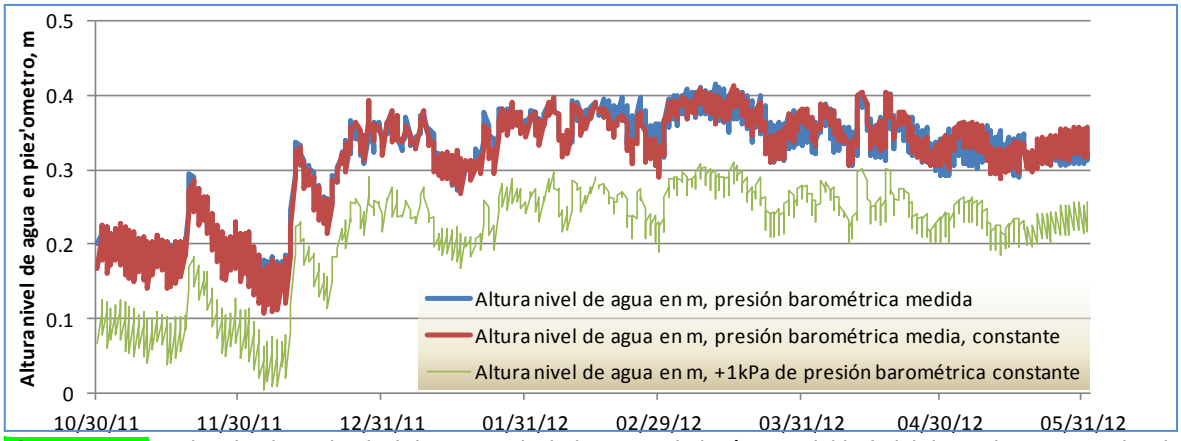


Figura A2-12. Series de altura de nivel de agua calculadas para el piezómetro del bofedal de Aychuta. La tendencia

dibujada con una línea verde se construye para asesorar la incertidumbre contenida en la transposición de mediciones desde otros sitios; el resultado de la comparación sugiere que la transposición de observaciones desde un sitio en la Cordillera Real hacia el área de estudio en el Parque Sajama implica una diferencia de 1kPa.

A2-13 Errores en los aforos.

Para asesorar los errores de los aforos se construyeron las gráficas de la Figura A2-14. La autoría del cálculo se muestra en la Figura mencionada.

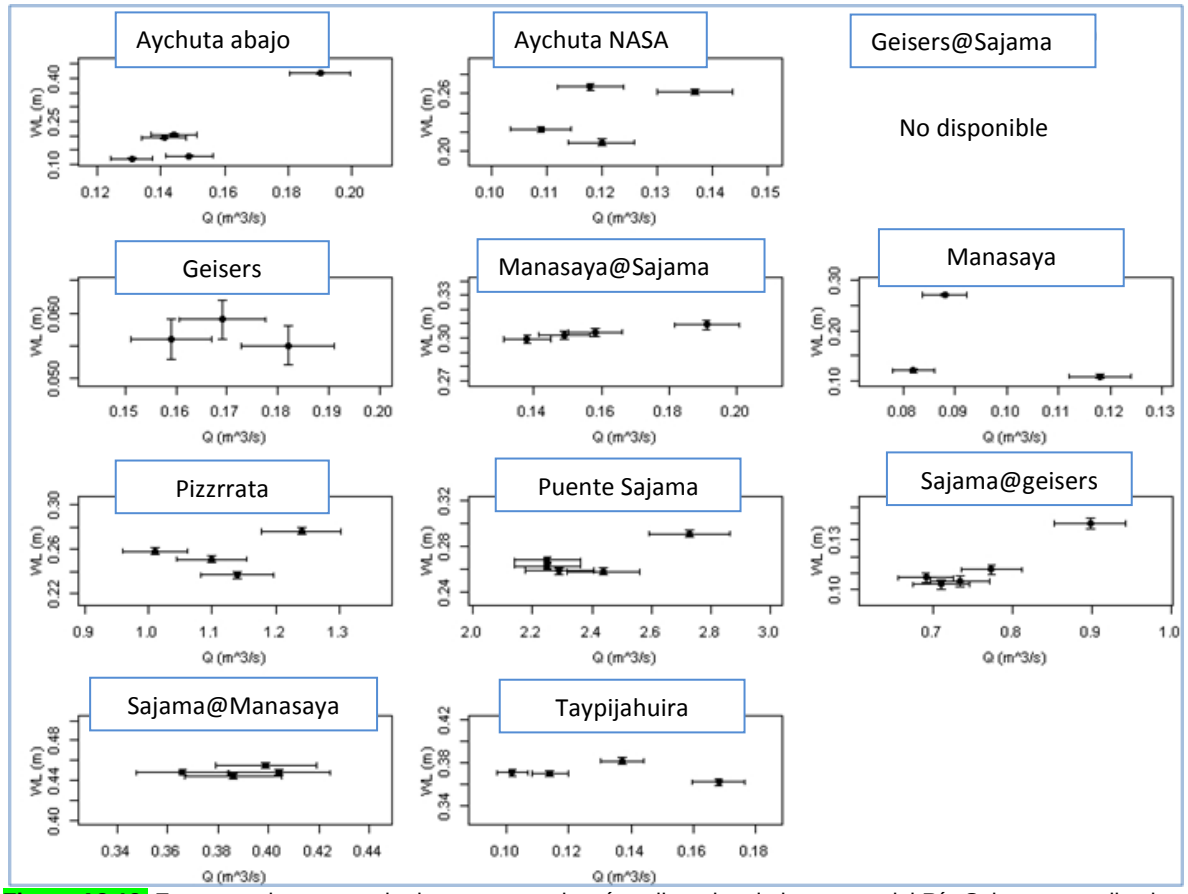


Figura A2-13. Errores en las curvas de descarga para los ríos tributarios de la cuenca del Río Sajama, actualizadas a junio de 2012. En la Figura, WL son los niveles de agua en los ríos. El gráfico es construido por Mathieu Beaulieu, técnico de campo de Agua Sustentable-CUSO.

A2-14 Cálculo de niveles de agua en las estaciones del área de estudio: Estación Puente Sajama (4136 msnm).

La ecuación para el cálculo del nivel de agua entre el espejo de agua y el sensor de nivel es la siguiente:

$$P = Po + \gamma h \qquad \text{(A1)},$$

donde h [m] es la profundidad a la cual el sensor está sumergido, γ es el peso específico del fluido (γ_{AGUA} = 9.81m s^{-2}· 1000 kg m^{-3}), Po es la presión barométrica [kg m^{-1} s^{-2}], y P es la presión absoluta medida por el sensor sumergido en el fluido [kg m^{-1} s^{-2}]. En base a la ecuación (A1), a

continuación se presentan los valores de profundidad de flujo para las estaciones instaladas en el área de estudio. Los valores referenciales de presión barométrica son:

- 59 kPa, a 4580 msnm.
- 61.5 kPa a 4247 msnm.
- Gradiente de presión barométrica: 7.5 kPa por km.

A continuación se presenta los resultados del cálculo de los niveles de agua para las estaciones del área de estudio.

A2-15 Niveles de agua: Estación Puente Sajama (4136 msnm).

Se observa correlación visual entre aforos y niveles de agua en época de estiaje, la cual se pierde al ocurrir una crecida, principalmente debido a que el área de flujo se duplica al extenderse hacia las planicies de inundación. Tal área crece de 7.5 m medidos en agosto de 2012 a 15 m medidos el 12 de abril de 2012 luego de un evento de precipitación.

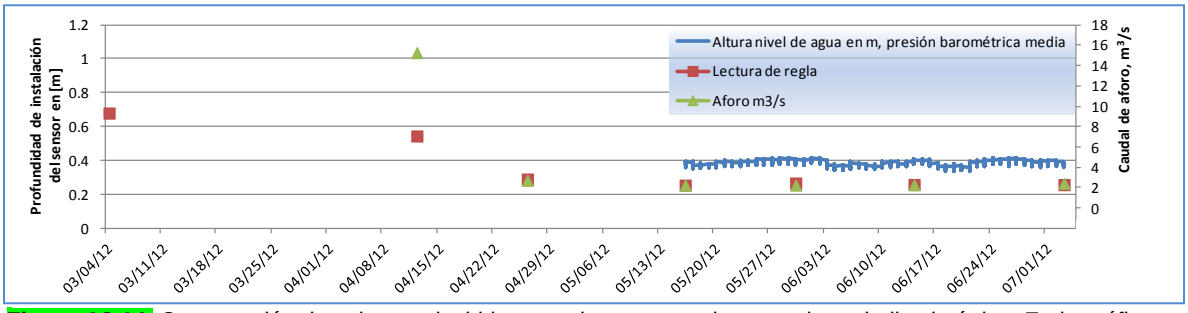


Figura A2-14. Comparación de valores adquiridos por el sensor con lecturas de regla limnimétrica. En la gráfica se asume un gradiente de variabilidad de presión con la altitud de 7.5 kPa/km.

A2-16 Niveles de agua: Estación Pizrrata (4150 msnm)

La Figura A2-15 se construye asumiendo un gradiente de presión barométrica de 6 kPa/km, menor al originalmente propuesto de 7.5 kPa/km como una forma empírica de corregir la discrepancia entre lecturas de altura de nivel de agua y la profundidad de instalación del sensor. En referencia a los aforos, existe cierta correlación entre los niveles de agua medidos y los caudales aforados en época de estiaje. La correlación se pierde al incrementarse los caudales debido probablemente a la importante carga de sedimentos de fondo y en suspensión que ocasionan cambios en la sección de flujo, añadiendo una fuente de incertidumbre adicional a las mediciones. Contrario a los que se observó en el Puente Sajama, el canal es aproximadamente rectangular, sin planicies de inundación (ver Figura A2-16), lo que ocasiona que el rango de variación de caudales no sea mayor al rango de variación de la profundidad de flujo.

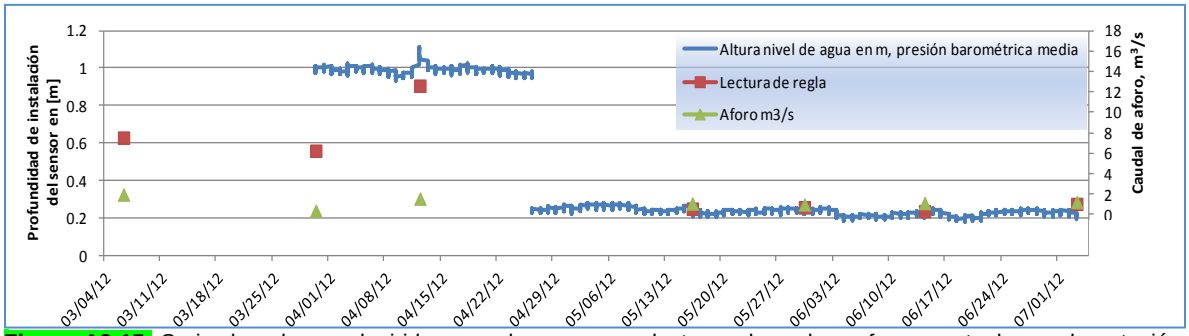


Figura A2-15. Serie de valores adquiridos por el sensor, con lecturas de regla y aforos puntuales en la estación Pizrrata. El gradiente de presión barométrica asumido es 6 kPa/km.

Figura A2-16. Aforo en la sección de la estación Pizrrata. Nótese la forma rectangular del canal de flujo. Fecha de la fotografía: 30-05-2012. Fotografía: Mathieu Beaulieu.

A2-17 Niveles de agua: Estación Taypijahuira (4150 msnm)

Tal como ocurre en las dos estaciones revisadas en los subtítulos precedentes, existe correlación durante la época de estiaje entre la profundidad de flujo y los aforos puntuales (Figura A2-17), correlación que se pierde a medida que los caudales se incrementan. Al comparar estos resultados con los obtenidos en la Estación Pizrrata, es notoria la similitud de los regímenes de flujo, con un rango amplio de variación de profundidad de flujo de hasta 0.6 m. Por las razones mencionadas en el párrafo precedente, únicamente los valores a partir del 16/05/2012 se consideran útiles.

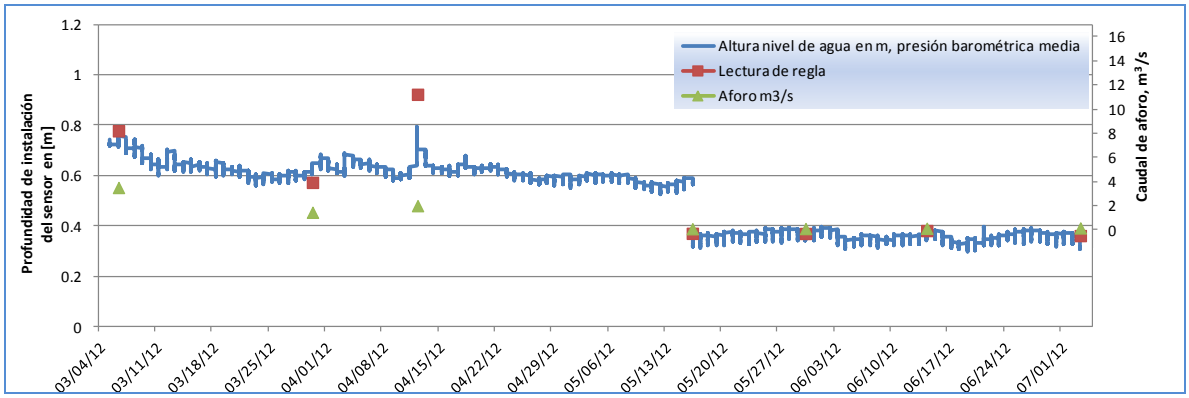


Figura A2-17. Niveles de agua, lecturas de regla y aforos puntuales realizados en la estación Taypijahuira. El quiebre en la gráfica se debe al cambio de lugar de la estación, debido a la alta carga de sedimentos presentes en el sitio original.

A2-18 Niveles de agua: Estación Sajama@geiser (4233 msnm)

Únicamente se instaló una regla limnimétrica debido a restricciones en presupuesto. Los resultados se presentan en la Figura 21. Los mismos sugieren una relación no lineal entre las lecturas de regla y los aforos puntuales, con un rango de variación en la profundidad de flujo observado menor al medido en las estaciones situadas aguas abajo, como era de esperarse. El flujo en la estación Sajama@geiser no transita por planicies de inundación, tal como ocurre en la estación Puente Sajama.

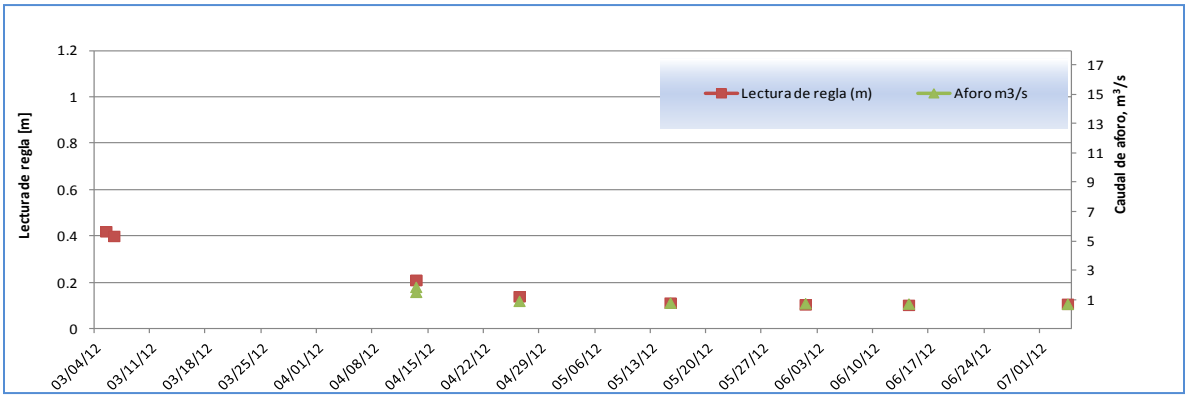


Figura A2-18. Lecturas de regla de profundidad de flujo y aforos puntuales realizados en la estación Sajama@geiser. No se cuenta con sensor de nivel de agua.

A2-19 Niveles de agua: Estación geiser@Sajama (4234 msnm)

La Estación geiser@Sajama se instaló en un canal de ancho pequeño (1.2 m a 1.4 m), con forma aproximadamente rectangular, sin planicies de inundación. En relación al caudal observado en las otras estaciones, la estacionalidad es menor, y tiene flujo estable. En esta Estación no existe una regla limnimétrica, por lo que la calibración de la profundidad a la cual el sensor se encuentra sumergido se realiza mediante mediciones de profundidad en sitio. Al realizar este procedimiento, asumiendo un gradiente de 7.5 kPa para la variable presión barométrica, se observa que la

profundidad medida en sitio es menor a la profundidad medida por el sensor. Varias razones podrían explicar este hecho; en la actualidad se busca la razón específica.

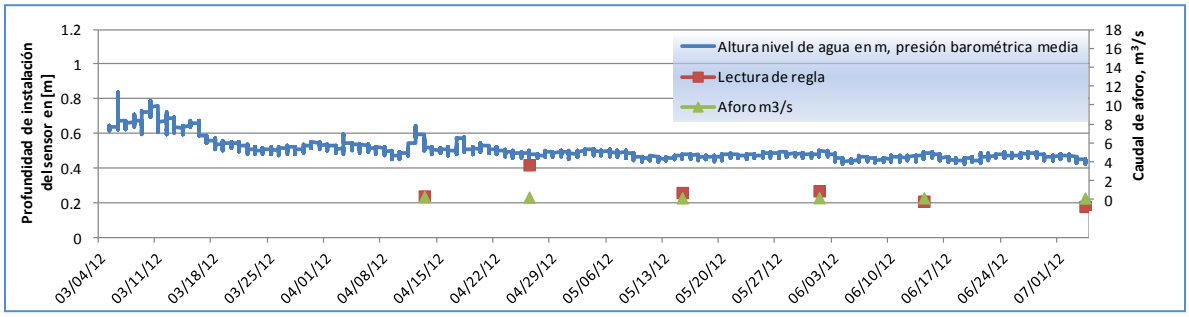


Figura A2-19. Lecturas de profundidad de agua mediante sensor, regla limnimétrica y valores de aforos puntuales en la Estación geiser@Sajama.

A2-20 Niveles de agua: Estación geiser (4353 msnm)

Similar a las condiciones en la estación situada aguas abajo del curso de agua, la Estación geiser se sitúa en un canal de forma regular. La correlación entre los caudales y los niveles de agua sugiere regímenes de flujo similares a los encontrados aguas abajo del curso del río.

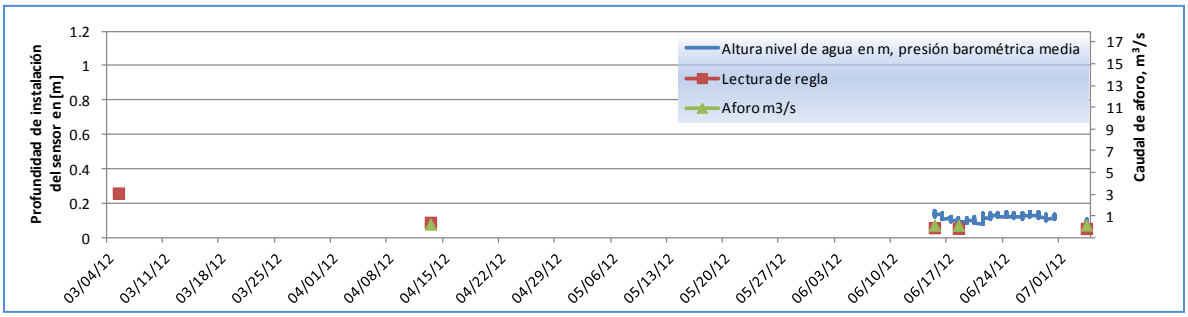


Figura A2-20. Lecturas de profundidad de agua mediante sensor, regla limnimétrica y valores de aforos puntuales en la Estación geiser.

A2-21 Niveles de agua: Estación Sajama@Manasaya (4290 msnm)

La serie de datos utilizables es corta después de la reubicación del sensor el 01/06/2012. No da lugar a observaciones.

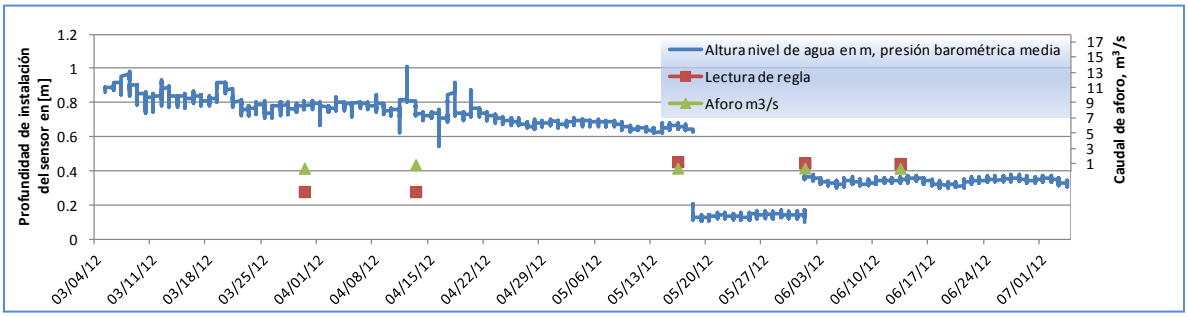


Figura A2-21. Lecturas de profundidad de agua mediante sensor, regla limnimétrica y valores de aforos puntuales en la Estación Sajama@Manasaya

A2-22 Niveles de agua: Estación Manasaya@Sajama (4287 msnm)

No se observan anomalías, con excepción del quiebre en la series de valores atribuida al cambio de lugar de la estación debido a cambios en la sección transversal del sitio de emplazamiento original.

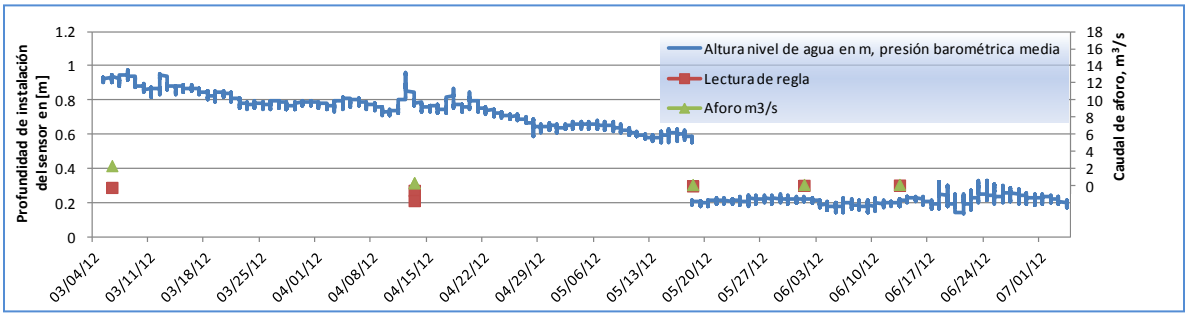


Figura A2-22. Lecturas de profundidad de agua mediante sensor, regla limnimétrica y valores de aforos puntuales en la Estación Manasaya@Sajama.

A2-23 Niveles de agua: Estación Manasaya (4386 msnm)

El sensor no está enterrado en sedimentos, lo cual hace que esta estación sea una de las más útiles. Desafortunadamente, la obstrucción de la sección mediante la construcción de una pequeña obra de toma hace que exista gran incertidumbre acerca de la utilidad de los datos a partir del 27/06/2012. La anomalía se presenta al observar que los niveles de regla son mucho más bajos que los niveles de agua calculados. La razón se desconoce.

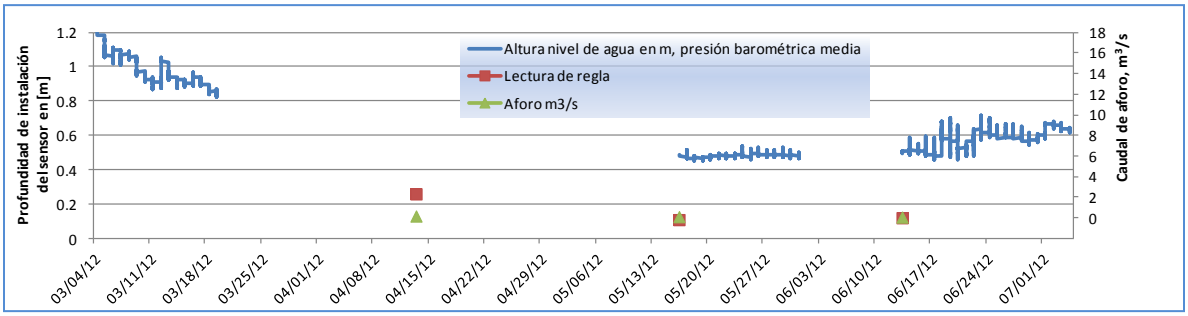


Figura A2-23. Lecturas de profundidad de agua mediante sensor, regla limnimétrica y valores de aforos puntuales en la Estación Manasaya.

A2-24 Niveles de agua: Estación Aychuta abajo (4424 msnm).

Se observa inestabilidad en las inferencias de profundidad de flujo, debido a los niveles bajos de flujo. Debido a la corta duración de la serie no es posible realizar mayor análisis.

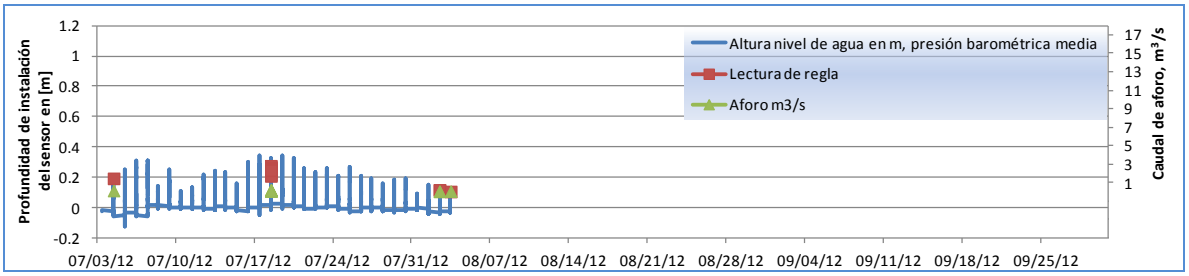


Figura A2-24. Lecturas de profundidad de agua mediante sensor, regla limnimétrica y valores de aforos puntuales en la Estación Aychuta abajo.