

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

ANEXO AL INFORME DE PROGRESO SEMESTRAL

NORDIC CLIMATE FACILITY



LA PAZ, BOLIVIA



PRIMER INFORME TECNICO DE AVANCE, CORRESPONDIENTE A LA CONSULTORIA:

Estudio hidrológico de los potenciales impactos del cambio climático en la oferta de agua en micro cuencas seleccionadas situadas en el Parque Nacional Sajama

Dirigido a: Carlos Jorge Carafa Rada, Director Ejecutivo Agua Sustentable.

Preparado por: Freddy Angel Soria Cespedes, Consultor Externo Independiente.

Proyecto: ADAPTING TO CLIMATE CHANGE IN BOLIVIAN ANDEAN COMMUNITIES
DEPENDING ON TROPICAL GLACIERS.

Fecha de entrega: 27 de marzo de 2012.

Ref.: Primer Informe de Avance.

Mediante la presente, tengo el agrado de dirigirme a su persona, como Director Ejecutivo de Agua Sustentable, a objeto de entregar el Primer Informe de Avance correspondiente a la consultoría encargada de realizar el “Estudio hidrológico de los potenciales impactos del cambio climático en la oferta de agua en micro cuencas seleccionadas situadas en el Parque Nacional Sajama” dentro del Proyecto “Adapting to Climate Change in Bolivian Andean Communities Depending on Tropical Glaciers”.

La entrega del presente Informe de Avance se realiza en el mes de marzo de 2012, en cumplimiento con los Términos de Referencia que forman parte del Contrato de Servicios de Consultoría suscrito en fecha 25 de enero de 2012. Para el efecto, el presente Primer Informe de Avance tiene el objetivo de reportar el avance a la fecha en el cumplimiento de los siguientes objetivos específicos propuestos:

- Objetivo específico “A”: Realizar el estudio de variaciones históricas de áreas con cobertura glaciar, en las micro cuencas del área de estudio. El avance a la fecha de este objetivo se presenta en la Parte 1 del Informe de Avance.
- Objetivo específico “F”: Establecimiento de la red de monitoreo de las micro cuencas con apoyo de técnicos de Agua Sustentable y gente de las comunidades; asesoramiento y diseño en la construcción de obras civiles pequeñas. El avance a la fecha de la red de monitoreo se presenta en la Parte 2 del Informe de Avance, mientras que el avance a la fecha del diseño y construcción de obras civiles pequeñas se presenta de la Parte 3 a la Parte 8 del Informe de Avance.

Sin otro particular me despido,

Atentamente,

Freddy A. Soria Cespedes

INGENIERO CIVIL E HIDRÓLOGO (PhD, M Eng.)

INDICE

PARTE 1. Estudio de variaciones históricas de áreas con cobertura glaciar, en las micro cuencas del área de estudio

1.1 Introducción y justificación	1
1.2 La región de los Andes Centrales y el Nevado Sajama	2
1.3 La teledetección para el estudio de la superficie de la tierra	3
1.3.1 La Misión Landsat	3
1.4 Metodología	4
1.4.1 Imágenes utilizadas y criterios de selección de imágenes	4
1.4.2 Pre procesamiento de las imágenes	5
1.4.3 Procesamiento de las imágenes	5
i) Método del índice de bandas	6
ii) Método de la clasificación no supervisada	6
1.5 Resultados	7
1.5.1 Selección del método para la delimitación de áreas cubiertas por glaciares	7
1.5.2 Variación histórica de las superficies cubiertas por glaciares	8
1.5.3 Criterio para la interpretación de la variación histórica observada en las áreas cubiertas por glaciares	10
1.6 Conclusiones y recomendaciones	11
1.7 Referencias bibliográficas	11
Anexo 1.1 Imágenes utilizadas en el análisis	13

PARTE 2. Establecimiento de la red de monitoreo de las micro cuencas

2.1 Introducción	14
2.2 Red de monitoreo hidrológico propuesta	14
2.3 Tipo de instrumentos instalados	15
2.4 Red de monitoreo hidrológico: futuras instalaciones	16
2.4 Conclusiones y recomendaciones	17
2.5 Referencias bibliográficas	17
Anexo 2.1 Coordenadas de los puntos de la red de monitoreo	18

PARTE 3. Asesoramiento y diseño en la construcción de obras civiles pequeñas. Obra de toma Comunidad Manasaya. Alternativa 1.

3.1 Introducción	19
3.1.1 Antecedentes	19
3.1.2 Obras de toma: Fundamentos teóricos	19
3.2 Criterios de diseño	19
3.2.1 Características generales de las obras proyectadas y del sitio de emplazamiento	19

3.3 Datos de entrada	23
3.4 Selección del tipo de obra de toma	25
3.4.1 Consideraciones generales de diseño	25
3.4.2 Consideraciones hidráulicas: Obra de cierre	25
3.4.3 Consideraciones hidráulicas: Boca toma	28
3.5 Referencias bibliográficas	31

PARTE 4. Asesoramiento y diseño en la construcción de obras civiles pequeñas. Obra de toma Comunidad Manasaya. Alternativa 2.

4.1 Introducción	32
4.2 Datos de entrada	32
4.3 Selección del tipo de obra de toma	32
4.3.1 Consideraciones generales de diseño	33
4.3.2 Consideraciones hidráulicas: Obra de cierre	33
4.3.3 Consideraciones hidráulicas: Boca toma	35
4.4 Referencias bibliográficas	37

PARTE 5. Asesoramiento y diseño en la construcción de obras civiles pequeñas. Obra de toma Comunidad Manasaya. Alternativa 3.

5.1 Introducción	38
5.2 Datos de entrada	38
5.3 Selección del tipo de obra de toma	39
5.3.1 Consideraciones generales de diseño	39
5.3.2 Consideraciones hidráulicas: Obra de cierre	39
5.3.3 Consideraciones hidráulicas: Boca toma	41
5.4 Referencias bibliográficas	42

PARTE 6. Asesoramiento y diseño en la construcción de obras civiles pequeñas. Obra de toma Papelpampa. Alternativa 1.

6.1 Introducción	43
6.2 Datos de entrada	43
6.3 Selección del tipo de obra de toma	43
6.3.1 Consideraciones generales de diseño	44
6.3.2 Consideraciones hidráulicas: Obra de cierre	44
6.3.3 Consideraciones hidráulicas: Boca toma	46
6.4 Referencias bibliográficas	47

PARTE 7. Asesoramiento y diseño en la construcción de obras civiles pequeñas

7.1 Introducción	49
7.2 Análisis de precios unitarios y material	49
7.2.1 Análisis de precios unitarios	49

7.2.2 Cantidad de material a ser empleado	51
7.3 Conclusiones y recomendaciones	51
Anexo 7.1 Plano de las obras canal Manasaya	52
Anexo 7.2 Plano de las obras canal Papel Pampa	55

PARTE 1 DEL INFORME DE AVANCE, CORRESPONDIENTE AL:

Informe de Avance del “Estudio hidrológico de los potenciales impactos del cambio climático en la oferta de agua en micro cuencas seleccionadas situadas en el Parque Nacional Sajama”

OBJETIVO ESPECIFICO “A”: Realizar el estudio de variaciones históricas de áreas con cobertura glaciar y áreas cubiertas por bofedales andinos, en las micro cuencas del área de estudio.

Preparado por: Freddy Soria, 27 de marzo de 2012

1.1 INTRODUCCION Y JUSTIFICACION.

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 fundamental 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 A, se realiza el estudio de variaciones históricas de áreas con cobertura glaciar y áreas cubiertas por bofedales andinos, en las micro cuencas del área de estudio.

La parte correspondiente al Informe de Avance presente se enfoca al estudio de la heterogeneidad espacio-temporal en la respuesta hidrológica superficial de una parte de la región del Parque Nacional Sajama, mediante el uso de indicadores cualitativos construidos a través de técnicas de teledetección. Dentro de este marco, se propone iniciar el Estudio hidrológico presente con la utilización de estas herramientas de teledetección debido a que la misma es una de las pocas alternativas que pueden proporcionar a bajo costo, información histórica (cualitativa, multitemporal) de un área extensa, espacialmente heterogénea, y pobremente monitoreada (ambos desde el punto de vista del régimen hidrológico superficial). La presente área de estudio se denomina un área pobremente monitoreada debido a la baja densidad espacial de la red de monitoreo hidro-climatológico establecida (menor a la recomendada por la OMM, 1994).

Dentro de este marco se selecciona dos elementos geomorfológicos, observables a la resolución espacio-temporal de las imágenes remotamente adquiridas disponibles, que a nuestro juicio proveen elementos indicadores de potenciales cambios históricos en las tendencias hídricas superficiales observables en el área de estudio. Los elementos geomorfológicos seleccionados son:

- i) Elemento 1: Las áreas con cobertura glaciar en las microcuencas del área de estudio.
La aplicación de técnicas de teledetección resulta en un análisis multitemporal que genera parámetros cualitativos (cuantitativos, si se considera que las áreas calculadas representan de alguna manera la pérdida de masa en los glaciares). Se estudia este elemento con el objeto de identificar relaciones entre los cambios históricos observables en el área de la superficie glaciar (área en proyección horizontal) y los cambios en las tendencias de variables climáticas registradas en estaciones meteorológicas instaladas en tierra.
- ii) Elemento 2: Las áreas con cobertura de bofedales andinos.
Se estudia este elemento con el objeto de estudiar los potenciales impactos de los cambios en los patrones climáticos en los bofedales andinos ubicados en la zona de estudio, asumiendo que los mismos constituyen elementos que regulan la respuesta hídrica superficial.

El presente Informe de Avance se enfoca en el estudio multitemporal de las áreas con cobertura glaciar. El estudio multitemporal de las zonas cubiertas por bofedales andinos, así como el análisis conjunto de las condiciones climáticas con aquellos potenciales cambios históricos observados serán realizados en el siguiente Informe de Avance de la presente consultoría.

1.2 LA REGION DE LOS ANDES CENTRALES Y EL NEVADO SAJAMA.

El Volcán Sajama (elevación del pico a 6542 msnm) se sitúa en una región con clima semiárido, con precipitación media alrededor de los 350 mm, precipitados mayormente entre los meses de diciembre y marzo. Las heladas ocasionales y las nevadas durante la época de estiaje (entre mayo-junio y agosto) son también comunes, ocasionados por la entrada de masas de aire polares de la zona planetaria de vientos del oeste (Vuille, 1999). En esta zona, los niveles específicos de humedad (durante la época húmeda) se incrementan debido a los vientos del este, mientras que los vientos secos del oeste obstaculizan el transporte de humedad de la zona de la Amazonía y el Chaco hacia la zona del Altiplano.

La línea de nieve (snow line) en la región del Nevado Sajama se presenta con variaciones de este a oeste, guiada por la variación espacial de la precipitación, la cual disminuye a medida que se aleja de las fuentes de humedad constituidas por el Atlántico Tropical y la cuenca del Río Amazonas (Thompson, 2002). En esta región, numerosos reportes hacen énfasis en que existe una principal diferencia entre los regímenes hielo-deshielo en esta zona y la observada en otras zonas situadas a diferentes latitudes: la coincidencia de los periodos de acumulación y ablación. A escalas de tiempo cortas, la mencionada característica hace que a la nieve permanezca por periodos de no más de 15 días fuera de los límites de los glaciares (ver la **Figura 1**), pero a escalas de tiempo mayores, hace que los glaciares de esta zona sean particularmente más sensibles a cambios en las condiciones hidro-meteorológicas de gran escala tales como los eventos ENSO (Arnaud et al., 2001).

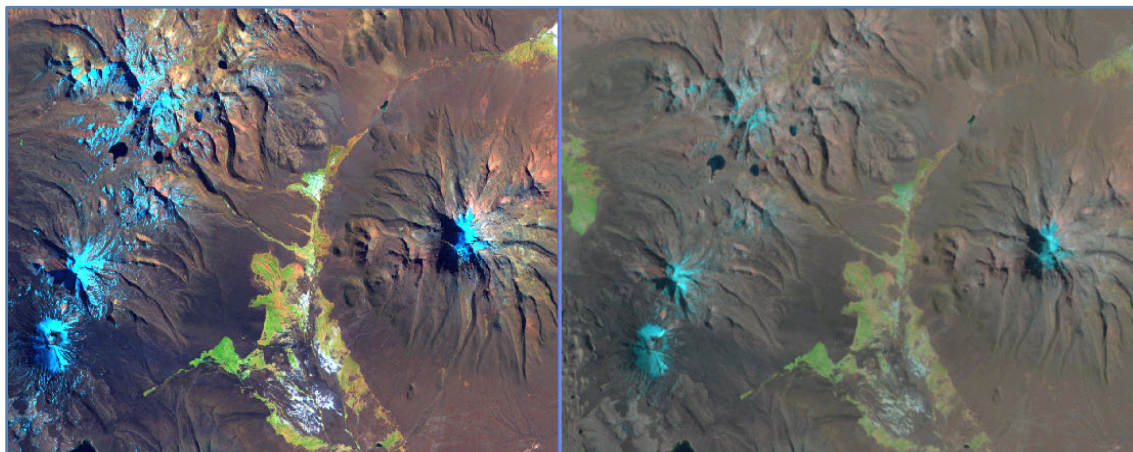


Figura 1. Pérdida de cobertura de nieve observada mediante la comparación entre imágenes Landsat TM5 adquiridas el 25 de julio de 1990 (izquierda) y el 9 de agosto de 1990 (derecha) (2 semanas de diferencia entre los días de adquisición).

Dentro de este marco, varios estudios observaron que la cobertura glaciar en la zona presentó una disminución en la superficie, probablemente a partir de la década de 1930, continuando de manera moderada hasta los comienzos de la década de 1980, y retrocediendo de manera permanente durante la década de 1990 (Vincent et al., 2005). Aparentemente, esta tendencia a recesión disminuyó en la década del 2000 e inclusive durante los años 1999-2000 se

observaron algunos avances (Vincent et al., 2005). Durante estos estudios, la mención a las alteraciones climatológicas causadas por los eventos ENSO fueron un punto de coincidencia, debido a los efectos del mismo en la disminución de la precipitación y el consecuente balance de masa negativo medido en las masas glaciares (e.g., Arnaud et al., 2001; Vincent et al., 2005).

1.3 LA TELEDETECCION PARA EL ESTUDIO DE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA.

La teledetección es el estudio de las propiedades geométricas y los cambios en la superficie de la tierra y los elementos naturales o artificiales establecidos sobre la superficie de la tierra a través de información adquirida utilizando plataformas que no tienen contacto directo con la superficie estudiada. Esta es una técnica utilizada desde que las cámaras ópticas fueron utilizadas en plataformas remotas primero, y en satélites espías luego. La teledetección óptica tiene el potencial de estimar de manera cuantitativa variables relacionadas a procesos de la superficie de la tierra (Liang, 2004). Entre las principales fuentes de información de este tipo de datos, están los datos producidos por la misión Landsat desde el año 1972 hasta nuestros días. Hasta hace algunos años, el acceso a este tipo de información era restringido; sin embargo, desde enero de 2009 hasta finales de 2009, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) empezó a entregar la totalidad de la información residente en sus bases de datos al público en general, a costo cero. En la actualidad, el acceso a la información permanece abierto, sin restricciones, pero con algunos problemas desde que la agencia espacial encargada de su administración (NASA) tuvo problemas con una de sus plataformas (ETM+), y decidió al mismo tiempo cortar la transmisión de datos a través de la plataforma alternativa (Landsat 5). Aunque su uso es aún restringido, esta tendencia de liberar la información al público continua y se va ampliando gradualmente hasta alcanzar imágenes tomadas por Imágenes Satelitales Desclasificados de satélites espías adquiridas de 1963 a 1980 por el Sistema de Vigilancia KH-7 y el Sistema de Mapeo KH-9. De esta manera, el potencial del uso de aquella información para aplicaciones civiles es ciertamente alta.

Dentro del mismo tipo de imágenes, una fuente alternativa ampliamente utilizada en estudios medio ambientales es la información producida por la misión MODIS. Esta misión adquiere datos mediante un espectro radiómetro que provee información de la superficie de la tierra y la cobertura de nubes en 36 bandas discretas, de ancho espectral menor al de los sensores de la misión Landsat que varía entre 0.4 a 14.0 μm (Barnes et al., 2003). El tiempo de paso del satélite TERRA MODIS es en la mañana y del AQUA MODIS es en la tarde, lo cual provee una alternativa interesante para la observación en regiones cubiertas por nubes (la misión Landsat adquiere imágenes cada 16 días, i.e., el satélite pasa por un mismo sitio cada 16 días). A pesar de que la característica mencionada es muy importante, MODIS provee información a una resolución espacial de 250 m a 1 km nadiral (Hall y Riggs, 2007), la cual es una desventaja en aplicaciones sobre regiones pequeñas, tal como ocurre con las áreas cubiertas por glaciares en los Andes. Una desventaja adicional de la información adquirida por estos satélites es que el TERRA MODIS recién empezó a adquirir información el 24 de febrero de 2000, mientras que el AQUA MODIS empezó a adquirir información el 24 de junio de 2002. Por las dos desventajas señaladas (resolución espacial y corto registro histórico), para el presente estudio se utilizó imágenes Landsat.

1.3.1 La misión Landsat.

Como se mencionó en el párrafo anterior, el mayor valor de los records de la misión Landsat es que ésta constituye la única fuente de información de su tipo que proporciona información multispectral desde el año 1972. El inicio de las misiones Landsat comenzó aquel año mediante la puesta en servicio de dos sensores y un Scanner Multiespectral MSS de 80 m de resolución. Aquella misión terminó de funcionar el año 1978, relevada por las misiones Landsat 2 en 1975 (fin de servicio en 1982), y Landsat 3 en 1978 (fin de servicio en 1983). Luego en

1984, se lanzó las misiones Landsat 4 y Landsat 5, llevando un instrumento de Mapeador Temático TM, el cual mejoró la resolución terrestre a 30 m, e incluyó 3 nuevas bandas. Los instrumentos de la misión Landsat 4 TM finalizaron su servicio el año 1993, mientras que los de la Landsat continuó enviando información hasta noviembre de 2011 (actualmente, NASA continúa evaluando las opciones para mantener el mismo en funcionamiento). Landsat 6 fue lanzado en 1993, pero fue perdido después de su lanzamiento. Luego en 1999, NASA envió la misión Landsat 7, con el instrumento Mapeador Temático Mejorado ETM+, el cual mejoró la resolución de una banda pancromática adicional a 10 m, y la mejora de la resolución de la banda térmica de 120 m (a bordo del TM) a 60 m. NASA accedió a enviar una nueva misión Landsat 8 para el 2013, aunque aún se desconoce si la información adquirida por estos nuevos sensores estarán disponibles para el público en general.

1.4 METODOLOGIA.

1.4.1 Imágenes utilizadas y criterios de selección de imágenes.

La fuente de información para el estudio presente es obtenida de la base de datos de imágenes Landsat de las misiones 4 hasta 7. Las imágenes obtenidas fueron obtenidas proyectadas al sistema UTM, WGS 84, en formato GeoTIFF, con restitución de convolución cúbica, y ortorectificadas con cobertura global del Visor Global de Visualización (GLOVIS) del Servicio Geológico de los Estados Unidos de Norteamérica (USGS). La base de datos mencionada tiene acceso libre.

El USGS entrega datos procesados a dos niveles: Nivel 1 con corrección geométrica (L1G), y Nivel 1 con efectos topográficos de terreno corregidos (L1T). El segundo implica que las imágenes tienen incorporada una corrección radiométrica sistemática, con precisión geométrica incorporada a través de puntos de control en tierra obtenidos de una Modelo de Elevación Digital DEM de referencia. El DEM de referencia es el producido a partir de la misión SRTM (Misión de Topografía por Radar del Transbordador Espacial), con resolución espacial de 30 arco segundos, del GTOPO 30. Las imágenes Landsat utilizadas fueron procesados por el USGS con el Sistema de Generación de Productos Nivel 1 (LPGS) o mediante el Sistema de Producción del Archivo Nacional de la Tierra (NLAPS). La principal diferencia entre ambos sistemas es el método de alineación de bandas utilizado, y los rangos de números digitales considerados (ver LPSO, 2012). Sin embargo, como todas las imágenes fueron adquiridas después de diciembre de 2008, las diferencias geométricas y radiométricas entre los productos de ambos sistemas ya fueron corregidos. En nuestro caso, todas las imágenes son producidas por el sistema LPGS.

Para la selección de las imágenes, se excluyó imágenes MSS imagery debido a la baja resolución especial, y debido a las deficiencias en las correcciones geométricas. Algunas imágenes TM fueron excluidas por la misma razón (por razones prácticas se omitió el proceso de co-registro de imágenes, debido a que no se justifica la enorme inversión de tiempo demandada por dicho proceso).

Para la mayor parte de las imágenes, se procuró seleccionar imágenes con calidad 9, la cual correspondiente a la mayor calidad especificada en las imágenes provistas por la base de datos del USGS GLOVIS. También son excluidas del análisis aquellas imágenes capturadas por la plataforma Landsat ETM+ con el SCS en modo apagado (SCS off), debido a la poca información secundaria existente que nos permita corregir el mencionado defecto.

Aparte de las consideraciones señaladas, el principal criterio de selección de imágenes es la ocurrencia del fenómeno de El Niño, considerando la relevancia que aquel fenómeno tiene en las anomalías climatológicas observadas en la zona (e.g., ver Arnaud et al., 2001). Para el efecto, la identificación de anomalías se realizó mediante las tablas de cambios en el Índice del Niño en los Océanos (ONI) elaboradas por la Administración Nacional del Océano y la

Atmósfera (NOAA) de los Estados Unidos (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml) (ver Buitrón y Fernández, 2012). De esta manera, las imágenes seleccionadas para el análisis se presentan en el Anexo 1.

1.4.2 Pre procesamiento de las imágenes.

Asumiendo que las imágenes corregidas hasta un nivel de L1G lograron una reducción del error geodético a aproximadamente 30 m en terrenos con relieve moderado, se considera que las correcciones geométricas necesarias fueron realizadas de manera implícitas a través de la mencionada corrección. En referencia a las correcciones atmosféricas necesarias, tal como se sugiere en Soria y Kazama (2009) (en base a la sugerencia de Arnaud et al., 2001), se considera que las mismas se logran a través de la calibración radiométrica de las imágenes. Adicionalmente, basado en la literatura mencionada, las correcciones topográficas se logran a través del uso de combinaciones de bandas (Liang, 2004).

Para la realización del análisis multitemporal (historico), la variación espectral y radiométrica se calibra calculando los valores de reflectancia de los píxeles considerando principalmente los siguientes parámetros: las elevaciones angulares y los azimuts de la posición del sol al momento de la adquisición de la imagen (Chander et al., 2009). Luego, basado en los valores de reflectancia, se calculan índices y/o se realiza la clasificación no supervisada.

La calibración radiométrica se realiza utilizando las ecuaciones mostradas a continuación:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{QCAL_{MAX} - QCAL_{MIN}} \right) * (DN - QCAL_{MIN}) + LMIN_{\lambda} \quad (1),$$

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{ESUN_{\lambda} * \cos\left(\frac{\pi}{180}(90 - \theta)\right)} \quad (2)$$

..donde, λ es la banda, L_{λ} es la radiancia espectral en la apertura del sensor en [watts/(m²*ster* μ m)]; $QCAL$ es el valor del pixel calibrado en números digitales [DN]; $LMIN_{\lambda}$ es espectral radiancia escalada a $QCAL_{MIN}$ en [watts/(m²*ster* μ m)]; $LMAX_{\lambda}$ es la radiancia espectral escalada a $QCAL_{MAX}$ en [watts/(m²*ster* μ m)]; $QCAL_{MIN}$ es la mínima cantidad valor del pixel calibrado correspondiente a $LMIN_{\lambda}$ en [DN]. El $QCAL_{MIN}$ es 1 para los productos Landsat ETM LPGS y NLAPS procesados después del 4-abril-2004; de otra manera, es igual a 0 para Landsat MSS, TM, ETM. El $QCAL_{MAX}$ es el máximo valor del píxel calibrado correspondiente a $LMAX_{\lambda}$ en [DN]. El $QCAL_{MAX}$ es 255 para Landsat TM, ETM; es 127 para todos los Landsat MSS, con la excepción de Landsat 1 a 3 adquirida antes del 1-febrero-1979, y Landsat 4 adquirida antes del 22-octubre-1982). El ρ_{λ} es la reflectancia planetaria en el satélite [adimensional]; d es la distancia Tierra-Sol en [unidades astronómicas] calculadas en base al día juliano de la fecha de adquisición de la imagen; $ESUN_{\lambda}$ es la irradiación solar exoatmosférica en [watts*m⁻²* μ m⁻¹]; θ es el ángulo cenital del sol en [grados], cuyo valor se encuentra en la metadata de la imagen. Los valores de $LMAX_{\lambda}$, $LMIN_{\lambda}$, $ESUN_{\lambda}$ varían de acuerdo al sensor, y los valores se pueden encontrar en Chander et al. (2009).

1.4.3 Procesamiento de las imágenes.

Para evaluar las proyecciones horizontales de los glaciares y los bofedales se consideró el cálculo de índices basados en el concepto de la línea del suelo (Liang, 2004) y/o métodos de clasificación no supervisada (ver Buitrón y Fernández, 2012).

i) Método del índice de bandas.

Para el estudio de variaciones en las superficies glaciares, el índice de bandas considerado es el Índice de Nieve de Diferencias Normalizadas *NDSI*:

$$NDSI = \frac{\rho_{VERDE} - \rho_{SWIR}}{\rho_{VERDE} + \rho_{SWIR}} \quad (3)$$

..donde, ρ_{VERDE} , ρ_{SWIR} , se refieren a la reflectancia de las bandas verde e infrarroja corta, respectivamente. Entre los métodos de mapeo de glaciares, estudio previos han demostrado que el *NDSI* varía de -1 and 1, y provee una efectiva forma de permitir la diferenciación entre el término del glaciar y las morrenas (e.g, Silverio y Jaquet, 2005). Por otro lado, otros estudios (e.g., Soria y Kazama, 2009) han demostrado que mejores resultados pueden obtenerse mediante la composición de color falso de onda corta infrarroja (i.e, banda 2 en azul, banda 4 en verde, y banda 7 ó 5 en rojo).

ii) Método de la clasificación no supervisada.

El objetivo del cálculo de índices mediante el álgebra de bandas es la clasificación de los valores que representan los píxeles de una escena. De la misma manera, la clasificación de los números contenidos en cada píxel puede realizarse mediante otros métodos de clasificación, ya sea supervisada o sin supervisión o no supervisada. La clasificación supervisada se realiza en general cuando tenemos datos de campo de lecturas de reflectancia de la superficie de interés. Por otro lado, cuando este tipo de información no está disponible (por ejemplo, debido a la ausencia de un instrumento que nos permita realizar estas lecturas), es posible realizar una clasificación mediante lecturas de superficies tipo generadas en otros estudios similares. Existen varios algoritmos utilizados en el campo de la teledetección para la realización de la supervisión no clasificada. Para el presente proyecto, se consideró el algoritmo presentado en Buitrón y Fernández (2012). El mismo se resume a continuación.

Paso 1.- Selección del área de interés (AOI). Se realiza debido a que se considera solamente una entidad (glaciares). Este primer paso se realiza con el objeto de discriminar las áreas que no están cubiertas por glaciares:

Paso 2.- Selección de variables que intervienen en el análisis. En nuestro contexto las variables son las bandas espectrales usadas en la clasificación, previa transformación y geométrica y atmosférica.

Paso 3.- Selección de un criterio para medir la similitud o distancia entre casos. Los casos son los valores radiométricos de los píxeles de cada una de las bandas que interviene en el análisis. De acuerdo con Buitrón y Fernández (2012), *en este espacio multivariado se trata de encontrar los grupos de píxeles con valores radiométricos similares, para luego equipararlos con alguna de las clases de información de nuestra leyenda.*

Paso 4.- Selección de un criterio para agrupar los casos similares. Siguiendo la metodología propuesta en Buitrón y Fernández (2012), la delimitación de cada grupo espectral se inicia señalando dos criterios: uno que mida la similitud entre píxeles y otro que marque las condiciones del proceso de agrupamiento.

Paso 4a.- Criterio para medir la distancia entre píxeles: Se selecciona la distancia euclidiana:

$$D_{a,b} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (ND_{a,k} - ND_{b,k})^2} \quad (4)$$

..donde, $D_{a,b}$ es la distancia entre dos píxeles a y b , $ND_{a,k}$ y $ND_{b,k}$ son los valores radiométricos de los píxeles a y b en la banda k , y m es el número de bandas.

Paso 4b.- Algoritmo de agrupamiento: Se selecciona el ISODATA. Este algoritmo señala una serie de centros de clase, de acuerdo al número y forma indicados por el usuario. Luego se asignan todos los píxeles de la imagen al centro de clase más próximo, y se calculan de nuevo los centros de clase teniendo en cuenta los valores de todos los píxeles que se hayan incorporado. Una razón práctica para que Buitrón y Fernández (2012) seleccionaran este algoritmo es que el mismo está implementado en la mayoría de los programas de procesamiento de imágenes disponibles en el mercado.

Paso 5.- Reducción de islas o grupos de píxel aislados. Posterior a la clasificación y reclasificación de asignaturas, se procede a eliminar islas que generalmente se observan después de una nevada en concavidades. En la práctica, Buitrón y Fernández (2012) sugieren eliminar aquellos que sean mayor de 6-10 píxeles. Nuevamente, la referencia citada sugiere el uso de algoritmos implementados en programas de procesamiento de imágenes.

Paso 6.- Exportación a formato vectorial y cálculo de las áreas cubiertas por los glaciares mediante herramientas SIG.

1.5 RESULTADOS.

1.5.1 Selección del método para la delimitación de áreas cubiertas por glaciares.

La selección del método (técnica de teledetección) utilizado para la delimitación de las áreas cubiertas por glaciares, se realizó mediante la comparación de los resultados obtenidos de la aplicación del índice NDSI y la aplicación de una clasificación no supervisada. Ambos métodos fueron utilizados para estudiar la superficie glaciar en una imagen Landsat con calidad 9 (nomenclatura USGS-GLOVIS), con ausencia de cobertura de nubes sobre el área estudiada, adquirida durante una fecha donde los efectos de fenómenos climatológicos (El Niño) son poco perceptibles.

Los resultados de la comparación demuestran que el método de la clasificación no supervisada se ajusta mejor a las características geomorfológicas del área estudiada (ver **Figura 2**). Específicamente, la principal ventaja en la aplicación de esta metodología es que la misma permite la discriminación de las áreas cubiertas por sombras en zonas con pendientes fuertes. Una ventaja adicional es que este método permite discriminar las superficies cubiertas por glaciares de las morrenas y el suelo circundante. Aunque el método de clasificación no supervisada aplicado tiene la ventaja de que, comparada con la aplicación del NDSI, reduce considerablemente el tiempo de post procesamiento al disminuir el número de píxeles que necesitan ser corregidos por digitalización manual, es importante indicar que permanece la dificultad en la identificación correcta del término del glaciar en la zona de ablación, en el área donde el glaciar está cubierto por un polvo fino que le da aspecto de “hielo sucio”. Para corregir este error la alternativa es el uso de imágenes con mayor resolución espacial-espectral (e.g., fotografías aéreas), lo cual está fuera de nuestro alcance debido a que incrementa notablemente el costo del estudio.

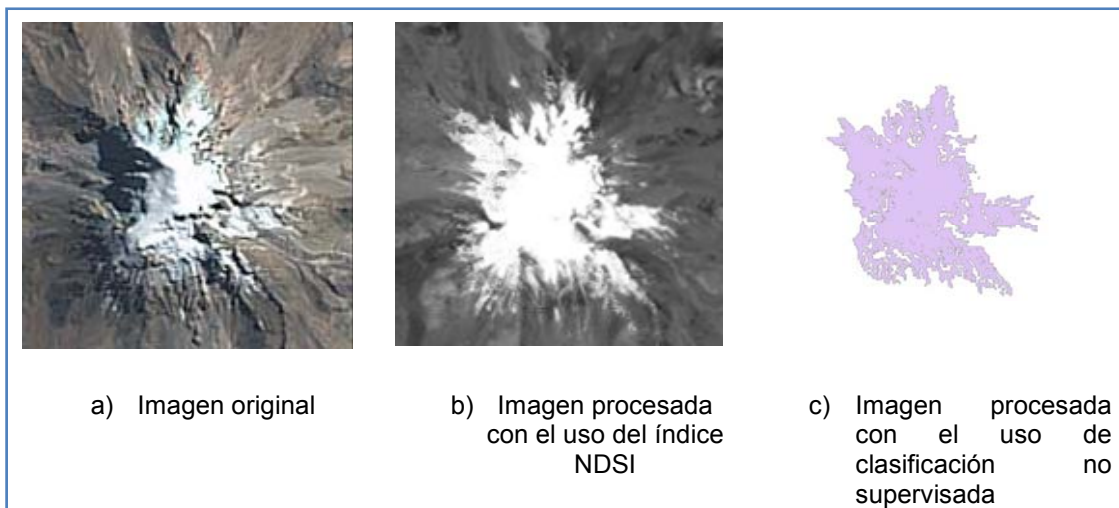


Figura 2. Comparación entre las dos técnicas de clasificación considerados (extraído de Buitrón y Fernández, 2012). La aplicación del NDSI muestra la tendencia a sobre estimar las áreas cubiertas por glaciares, principalmente en los píxeles de los bordes del glaciar.

1.5.2 Variación histórica de las superficies cubiertas por glaciares.

A través de la supervisión y coordinación con los pasantes contratados para apoyar la presente consultoría, los resultados obtenidos del proceso de digitalización y cálculo de las superficies glaciares se presentan en las Figuras 3, 4 y 5. Allí se observa dos aspectos citados en la literatura (e.g., Vuille, 1999) que son, la presencia de nevadas ocasionales en la época de estiaje que incrementan el área de la superficie cubierta por glaciares (ver los valores de los años 1998, 1999 y 2001), y la disminución en el área cubierta por los glaciares cuando se compara las áreas medidas en las imágenes en los años 1986 y 2011.

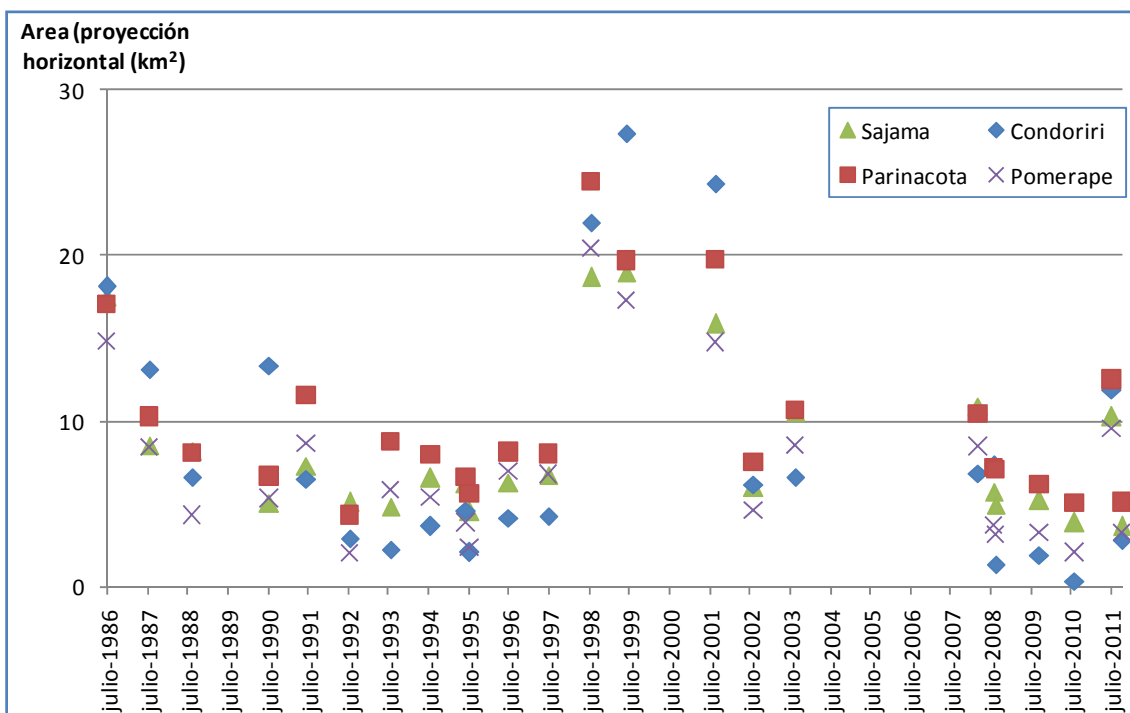


Figura 3. Tendencias históricas en el periodo 1986-2011 (época de estiaje), de las proyecciones horizontales de las áreas cubiertas por glaciares en la zona de estudio (Parque Nacional Sajama). Figura construida utilizando información de Buitrón y Fernández (2012).

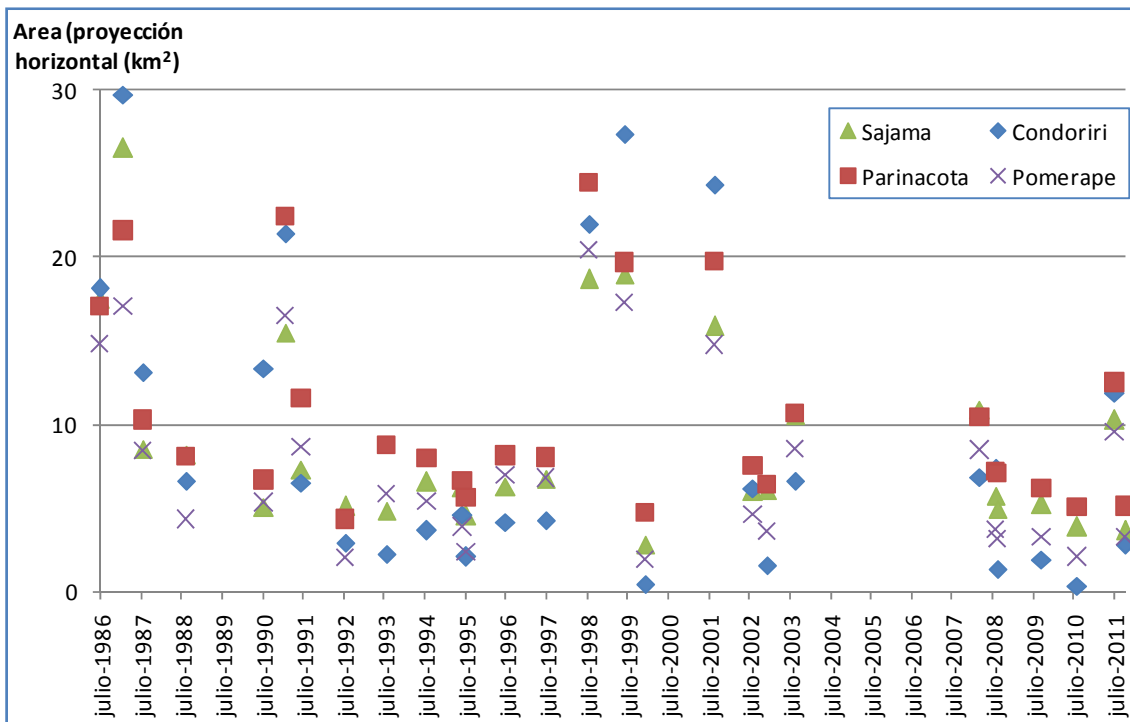


Figura 4. Tendencias históricas en el periodo 1986-2011 (utilizando imágenes adquiridas en la época de estiaje, más algunas imágenes adquiridas en la época húmeda), de las proyecciones horizontales de las áreas cubiertas por glaciares en la zona de estudio (Parque Nacional Sajama). Figura construida utilizando información de Buitrón y Fernández (2012).

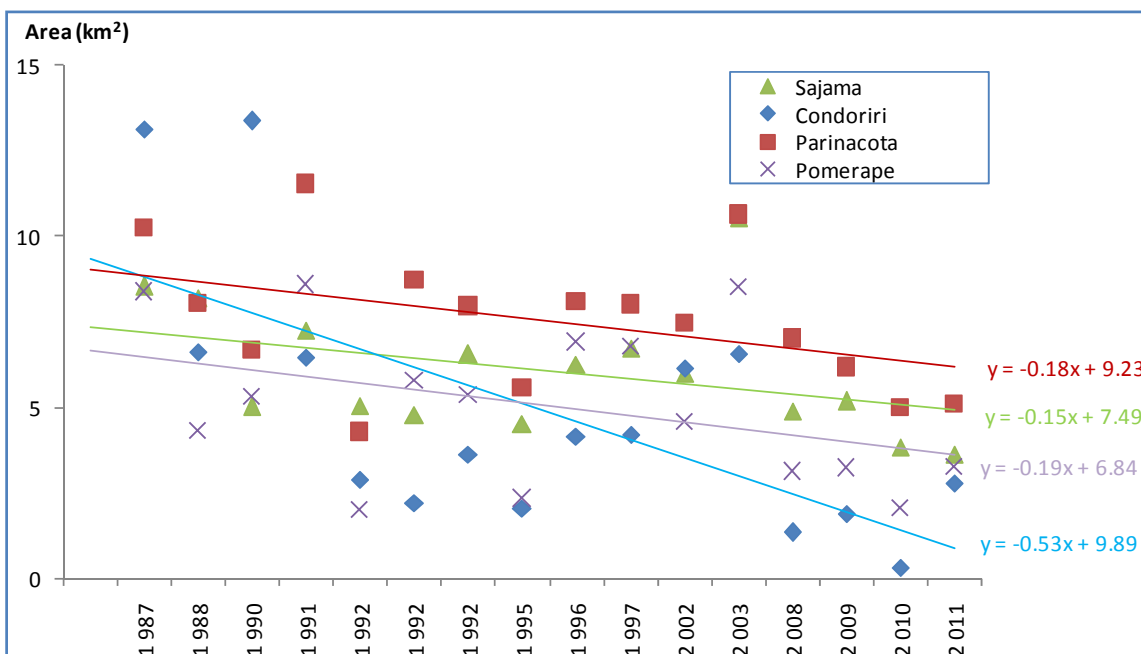


Figura 5. Tendencias históricas en el periodo 1986-2011, eliminando las imágenes adquiridas inmediatamente después de nevadas ocasionales observadas en época de estiaje, más las imágenes adquiridas en la época húmeda. Figura construida utilizando información de Buitrón y Fernández (2012).

Realizando un simple filtro de las imágenes que fueron adquiridas después de algún evento de precipitación (nieve ocasional de época de estiaje), se logra observar que al ajustar tendencias lineales a las áreas calculadas, se obtiene tendencias negativas en todos los casos (Figura 5), con la mayor pérdida aparente registrada en el glaciar Condoriri (0.53 km^2 de pérdida por año), seguida por el glaciar Pomerape (0.19 km^2 de pérdida por año), los cuales son los más pequeños. Siguiendo el mismo criterio, las pérdidas aparentes en los glaciares mayores observadas en el periodo 1987-2011 son, para el glaciar Parinacota (0.18 km^2 de pérdida por año), y el glaciar Sajama (0.15 km^2 de pérdida por año). Cuando se incluye las imágenes sin el filtro de la Figura 5, la pérdida de superficie en los glaciares se hace mayor, más dramática, pero exagerada (Figura 6). De esta manera, la interpretación de los resultados demanda extrema cautela, tal como se indica en el siguiente subtítulo.

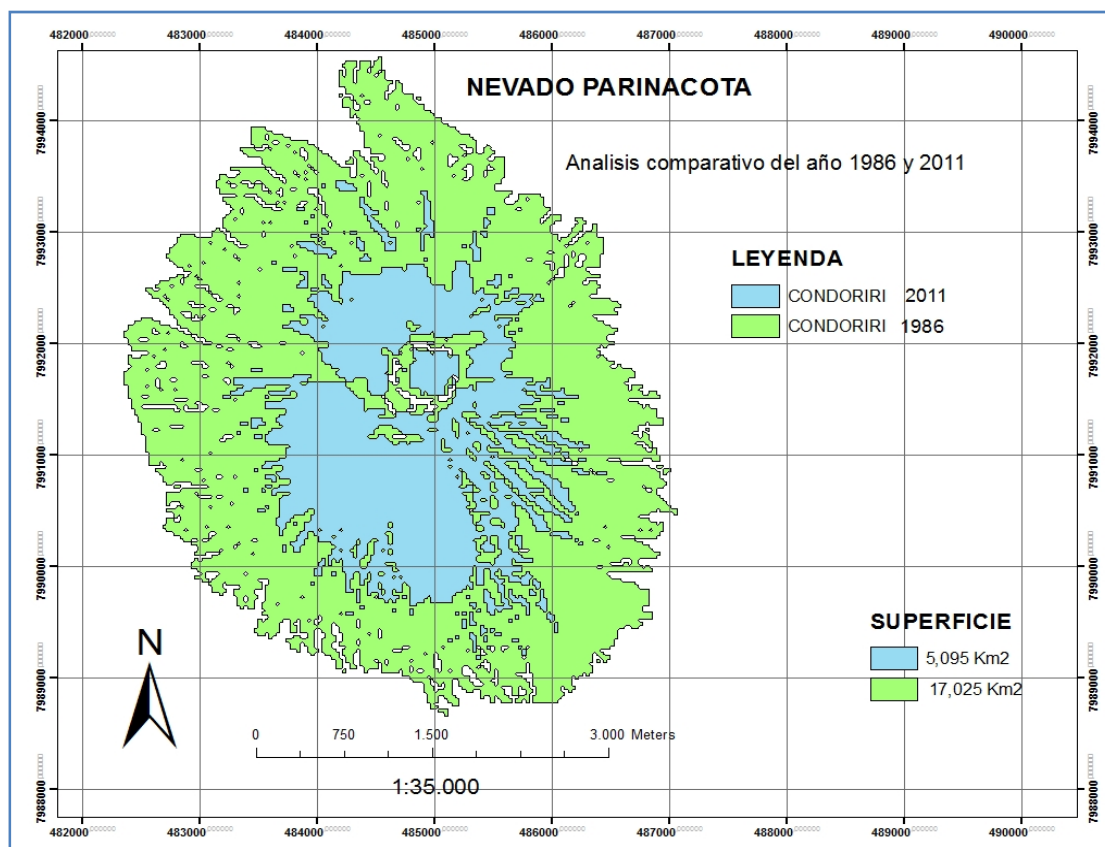


Figura 6. Pérdida en la superficie cubierta por el glaciar Parinacota entre los años 1986-2011. Figura extraída de Buitrón y Fernández (2012). La proyección es UTM, WGS 84.

1.5.3 Criterio para la interpretación de la variación histórica observada en las áreas cubiertas por glaciares.

Es muy importante señalar que las tendencias lineales (Figura 5) ajustadas a las variaciones históricas observadas en los glaciares del área de estudio son indicadores referenciales, debido a lo cual su interpretación debe realizarse con mucha cautela considerando que:

- i) Las áreas calculadas representan las proyecciones horizontales de superficies con importantes gradientes topográficos, por lo tanto los valores presentados no deben ser interpretados en unidades de volumen.
- ii) Las tendencias lineales ajustadas no necesariamente deben extrapolarse hasta cruzar el eje horizontal. Este fenómeno (la desaparición del glaciar) ocurrirá únicamente en aquellas masas glaciares donde la línea de equilibrio haya sido superada, tal como ocurrió en otras masas glaciares de los Andes como el Nevado

Chacaltaya (ver Ramirez et al., 2001; Francou et al., 2003; Andrade, 2008). Esta consideración es de extrema importancia para los fines del presente estudio, pues de momento no tenemos evidencia suficiente para realizar esta afirmación.

1.6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Bajo las consideraciones señaladas al final del párrafo precedente, se concluye que aunque los resultados evidencian una disminución en las proyecciones horizontales de las áreas cubiertas por los glaciares en el Parque Nacional Sajama en rangos dramáticos de 43% a 50%, es muy difícil predecir:

- Que la tendencia negativa es constante (ver consideración i), acápite 1.5.3 del presente Informe de Avance), o que la tendencia negativa implica la desaparición de los glaciares.
- Es muy complejo inferir el potencial impacto de esta variación en la disponibilidad de los recursos hídricos superficiales y subsuperficiales aguas debajo de las formaciones glaciares, sin antes analizar los resultados de mediciones históricas en campo de las variaciones en el caudal disponible en los cursos de agua superficiales y subsuperficiales.
- Por la misma razón, es aún más complejo señalar que el cambio climático es la razón por la cual se observa una disminución en las áreas cubiertas por los glaciares.

A partir de las conclusiones, las recomendaciones son simples y reiterativas: La comparación de las superficies glaciares observadas en las últimas tres décadas otorga interesante y útil información que indica que existe un cambio en la masa glaciar observado en el periodo 1987-2011), pero que no indica de manera cuantitativa la magnitud de ese cambio (e.g. en unidades de equivalente agua). Por esta razón y por las señaladas en los anteriores párrafos se recomienda que la interpretación de los resultados no debe ser lineal, principalmente en trabajos donde se busca inferir el impacto de los aportes de los glaciares en la variabilidad del régimen hídrico aguas debajo de aquellas formaciones glaciares, debido a la resolución de la fuente de información utilizada para la generación de los productos, y principalmente debido a que los cambios observados son producto de la interacción de varias variables y componentes del sistema hidrológico local y regional.

1.7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

Andrade, M., 2008. Mitos y verdades acerca del cambio climático en Bolivia. Revista Boliviana de Física 14, 42-49.

Arnaud, Y., Muller, F., Vuille, M., Ribstein, P., 2001. Influencia de la Oscilación Sur El Niño en un glaciar del volcán Sajama de 1963 a 1998 observado de Landsat y fotografía aérea, Revista de Investigación en Geofísica 106, 17773-17784.

Barnes, W. L., Xiong, X., Salomonson, V.V., 2003. Estado del Terra MODIS y del Aqua MODIS. Avances en Investigación Espacial 32 (11), 2099-2106.

Buitrón, C. y Fernández, J., 2012 (Marzo). Informe de avance - Evaluación de potenciales impactos del cambio climático en comunidades andinas bolivianas en una región del Parque Nacional Sajama, mediante el estudio espacial-multi temporal de variaciones en superficie observadas a través de imágenes satelitales. Agua Sustentable, La Paz.

Chander, G., Markham, B., Helder, D., 2009. Resumen de los coeficientes actuales de calibración para los sensores Landsat MSS, TM, ETM+, y EO-1 ALI. Teledetección del Medio Ambiente 113, 893-903.

Francou, B., Vuille, M., Wagnon, P., Mendoza, J., Sicart, J.M., 2003. Cambio climático en el trópico observado en un glaciar en los Andes centrales durante las últimas décadas del siglo veinte: Chacaltaya, Bolivia, 16°S. *Revista de Investigación Geofísica* 108, D5 4154.

García, M., 2012 (Enero). Caracterización agroclimática del Parque Sajama - Segundo informe técnico de consultoría de agro climatología, Proyecto Sajama. Agua Sustentable, La Paz.

Hall, D. y Riggs, G., 2007. Asesoramiento de la precisión de los productos de nieve de MODIS. *Procesos Hidrológicos* 21, 1534–1547.

Kincaid, J., 2007. Asesoramiento de tendencias climáticas regionales y cambios en los glaciares del Monte Jaya de Irian Jaya. Tesis de Maestría. Universidad de Texas A&M. 87 paginas.

Liang, S., 2004. Teledetección cuantitativa, Wiley, Nueva Jersey, 232.

Oficina Científica del Proyecto Landsat (LPSO), 2012: Landsat-7 Manual del Usuario de Datos Científicos, <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov>.

Organización Meteorológica Mundial (OMM), 1994. Guía de prácticas hidrológicas. Quinta edición, WMO-No. 168, Capítulo 20.

Ramirez, E., Francou, B., Ribstein, P., Descloitres, R., Mendoza, J., Gallaire, R., Pouyaund, B., Jordan, E., 2001. Desaparición de glaciares pequeños en los Andes tropicales: estudio de caso en Bolivia, Glaciar Chacaltaya (16°S). *Revista de Glaciología* 47 (157), 187-194.

Silverio, W. y Jaquet J., 2005. Mapeo de cobertura glaciar de la Cordillera Blanca (Peru) utilizando imágenes satelitales. *Teledetección del Medio Ambiente* 95, 342-350.

Soria, F. y Kazama, S., 2009. Evaluación de los efectos del cambio climático en las áreas de glaciares y áreas vegetadas utilizando imágenes satelitales. *Actas del 7° Congreso de Hidroinformática*. Concepción-Chile.

Soruco, A., Vincent, C., Francou, B., Ribstein, P., Berger, T., Sicart, J.E., Wagnon, P., Arnaud, Y., Favier, V., Lejeune, Y., 2009. Balance de masa del glaciar Zongo, Bolivia, entre 1956 y 2006, utilizando métodos glaciológicos, hidrológicos y geodéticos. *Anales de Glaciología* 50, 1–8.

Thompson, L., Mosley-Thompson, E., Davis, M., Henderson, K., Brecher, H., Zagorodnov, V., Mashiotta, T., Lin, P.-N., Mikhalev, V., Hardy, D., Beer, J., 2002. Records de muestras de hielo del Kilimanjaro: evidencia de cambio climático en el Holoceno en el África tropical. *Science* 298, 589-593.

Vincent, C., Ribstein, P., Favier, V., Wagnon, P., Francou, B., 2005. Fluctuaciones en los glaciares de los Alpes y de los Andes tropicales”, *C.R. Geociencia* 337, 97-106.

Vuille, M., 1999. Circulación atmosférica sobre el Altiplano Boliviano durante periodos secos y húmedos y las fases extremas de la oscilación sur. *Revista Internacional de Climatología* 19, 1579-1600.

ANEXO 1. Imágenes utilizadas en el análisis

Tabla 1. Imágenes seleccionadas para el análisis multitemporal, en base a la información presentada en Buitrón y Fernández (2012).

PLATAFORMA	CODIGO	FECHA (DD/MM/YYYY)
Landsat 5	L519860714	14/07/1986
Landsat 5	L519870207	07/02/1987
Landsat 5	L519870802	02/08/1987
Landsat 5	L519880820	20/08/1988
Landsat 5	L519900725	25/07/1990
Landsat 5	L519910202	02/02/1991
Landsat 5	L519910626	26/06/1991
Landsat 5	L519920730	30/07/1992
Landsat 5	L519930802	02/08/1993
Landsat 5	L519940805	05/08/1994
Landsat 5	L519950621	21/06/1995
Landsat 5	L519950723	23/07/1995
Landsat 5	L519960709	09/07/1996
Landsat 5	L519970712	12/07/1997
Landsat 5	L519980731	31/07/1998
Landsat 5	L519990616	16/06/1999
Landsat 7	L719991217	17/12/1999
Landsat 7	L720010221	21/02/2001
Landsat 7	L720010901	01/09/2001
Landsat 7	L720020819	19/08/2002
Landsat 7	L720021225	25/12/2002
Landsat 5	L520030830	30/08/2003
Landsat 5	L520080320	20/03/2008
Landsat 5	L520080811	11/08/2008
Landsat 5	L520080827	27/08/2008
Landsat 5	L520090930	30/09/2009
Landsat 5	L520100817	17/08/2010
Landsat 5	L520110719	19/07/2011
Landsat 5	L520111023	23/10/2011

PARTE 2 DEL INFORME DE AVANCE, CORRESPONDIENTE AL:

Informe de Avance del “Estudio hidrológico de los potenciales impactos del cambio climático en la oferta de agua en micro cuencas seleccionadas situadas en el Parque Nacional Sajama”

OBJETIVO ESPECIFICO “F”: Establecimiento de la red de monitoreo de las micro cuencas con apoyo de técnicos de Agua Sustentable y gente de las comunidades.

Preparado por: Freddy Soria, 27 de marzo de 2012

2.1 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 fundamental para el logro de los alcances y objetivos del proyecto titulado “Adaptación al Cambio Climático en Comunidades Andinas Bolivianas que Dependenden de Glaciares Tropicales”, ejecutado por Agua Sustentable. Para el objeto, en cumplimiento del Objetivos Específico F, se realiza el *establecimiento de la red de monitoreo de las micro cuencas con apoyo de técnicos de Agua Sustentable y gente de las comunidades*. Específicamente, el presente reporte (Informe) muestra 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.

2.2 RED DE MONITOREO HIDROLOGICO PROPUESTA: ESQUEMA Y JUSTIFICACION.

Tal como se describe en la Parte 1 del presente Informe de Avance, el área de estudio tiene una variabilidad espacial que es altamente relevante en la planificación y ejecución del estudio del régimen hídrico superficial y sub superficial. Aquella heterogeneidad espacial (y temporal) evidenciada a través de las visitas realizadas al lugar, indica que los tributarios de los cursos de agua superficiales son de distintos tipos:

- i) **Manantiales en los bofedales:** Que son fuentes naturales de agua que brotan principalmente en los bordes de los bofedales andinos, distribuidos en la parte baja del valle. Estos manantiales colectan las aguas de origen pluvial que escurren por las laderas del Sajama (glaciar) y la cadena montañosa representada por los cerros Parinacota (glaciar), Pomerape, y Condoriri (estacionalmente cubiertos por nieve). De acuerdo a las características observadas, es posible que una parte de los aportes de los glaciares (en forma de agua líquida) también escurra hacia los manantiales de los bofedales; sin embargo, es desconocida la relevancia práctica de aquellos aportes en relación a la relevancia de la precipitación (de acuerdo a observaciones en campo de las variaciones en el caudal de los cursos superficiales observados por el equipo de trabajo).
- ii) **Géiseres y manantiales entre los cerros de la cadena montañosa del cerro Parinacota:** Que son fuentes de agua naturales que brotan verticalmente a través de las fallas características de las formaciones volcánicas de las montañas que se encuentran en el área de estudio. Una de las características del área de estudio es la ausencia de cursos superficiales permanentes que escurran por las laderas (razón por la cual el agua fluye a través de los manantiales, directamente en el área donde se desarrollan los bofedales del valle). Sin embargo, en la zona de los géiseres y manantiales de altura las características son diferentes, porque estos permiten la formación de cursos superficiales que fluyen hacia la superficie por

- diferencias de presiones, desde las partes altas del valle (en las intersecciones de los cerros), hasta la parte baja del valle donde se desarrollan los bofedales.
- iii) Cursos de río principal: Constituido por el curso del Río Sajama, el cual colecta los aportes de los manantiales observados en los bofedales (agua precipitada más el aporte glaciar), y los aportes de los cursos permanentes originados en los géiseres y manantiales.
 - iv) Flujo subsuperficial, a través de los bofedales del valle: El agua contenida en estos bofedales, es probable que constituya una fuente de aporte estacional de agua hacia los principales cursos de río permanentes. Debido a las grandes variaciones en los rangos de caudal medidos en campo por el equipo de trabajo, y a la intervención artificial que los comunarios realizan en el área de los bofedales (recarga artificial por un sistema de canales), existe mucha incertidumbre acerca de qué tan relevante es el rol regulador de estos bofedales.

Considerando las fuentes descritas, y teniendo en cuenta el carácter práctico de los productos demandados, se entiende que la alternativa más factible y económica de entender la enorme heterogeneidad de la respuesta hídrica superficial es a través del monitoreo en campo de los aportes más representativos, mediante el establecimiento de una red de monitoreo bajo los lineamientos generales propuestos en las guías especializadas (e.g., OMM, 1994). Para los fines particulares del estudio se considera que el Río Sajama constituye el elemento que representa la respuesta final del sistema. Por esta razón, la distribución espacial de los instrumentos de monitoreo se realiza bajo el concepto de cuenca, tal como explica el esquema de la **Figura 7**.

2.3 TIPO DE INSTRUMENTOS INSTALADOS.

El tipo de instrumentos a ser instalados fueron seleccionados en función de las características del área de estudio y a la velocidad de la respuesta hídrica esperada:

- i) Cursos donde la velocidad de la respuesta hídrica esperada es rápida: En cursos donde la respuesta hídrica es rápida (variaciones horarias o menores en los niveles de agua), se decidió instalar sensores de velocidad de registro automático (establecido cada 10 min) del tipo HOB0 U20 Water Level Logger. El sensor mide valores de presión absoluta (incluidos la presión atmosférica y la carga de agua), los cuales son luego convertidos a valores de nivel de agua mediante simples diferencias con mediciones de presión atmosférica realizados por otro sensor instalado fuera de los cursos o canales de agua donde es instalado el otro sensor. Los sensores fueron colocados dentro de tubos de fierro fundido de 10 cm de diámetro, para proteger al sensor contra material flotante, y mantenerlo vertical. 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) Velocidad de la respuesta hídrica esperada es lenta: En cursos donde la respuesta hídrica esperada es lenta (mayor a seis horas) se decidió instalar reglas limnimétricas graduadas el milímetro. De manera similar a la instalación de los sensores automáticos, y considerando que las orillas de los cursos no están compuestas por material rocoso, las reglas fueron instaladas fijas a tubos de fierro fundido de 10 cm de diámetro, hincados manualmente en el lecho del río.
- iii) En lechos de río compuesto por material grueso, duro: En este tipo de lechos, no fue posible la instalación de los sensores automáticos por razones prácticas. El tubo de fierro fundido no pudo ser hincado más de 30 cm, de manera que se pueda evitar el robo del material. Por esta razón se decidió instalar reglas limnimétricas cuyo costo es bajo. En este caso, para compensar la pérdida de

precisión, se decide la lectura periódica de las reglas mediante la cooperación de comunarios contratados para el efecto.

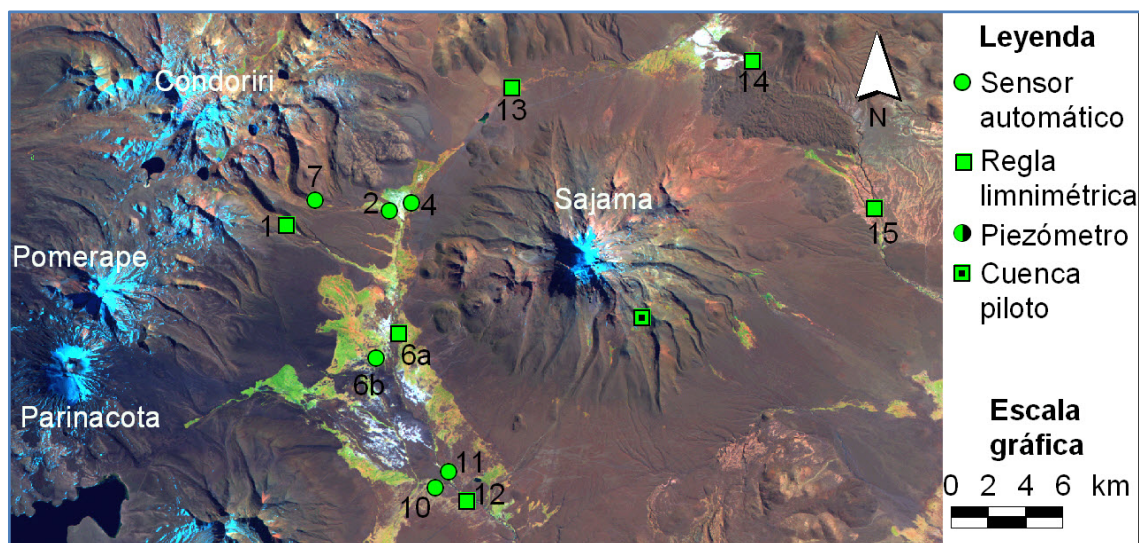


Figura 7. Esquema de la red de monitoreo propuesta y situación geográfica de los instrumentos instalados.

2.4 RED DE MONITOREO HIDROLOGICO: FUTURAS INSTALACIONES.

La importancia del monitoreo de los niveles de agua sobre la superficie de los bofedales en el valle (planicie) principal del área de estudio sugiere la necesidad de la instalación de piezómetros distribuidos en el área de los bofedales, para el estudio del gradiente hidráulico y la inferencia de la dirección de flujo en la capa subsuperficial de los bofedales. Para el efecto, siguiendo el esquema de instalación llevado a cabo en la cuenca piloto del bofedal de altura (cuenca piloto), se propone la instalación de 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 (donde en teoría se sitúa el área de descarga del bofedal). De la misma manera, en congruencia con el sistema de piezómetros instalados en la cuenca piloto, cada transversal deberá contener tres piezómetros. Adicionalmente, se propone la instalación de cuatro piezómetros adicionales, dos por cada porción intermedia delimitada por dos transversales consecutivas. El número total de piezómetros estará entre 9 a 13 piezómetros, distribuidos tal como muestra el esquema de la **Figura 8**. Finalmente, es posible que esta red de piezómetros sea complementada por una red adicional de 9 piezómetros distribuidos en el bofedal de Lagunas; sin embargo, esta etapa de monitoreo está aun en consideración.



Figura 8. Esquema de la red de piezómetros (PZ#) a ser instalados y situación geográfica de los instrumentos actualmente instalados.

2.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Uno de los principales retos en el estudio de las micro cuencas principales del Parque Nacional Sajama es la heterogeneidad espacial observada en el sistema. Para solucionar este inconveniente se propone un sistema de monitoreo intensivo a ser establecido con el apoyo valioso de los técnicos de Agua Sustentable y los comunarios del lugar. Se espera que este tipo de trabajo conjunto provea las bases para el establecimiento de futuros emprendimientos, tanto en el ámbito científico como en el ámbito práctico ingenieril, con directo impacto en aspectos socio-económicos del área de estudio. En caso de que la iniciativa prospere, es altamente probable que las comunidades vecinas deseen replicar las experiencias, con el consiguiente beneficio para ambas partes.

2.6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

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

ANEXO 2.1 COORDENADAS DE LAS PUNTOS DE LA RED DE MONITOREO.

Sistema de coordenadas: UTM WGS 84 Z19 sur.

Punto ID	x	y
1	499292.77	8000026.6
2	502355.56	799454.58
3	506090.07	8004144.12
4	502901.12	8000010.96
5	507150.04	7997906.95
6	502386	7995643.88
7	498204.95	7998165.26
8	498192.48	7991179.37
9	493548.83	7990091.59
10	503477.14	7985597.24
11	503349.97	7985555.41
12	505573.25	7985100.42
13	508577.49	8006954.25
14	519618.25	8008545.17
15	528097.93	7999675.49

PARTE 3 DEL INFORME DE AVANCE, CORRESPONDIENTE AL:

Informe de Avance del “Estudio hidrológico de los potenciales impactos del cambio climático en la oferta de agua en micro cuencas seleccionadas situadas en el Parque Nacional Sajama”

OBJETIVO ESPECIFICO “F”: Asesoramiento y diseño en la construcción de obras civiles pequeñas. Obra de toma Comunidad Manasaya.

Preparado por: Freddy Soria, 27 de marzo de 2012

3.1 INTRODUCCION.

3.1.1 ANTECEDENTES.

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 fundamental 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 Objetivos Específico F, se realiza el *asesoramiento y diseño en la construcción de obras civiles pequeñas*. Específicamente, el presente reporte (Informe) se enfoca al diseño de obras de derivación de flujo superficial en el área de la Comunidad Manasaya. El objeto de la mencionada obra es el de derivar una parte del volumen de flujo hacia el canal Manasaya para ampliar el área de bofedales, con el correspondiente beneficio a la crianza de camélidos. Las obras propuestas se proyectan a solicitud de la comunidad mencionada, con el apoyo técnico de Agua Sustentable.

3.1.2 OBRAS DE TOMA: FUNDAMENTOS TEORICOS.

La obra de toma es el conjunto de estructuras que tiene por objeto desviar las aguas que escurren sobre la solera hacia el sistema de conducción (Mattos, 1999). Es uno de los componentes más importantes de un sistema de provisión de agua (agua potable, riego, etc), debido a que su disposición y diseño establece los parámetros para los demás componentes del sistema correspondiente. Dentro de este marco, uno de los aspectos más importantes en el diseño e implementación de obras de toma en el área de estudio es la consideración del río como parte de un sistema sensible, donde cualquier intervención no analizada podrá llevar a alterar al sistema.

En general, de acuerdo a la fuente de agua, existen tres tipos de obras de toma: de recurso superficial, de recurso sub superficial, y de recurso subterráneo.

- i) Obras de toma superficiales. Son del tipo: derivación directa, con canal de limpieza, de toma frontal.
- ii) Obras de toma en solera. Son del tipo: tirolesas, tipo Cáucaso.

La selección del tipo de obra depende de las características de la cuenca, las características morfológicas del río o el tipo de fuente de agua, la importancia de la obra, y las condiciones socio-económicas del área de estudio. Para el presente proyecto, las dos últimas condiciones son particularmente importantes en la selección del tipo de obra.

3.2 CRITERIOS DE DISEÑO (PREDISEÑO).

3.2.1 CARACTERISTICAS GENERALES DE LAS OBRAS PROYECTADAS Y DEL SITIO DE EMPLAZAMIENTO.

El establecimiento de las obras de toma proyectadas responden a la necesidad de establecer una estructura de derivación que permita el aprovechamiento de las aguas que fluyen por el

curso superficial del canal natural Manasaya, hacia un canal artificial de derivación cuyo principal objetivo es el de ampliar el área de bofedales, que en un futuro próximo puedan ser aprovechados para la crianza de camélidos (la principal actividad económica de la población local).

Las características del sitio de emplazamiento de la obra de toma son: la baja pendiente longitudinal del curso superficial Manasaya (aproximadamente 1%), y la importante carga de sedimentos debido a las características geológicas de la zona (material fino, no cohesivo). Este último aspecto es claramente observado en una de las obras de toma realizadas en las proximidades de la comunidad Sajama (cerca del canal Manasaya), donde el excesivo arrastre de sedimentos inutilizó una obra de toma donde aparentemente la inversión de recursos fue importante (ver Figuras 9 a 11).



Figura 9. Obra de toma de derivación directa, con azud derivador. La obra se encuentra sin funcionamiento, aparentemente debido a la incorrecta orientación del azud derivador (fuera del eje del curso natural del Río Sajama, ver Figura 10), y al excesivo arrastre de material en suspensión (ver Figura 11).

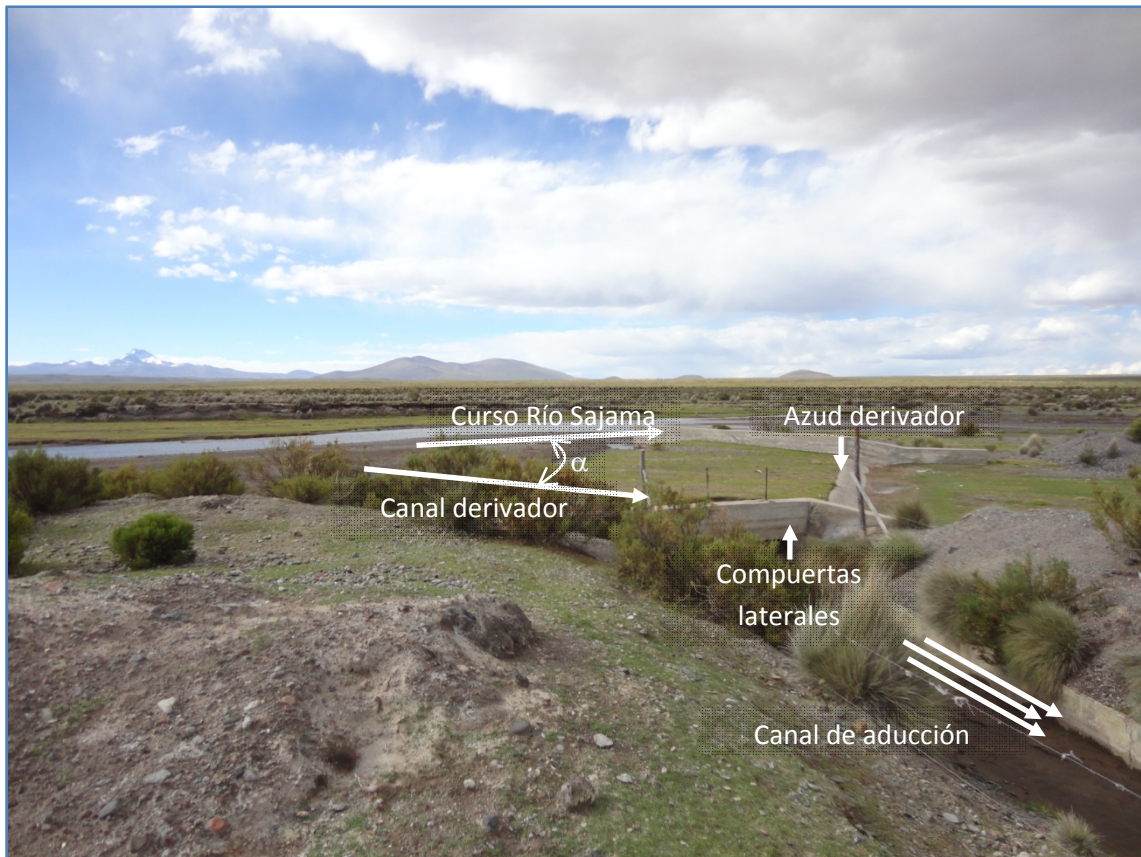


Figura 10. Aparente incorrecta orientación del azud derivador (fuera del eje del curso natural del Río Sajama), y excesivo arrastre de material en suspensión.



Figura 11. Canal de aducción (sin funcionamiento) con material de suspensión.

Por las dos razones expresadas, con la consideración de que el sitio de emplazamiento de la obra de toma en el canal Manasaya tiene similares características geomorfológicas (ver **Figura 12**), y considerando además que el aprovechamiento de las aguas superficiales para provisión de agua potable no es particularmente relevante, se sugiere contemplar una obra de toma mediante el establecimiento de estructuras que sean económicas y simples.



Figura 12. Sitio de emplazamiento. Abajo: Fotografía tomada en Diciembre de 2011 (inicio de la época de lluvias). Arriba: Fotografía tomada en Febrero de 2012 (época de lluvias). Nótese la diferencia en caudales entre ambas fechas, la carga de material, el rápido cambio en la cobertura vegetal y la consecuente inestabilidad en las paredes del canal natural Manasaya.

3.3 DATOS DE ENTRADA.

- Pendiente longitudinal promedio $S=1.5\%$.
- Caudal mínimo $Q_{min}=51$ L/s (Aforos realizados el 5 de agosto de 2011 (época seca).
- La sección típica de los aforos del 5 de agosto de 2011 se muestra en la **Figura 13**.

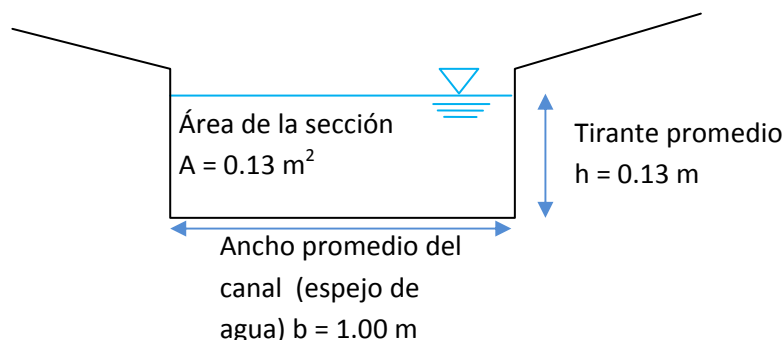


Figura 13. Sección típica de los aforos realizados el 5 de agosto de 2011.

- Caudal máximo: Debido a la ausencia de registros históricos, se asume que el caudal máximo corresponde al medido en febrero de 2012 (época húmeda). $Q_{max}=250$ L/s.
ACTUALIZACION (5 de marzo de 2012): El caudal medido al final del canal Manasaya es de $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Se decide aumentar el caudal máximo esperado a $Q_{max} = 750$ L/s. Este caudal debe ser confirmado con el aforo a ser realizado el 7 de marzo de 2012.
- Las secciones transversales, correspondientes a las observadas en febrero de 2012, se presentan en las **Figuras 14a, 14b, 14c**. Distancia entre secciones transversales: 2.0 m. La sección A-A (**Figura 14a**) está situada aguas arriba, mientras que la sección H-H (**Figura 14c**) se sitúa en la sección donde está la antigua derivación hecha por los comunarios mostrada en la **Figura 12**.

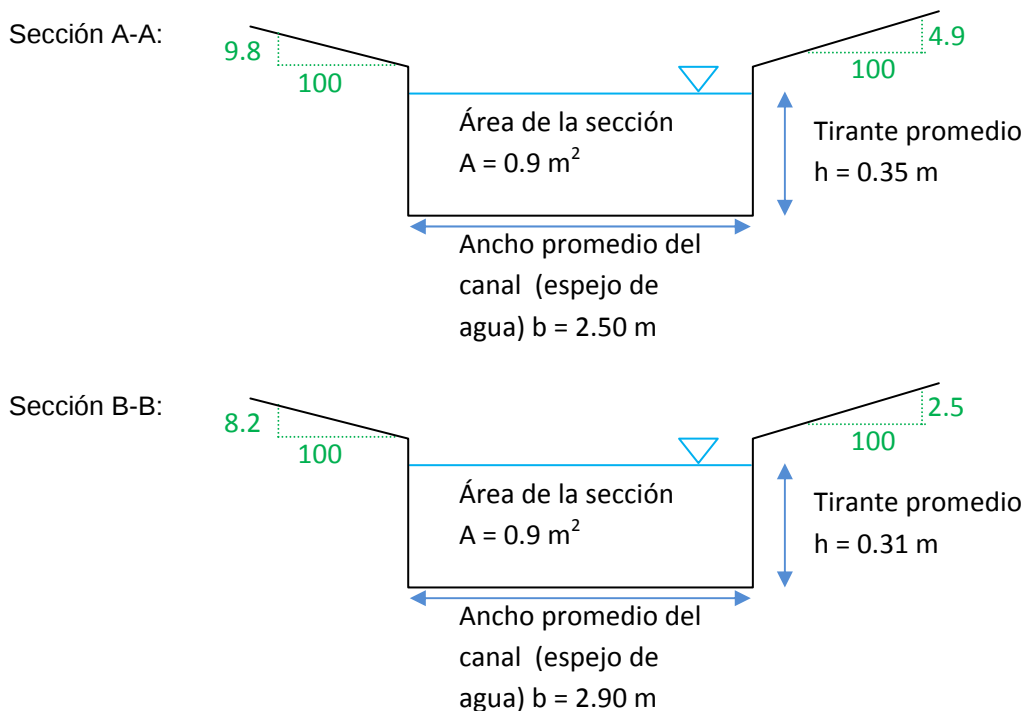
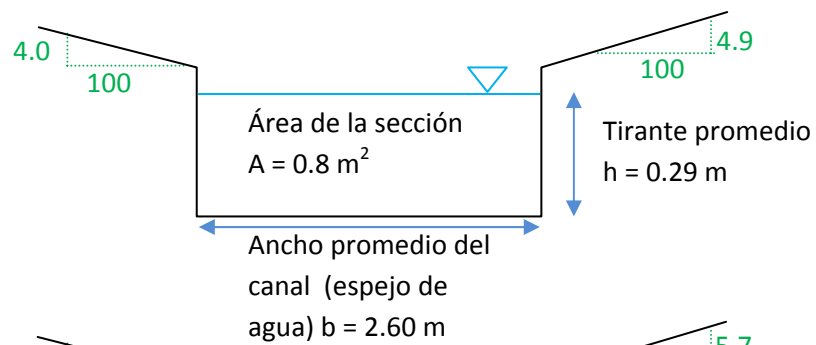
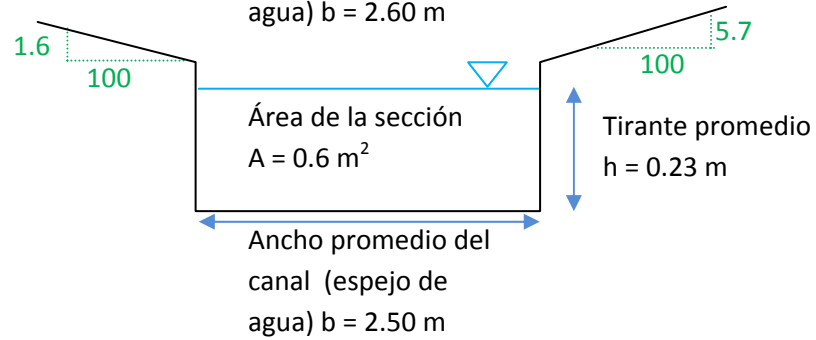


Figura 14a. Secciones transversales levantadas el 5 de agosto de 2011.

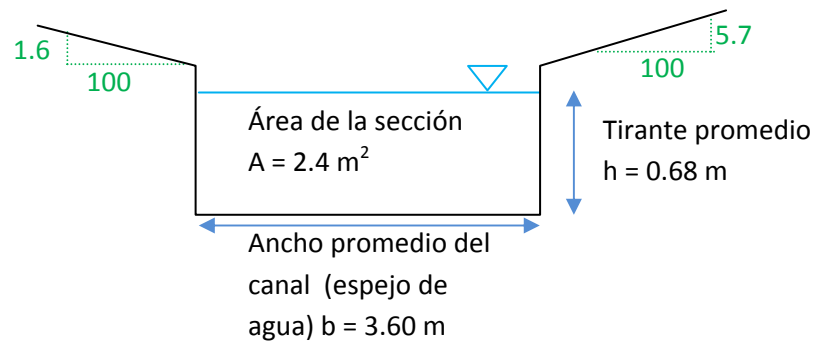
Sección C-C:



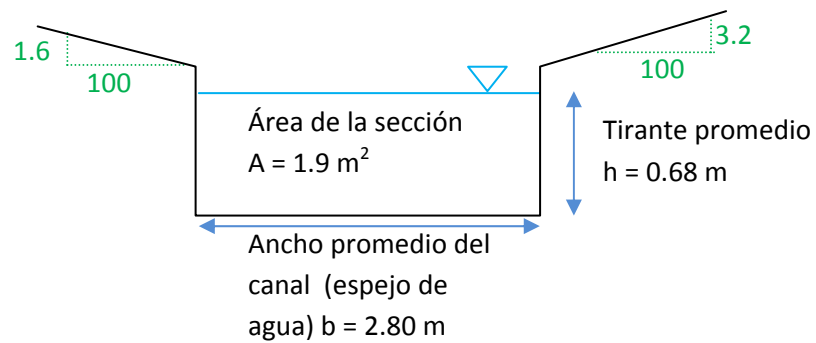
Sección D-D:



Sección E-E:



Sección F-F:



Sección G-G:

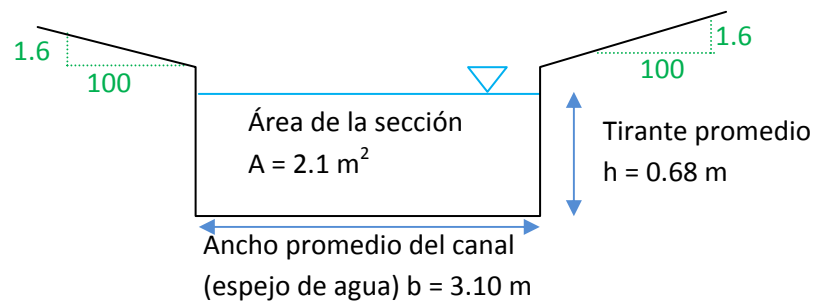


Figura 14b. Secciones transversales levantadas el 5 de agosto de 2011.

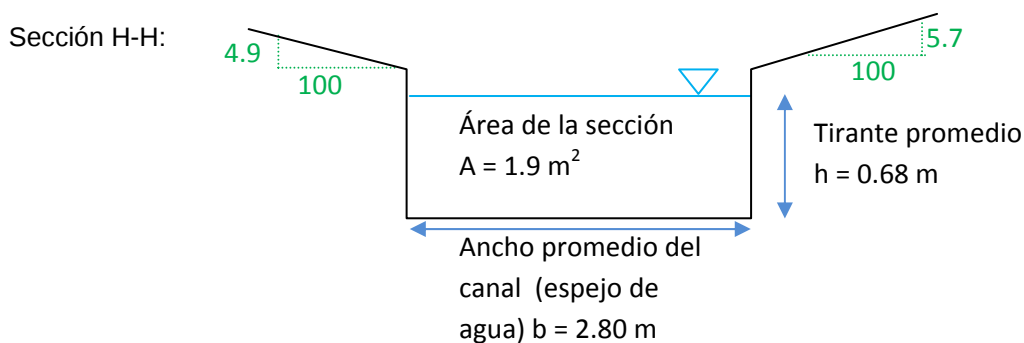


Figura 14c. Secciones transversales levantadas el 5 de agosto de 2011.

3.4 SELECCIÓN DEL TIPO DE OBRA DE TOMA.

El tipo de obra de toma seleccionado es una toma de derivación directa, con toma lateral convencional y muro transversal sobre una sección situada inmediatamente aguas arriba de la toma para proteger a la misma de la erosión y la muy probable colmatación de la obra de toma debido a la importante carga de sedimentos observada. Por la razón anterior, no se toma en cuenta una toma tipo Tirolés (útil en zonas de montaña donde existe arrastre de sedimentos gruesos), ni una toma tipo Cáucaso (debido al gran arrastre de sedimentos). Debido a que las técnicas para lograr la derivación no se diferencian de gran manera con los caso de tomas para aducción de agua potable, muchos de las consideraciones técnicas son derivadas de las normas correspondientes al diseño de aquel tipo de sistemas (e.g, Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable, Reglamento Nacional NB 689, VSB, 2004).

3.4.1 Consideraciones generales de diseño.

- En ausencia de un criterio que indique cuál es el caudal mínimo necesario para el bofedal alimentado por el canal natural Manasaya (las mediciones en el sistema se iniciarán en Marzo de 2012), se asumen las regulaciones dadas por la Ley del Medio Ambiente (Ley 1333), donde se aconseja que el caudal aprovechado debe ser menos del 20% de la descarga mínima diaria promedio. Bajo aquel criterio, se asume que el caudal máximo derivado durante época de estiaje es el 20% del $Q_{min} = 10 \text{ L/s}$ (caudal de diseño).
- En época húmeda, se asume la misma consideración anterior, derivando el 20% del caudal observado = 100 L/s (caudal de crecida de diseño).

3.4.2 Consideraciones hidráulicas: Obra de cierre.

a) Toma de superficie libre: Obra de cierre.

Se sugiere un dique fijo de hormigón ciclópeo ($H^{\circ}C^{\circ}$), que funcionará como un vertedero rectangular durante crecidas. De esta manera, asumiendo una sección rectangular, la ecuación que describe el flujo es:

$$Q = \frac{2}{3} \mu * \sqrt{2g} * L * H^{3/2} = C * L * H^{3/2} \quad (5)$$

..donde Q es el caudal para la crecida de diseño ($Q = 100 \text{ L/s}$), μ (adimensional) es el coeficiente de descarga o coeficiente de eficiencia del azud (asumido constante por razones prácticas, $\mu = 0.50$), L es la longitud neta del azud, H es la altura de carga, C es el coeficiente de flujo sumergido ($C = 1.5$). Como se muestra, μ y C dependen de la forma del vertedero (se asume un vertedero de pared gruesa). Debido a las características de la obra (obra pequeña), se asume que la descarga del vertedero es a superficie libre (no está parcialmente sumergido).

Conociendo μ , C , y L ($L = 290\text{cm}$), de la ecuación (1) se determina $H = 32\text{cm}$. De acuerdo a recomendaciones de la literatura (Molina, 2006), asumiendo que la altura de la rejilla a la entrada del canal es $hr = 25\text{cm}$, se asume una altura del azud igual a $P > 3.0 \cdot hr = 110\text{cm}$ (Figura 15).

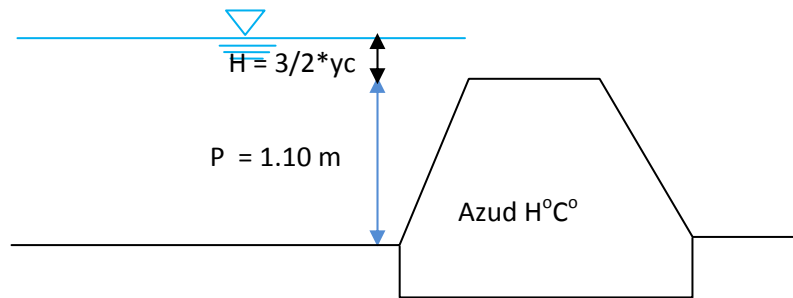


Figura 15. Esquema del azud.

b) Estabilidad del azud.

- Estabilidad al vuelco.

$$K_v = \frac{\sum Mr}{\sum Mv} > 1.30 \quad (6)$$

..donde Mr es la suma de momentos resistentes y Mv es la suma de momentos de vuelco.

Considerando:

peso unitario del $H^\circ C^\circ = 2200 \text{ kg/m}^3$,

peso unitario de la arena saturada más sedimento = 2080 kg/m^3 ,

esfuerzo admisible del terreno de fundación = 2 kg/cm^2 ,

ángulo de fricción interna (arena limosa) = 30° ,

rugosidad lecho del río = 0.030 ,

pendiente longitudinal = 0.015 ,

tirante crítico $yc = 21 \text{ cm}$.

$$K_v = 1.7 > 1.3$$

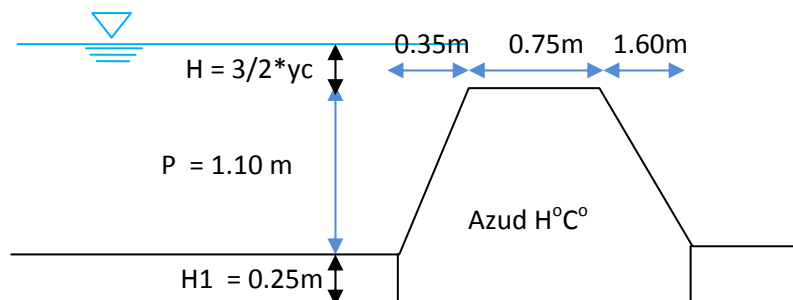


Figura 16. Esquema del azud, con dimensiones asumidas en base a consideraciones de estabilidad al vuelco.

- Estabilidad al deslizamiento.

$$Kd = f \frac{\sum F_v}{\sum F_h} > 1.30 \quad (7)$$

..donde F_v es la suma de fuerza horizontales, F_h es la suma de fuerzas verticales y f es el coeficiente de fricción entre azud y terreno ($f = 0.4$, arena limosa).

Para satisfacer la estabilidad al deslizamiento, se introduce un dentellón de 0.10m en la cara situada aguas arriba del azud, asumiendo un ángulo de deslizamiento $\alpha = 1^\circ$ ($Kd = 2.0$).

- Esfuerzos sobre el terreno (sin considerar subpresión).
Deberá cumplirse que el esfuerzo de compresión máximo no supere la tensión máxima admisible del terreno de fundación. Además, se deberá cumplir que no existen esfuerzos de tracción (cuando la resultante de las fuerzas actuantes pasa por el tercio central de la fundación).
- Dentellón para protección contra erosión del zampeado.
La profundidad del dentellón debe ser mayor que la profundidad de la socavación producida por la erosión, cuya magnitud se calcula con la siguiente ecuación (Krochin, 1982):

$$Y + do = q/v \quad (8)$$

..donde, Y es la magnitud de la erosión, do es el calado normal, q es el caudal por unidad de ancho, y v es el producto entre la velocidad máxima de los materiales que forman el cauce (v_{adm}) y la raíz "m" del radio hidráulico R ($m = 2+R$).

Para nuestro caso, la magnitud de la erosión es Y (m) = 0.60, la cual corresponde con la profundidad del dentellón.

c) Flujo secundario en la obra de toma.

La derivación del caudal ocasiona un punto de remanso que abarca una zona que se desplaza aguas arriba, y cuya influencia disminuye gradualmente (Mattos, 1999). Los flujos turbulentos generados por el plano frontera que divide el curso principal del secundario, ocasionan el transporte de sedimentos hacia la zona de derivación en proporción directa al Q , por lo cual se sugiere lo siguiente para evitar el ingreso de material en suspensión a la aducción (Mattos, 1999):

- Debido a que el Q es notoriamente menor al caudal que fluye por el curso principal Q_u , es recomendable situar la toma en la ribera exterior de una curva, debido a que el flujo secundario se ve favorecido. En nuestro caso, debido a la necesidad de tener mayores tirantes, y considerando que las curvas son cortas (ángulo α menor a 30°), se sugieren dos alternativas de diseño:
 - i) El emplazamiento de un espigón declinante para favorecer el desarrollo del efecto curva, y generar la desviación del sedimento hacia el interior de la curva. Esta medida artificial podría generar erosiones locales que profundizarían el lecho.
 - ii) Dos travesaños paralelos al eje del curso principal, con estructura transversal (azud) que incorpora al mismo tiempo un vertedero de excedencias y una estructura de limpieza de sedimentos.



Figura 17. Vista panorámica del sitio de emplazamiento de la obra de toma; canal (natural) Manasaya.

d) Disipación de energía.

Asumiendo canal rectangular, el tirante contraído y_{cont} se calcula con la siguiente ecuación:

$$y_{cont} = \frac{q\sqrt{1+k}}{b\sqrt{2g(H_{total}-y_{cont})}} = . \quad (9)$$

...donde q es el caudal por sección unitaria. Luego:

$$y_{cont} \text{ (m)} = 0.04$$

El tirante normal se calcula por iteraciones, resultando en: $y_{normal} \text{ (m)} = 0.06$

Luego el tirante conjugado $y_3' \text{ (m)} = 0.6$

Como el $y_3' > y_{cont}$, se concluye que es necesario un colchón en depresión.

Mediante iteraciones (Molina, 1996; Krochin, 1982), se obtiene la altura de la grada $z \text{ (m)} = 0.50$.

De la misma manera, se calcula que la longitud del colchón hidráulico es 2.8 m.

3.4.3 Consideraciones hidráulicas: Bocatoma.

a) Dimensiones generales.

De acuerdo a recomendaciones de la literatura (e.g., Molina, 2006), se sugiere:

- Umbral de la bocatoma mayor a $2*hr = 0.85 \text{ m}$.
- Altura total umbral+ $hr = 1.10 \text{ m}$.
- Altura del muro que contiene la bocatoma = 1.75 m (respecto al nivel del lecho).
- Ángulo entre la dirección del río y el muro que contiene a la bocatoma: 30° .

b) Cálculo hidráulico: Condiciones normales.

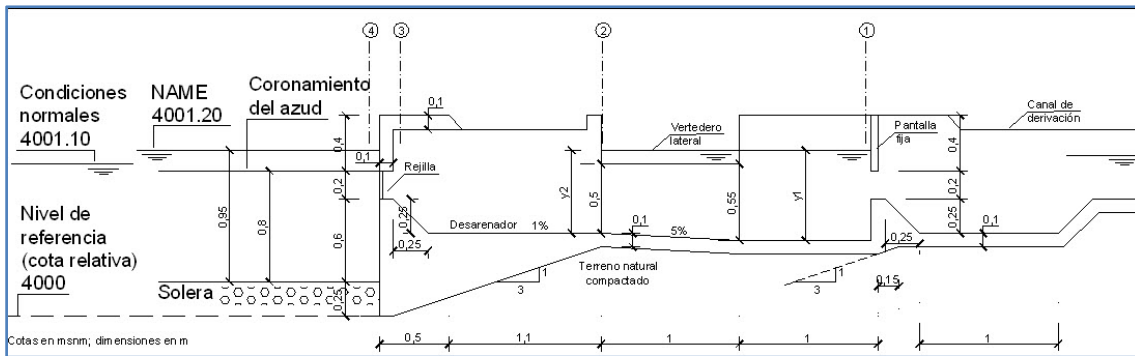


Figura 18. Predimensionamiento de la obra de toma.

Datos predimensionamiento:

- Caudal que entra al canal de derivación (condiciones normales, estiaje): $Q_c = 10 \text{ L/s}$
- Ancho desarenador, bocatoma y pantalla: $b_{\text{desar}} \text{ (m)} = 0.80 \text{ m}$
- Caudal de captación que entra al canal de derivación: $Q_c = 50 \text{ L/s}$

Tomando la sección de control, aquella que se encuentra a la entrada del canal de captación (Sección 1, **Figura 14a**), el cálculo se inicia mediante la inferencia de la carga necesaria para que el orificio capte Q_c en base a la fórmula de orificios (e.g., Molina, 2006):

$$Q_c = Cd \cdot A \cdot \sqrt{2gH_1} \rightarrow H_1 = \frac{\left(\frac{Q_c}{A \cdot Cd} \right)^2}{2g} \quad (10)$$

...donde, el coeficiente de descarga es $Cd = 0.6$, y el subíndice 1 hace referencia a la sección 1.

Entre los tramos 1-2 y 2-3 se asumen únicamente pérdidas por fricción, cuyos valores se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$h_{f \ 2-1} = \left(\frac{Q_c \cdot n}{A_m \cdot R_m^{2/3}} \right)^2 \cdot L \quad (11)$$

..donde, h_f son las pérdidas por fricción, n es el coeficiente de rugosidad, A_m y R_m son las áreas y radio hidráulico medios entre las secciones donde se calculan las pérdidas. En el tramo 3-4 se consideran las pérdidas por rejilla, por entrada, y por expansión (e.g., Molina, 2006).

Luego, para el cálculo de tirantes de agua "y", se aplica el teorema de Bernoulli:

$$E_1 + h_{f \ 2-1} = E_2 + \Delta z_{1-2} \quad (12)$$

..donde E es la energía específica en la sección correspondiente, y Δz se refiere al gradiente topográfico entre las mismas secciones.

De esta manera, el prediseño final se presenta en la **Figura 19**.

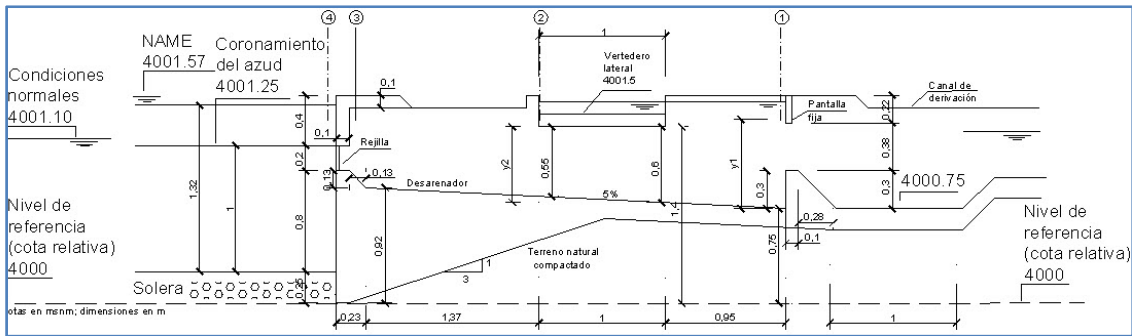


Figura 19. Predimensionamiento de la obra de toma, condiciones normales. Las dimensiones están en metros; las cotas en msnm, en referencia a un plano situado a una altitud de 4000 msnm.

c) Cálculo hidráulico: Condiciones de crecida.

El caudal de ingreso por el canal de derivación se calcula asumiendo flujo por un orificio no sumergido (estas condiciones se determinaron en el cálculo en condiciones normales):

$$Q_{\text{ingreso}} = Cd * An * \sqrt{2g * (H_4 - h_r)} \quad (13)$$

...donde, Cd se asume igual a 0.6, An es el área de entrada al canal, H_4 es la carga sobre la sección 4 y h_r es la altura de la rejilla (a la entrada por la sección 4). De esta manera, asumiendo que la entrada por el canal de derivación es un 20% más del caudal esperado de captación Q_c , se obtiene que el Q_c es 60 L/s. El resto es evacuado por el vertedero lateral de excedencias, cuya inclinación respecto al flujo es asumido igual a 20° , a objeto de mejorar la eficiencia del mismo.

Para un caudal de captación de $0.18 \text{ m}^3/\text{s}$ (asumiendo un 20% adicional como un valor aceptable de captación), se confirma que el flujo es subcrítico, (Froude, $F = 0.145$). De la misma forma considerada para el diseño en condiciones normales, haciendo el balance de energía entre las secciones 1 y 2, se calcula el tirante de la sección 2, y se confirma la condición de flujo subcrítico.

Con los tirantes de las secciones 1 y 2 calculados, habiendo confirmado la condición de flujo subcrítico para ambas secciones, se asume una longitud de vertedero de 1 m. Con esta longitud de vertedero, se calcula que el caudal por el vertedero es $Q_{\text{exceso}} = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, y el caudal de captación es $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$, utilizando la siguiente ecuación:

$$L_{\text{vertedero}} = \frac{3 (Q_{\text{exceso}})}{2 Cw \sqrt{2g} h_m^{3/2}} \quad (14)$$

...donde, $L_{\text{vertedero}}$ es la longitud del vertedero, Cw es 0.6, y h_m es la altura de carga media para el vertedero lateral.

d) Cálculo hidráulico: Resalto hidráulico.

Para el análisis de resalto hidráulico, la longitud del tramo 2-3 debe ser mayor a la producida por el resalto (2 m), por lo que se decide re-calcular todo el proceso. De esta manera, las dimensiones de la obra (prediseño) se presentan en la **Figura 20**.

e) Cálculo hidráulico: Estanque amortiguador.

Se calcula que el estanque amortiguador tiene una profundidad de 5 cm (con respecto a la parte inferior de la abertura de la pantalla del canal de captación). Finalmente, de la misma forma que se realizó el cálculo del resalto hidráulico en el inciso anterior, se calcula que la longitud del estanque amortiguador es de 3 m.

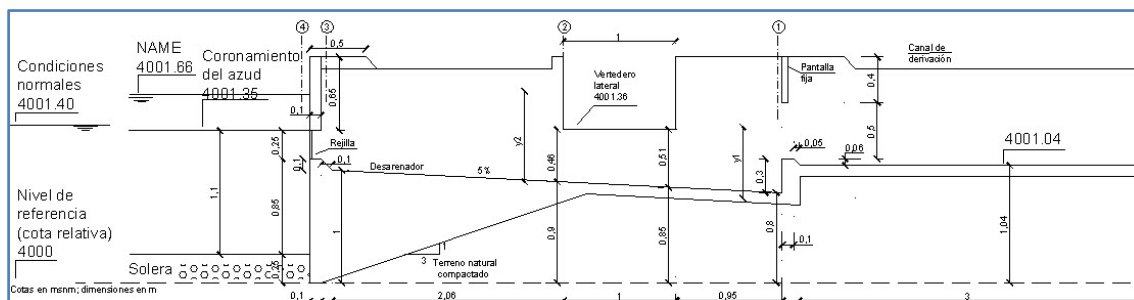


Figura 20. Predimensionamiento de la obra de toma: Cálculo final. Las dimensiones están en metros; las cotas en msnm, en referencia a un plano situado a una altitud de 4000 msnm. Los planos se entregan en formato CAD, con toda la información detallada.

3.5 REFERENCIASBIBLIOGRAFICAS.

Congreso Nacional de Bolivia, 1992. Ley del Medio Ambiente No. 1333. Gaceta Oficial de Bolivia, La Paz.

Krochin, S., 1982. Diseño hidráulico. Universidad Central de Ecuador.

Mattos, R., 1999. Pequeñas obras hidráulicas. PHI UNESCO, IHH UMSA. La Paz.

Molina, J., 2006. Temas especiales de hidráulica. IHH UMSA, La Paz.

Sánchez, L., Gutierrez, Z., Montañó, C., Brun, F., 2002. Tomas directas. PROAGRO. Cochabamba.

Viceministerio de Servicios Básicos VSB, 2004. Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable, Reglamento Nacional NB 689. VSB, La Paz.

PARTE 4 DEL INFORME DE AVANCE, CORRESPONDIENTE AL:

Informe de Avance del “Estudio hidrológico de los potenciales impactos del cambio climático en la oferta de agua en micro cuencas seleccionadas situadas en el Parque Nacional Sajama”

OBJETIVO ESPECIFICO “F”: Asesoramiento y diseño en la construcción de obras civiles pequeñas. Alternativa 2 para la obra de toma canal Manasaya: Captación de todo el caudal que fluye por el curso natural.

Preparado por: Freddy Soria, 27 de marzo de 2012

4.1 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 fundamental 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 Objetivos Específico F, se realiza el *asesoramiento y diseño en la construcción de obras civiles pequeñas*. Específicamente, el presente reporte (Informe) muestra la alternativa número 2 para del diseño de obras de derivación de flujo superficial en el área de la Comunidad Manasaya. La diferencia entre la presente alternativa y la originalmente propuesta, es que el caudal de captación se incrementa a 51 L/s, el cual corresponde al caudal total que fluye por el curso natural. El diseño de la presente alternativa se realiza a petición de la Comunidad Manasaya, a través de los técnicos de Agua Sustentable.

4.2 DATOS DE ENTRADA.

- Pendiente longitudinal promedio $S=1.5\%$.
- Caudal mínimo $Q_{min}=51$ L/s (Aforos realizados el 5 de agosto de 2011, época de estiaje).
- La sección típica de los aforos del 5 de agosto de 2011 se presenta en la **Figura 21**:

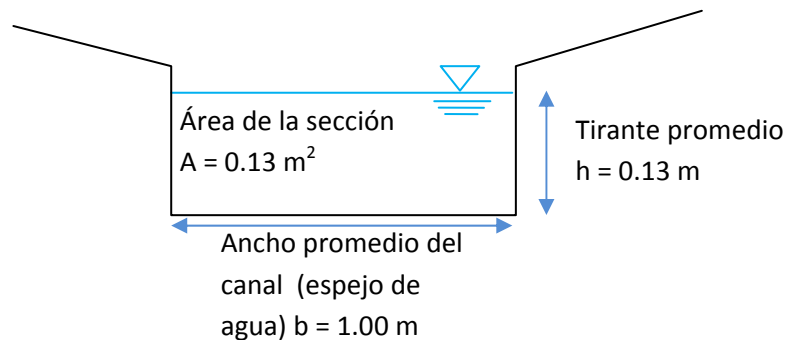


Figura 21. Sección típica para la época de estiaje

- Caudal máximo: El caudal medido al final del canal Manasaya es de $2m^3/s$. Se decide asumir un caudal máximo esperado de $Q_{max} = 750$ L/s.

4.3 SELECCIÓN DEL TIPO DE OBRA DE TOMA.

Se selecciona una toma de derivación directa, con toma lateral convencional, y muro transversal sobre una sección situada inmediatamente aguas arriba de la toma para proteger a la misma de la erosión lateral. Las ecuaciones que a continuación se hace mención, así como

las variables mencionadas, hacen referencia a las descritas en el INFORME DE AVANCE **Parte 3**.

4.3.1 Consideraciones generales de diseño. Se ubica la toma en la orilla cóncava del curso del canal Manasaya, donde comienza la parte convexa. A diferencia de la alternativa 1, en la presente se considera un canal de purga en un extremo del azud, al lado de la reja de entrada, la cual se abrirá en las crecientes. El canal de purga fue omitido en la alternativa 1 para disminuir el costo de las obras. Se consideran los siguientes caudales:

- El caudal de diseño es $Q_{min} = 50 \text{ L/s}$.
- Caudal de crecida de diseño $Q_{max} = 750 \text{ L/s}$.

4.3.2 Consideraciones hidráulicas: Obra de cierre.

a) Toma de superficie libre: Obra de cierre.

- Por razones de estabilidad, se opta por un azud con perfil trapezoidal (ligeramente redondeado para facilitar el paso del agua. Consiguientemente, para reducir la presión sobre el cimacio (parte superior del paramento), se busca adoptar un perfil Creager que esté sometido a una presión casi nula en todos sus puntos. Para evitar la cavitación y vibración, la altura de carga máxima es menor a la calculada.
- Dique fijo de hormigón ciclópeo (H^oC^o), que funcionará como un vertedero rectangular durante crecidas. De esta manera, asumiendo una sección rectangular, la **ecuación (5)** describe el flujo a través de la ecuación general para un vertedero, para la cual el caudal de la crecida de diseño es $Q_{max} = 750 \text{ L/s}$, $\mu = 0.50$, L es 2.30 m , C es 1.5 , y se asume que la descarga del vertedero es a superficie libre. Conociendo μ , C , y L ($L = 230\text{cm}$), de la **ecuación (5)** se determina $H = 28\text{cm}$. De acuerdo a recomendaciones de la literatura (Molina, 2006), asumiendo que la altura de la rejilla a la entrada del canal es $h_r = 25\text{cm}$, se asume una altura del azud igual a $P > 3.0 \cdot h_r = 120\text{cm}$ (**Figura 22**).

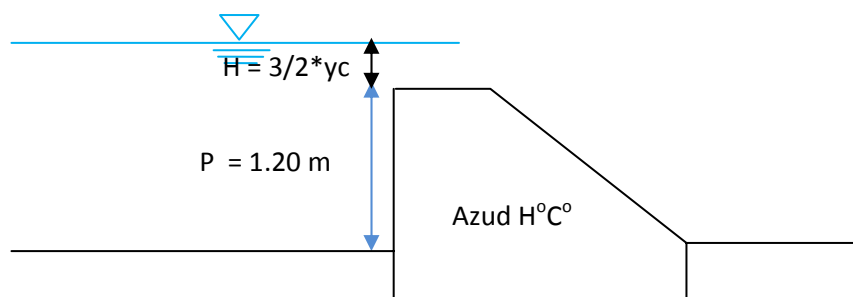


Figura 22. Esquema de la vista lateral del azud

b) Estabilidad del azud.

- Estabilidad al vuelco. Considerando la **ecuación (6)**, se asume:

peso unitario del $H^oC^o = 2200 \text{ kg/m}^3$,
peso unitario de la arena saturada más sedimento = 2080 kg/m^3 ,
esfuerzo admisible del terreno de fundación = 2 kg/cm^2 ,
ángulo de fricción interna (arena limosa) = 30° ,
rugosidad lecho del río = 0.030 ,
pendiente longitudinal = 0.015 ,
tirante crítico $yc = 19 \text{ cm}$.

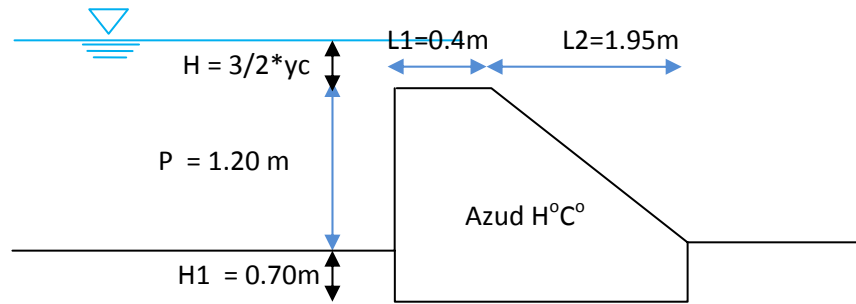


Figura 23. Esquema del azud y sus dimensiones.

$$Mv = \frac{1}{2} [\gamma_{H2O} * (P + H1 + H) + \gamma_{H2O} * H] * (P + H1) * CG1 + \frac{1}{2} \gamma_{sat} * (P + H1)^2 * CG2$$

$$+ \frac{1}{2} [\gamma_{H2O} * (P + H1 + H)] * (L1 + L2) * CG3$$

$$Mr = \gamma_{HoCo} * Area_{azud} * CG6$$

..donde CG es el brazo del momento. Luego:

$$Kv = Mr / Mv = 1.34 > 1.3$$

- Estabilidad al deslizamiento. Considerando la **ecuación (7)**.

Para satisfacer la estabilidad al deslizamiento, se introduce una pantalla-dentellón de 1.0m en la cara situada aguas arriba del azud, para lo cual existe un ángulo de deslizamiento de $\alpha = 18^\circ$ ($Kd = 1.21 > 1.2$).

- Esfuerzos sobre el terreno (sin considerar subpresión).
Las dimensiones señaladas, hacen que se cumpla que la resultante de las fuerzas actuantes no pasa por el tercio central de la fundación.
- Dentellón para protección contra erosión del zampeado.
La profundidad del dentellón debe ser mayor que la profundidad de la socavación producida por la erosión, cuya magnitud se calcula con la **ecuación (8)**. Para nuestro caso, la magnitud de la erosión es Y (m) = 0.70, la cual corresponde con la profundidad del dentellón.

c) Flujo secundario en la obra de toma.

Debido a que el Q es notoriamente menor al caudal que fluye por el curso principal Q_u , es recomendable situar la toma en la ribera exterior de una curva, debido a que el flujo secundario se ve favorecido. En nuestro caso, debido a la necesidad de tener mayores tirantes, y considerando que las curvas son cortas (ángulo α menor a 30°), se sugieren dos alternativas de diseño:

- El emplazamiento de un espigón declinante para favorecer el desarrollo del efecto curva, y generar la desviación del sedimento hacia el interior de la curva. Esta medida artificial podría generar erosiones locales que profundizarían el lecho.
- Dos travesaños paralelos al eje del curso principal, con estructura transversal (azud) que incorpora al mismo tiempo un vertedero de excedencias y una estructura de limpieza de sedimentos.

d) Disipación de energía.

Asumiendo canal rectangular, el tirante contraído y_{cont} se calcula con la ecuación (9). Luego:

$$y_{cont} \text{ (m)} = 0.05$$

El tirante normal se calcula por iteraciones, resultando en: $y_{normal} \text{ (m)} = 0.06$

Luego el tirante conjugado $y_3' \text{ (m)} = 0.7$

Como el $y_3' > y_{cont}$, se concluye que es necesario un colchón en depresión.

Mediante iteraciones (Molina, 1996; Krochin, 1982), se obtiene la altura de la grada $z \text{ (m)} = 0.55$.

De la misma manera, se calcula que la longitud del colchón hidráulico es 3.1 m.

4.3.3 Consideraciones hidráulicas: Bocatoma.

a) Dimensiones generales.

De acuerdo a recomendaciones de la literatura (e.g., Molina, 2006), se sugiere:

- Umbral de la bocatoma mayor a $2*hr = 0.85 \text{ m}$.
- Altura total umbral+ $hr = 1.10 \text{ m}$.
- Altura del muro que contiene la bocatoma = 1.75 m (respecto al nivel del lecho).
- Ángulo entre la dirección del río y el muro que contiene a la bocatoma: 30° .

b) Cálculo hidráulico: Condiciones normales.

Datos predimensionamiento:

- Ancho desarenador y bocatoma : $b_{desar} \text{ (m)} = 0.80 \text{ m}$.
- Ancho pantalla: $b_{pantalla} \text{ (m)} = 0.65 \text{ m}$.
- Caudal de captación que entra al canal de derivación: $Q_c = 50 \text{ L/s}$

Tomando la sección de control, aquella que se encuentra a la entrada del canal de captación, el cálculo se inicia mediante la inferencia de la carga necesaria para que el orificio capte Q_c en base a la fórmula de orificios (ecuación (10)), donde $C_d = 0.6$.

Entre los tramos 1-2 y 2-3 se asumen únicamente pérdidas por fricción, cuyos valores se calculan mediante la ecuación (11). En el tramo 3-4 se consideran las pérdidas por rejilla, por entrada, y por expansión. Luego, para el cálculo de tirantes de agua "y", se aplica el teorema de Bernoulli (ecuación (12)). De esta manera, el prediseño final se presenta en la Figura 24:

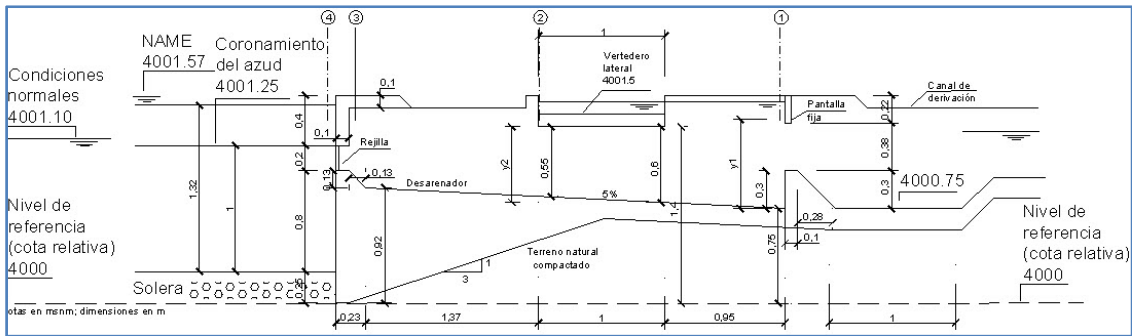


Figura 24. Predimensionamiento de la obra de toma, condiciones normales. Las dimensiones están en metros; las cotas en msnm, en referencia a un plano situado a una altitud de 4000 msnm.

c) Cálculo hidráulico: Condiciones de crecida.

El caudal de ingreso por el canal de derivación se calcula asumiendo flujo por un orificio no sumergido (**ecuación (13)**), donde, C_d es 0.6. Luego, asumiendo que la entrada por el canal de derivación es un 20% más del caudal esperado de captación Q_c igual a 180 L/s. El resto es evacuado por el vertedero lateral de excedencias, cuya inclinación respecto al flujo es asumido igual a 20° , a objeto de mejorar la eficiencia del mismo.

Para un caudal de captación de $0.18 \text{ m}^3/\text{s}$ (asumiendo un 20% adicional como un valor aceptable de captación), se confirma que el flujo es subcrítico, (Froude, $F = 0.215$). De la misma forma considerada para el diseño en condiciones normales, haciendo el balance de energía entre las secciones 1 y 2, se calcula el tirante de la sección 2, y se confirma la condición de flujo subcrítico (Froude, $F = 0.346$).

Con los tirantes de las secciones 1 y 2 calculados, habiendo confirmado la condición de flujo subcrítico para ambas secciones, se asume una longitud de vertedero de 1 m. Con esta longitud de vertedero, se calcula que el caudal por el vertedero es $Q_{\text{exceso}} = 0.016 \text{ m}^3/\text{s}$, y el caudal de captación es $0.197 \text{ m}^3/\text{s}$, utilizando la **ecuación (14)**, donde C_w es 0.6.

d) Cálculo hidráulico: Resalto hidráulico.

Para el análisis de resalto hidráulico, la longitud del tramo 2-3 debe ser mayor a la producida por el resalto (2 m).

e) Cálculo hidráulico: Estanque amortiguador.

Se calcula que el estanque amortiguador tiene una profundidad de 5 cm (con respecto a la parte inferior de la abertura de la pantalla del canal de captación). Finalmente, de la misma forma que se realizó el cálculo del resalto hidráulico en el inciso anterior, se calcula que la longitud del estanque amortiguador es de 3.1 m.

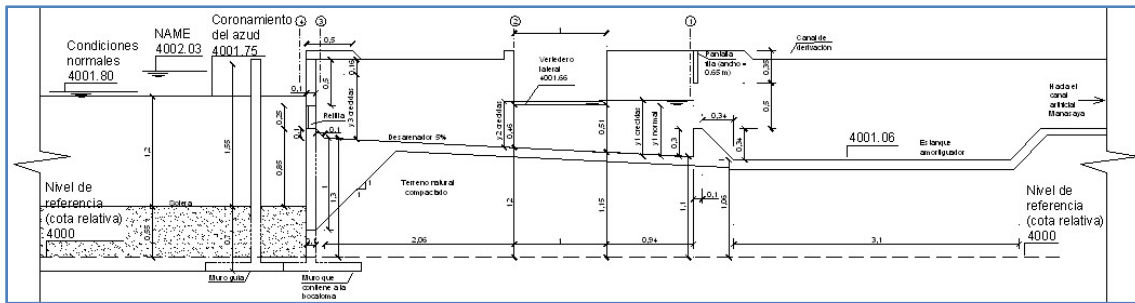


Figura 25. Predimensionamiento de la obra de toma: Cálculo final. Las dimensiones están en metros; las cotas en msnm, en referencia a un plano situado a una altitud de 4000 msnm. El archivo correspondiente se entrega en formato CAD para su mejor apreciación.

4.4 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Congreso Nacional de Bolivia, 1992. Ley del Medio Ambiente No. 1333. Gaceta Oficial de Bolivia, La Paz.

Krochin, S., 1982. Diseño hidráulico. Universidad Central de Ecuador.

Mattos, R., 1999. Pequeñas obras hidráulicas. PHI UNESCO, IHH UMSA. La Paz.

Molina, J., 2006. Temas especiales de hidráulica. IHH UMSA, La Paz.

Sánchez, L., Gutierrez, Z., Montaña, C., Brun, F., 2002. Tomas directas. PROAGRO. Cochabamba.

Viceministerio de Servicios Básicos VSB, 2004. Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable, Reglamento Nacional NB 689. VSB, La Paz.

PARTE 5 DEL INFORME DE AVANCE, CORRESPONDIENTE AL:

Informe de Avance del “Estudio hidrológico de los potenciales impactos del cambio climático en la oferta de agua en micro cuencas seleccionadas situadas en el Parque Nacional Sajama”

OBJETIVO ESPECIFICO “F”: Asesoramiento y diseño en la construcción de obras civiles pequeñas. Alternativa 3 para la obra de toma canal Manasaya: Captación mediante cámara de captación, utilizando tuberías de PVC.

Preparado por: Freddy Soria, 27 de marzo de 2012

5.1 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 fundamental 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 Objetivos Específico F, se realiza el *asesoramiento y diseño en la construcción de obras civiles pequeñas*. Específicamente, el presente reporte (Informe) muestra la Alternativa 3, para del diseño de obras de derivación de flujo superficial en el área de la Comunidad Manasaya. La diferencia con las anteriores alternativas es que se la captación se realiza mediante cámara de captación y tuberías de PVC. El establecimiento de la Alternativa 3 implica las siguientes observaciones prácticas en la administración de la obra:

Observación 1: La comunidad responsable de la administración de la obra deberá otorgar mayor atención a la limpieza y apertura de la tubería de desfogue, debido a la gran cantidad de material en suspensión.

Observación 2: La consideración de la presente Alternativa 3 implica que los caudales en época de crecidas deben ser cercanamente monitoreados. En la práctica esto implica que una vez que los comunarios observen una crecida extraordinaria en el curso natural aguas arriba de la obra, ellos deberán abrir la compuerta del canal de desfogue del azud y cerrar simultáneamente la compuerta de la boca de toma, para evitar la colmatación de la cámara de captación y otros problemas colaterales. La apertura de la compuerta de la obra de toma podrá realizarse una vez los comunarios observen que los niveles de las aguas retomen niveles seguros.

Observación 3: Aunque la presente Alternativa 3 se diseña mediante consideraciones hidráulicas básicas presentadas en los siguientes subtítulos, los caudales captados por la obra no tienen los niveles de precisión otorgados por las Alternativas 1 y 2.

Observación 4: La consideración de la presente Alternativa conlleva un menor costo. Sin embargo, la razón por la cual se presenta esta alternativa es a sugerencia de técnicos de Agua Sustentable quienes demandaron por un proyecto que constructivamente sea factible de implementar (en comparación a las Alternativas 1 y 2).

5.2 DATOS DE ENTRADA.

- Pendiente longitudinal promedio $S=1.5\%$.
- Caudal mínimo $Q_{min}=51 \text{ L/s}$.
- Caudal máximo de captación $Q_{max}=20\% \text{ } 175 \text{ L/s} = 150 \text{ L/s}$.
- La sección típica se presenta en la **Figura 26**:

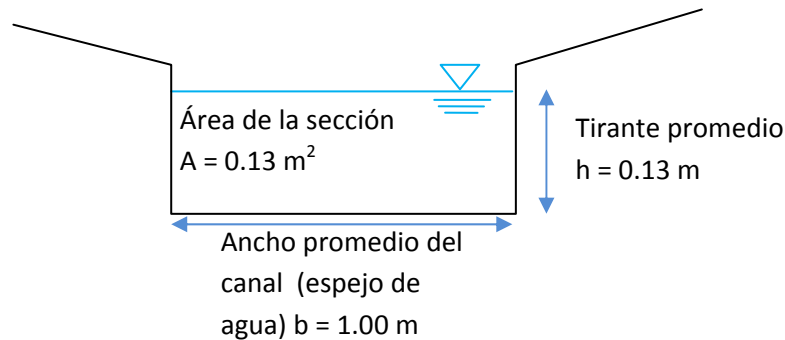


Figura 26. Sección típica para la época de estiaje

5.3 SELECCIÓN DEL TIPO DE OBRA DE TOMA.

Se selecciona una obra de captación lateral, con azud de elevación, obras de encauce y protección lateral mínimas debido a las restricciones económicas, y cámara de recolección para su posterior conducción a través de tubería. El esquema general de la obra se obtiene a partir de las recomendaciones sugeridas en la Figura 4.2 de VSB (2005).

5.3.1 Consideraciones generales de diseño. Se ubica la toma en la orilla cóncava del curso del canal Manasaya, donde comienza la parte convexa. Las diferencias en el esquema de diseño se presentan en la parte de la Introducción, de la presente parte del Informe de Avance.

5.3.2 Consideraciones hidráulicas: Obra de cierre.

a) Toma de superficie libre: Obra de cierre. (las variables y ecuaciones mencionadas a continuación, hacen referencia a las detalladas en la **Parte 3** del Informe de Avance presente).

- Por razones de estabilidad, se opta por un azud con perfil trapezoidal (ligeramente redondeado para facilitar el paso del agua. Consiguientemente, para reducir la presión sobre el cimacio (parte superior del paramento), se busca adoptar un perfil Creager que esté sometido a una presión casi nula en todos sus puntos. Para evitar la cavitación y vibración, la altura de carga máxima es menor a la calculada.
- Dique fijo de hormigón ciclópeo (H^oC^o), que funcionará como un vertedero rectangular durante crecidas. De esta manera, asumiendo una sección rectangular, la **ecuación (5)** describe el flujo a través de la ecuación general para un vertedero, para la cual el $Q_{\max} = 750 \text{ L/s}$, $\mu = 0.50$, L es 2.20 m , C es 1.5 , y se asume que la descarga del vertedero es a superficie libre. Conociendo μ , C , y L ($L = 220\text{cm}$), de la **ecuación (5)** se determina $H = 29\text{cm}$. De acuerdo a recomendaciones de la literatura (Molina, 2006), asumiendo que la altura de la rejilla a la entrada del canal es $hr = 40\text{cm}$, el umbral de la rejilla = 60cm , se asume una altura del azud igual a $P > 3.0 \cdot hr = 120\text{cm}$ (**Figura 27**).

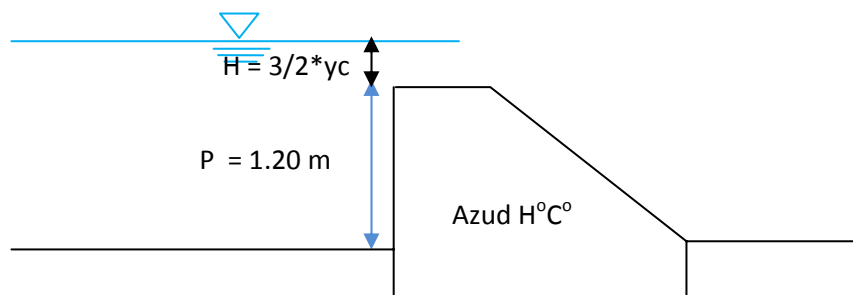


Figura 27. Esquema de la vista lateral del azud

b) Estabilidad del azud.

- Estabilidad al vuelco. Considerando la ecuación (6), se asume:

peso unitario del $H^oC^o = 2200 \text{ kg/m}^3$,
peso unitario de la arena saturada más sedimento = 2080 kg/m^3 ,
esfuerzo admisible del terreno de fundación = 2 kg/cm^2 ,
ángulo de fricción interna (arena limosa) = 30° ,
rugosidad lecho del río = 0.030,
pendiente longitudinal = 0.015,
tirante crítico $y_c = 19 \text{ cm}$.

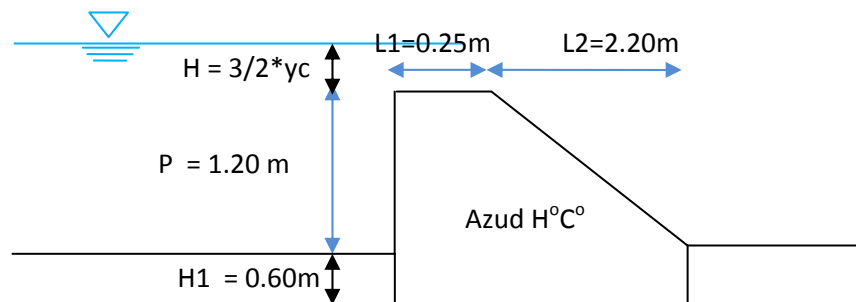


Figura 28. Esquema del azud y sus dimensiones.

$$M_v = \frac{1}{2} [\gamma_{H_2O} * (P + H1 + H) + \gamma_{H_2O} * H] * (P + H1) * CG1 + \frac{1}{2} \gamma_{sat} * (P + H1)^2 * CG2$$
$$+ \frac{1}{2} [\gamma_{H_2O} * (P + H1 + H)] * (L1 + L2) * CG3$$
$$M_r = \gamma_{HoCo} * Area_{azud} * CG6$$

..donde CG es el brazo del momento. Luego:

$$K_v = M_r / M_v = 1.3$$

- Estabilidad al deslizamiento. Considerando la ecuación (7).

Para satisfacer la estabilidad al deslizamiento, se introduce una pantalla-dentellón de 1.0 m en la cara situada aguas arriba del azud, para lo cual existe un ángulo de deslizamiento de $\alpha = 18^\circ$ ($K_d = 1.21 > 1.2$).

- Esfuerzos sobre el terreno (sin considerar subpresión).
Las dimensiones señaladas, hacen que se cumpla que la resultante de las fuerzas actuantes no pasa por el tercio central de la fundación.
- Dentellón para protección contra erosión del zampeado.
La profundidad del dentellón debe ser mayor que la profundidad de la socavación producida por la erosión, cuya magnitud se calcula con la ecuación (8). Para nuestro caso, la magnitud de la erosión es $Y \text{ (m)} = 0.50$, la cual corresponde con la profundidad del dentellón.

c) Flujo secundario en la obra de toma.

Debido a que el Q es notoriamente menor al caudal que fluye por el curso principal Q_u , es recomendable situar la toma en la ribera exterior de una curva, debido a que el flujo secundario se ve favorecido. En nuestro caso, debido a la necesidad de tener mayores tirantes, y considerando que las curvas son cortas (ángulo α menor a 30°), se sugieren dos alternativas de diseño:

- i) El emplazamiento de un espigón declinante para favorecer el desarrollo del efecto curva, y generar la desviación del sedimento hacia el interior de la curva. Esta medida artificial podría generar erosiones locales que profundizarían el lecho.
- ii) Dos travesaños paralelos al eje del curso principal, con estructura transversal (azud) que incorpora al mismo tiempo un vertedero de excedencias y una estructura de limpieza de sedimentos.

d) Disipación de energía.

Asumiendo canal rectangular, el tirante contraído y_{cont} se calcula con la ecuación (9). Luego:

$$y_{cont} \text{ (m)} = 0.05$$

El tirante normal se calcula por iteraciones, resultando en: $y_{normal} \text{ (m)} = 0.24$

Luego el tirante conjugado $y_3' \text{ (m)} = 0.7$

Como el $y_3' > y_{cont}$, se concluye que es necesario un colchón en depresión.

Mediante iteraciones (Molina, 1996; Krochin, 1982), se obtiene la altura de la grada $z \text{ (m)} = 0.55$.

De la misma manera, se calcula que la longitud del colchón hidráulico es 3.2 m.

5.3.3 Consideraciones hidráulicas: Bocatoma.

a) Dimensiones generales.

De acuerdo a recomendaciones de la literatura (e.g., Molina, 2006), se sugiere:

- Umbral de la bocatoma mayor o igual a $2 \cdot h_r = 0.80 \text{ m}$.
- Altura total umbral + $h_r = 1.20 \text{ m}$.
- Altura del muro que contiene la bocatoma = 1.75 m (respecto al nivel del lecho).
- Ángulo entre la dirección del río y el muro que contiene a la bocatoma: 30° .

b) Cálculo hidráulico: Condiciones normales.

Datos predimensionamiento cámara de captación:

- Cámara de captación: $1.40 \times 1.20 \times 1.50 \text{ m}$ (sección tipo de una cámara séptica de ladrillo gambote).

El cálculo de la pérdida de carga entre la entrada de la tubería y la entrada del canal de captación se realiza mediante la ecuación de Hazen-Williams (VSB, 2005):

$$Q_c = 0.28 * C * D^{2.63} * J^{0.54} \quad (15)$$

...donde C es el coeficiente de Hazen-Williams (140 para tubería de PVC), D es el diámetro interno de la tubería, J es el gradiente hidráulico en m/m (longitud de la tubería igual a 50 m; diferencia de altura entre la entrada y la salida de la tubería igual a 2 m). De allí, para un Q_c de 150 L/s (20% del caudal máximo que fluye por el canal Manasaya), se calcula que será

Luego, se realiza el cálculo de la carga necesaria para que la tubería capte el caudal calculado, en base a la fórmula de orificios (ecuación (10)), donde $C_d = 0.6$. Debido a que existen restricciones económicas en cuanto al diámetro de la tubería de salida y a las dimensiones de la cámara de captación, la altura real de carga mínima es 0.6m, para lo cual se calcula que el caudal mínimo de captación es 105 L/s. Luego, nuevamente entre la salida de la cámara de captación y la entrada al canal de captación se asumen únicamente las pérdidas de Hazen Williams (ecuación (15)), y se calcula que para el Q_{max} de captación se necesita una tubería de PVC 6".

Se realiza en base a las recomendaciones establecidas en VSB, 2005). Para una bocatoma rectangular, con barrotes lisos de 1/2", espacio entre barrotes de 3 cm, son necesarias 24 barrotes. De allí, el ancho de la bocatoma calculado es 1.0 m.

Vista en planta de azud y bocatoma

Cotas en msnm; dimensiones en m

Diagram details include:

- Compuerta 2:** Rectangular structure with a trash rack (Rejilla de entrada) and a gate (Compuerta 2) with an elevation of 1.60m and length of 1.0m.
- Compuerta 1:** Gate with an elevation of 1.6m and length of 1.6m.
- Canal de desfogue:** Outlet channel with a side wall elevation of 1.50m and length of 0.55m.
- Muro lateral:** Side walls with various elevations (1.90m, 0.50m, 1.50m, 0.50m) and lengths (2.1m, 0.5m, 2.2m, 0.55m, 3.1m, 0.58m).
- Coronamiento del azud:** Weir crest with a height of 0.30m.
- Azud de H₂O₂:** Weir structure with a height of 1.70m and length of 1.3m.
- Colchón hidráulico:** Hydraulic cushion (depression) with a depth of 0.55m.
- Tubería de limpieza:** 6-inch cleaning pipe.
- Tubería de salida:** 8-inch outlet pipe leading to the channel or cushion.
- Cámara de captación:** Capture chamber with a 2% slope and dimensions of 1.2m by 0.2m.

5.4 REFERENCIAS

- Krochin, S., 1982. Diseño hidráulico. Universidad Central de Ecuador.
- Mattos, R., 1999. Pequeñas obras hidráulicas. PHI UNESCO, IHH UMSA. La Paz.
- Molina, J., 2006. Temas especiales de hidráulica. IHH UMSA, La Paz.
- Viceministerio de Servicios Básicos VSB, 2005. Guía técnica de diseño de proyectos de agua potable para poblaciones menores a 10000 habitantes. VSB, La Paz.
- Viceministerio de Servicios Básicos VSB, 2004. Reglamentos técnicos de diseño para Sistemas de agua potable, Reglamento Nacional NB 689. VSB, La Paz.

PARTE 6 DEL INFORME DE AVANCE, CORRESPONDIENTE AL:

Informe de Avance del “Estudio hidrológico de los potenciales impactos del cambio climático en la oferta de agua en micro cuencas seleccionadas situadas en el Parque Nacional Sajama”

OBJETIVO ESPECIFICO “F”: Asesoramiento y diseño en la construcción de obras civiles pequeñas. Alternativa 1 para la obra de toma aguas abajo del canal Manasaya (Papelpampa): Obra de captación lateral con azud de elevación.

Preparado por: Freddy Soria, 28 de marzo de 2012

6.1 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 fundamental 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 Objetivos Específico F, se realiza el *asesoramiento y diseño en la construcción de obras civiles pequeñas*. Específicamente, el presente reporte (Informe) muestra la Alternativa número 1 para del diseño de obras de derivación de flujo superficial en el área de la Comunidad Papelpampa. El diseño de la presente alternativa sigue los parámetros considerados en el diseño de la Alternativa 1 de la obra de toma del canal Manasaya.

6.2 DATOS DE ENTRADA.

- Pendiente longitudinal promedio $S=1.5\%$.
- Caudal mínimo $Q_{min}=51$ L/s (Aforos realizados el 5 de agosto de 2011, época de estiaje).
- La sección típica de los aforos del 5 de agosto de 2011 se presenta en la **Figura 30**:

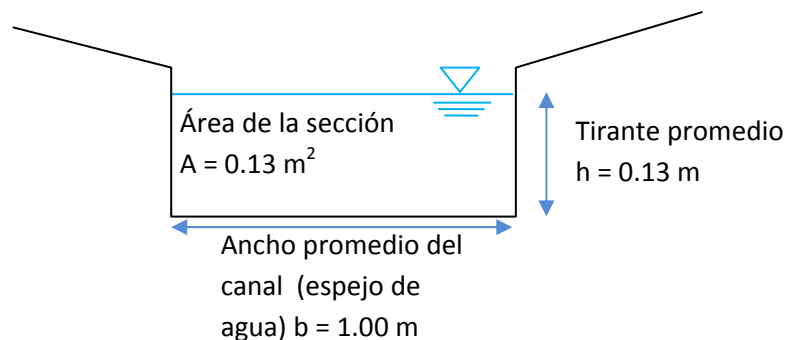


Figura 30. Sección típica para la época de estiaje

- Caudal máximo: $Q_{max} = 750$ L/s (esperado).

6.3 SELECCIÓN DEL TIPO DE OBRA DE TOMA.

Se selecciona una toma de derivación directa, con toma lateral convencional, y muro transversal sobre una sección situada inmediatamente aguas arriba de la toma para proteger a la misma de la erosión lateral, la erosión de fondo y la colmatación del azud (ver **Figuras 9 a 11**). Las ecuaciones que a continuación se hace mención, así como las variables mencionadas, hacen referencia a las descritas en el INFORME DE AVANCE **Parte 3**.

6.3.1 Consideraciones generales de diseño. Se ubica la toma en la orilla cóncava del curso del río, donde comienza la parte convexa. Se considera un canal de purga en un extremo del azud, al lado de la reja de entrada, la cual se abrirá en las crecientes.

6.3.2 Consideraciones hidráulicas: Obra de cierre.

a) Toma de superficie libre: Obra de cierre.

- Azud con perfil trapezoidal (ligeramente redondeado para facilitar el paso del agua. Consiguientemente, para reducir la presión sobre el cimacio (parte superior del paramento). Para evitar la cavitación y vibración, la altura de carga máxima es menor a la calculada.
- Dique fijo de hormigón ciclópeo (H^oC^o), que funcionará como un vertedero rectangular durante crecidas. De esta manera, asumiendo una sección rectangular, la ecuación (5) describe el flujo a través de la ecuación general para un vertedero, para la cual el caudal de la crecida de diseño es $Q_{max} = 750 \text{ L/s}$, $\mu = 0.50$, L es 1.10 m, C es 1.5, y se asume que la descarga del vertedero es a superficie libre. Conociendo μ , C , y L ($L = 220\text{cm}$), de la ecuación (5) se determina $H = 45\text{cm}$. De acuerdo a recomendaciones de la literatura (Molina, 2006), asumiendo que la altura de la rejilla a la entrada del canal es $h_r = 25\text{cm}$, se asume una altura del azud igual a $P > 3.0 \cdot h_r = 90\text{cm}$ (Figura 31).

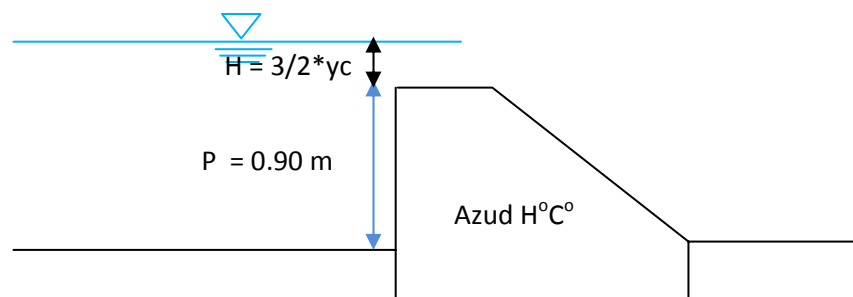


Figura 31. Esquema de la vista lateral del azud

b) Estabilidad del azud.

- Estabilidad al vuelco. Considerando la ecuación (6), se asume:

peso unitario del $H^oC^o = 2200 \text{ kg/m}^3$,
 peso unitario de la arena saturada más sedimento = 2080 kg/m^3 ,
 esfuerzo admisible del terreno de fundación = 2 kg/cm^2 ,
 ángulo de fricción interna (arena limosa) = 30° ,
 rugosidad lecho del río = 0.030,
 pendiente longitudinal = 0.015,
 tirante crítico $y_c = 31 \text{ cm}$.

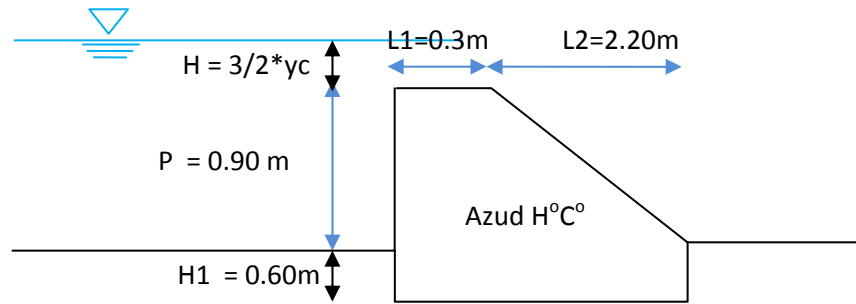


Figura 32. Esquema del azud y sus dimensiones.

$$Mv = \frac{1}{2} [\gamma_{H2O} * (P + H1 + H) + \gamma_{H2O} * H] * (P + H1) * CG1 + \frac{1}{2} \gamma_{sat} * (P + H1)^2 * CG2$$

$$+ \frac{1}{2} [\gamma_{H2O} * (P + H1 + H)] * (L1 + L2) * CG3$$

$$Mr = \gamma_{HoCo} * Area_{azud} * CG6$$

..donde CG es el brazo del momento. Luego:

$$Kv = Mr / Mv = 1.4 > 1.3$$

- Estabilidad al deslizamiento. Considerando la **ecuación (7)**.

Para satisfacer la estabilidad al deslizamiento, se introduce una pantalla-dentellón de 1.0m en la cara situada aguas arriba del azud, para lo cual existe un ángulo de deslizamiento de $\alpha = 18^\circ$ ($Kd = 1.21 > 1.2$).

- Esfuerzos sobre el terreno (sin considerar subpresión).
Las dimensiones señaladas, hacen que se cumpla que la resultante de las fuerzas actuantes no pasa por el tercio central de la fundación.
- Dentellón para protección contra erosión del zampeado.
La profundidad del dentellón debe ser mayor que la profundidad de la socavación producida por la erosión, cuya magnitud se calcula con la **ecuación (8)**. Para nuestro caso, la magnitud de la erosión es Y (m) = 1.30, la cual corresponde con la profundidad del dentellón.

c) Flujo secundario en la obra de toma.

Debido a que el Q es notoriamente menor al caudal que fluye por el curso principal Q_u , es recomendable situar la toma en la ribera exterior de una curva, debido a que el flujo secundario se ve favorecido. En nuestro caso, debido a la necesidad de tener mayores tirantes, y considerando que las curvas son cortas (ángulo α menor a 30°), se sugieren dos alternativas de diseño:

- El emplazamiento de un espigón declinante para favorecer el desarrollo del efecto curva, y generar la desviación del sedimento hacia el interior de la curva. Esta medida artificial podría generar erosiones locales que profundizarían el lecho.
- Dos travesaños paralelos al eje del curso principal, con estructura transversal (azud) que incorpora al mismo tiempo un vertedero de excedencias y una estructura de limpieza de sedimentos.

d) Disipación de energía.

Asumiendo canal rectangular, el tirante contraído y_{cont} se calcula con la ecuación (9). Luego:

$$y_{cont} \text{ (m)} = 0.10$$

El tirante normal se calcula por iteraciones, resultando en: $y_{normal} \text{ (m)} = 0.40$

Luego el tirante conjugado $y_3' \text{ (m)} = 0.93$

Como el $y_3' > y_{cont}$, se concluye que es necesario un colchón en depresión.

Mediante iteraciones (Molina, 1996; Krochin, 1982), se obtiene la altura de la grada $z \text{ (m)} = 0.65$.

De la misma manera, se calcula que la longitud del colchón hidráulico es 4.2 m.

6.3.3 Consideraciones hidráulicas: Bocatoma.

a) Dimensiones generales.

De acuerdo a recomendaciones de la literatura (e.g., Molina, 2006), se sugiere:

- Umbral de la bocatoma mayor a $2*hr = 0.85 \text{ m}$.
- Altura total umbral+ $hr = 1.10 \text{ m}$.
- Altura del muro que contiene la bocatoma = 1.75 m (respecto al nivel del lecho).
- Ángulo entre la dirección del río y el muro que contiene a la bocatoma: 30° .

b) Cálculo hidráulico: Condiciones normales.

Datos predimensionamiento:

- Ancho desarenador y bocatoma : $b_{desar} \text{ (m)} = 0.80 \text{ m}$.
- Ancho pantalla: $b_{pantalla} \text{ (m)} = 0.65 \text{ m}$.
- Caudal de captación que entra al canal de derivación: $Q_c = 50 \text{ L/s}$

Tomando la sección de control, aquella que se encuentra a la entrada del canal de captación, el cálculo se inicia mediante la inferencia de la carga necesaria para que el orificio capte Q_c en base a la fórmula de orificios (ecuación (10)), donde $C_d = 0.6$. Dicha carga es 0.03 m .

Entre los tramos 1-2 y 2-3 se asumen únicamente pérdidas por fricción, cuyos valores se calculan mediante la ecuación (11). En el tramo 3-4 se consideran las pérdidas por rejilla, por entrada, y por expansión. Luego, para el cálculo de tirantes de agua "y", se aplica el teorema de Bernoulli (ecuación (12)). Luego, el prediseño se somete al diseño para condiciones de crecida.

c) Cálculo hidráulico: Condiciones de crecida.

Datos predimensionamiento:

- Alto pantalla: $a_{pantalla} \text{ (m)} = 0.48 \text{ m}$.
- Ancho pantalla: $b_{pantalla} \text{ (m)} = 0.65 \text{ m}$.

El caudal de ingreso por el canal de derivación se calcula asumiendo flujo por un orificio no sumergido (ecuación (13)), donde, C_d es 0.6. Luego, asumiendo que la entrada por el canal de derivación es un 20% más del caudal esperado de captación Q_c igual a 180 L/s . El resto es evacuado por el vertedero lateral de excedencias, cuya inclinación respecto al flujo es asumido igual a 20° , a objeto de mejorar la eficiencia del mismo.

Para un caudal de captación de $0.18 \text{ m}^3/\text{s}$ (asumiendo un 20% adicional como un valor aceptable de captación), se confirma que el flujo es subcrítico, (Froude, $F = 0.230$). De la misma forma considerada para el diseño en condiciones normales, haciendo el balance de energía entre las secciones 1 y 2, se calcula el tirante de la sección 2, y se confirma la condición de flujo subcrítico (Froude, $F = 0.392$).

Con los tirantes de las secciones 1 y 2 calculados, habiendo confirmado la condición de flujo subcrítico para ambas secciones, se asume una longitud de vertedero de 1 m. Con esta longitud de vertedero, se calcula que el caudal por el vertedero es $Q_{\text{exceso}} = 0.024 \text{ m}^3/\text{s}$, y el caudal de captación es $0.220 \text{ m}^3/\text{s}$, utilizando la **ecuación (10)**, donde C_w es 0.6.

d) Cálculo hidráulico: Resalto hidráulico.

Para el análisis de resalto hidráulico, la longitud del tramo 2-3 debe ser mayor a la producida por el resalto (1.90 m).

e) Cálculo hidráulico: Estanque amortiguador.

Se calcula que el estanque amortiguador tiene una profundidad de 5 cm (con respecto a la parte inferior de la abertura de la pantalla del canal de captación). Finalmente, de la misma forma que se realizó el cálculo del resalto hidráulico en el inciso anterior, se calcula que la longitud del estanque amortiguador es de 3.0 m.

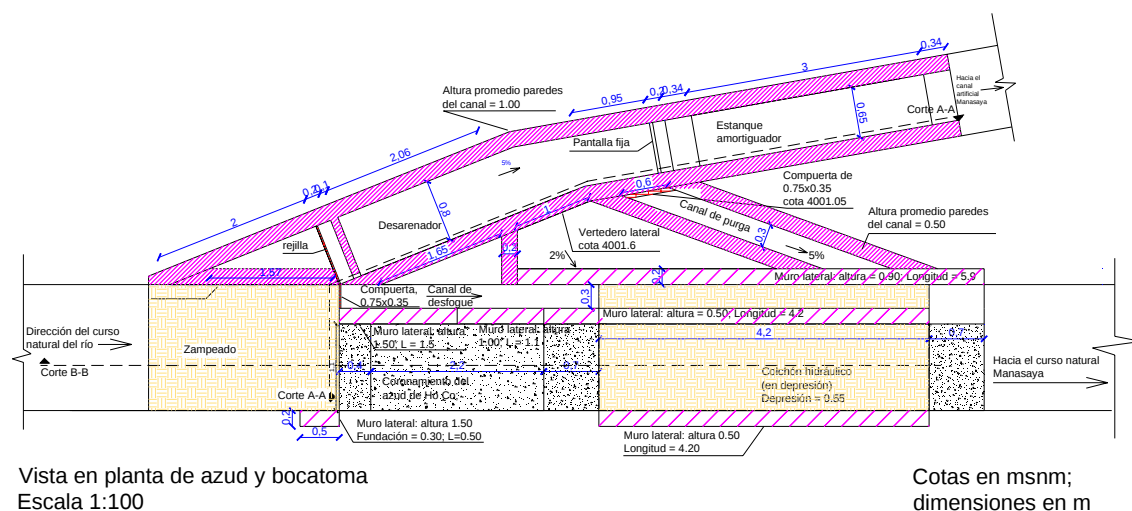


Figura 33. Obra de toma: Cálculo final. Las dimensiones están en metros; las cotas en msnm, en referencia a un plano situado a una altitud de 4000 msnm. El archivo correspondiente se entrega en formato CAD para su mejor apreciación.

6.4 REFERENCIAS

Congreso Nacional de Bolivia, 1992. Ley del Medio Ambiente No. 1333. Gaceta Oficial de Bolivia, La Paz.

Krochin, S., 1982. Diseño hidráulico. Universidad Central de Ecuador.

Mattos, R., 1999. Pequeñas obras hidráulicas. PHI UNESCO, IHH UMSA. La Paz.

Molina, J., 2006. Temas especiales de hidráulica. IHH UMSA, La Paz.

Sánchez, L., Gutierrez, Z., Montaña, C., Brun, F., 2002. Tomas directas. PROAGRO. Cochabamba.

Viceministerio de Servicios Básicos VSB, 2004. Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable, Reglamento Nacional NB 689. VSB, La Paz.

PARTE 7 DEL INFORME DE AVANCE, CORRESPONDIENTE AL:

Informe de Avance del “Estudio hidrológico de los potenciales impactos del cambio climático en la oferta de agua en micro cuencas seleccionadas situadas en el Parque Nacional Sajama”

OBJETIVO ESPECIFICO “F”: Asesoramiento y diseño en la construcción de obras civiles pequeñas. Presupuesto para la Alternativa 3 de la obra de toma aguas abajo del canal Manasaya, y la Alternativa 2 (Papelpampa): Obras de captación lateral con azud de elevación.

Preparado por: Freddy Soria, 28 de marzo de 2012

7.1 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 fundamental 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 Objetivos Específico F, se realiza el *asesoramiento y diseño en la construcción de obras civiles pequeñas*. Específicamente, el presente reporte (Informe) muestra los presupuestos para la implementación de la Alternativa 3 para del diseño de obras de derivación de flujo superficial en el área del canal Manasaya, y la Alternativa 2 para el mismo tipo de obra para la Comunidad Papelpampa.

7.2 ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS Y MATERIAL.

7.2.1 Análisis de Precios Unitarios.

PROVISIÓN Y COLOCACIÓN DE COMPUERTA METALICA PARA CANAL 75 x 35 cm				
Unidad: Pza				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Bs	Costo total Bs
1. MATERIALES				
ACERO LISO 20 mm (3/4")	m	0.6	18.42	11.1
ALAMBRE DE AMARRE	kg	0.36	11.83	4.3
ANGULAR 1" x 1/8"	m	2.96	9.5	28.1
ARENA CORRIENTE	m ³	0.02	122	2.4
CEMENTO IP - 30	kg	12	1.07	12.8
CLAVOS	kg	0.06	13	0.8
GRAVA COMUN	m ³	0.03	100	3.0
MADERA PARA CONSTRUCCION (3 USOS)	P2	1.03	9.75	10.0
ELECTRODO 6010 2.5	kg	1.5	18.46	27.7
PINTURA ANTICORROSIVA	Gal	0.03	147.13	4.4
PLANCHA DE ACERO 1/8" e = 3 mm	m ²	0.12	213.22	25.6
			Total Material =	130.2

DINTELES DE MADERA				
Unidad: ML				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Bs	Costo total Bs
1. MATERIALES				
ALAMBRE DE AMARRE	kg	0.3	11.83	3.5
ALAMBRE TEJIDO	m2	0.6	4.29	2.6
CLAVOS	kg	0.2	13	2.6
ESTUCO PANDO	kg	13	0.35	4.6
MADERA PARA CONSTRUCCION (3 USOS)	P2	1.3	9.75	12.7
			Total Material =	25.9

TAPA DE Hº Aº PARA CAMARA DE 1 x 0.5 x 0.1 m DOSIFICACION 1:2:4				
Unidad: ML				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Bs	Costo total Bs
1. MATERIALES				
ACERO CORRUGADO	kg	4	8.48	33.9
ALAMBRE DE AMARRE	kg	0.1	11.83	1.2
ARENA CORRIENTE	m ³	0.02	122	2.4
CEMENTO IP - 30	kg	14	1.07	15.0
CLAVOS	kg	0.1	13	1.3
GRAVA COMUN	m ³	0.04	100	4.0
MADERA PARA CONSTRUCCION (3 USOS)	P2	0.67	9.75	6.5
Total Material =				64.4

Hº Cº CON 50% DE PIEDRA DESPLAZADORA DOSIF:1:3:4 + ACELERADOR DE FRAGUADO EXENTO DE CLORUROS				
Unidad: m ³				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Bs	Costo total Bs
1. MATERIALES				
ADITIVO ACELERADOR DE FRAGUADO EXENTO DE CLORUROS	kg	2.25	34.5	77.6
ARENA CORRIENTE	m ³	0.27	122	32.9
CEMENTO IP - 30	kg	150	1.07	160.5
CLAVOS	kg	0.5	13	6.5
GRAVA COMUN	m ³	0.36	100	36.0
MADERA PARA CONSTRUCCION (3 USOS)	P2	10	9.75	97.5
PIEDRA BRUTA	m ³	0.5	125	62.5
Total Material =				473.6

PISO DE CEMENTO CON CONTRAPISO CARPETA DE Hº 1:3:4 e = 5 cm				
Unidad: m ²				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Bs	Costo total Bs
1. MATERIALES				
ARENA CORRIENTE	m ³	0.03	122	3.7
CEMENTO IP - 30	kg	13	1.07	13.9
GRAVA COMUN	m ³	0.04	100	4.0
PIEDRA MANZANA	m ³	0.12	110	13.2
Total Material =				34.8

EMPIEDRE DE CALZADA				
Unidad: m ²				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Bs	Costo total Bs
1. MATERIALES				
PIEDRA MANZANA	m ³	0.14	110	15.4
Total Material =				15.4

HORMIGON POBRE				
Unidad: m ³				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Bs	Costo total Bs
1. MATERIALES				
ARENA CORRIENTE	m ³	0.43	122	52.5
CEMENTO IP - 30	kg	200	1.07	214.0
GRAVA COMUN	m ³	0.74	100	74.0
Total Material =				340.5

CAMARA SEPTICA (2.0 x 1.20 x 1.5) LADRILLO GAMBOTE				
Unidad: Pza				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Bs	Costo total Bs
1. MATERIALES				
ALAMBRE DE AMARRE	kg	0.3	11.83	3.5
ARENA FINA	m ³	0.71	136	96.6
CEMENTO IP - 30	kg	260	1.07	278.2
LADRILLO GAMBOTE 18H 25 x 12 x 6 cm	Pza	672	1.12	752.6
Total Material =				1130.9

7.2.2 Cantidad de material a ser empleado.

MATERIALES		total	para comprar
ACERO LISO 20 mm (3/4")	m	3.6	1 barra
ACERO LISO (1/2")	m	18.0	3 barra
ALAMBRE DE AMARRE	kg	3.5	4 kg
ANGULAR 1" x 1/8"	m	17.8	18 m
ARENA CORRIENTE	m ³	0.7	1 m ³
CEMENTO IP - 30	kg	5362.5	107 bolsas
CLAVOS	kg	15.8	16 kg
GRAVA COMUN	m ³	13.0	13 m ³
MADERA PARA CONSTRUCCION (3 USOS)	P2	305.1	300 P2
ELECTRODO 6010 2.5	kg	9.0	9 kg
PINTURA ANTICORROSIVA	Gal	0.2	1 Litros
PLANCHA DE ACERO 1/8" e = 3 mm	m ²	0.7	1 m ²
ALAMBRE TEJIDO	m ²	1.2	1.5 m ²
ESTUCO PANDO	kg	26.0	1.5 bolsas
ACERO CORRUGADO	kg	16.0	16 kg
ADITIVO ACELERADOR DE FRAGUADO EXENTO DE CLORUROS	kg	66.1	4 envases SIKA Rapid 1
PIEDRA BRUTA	m ³	14.7	15 m ³
PIEDRA MANZANA	m ³	4.2	5 m ³
ARENA FINA	m ³	0.7	1 m ³
LADRILLO GAMBOTE 18H 25 x 12 x 6 cm	Pza	672.0	672 piezas

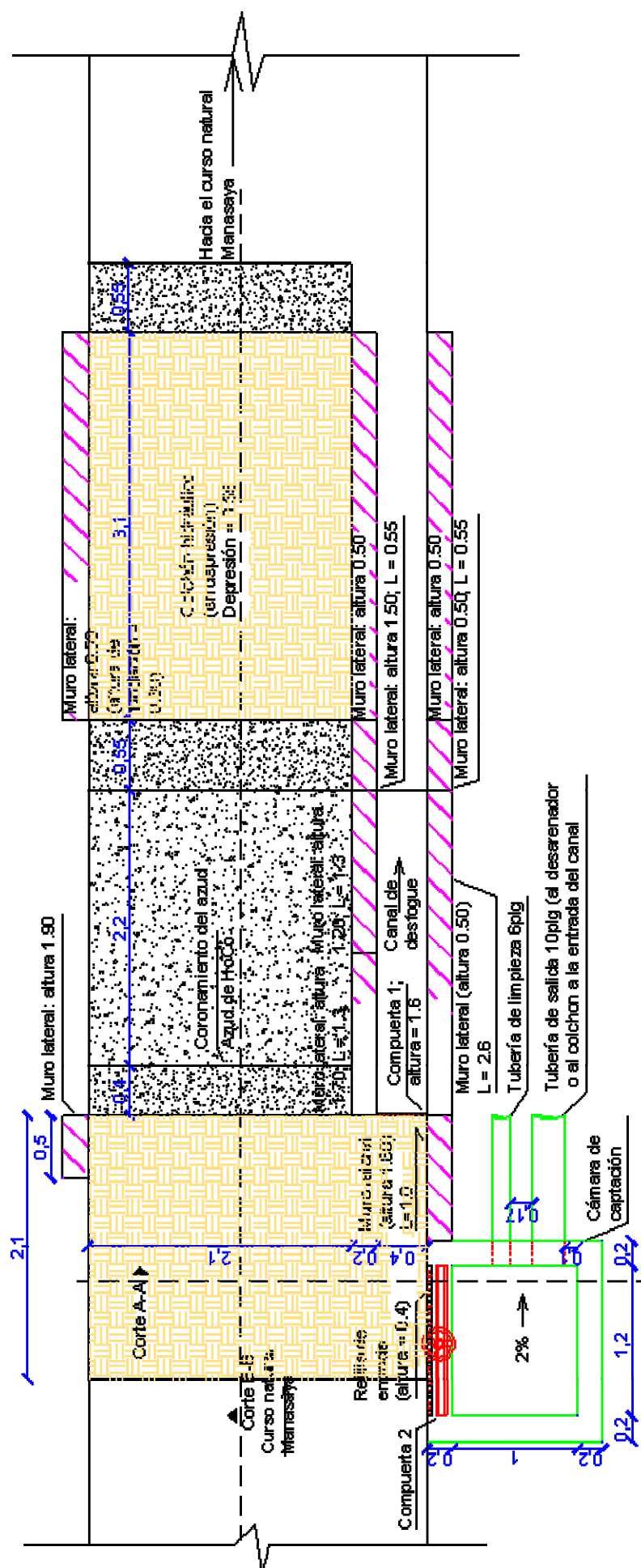
Total costo de inversión (2 obras de toma): 17700 Bs

7.3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- En base a la Alternativa 3 del diseño de la obra de toma del canal Manasaya y a la Alternativa 2 de la obra de toma Comunidad Papel Pampa, se presentó el análisis de precios unitarios y el cálculo del material a ser empleado. Para una óptima utilización de los materiales y recursos humanos, y en caso de que por disposiciones constructivas exista la necesidad de realizar modificaciones al diseño presentado, se recomienda la contratación de un supervisor con experiencia en la construcción de obras civiles (de preferencia ingeniero civil).
- En caso de utilizarse material del lugar (áridos), se recomienda seguir las especificaciones técnicas respectivas para garantizar la funcionalidad de la obras, principalmente en lo que concierne a las mezclas de hormigones.
- Se recomienda tomar en cuenta las observaciones señaladas en la introducción de las partes correspondientes del presente Informe de Avance, principalmente en caso de que existan dudas acerca de la funcionalidad y mantenimiento requerido en la operación del diseño presentado en la Alternativa 3 de la obra en el canal Manasaya.
- Se recomienda consultar los planos que acompañan el presente Informe de Avance a lo largo del proceso de construcción de las obras.

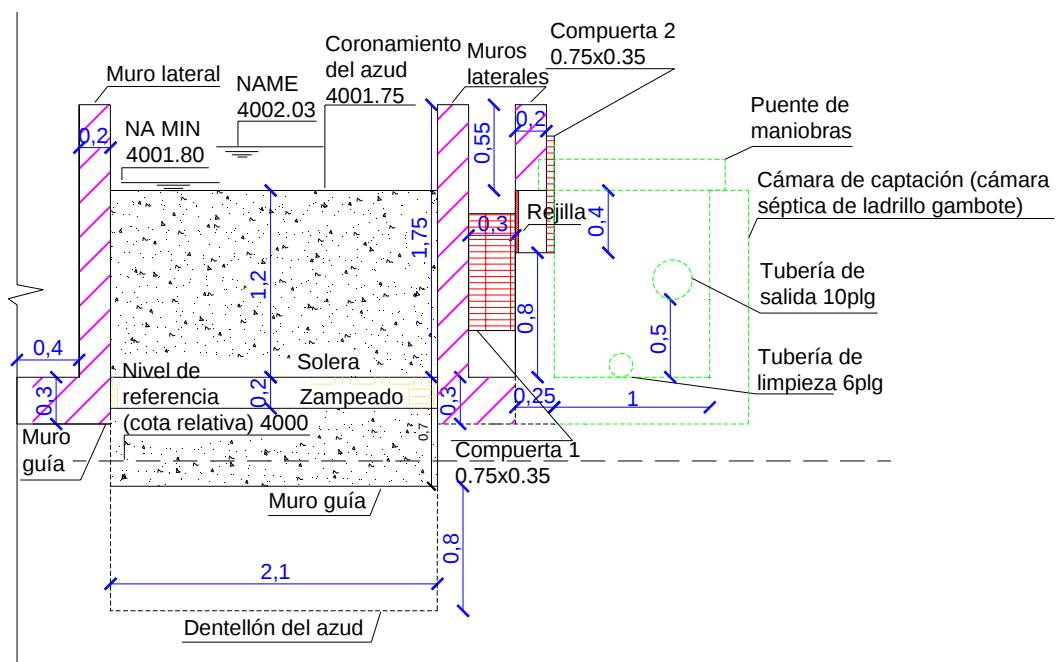
**Vista lateral de azud y entrada
a bocatoma - Corte B-B
Escala 1:100**

52



Vista en planta de azud y bocatoma

Cotas en msnm; dimensiones en m



Corte A-A: Vista de la bocatoma
Escala 1:100

Cotas en msnm;
dimensiones en m

Technical drawing of a canal cross-section and longitudinal profile.

Cross-section (Top):

- Water depth: 0.85
- Total width: 3.00
- Side slopes: 1:1

Longitudinal Profile (Bottom):

- Gate (Puerta):** Length 0.30, Height 0.80, Longitud 0.30.
- Check Dam (Estrado):** Length 0.30, Height 0.80, Longitud 0.30.
- Side Channel (Canal de riego):** Length 0.30, Height 0.80, Longitud 0.30.
- Side Ditch (Vertedero lateral):** Length 0.30, Height 0.80, Longitud 0.30.
- Desander (Desarenador):** Length 0.30, Height 0.80, Longitud 0.30.
- Side Ditch (Canal de desagüe):** Length 0.30, Height 0.80, Longitud 0.30.

Direction of the natural river course: Hacia el curso natural Matucana.

Vista en planta de azud y bocatoma
Escala 1:100

