

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA CIVIL**  
**INSTITUTO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL**  
**POST GRADO EN INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL**



**ANALISIS DE ESCENARIOS DE OPERACIÓN EN LAS  
PRESAS CHACALTAYA, PAMPALARAMA Y ALPAQUITA  
PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN POR ACTIVIDAD  
MINERA EN EL RIO KHALUYO – APLICACIÓN DEL  
MODELO MATEMÁTICO HEC RAS**

**Tesis de maestría presentada para la obtención del grado de Magister Scientiarum**

**POSTULANTE: Ing. GUILLERMO MANRIQUE GUTIÉRREZ**  
**TUTOR: Msc. Ing. OSCAR PAZ RADA**

**LA PAZ – BOLIVIA**

**2021**



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a:

Mis padres Guillermo y Rosemary, quienes me han apoyado durante toda mi vida a cumplir con mis metas, permitiéndome alcanzar cada objetivo que me he propuesto; gracias a su paciencia, tolerancia, sacrificio y cariño puedo decir ahora que he logrado convertirme en una mejor persona, su ejemplo me ha servido para concretar un sueño más en lo profesional.

A mi hijo Guillermo, que es el motivo y el motor que me impulsa para seguir adelante ante cualquier adversidad, sabiendo que él está siempre a mi lado dándome su apoyo y alentando cada emprendimiento que me propongo.

Finalmente, a mis hermanas, sobrinas y sobrino que siempre han estado en el momento que más las he necesitado, agradezco su cariño y apoyo en todo momento.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco primeramente a mis padres por todo su apoyo, a mi hijo, mis hermanas y toda mi familia que siempre me ha apoyado.

Agradezco también a mis docentes de pregrado y de postgrado, son tantas las enseñanzas que me han transferido que me faltarían hojas para enumerarlas, es grato saber que el conocimiento es compartido por la mayoría de ellos a las nuevas generaciones para que mejore cada vez más los trabajos e investigaciones que se van realizando en nuestro país.

También quiero agradecer muy especialmente a mi tutor Msc. Ing. Oscar Paz por su apoyo, impulso y dedicación para que este trabajo se concluya de manera correcta.

**ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE OPERACIÓN EN LAS PRESAS CHACALTAYA,  
PAMPALARAMA Y ALPAQUITA PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN POR  
ACTIVIDAD MINERA EN EL RÍO KHALUYO – APLICACIÓN DEL MODELO  
MATEMÁTICO HEC RAS**

**Autor: Ing. Guillermo Manrique Gutiérrez**

**RESUMEN**

Debido a la situación de emergencia presentada por la escasez de agua en la ciudad de La Paz durante el año 2016 y que en el tiempo puede hacerse más frecuente por la irregularidad y disminución de las lluvias, ocasionadas en parte por la variabilidad y el cambio climático, el Gobierno Nacional ha instruido la ejecución inmediata de presas (Chacaltaya, Pampalarama y Alpaquita) que permitan el incremento de los volúmenes de agua potable para la ciudad de La Paz.

En el proceso de ejecución se ha identificado pasivos ambientales dejados por la actividad minera principalmente en la cuenca de aporte a la presa Chacaltaya. Estas aguas son recolectadas a través de toda la cuenca y depositadas en el mismo río aguas abajo de la presa sin ningún tratamiento específico previo. Estos pasivos ambientales hacen que las concentraciones en el agua de aluminio, antimonio, hierro y manganeso estén por encima de los límites permisibles en la NB-512.

La presente investigación ha realizado un análisis de sensibilidad considerando variaciones del caudal producto de escenarios de operación de las presas Pampalarama, Chacaltaya y Alpaquita, utilizando el modelo de simulación Hec Ras. De acuerdo a las simulaciones realizadas se ha podido observar que es posible reducir las concentraciones de aluminio, hierro y manganeso, hasta los límites recomendados en la NB-512 para abastecimiento de agua potable, regulando los caudales de salida de las presas, manteniendo un caudal de salida mínimo constante de 500 l/s. Este trabajo es una herramienta útil para la toma de decisiones con respecto a la operación de las presas orientado a reducir los requerimientos de tratamiento del agua del río Khaluyo en la planta de Achachicala.

**PALABRAS CLAVE**

Presas, Escenarios de Operación, contaminación de agua, metales pesados, modelación en Hec Ras.

## **SUMMARY**

Due to the emergency situation presented by the scarcity of water in the city of La Paz during 2016 and that over time it can become more frequent due to the irregularity and decrease of rainfall, partly caused by variability and climate change, the National Government has instructed the immediate execution of dams (Chacaltaya, Pampalarama and Alpaquita) that allow the increase of drinking water volumes for the city of La Paz.

In the execution process, environmental liabilities left by the mining activity have been identified mainly in the basin of contribution to the Chacaltaya dam. These waters are collected throughout the basin and deposited in the same river downstream of the dam without any specific prior treatment. These environmental liabilities mean that the concentrations in the aluminum, antimony, iron and manganese water are above the permissible limits in the NB-512. The present investigation has carried out a sensitivity analysis considering variations of the flow resulting from operating scenarios of the Pampalarama, Chacaltaya and Alpaquita dams, using the Hec Ras simulation model. According to the simulations carried out, it has been observed that it is possible to reduce the concentrations of aluminum, iron and manganese, up to the limits recommended in the NB-512 for drinking water supply, regulating the flow rates of the dams, maintaining a constant minimum output flow of 500 l/s., This work is a useful tool for decision-making regarding the operation of dams aimed at reducing the water treatment requirements of the Khaluyo River at the water treatment plant (Achachicala).

# Contenido

<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>- 1 -</b>
<b>INTRODUCCION</b> .....	<b>- 1 -</b>
<b>1.1 ANTECEDENTES</b> .....	<b>- 1 -</b>
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	- 3 -
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>- 4 -</b>
<b>OBJETIVOS Y METODOLOGÍA</b> .....	<b>- 4 -</b>
<b>2.1 OBJETIVO GENERAL</b> .....	<b>- 4 -</b>
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	- 4 -
2.3 METODOLOGÍA.....	- 4 -
2.3.1 <i>HIPÓTESIS</i> .....	- 4 -
2.3.1.1. <b>DEFINICION DE VARIABLES</b> .....	- 4 -
2.3.2 <i>ANÁLISIS METODOLÓGICO</i> .....	- 4 -
2.3.2.1. <b>TIPO DE INVESTIGACIÓN</b> .....	- 4 -
2.3.2.2. <b>CLASIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	- 5 -
2.3.2.3. <b>MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN</b> .....	- 5 -
2.3.2.4. <b>ESQUEMA METODOLÓGICO</b> .....	- 5 -
<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>- 8 -</b>
<b>SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA Y CONTAMINACIÓN MINERA EN LA CIUDAD DE LA PAZ</b> .....	<b>- 8 -</b>
<b>3.1 SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA CIUDAD DE LA PAZ</b> .....	<b>- 8 -</b>
<b>3.2 CONTAMINACIÓN MINERA EN LAS FUENTES DE AGUA</b> .....	<b>- 10 -</b>
3.2.1 <i>CONTAMINACIÓN DE CUERPOS DE AGUA POR ACTIVIDAD MINERA</i> .....	- 10 -
3.2.2 <i>EFFECTOS EN LA SALUD POR CONTAMINACIÓN DE ACTIVIDAD MINERA EN LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE</i> .....	- 11 -
<i>ALUMINIO (Al)</i> .....	- 11 -
<i>ANTIMONIO (Sb)</i> .....	- 11 -
<i>HIERRO (Fe)</i> .....	- 12 -
<i>MANGANESO (Mn)</i> .....	- 12 -
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>- 13 -</b>
<b>FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO DEL NUEVO SISTEMA DE PRESAS EN EL RÍO KHALUYO</b> - <b>13</b>	
-	
<b>3.1 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE LAS TRES PRESAS</b> .....	<b>- 13 -</b>
<b>3.2 DIAGNÓSTICO Y OPERACIÓN DE LA PRESA PAMPALARAMA</b> .....	<b>- 13 -</b>
3.2.1 <i>DIAGNÓSTICO DE LA PRESA PAMPALARAMA</i> .....	- 13 -
3.2.1.1. <b>SITUACIÓN ACTUAL DE LA PRESA</b> .....	- 13 -
3.2.1.2. <b>CALIDAD DE AGUA EN LA PRESA</b> .....	- 16 -
3.2.1.3. <b>CURVA VOLUMEN vs ALTURA</b> .....	- 17 -
3.2.2 <i>OPERACIÓN DE LA PRESA PAMPALARAMA</i> .....	- 18 -
3.2.2.1. <b>CURVA DE DESCARGA ALTURA vs CAUDAL</b> .....	- 18 -
3.2.2.2. <b>TIEMPO DE VACIADO DE LA PRESA vs CAUDAL DE SALIDA</b> .....	- 21 -
<b>3.3 DIAGNÓSTICO Y OPERACIÓN DE LA PRESA CHACALTAYA</b> .....	<b>- 25 -</b>
3.3.1 <i>DIAGNÓSTICO DE LA PRESA CHACALTAYA</i> .....	- 25 -
3.3.1.1. <b>SITUACIÓN ACTUAL DE LA PRESA</b> .....	- 25 -

3.3.1.2.	CALIDAD DE AGUA EN LA PRESA .....	- 27 -
3.3.1.3.	CURVA ALTURA vs VOLUMEN .....	- 34 -
3.3.2	OPERACIÓN DE LA PRESA CHACALTAYA.....	- 35 -
3.3.2.1.	CURVA DE DESCARGA ALTURA vs CAUDAL .....	- 35 -
3.3.2.2.	TIEMPO DE VACIADO DE LA PRESA vs CAUDAL.....	- 38 -
<b>3.4</b>	<b>DIAGNÓSTICO Y OPERACIÓN DE LA PRESA ALPAQUITA .....</b>	<b>- 42 -</b>
3.4.1	DIAGNÓSTICO DE LA PRESA ALPAQUITA .....	- 42 -
3.4.1.1.	SITUACIÓN ACTUAL DE LA PRESA .....	- 42 -
3.4.1.2.	CALIDAD DE AGUA EN LA PRESA .....	- 43 -
3.4.1.3.	CURVA ALTURA vs VOLUMEN .....	- 47 -
3.4.2	OPERACIÓN DE LA PRESA ALPAQUITA .....	- 49 -
3.4.2.1.	CURVA DE DESCARGA ALTURA vs CAUDAL .....	- 49 -
3.4.2.2.	TIEMPO DE VACIADO DE LA PRESA vs CAUDAL.....	- 51 -
<b>CAPÍTULO V</b>	<b>.....</b>	<b>- 56 -</b>
<b>MODELACIÓN DE CALIDAD DE AGUA EN RÍOS CON HEC RAS Y QGIS .....</b>		<b>- 56 -</b>
<b>5.1 MODELO QGIS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA .....</b>		<b>- 56 -</b>
5.1.1	CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO .....	- 56 -
5.1.2	ELEMENTOS DEL MODELO QGIS .....	- 57 -
5.1.3	FUNCIONAMIENTO DEL MODELO QGIS .....	- 59 -
<b>5.2 MODELO MATEMÁTICO HEC RAS.....</b>		<b>- 62 -</b>
5.1.1	CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO HEC RAS .....	- 62 -
5.1.2	DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELO .....	- 65 -
5.1.3	COMPONENTES PARA EL DESARROLLO DEL MODELO HEC RAS.....	- 66 -
5.1.4	INSUMOS.....	- 66 -
5.1.5	PROCEDIMIENTO .....	- 66 -
5.1.6	RESULTADOS QUE MUESTRA EL MODELO HEC RAS.....	- 68 -
5.1.7	VENTAJAS Y DESVENTAJAS.....	- 69 -
<b>CAPÍTULO VI</b>	<b>.....</b>	<b>- 71 -</b>
<b>RESULTADOS DE LA MODELACIÓN EN HEC RAS .....</b>		<b>- 71 -</b>
6.1	TRABAJO DE CAMPO -CAMPAÑA DE MUESTREO .....	- 71 -
6.2	CALIBRACIÓN HIDRODINÁMICA DEL MODELO .....	- 77 -
6.3	CALIBRACIÓN DEL MODELO DE CALIDAD DE AGUA .....	- 83 -
6.3.1	ECUACIÓN DE BALANCE DE MASA PARA COMPUESTOS CONSERVATIVOS (APLICABLE A LAS CONFLUENCIAS DE LOS RÍOS) .....	- 83 -
6.3.1.1	CÁLCULO DE LAS CONCENTRACIONES EN LA UNIÓN 1 (FLUJOS PROVENIENTES DE LAS PRESAS PAMPALARAMA Y ALPAQUITA).....	- 85 -
	<i>Considerando las concentraciones muestreadas en las presas Pampalarama y Alpaquita, así como sus caudales respectivos, se ha calculado la concentración resultante de la unión de estos dos ríos aplicando el balance de masa para compuestos conservativos: .....</i>	<i>- 85 -</i>
6.3.1.2	CÁLCULO DE LAS CONCENTRACIONES EN LA UNIÓN 2 (FLUJOS PROVENIENTES DE LAS PRESAS PAMPALARAMA, ALPAQUITA Y CHACALTAYA) .....	- 86 -
	<i>Considerando las concentraciones calculadas en la Unión 1 (Pampalarama y Alpaquita), las concentraciones muestreadas a la salida de la presa Chacaltaya y sus caudales respectivos; se ha calculado las concentraciones correspondientes a las aguas provenientes de la Unión 1 con las aguas provenientes de la presa Chacaltaya, aplicando el balance de masa para compuestos conservativos:...</i>	<i>- 86 -</i>
6.3.2	ECUACIÓN DE BALANCE DE MASA PARA COMPUESTOS NO CONSERVATIVOS (APLICABLE A LO LARGO DE LOS RÍOS) APLICACIÓN DEL SOFTWARE HEC RAS.....	- 87 -
6.3.3	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS SIMULADOS EN HEC RAS .....	- 92 -
6.3.4	ANÁLISIS Y VERIFICACIÓN DE LOS VALORES K CALCULADOS EN HEC RAS.....	- 95 -



6.3.4.1	CONSIDERACIONES SOBRE LOS CAUDALES – ECUACION DE CONTINUIDAD .....	- 96 -
6.3.4.2	CONCENTRACIONES DE CONTAMINANTES EN EL PUENTE KHALUYO Y PUENTE LIMANIPATA, NECESARIAS PARA DETERMINAR K.....	- 97 -
6.3.4.3	DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE AGUA TRANSPORTADO POR EL RÍO.....	- 98 -
6.3.4.4	DETERMINACIÓN DE K (CONSTANTE DE VELOCIDAD) PARA CADA CONTAMINANTE..	- 99 -
6.3.4.5	COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE K, CALCULADOS POR EL HEC RAS Y POR EL MÉTODO SIMPLIFICADO, PARA SU VERIFICACIÓN .....	- 102 -
6.4	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA DIFERENTES ESCENARIOS DE OPERACIÓN DE LAS PRESAS .....	- 103 -
6.4.1	ESCENARIO 1: VÁLVULAS CERRADAS, CAUDAL BASE .....	- 103 -
6.4.2	ESCENARIO 2: DESCARGA MÍNIMA DE 500 l/s SOLO PRESA PAMPALARAMA .....	- 105 -
6.4.3	ESCENARIO 3: DESCARGA MÍNIMA DE 500 l/s SOLO PRESA ALPAQUITA .....	- 106 -
6.4.4	ESCENARIO 4: DESCARGA MÍNIMA DE 500 l/s SOLO PRESA CHACALTAYA .....	- 107 -
6.4.5	ESCENARIO 5: DESCARGA MÍNIMA DE 500 l/s ENTRE LAS TRES PRESAS.....	- 109 -
6.4.6	ESCENARIO 6: VÁLVULAS CERRADAS Y CAUDAL BASE AFORADO EN CAMPAÑA DE MUESTREO (MES DE MAYO) .....	- 110 -
6.4.7	ESCENARIO 7: PRESA ALPAQUITA CERRADA Y DESCARGA AL 15% DE LAS PRESAS CHACALTAYA Y PAMPALARAMA .....	- 112 -
6.4.8	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS PARA CADA ESCENARIO CONSIDERADO	- 113 -
7.1	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	- 117 -
7.1.1	CONCLUSIONES.....	- 117 -
7.1.2	RECOMENDACIONES.....	- 120 -
7.2	ALCANCE Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN .....	- 121 -
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>- 123 -</b>
	<b>ANEXO I .....</b>	<b>- 125 -</b>
	<b>PLANTA DE TRATAMIENTO DE ACHACHICALA.....</b>	<b>- 125 -</b>
	<b>ANEXO II.....</b>	<b>- 1 -</b>
	<b>SITUACIÓN MINERA Y EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN BOLIVIA.....</b>	<b>- 1 -</b>
	<b>ANEXO III .....</b>	<b>- 12 -</b>
	<b>MARCO NORMATIVO DE AGUA POTABLE Y MINERÍA EN BOLIVIA.....</b>	<b>- 12 -</b>
	<b>ANEXO IV.....</b>	<b>- 17 -</b>
	<b>CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE RÍOS, CARGAS Y BALANCE DE MASAS .....</b>	<b>- 17 -</b>
	<b>ANEXO V .....</b>	<b>- 26 -</b>
	<b>RECOMENDACIONES PARA LA OPERACIÓN DE VÁLVULAS EN PRESAS.....</b>	<b>- 26 -</b>
	<b>ANEXO VI.....</b>	<b>- 28 -</b>
	<b>ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING “N” .....</b>	<b>- 28 -</b>
	<b>ANEXO VII .....</b>	<b>- 33 -</b>
	<b>RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AGUA DE LA CAMPAÑA DE MUESTREOS DEL 15 DE MAYO DE 2019 .....</b>	<b>- 33 -</b>
	<b>ANEXO VIII.....</b>	<b>- 1 -</b>
	<b>RESULTADOS DE LA MODELACIÓN EN HEC RAS .....</b>	<b>- 1 -</b>

## Índice de tablas

Tabla 1. Sistema de abastecimiento de la ciudad de La Paz.....	- 8 -
Tabla 2. Principales actividades industriales generadoras de metales pesados.....	- 10 -
Tabla 3. Síntomas de la intoxicación típicos y los niveles de contaminación máximos .....	- 11 -
Tabla 4. Datos generales Presa Pampalarama .....	- 14 -
Tabla 5. Análisis de calidad de agua en la presa Pampalarama .....	- 16 -
Tabla 6. Altura vs Volumen, presa Pampalarama .....	- 17 -
Tabla 7. Cota de agua en el embalse y porcentaje de apertura de las válvulas necesarias para mantener un caudal de descarga mínimo de 500 l/s .....	- 19 -
Tabla 8. Datos generales Presa Chacaltaya .....	- 25 -
Tabla 9. Resultados de laboratorio muestreados en cada pasivo ambiental.....	- 31 -
Tabla 10. Volumen de almacenamiento de la presa Chacaltaya en función de la altura del espejo de agua en el embalse.....	- 34 -
Tabla 11. Cota de agua en el embalse y porcentaje de apertura de las válvulas necesarias para mantener un caudal de descarga mínimo de 500 l/s .....	- 36 -
Tabla 12. Datos generales, presa Alpaquita .....	- 43 -
Tabla 13. Volumen de almacenamiento de la presa Alpaquita en función de la altura del espejo de agua en el embalse .....	- 48 -
Tabla 14. Cota de agua en el embalse y porcentaje de apertura de las válvulas necesarias para mantener un caudal de descarga mínimo de 500 l/s .....	- 50 -
Tabla 15. Evolución del tipo de modelización y herramientas de análisis de Hec Ras.....	- 62 -
Tabla 16. Resultados del aforo y calidad de agua .....	- 73 -
Tabla 17. Resultados de la campaña de aforo y muestreo realizada el 15 de mayo de 2019-	- 91 -
Tabla 18. Coeficiente de velocidad de reducción de concentración “K” (para un constituyente arbitrario), utilizados para cada contaminante.....	- 91 -
Tabla 19. Valores de K, comparación y verificación .....	- 102 -
Tabla 20. Datos introducidos al Hec Ras y resultados para el escenario 1 .....	- 104 -
Tabla 21. Datos introducidos al Hec Ras y resultados para el escenario 2 .....	- 105 -
Tabla 22. Datos introducidos al Hec Ras y resultados para el escenario 3 .....	- 106 -
Tabla 23. Datos introducidos al Hec Ras y resultados para el escenario 4 .....	- 108 -
Tabla 24. Datos introducidos al Hec Ras y resultados para el escenario 5 .....	- 109 -
Tabla 25. Datos introducidos al Hec Ras y resultados para el escenario 6 .....	- 111 -
Tabla 26. Datos introducidos al Hec Ras y resultados para el escenario 7 .....	- 112 -
Tabla 27. Resumen general de resultados y escenario planteados .....	- 114 -
Tabla 28. Resumen de los caudales y consideraciones para cada escenario .....	- 116 -
Tabla 29. Resumen de cumplimiento de la NB-512 de cada contaminante .....	- 116 -

## Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de calibración hidrodinámica y de calidad de agua para Hec Ras .....	- 6 -
Figura 2. Diagrama de análisis de sensibilidad para cada escenario planteado .....	- 7 -
Figura 3. Esquema del sistema de abastecimiento en la ciudad de La Paz .....	- 9 -
Figura 4. Sistema de presas del río Khaluyo .....	- 13 -
Figura 5. Presa Pampalarama concluida.....	- 14 -
Figura 6. Galería al interior de la presa Pampalarama .....	- 14 -
Figura 7. Instalación de equipos al interior de la galería en la presa Pampalarama.....	- 15 -
Figura 8. Sección Típica de la presa Pampalarama.....	- 15 -

Figura 9. Detalle de Perfil y planta de la obra de toma y desfogue de azolves presa Pampalarama .....	- 16 -
Figura 10. Curva Volumen del embalse vs Altura .....	- 18 -
Figura 11. Curva Altura de agua vs Caudal de descarga.....	- 18 -
Figura 12. Porcentaje de apertura de válvulas para mantener un caudal de salida de 500 l/s, en función del nivel de agua en el embalse .....	- 20 -
Figura 13. Descarga de caudal en función del porcentaje de apertura de válvulas .....	- 21 -
Figura 14. Tiempo de vaciado de la presa manteniendo un caudal mínimo de 500 l/s, con 100% y 75 % de apertura de la válvula .....	- 22 -
Figura 15. Tiempo de vaciado de la presa manteniendo el 50% y 25 % de apertura de la válvula .....	- 23 -
Figura 16. Tiempo de vaciado de la presa manteniendo el 15 % de apertura de la válvula .	- 24 -
Figura 17. Resumen del tiempo de vaciado de la presa en función del porcentaje de apertura de válvulas.....	- 24 -
Figura 18. Presa Chacaltaya .....	- 25 -
Figura 19. Emplazamiento de la presa Chacaltaya.....	- 26 -
Figura 20. Sección Típica con materiales presa Chacaltaya .....	- 26 -
Figura 21. Sección típica con dimensiones presa Chacaltaya .....	- 27 -
Figura 22. Calidad de agua en la presa Chacaltaya .....	- 28 -
Figura 23. Ubicación de pasivos ambientales (A1, A2, A3, A4 y A5) y colector de aguas ácidas con relación a la ubicación del eje de la presa (CH1) .....	- 29 -
Figura 24. Ubicación de las presas y la obra de toma .....	- 30 -
Figura 25. pH y Concentraciones de Fe, Mg y Na en los pasivos ambientales.....	- 31 -
Figura 26. Concentración de Mn, Zn, Al y Cu en pasivos ambientales .....	- 32 -
Figura 27. Concentraciones de Pb, Ag, Hg y Sb en pasivos ambientales .....	- 33 -
Figura 28. Altura vs Volumen de almacenamiento presa Chacaltaya.....	- 35 -
Figura 29. Altura de embalse vs Caudal de descarga, en función del porcentaje de apertura de válvulas.....	- 35 -
Figura 30. Porcentaje de apertura de válvulas para mantener un caudal de salida de 500 l/s, en función del nivel de agua en el embalse Chacaltaya .....	- 36 -
Figura 31. Descarga de caudal en función del porcentaje de apertura de válvulas. Embalse Chacaltaya .....	- 37 -
Figura 32. Tiempo de vaciado de la presa manteniendo el 100% y 75 % de apertura de la válvula .....	- 38 -
Figura 33. Tiempo de vaciado de la presa manteniendo el 50% y 25 % de apertura de la válvula .....	- 40 -
Figura 34. Tiempo de vaciado de la presa manteniendo el 25 % de apertura de la válvula .	- 41 -
Figura 35. Resumen del tiempo de vaciado de la presa en función del porcentaje de apertura de válvulas.....	- 41 -
Figura 36. Presa Alpaquita .....	- 43 -
Figura 37. Sección Típica presa Alpaquita.....	- 43 -
Figura 38. Puntos de muestreo realizado en la etapa de elaboración del diseño final de la presa Alpaquita .....	- 44 -
Figura 39. Concentraciones de NO <sub>2</sub> , Fluoruros, NH <sub>3</sub> , B, Cu, Fe, Mn, Cloro residual, Pb, As y Al en el embalse Alpaquita, muestreados en 2017 por la consultora .....	- 44 -
Figura 40. Valores muestreados de pH, color, turbiedad, sólidos sedimentables, NO <sub>3</sub> , O <sub>2</sub> , DQO, DBO <sub>5</sub> , aceites, grasas, Zn, sulfuros, SDT, Ca, Mg, Na, SO <sub>4</sub> , Cl-, Alcalinidad, Dureza	

total Coliformes totales y fecales en el embalse Alpaquita, muestreados en 2017 por la consultora .....	- 46 -
Figura 41. Curva Volumen del embalse vs Altura .....	- 48 -
Figura 42. Altura de embalse vs Caudal de descarga, en función del porcentaje de apertura de válvulas .....	- 49 -
Figura 43. Porcentaje de apertura de válvulas para mantener un caudal de salida de 500 l/s, en función del nivel de agua en el embalse .....	- 50 -
Figura 44. Descarga de caudal en función del porcentaje de apertura de válvulas .....	- 51 -
Figura 45. Tiempo de vaciado de la presa manteniendo el 100% y 75% de apertura de la válvula .....	- 52 -
Figura 46. Tiempo de vaciado de la presa manteniendo el 50% y 25% de apertura de la válvula .....	- 53 -
Figura 47. Tiempo de vaciado de la presa manteniendo el 15% de apertura de la válvula ..	- 54 -
Figura 48. Resumen del tiempo de vaciado de la presa en función del porcentaje de apertura de válvulas .....	- 55 -
Figura 49. Tipos de datos espaciales en QGIS .....	- 57 -
Figura 50. Entorno de trabajo en Qgis.....	- 58 -
Figura 51. Aplicación del modelo QGIS y RIVERGIS para la exportación de la geometría del cauce al Hec Ras.....	- 60 -
Figura 52. Evolución de la interfaz de HEC RAS a lo largo de sus diferentes versiones ....	- 63 -
Figura 53. Ecuación de energía .....	- 64 -
Figura 54. Ejemplo de sección transversal del río.....	- 64 -
Figura 55. Diagrama de procesos en Hec Ras .....	- 65 -
Figura 56. Estructura de un proyecto en Hec Ras .....	- 65 -
Figura 57. Vista en 3D y perfil del cauce con sus afluentes.....	- 68 -
Figura 58. Resultados de la simulación de calidad de agua para cada contaminante, con respecto al tiempo y para cada sección transversal .....	- 69 -
Figura 59. Ubicación de los puntos de muestreo.....	- 71 -
Figura 60. Puntos de aforo y muestreo 1 y 2 .....	- 71 -
Figura 61. Puntos de aforo y muestreo 3 y 4.....	- 72 -
Figura 62: Punto de muestreo 5.....	- 72 -
Figura 63. Evolución de las concentraciones de contaminantes a lo largo de los 5 puntos de muestreo .....	- 74 -
Figura 64. Caudal aforado a lo largo de los 5 puntos de muestreo.....	- 74 -
Figura 65. Evolución de la concentración de Mn y Al a lo largo de los 5 puntos de muestreo ..	- 75 -
Figura 66. Evolución de la concentración de Fe y Sb a lo largo de los 5 puntos de muestreo-	- 76 -
Figura 67. Variación del PH en los 5 puntos de muestreo .....	- 76 -
Figura 68. Presa Alpaquita y alcantarilla modelados en Hec Ras .....	- 78 -
Figura 69. Comparación del tirante medido y simulado en el punto 1 (cerca de la presa Alpaquita).....	- 78 -
Figura 70. Presa Pampalarama y alcantarilla doble modelados en Hec Ras .....	- 79 -
Figura 71. Comparación del tirante medido y simulado en el punto 2 (cerca de la presa Pampalarama).....	- 80 -
Figura 72. Alcantarilla de siete tubos modelado en Hec Ras .....	- 80 -

Figura 73. Comparación del tirante medido y simulado en el punto 3 (cerca del puente Khaluyo).....	- 81 -
Figura 74. Velocidad calculada en los puntos 1,2 y 3 y sus coeficientes de correlación respecto a “n”.....	- 82 -
Figura 75. Resultados de la Calibración hidrodinámica en el punto de control 4, Estación Achachicala .....	- 82 -
Figura 76. Esquema de todo el sistema de presas y las uniones de los ríos .....	- 85 -
Figura 77. Ventana de selección de constituyente arbitrario “no conservativo” en el Hec Ras..	- 89 -
Figura 78. Efecto de la dilución en la concentración de contaminantes en un río .....	- 90 -
Figura 79. Módulo de calidad del Hec Ras utilizado para el análisis de concentraciones de Fe, Mn, Al y Sb .....	- 92 -
Figura 80. Correlación entre K y la concentración de Hierro (Fe) en el punto 5 (puente Limanipata).....	- 93 -
Figura 81. Correlación entre K y la concentración de Manganeso (Mn) en el punto 5 (puente Limanipata).....	- 93 -
Figura 82. Correlación entre K y la concentración de Antimonio (Sb) en el punto 5 (puente Limanipata).....	- 94 -
Figura 83. Correlación entre K y la concentración de Aluminio (Al) en el punto 5 (puente Limanipata).....	- 94 -
Figura 84. Relación de caudales en el sistema .....	- 97 -
Figura 85. Concentraciones de contaminantes en el Puente Khaluyo.....	- 98 -
Figura 86. Concentraciones de contaminantes en el Puente Limanipata .....	- 98 -
Figura 87. Concentraciones de contaminantes en la toma de Achachicala y recomendación de la NB-512, escenario 1 .....	- 104 -
Figura 88. Concentraciones de contaminantes en la toma de Achachicala y recomendación de la NB-512, escenario 2 .....	- 105 -
Figura 89. Concentraciones de contaminantes en la toma de Achachicala y recomendación de la NB-512, escenario 3 .....	- 107 -
Figura 90. Concentraciones de contaminantes en la toma de Achachicala y recomendación de la NB-512, escenario 4 .....	- 108 -
Figura 91. Concentraciones de contaminantes en la toma de Achachicala y recomendación de la NB-512, escenario 5 .....	- 110 -
Figura 92. Concentraciones de contaminantes en la toma de Achachicala y recomendación de la NB-512, escenario 6 .....	- 111 -
Figura 93. Concentraciones de contaminantes en la toma de Achachicala y recomendación de la NB-512, escenario 7 .....	- 113 -
Figura 94. Concentración de Fe para cada escenario planteado.....	- 114 -
Figura 95. Concentración de Mn para cada escenario planteado .....	- 115 -
Figura 97. Concentración de Al para cada escenario planteado.....	- 115 -

## Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Tiempo de descarga desde el nivel y1 al nivel y2 .....	- 22 -
Ecuación 2. Tiempo de descarga desde el nivel y1 al nivel y2 .....	- 38 -
Ecuación 3. Tiempo de descarga desde el nivel y1 al nivel y2 .....	- 52 -

Ecuación 4. Balance de masa para compuestos conservativos.....	- 84 -
Ecuación 5. Concentraciones en la Unión 1 (Pampalarama y Alpaquita).....	- 86 -
Ecuación 6. Concentraciones en la Unión 2 (Unión 1 y Chacaltaya).....	- 87 -
Ecuación 7. Balance de masa para constituyentes no conservativos.....	- 88 -
Ecuación 8. Tasa de reacción para compuesto no conservativo.....	- 88 -
Ecuación 9. Tasa de reacción del componente arbitrario “no conservativo”, modelo Hec Ras..	- 88 -
Ecuación 10. Ecuación de balance de masas para compuestos conservativos .....	- 90 -
Ecuación 11. Diferencias entre las ecuaciones de balance de masa para compuestos conservativos y no conservativos .....	- 95 -
Ecuación 12. Volumen de agua transportado por el río .....	- 99 -
Ecuación 13. Cálculo de $K_r$ , constante de velocidad de reacción .....	- 100 -
Ecuación 14. Verificación del valor de $K$ para el Hierro .....	- 101 -
Ecuación 15. Verificación del valor de $K$ para el Manganeseo .....	- 101 -
Ecuación 16. Verificación del valor de $K$ para el Antimonio .....	- 101 -
Ecuación 17. Verificación del valor de $K$ para el Aluminio .....	- 101 -

## Índice de anexos

Anexo 1. Esquema de la planta de tratamiento de agua en Achachicala.....	- 1 -
Anexo 2. Distribución de áreas mineras y los recursos hídricos en el país hasta el 2014.....	- 3 -
Anexo 3. Número de áreas mineras con fuentes de agua superficiales.....	- 3 -
Anexo 4. Humedales en áreas mineras hasta el 2013.....	- 4 -
Anexo 5. Mapa de la cuenca del río La Paz .....	- 5 -
Anexo 6. Mapa de calidad de los cuerpos de agua en la cuenca del río La Paz.....	- 6 -
Anexo 7. Metales pesados presentes en drenaje ácido de minas de socavones Mina Milluni-	- 7 -
Anexo 8. Parámetros promedio fuera de los límites establecidos por normativa del agua cruda que ingresa a la planta de Achachicala.....	- 7 -
Anexo 9. Parámetros de agua tratada en la planta de Achachicala que superan la NB512....	- 7 -
Anexo 10. Derechos mineros sobrepuestos o en las zonas de recarga de las presas Incachaca y Hampaturi (2014) .....	- 8 -
Anexo 11. Derechos mineros sobrepuestos o en las zonas de recarga de las presas Milluni y Janqo Khota (2014) .....	- 8 -
Anexo 12. Proyectos de captación de agua para la ciudad de La Paz y su sobreposición con derechos mineros al 2014 .....	- 9 -
Anexo 13. Procesamiento del mineral.....	- 10 -
Anexo 14. Datos económicos sobre la minería en Bolivia.....	- 10 -
Anexo 15. Cantidad de agua utilizada en la minería en Bolivia .....	- 11 -
Anexo 16. Contaminación del agua por la minería en Bolivia.....	- 11 -
Anexo 17. Parámetros de control de la NB-512.....	- 13 -
Anexo 18. Número de vueltas y apertura de válvulas .....	- 27 -
Anexo 19. Coeficiente de rugosidad en función de varios parámetros .....	- 29 -
Anexo 20. Valores para el coeficiente de rugosidad por el método de Cowan.....	- 30 -
Anexo 21. Coeficiente de Rugosidad para cauces naturales .....	- 31 -

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCION

### 1.1 ANTECEDENTES

La ciudad de La Paz ha sufrido recientemente una crisis del agua en el año 2016, debido a diferentes factores como el incremento de su población, el mal estado de sus tuberías que permiten excesivas pérdidas de agua, la falta de acciones para el incremento de dotación de agua, etc. Esta sequía del año 2016 ha establecido como medida de solución la construcción de 3 presas (Pampalarama, Chacaltaya y Alpaquita) en la cabecera del río Choqueyapu (río Khaluyo) esto incrementará la dotación de agua en más de 7 hectómetros cúbicos (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social, EDTP presas Pampalarama, Chacaltaya y Alpaquita, 2019).

Lamentablemente el sector tiene pasivos ambientales dejados por la actividad minera principalmente en la cuenca del río que abastece a la presa Chacaltaya (esta actividad actualmente se encuentra abandonada).

Los pasivos ambientales son transportados a través de un sistema de recolección por tubería de 8" de PVC, con obras de toma para cada pasivo ambiental identificado. Esta tubería descarga sus aguas ácidas a uno 50 m de la salida de la presa. Estas aguas se mezclan con el caudal del río Khaluyo y las aguas provenientes de las presas Pampalarama y Alpaquita; finalmente el caudal total llega al río Choqueyapu de la ciudad de La Paz. EPSAS pretende realizar la toma aguas abajo de la confluencia de las tres presas, por lo que el agua que se capte tendrá un grado de contaminación debido a estos pasivos ambientales. No se pretende realizar una planta de tratamiento específica para estas aguas ácidas y se tiene planificado tratar estas aguas en la planta de Achachicala.

También se debe considera que actualmente la actividad minera en el sector está paralizada momentáneamente debido al bajo precio de los minerales, sin embargo esta actividad es intermitente en época de precios bajos, pero se activa y es muy intensa en épocas donde se tiene un buen precio de los minerales.



Por este motivo se ha realizado un análisis de sensibilidad con respecto a la variación del caudal producto de la operación de las tres presas y sus efectos en las concentraciones de Fe, Mn, Al y Sb.

En el proceso de recopilación de información se ha podido advertir que no se ha escrito textos específicos sobre el tema de esta investigación, sin embargo, se tiene trabajos como el “Proyecto Integral de aprovechamiento de las agua de la cuencas de los ríos Choqueyapu y Chacaltaya, para el sistema de abastecimiento de agua potable para la ciudad de La Paz”, elaborado por el Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social en el año 2018, este documento es el estudio que sirvió como base para la construcción de las tres presas objeto de este estudio; con respecto a la contaminación por actividad minera cerca al sector de estudio, se tiene el texto “Propuesta de tratamiento de las aguas ácidas de la mina Milluni mediante drenes anóxicos calizos” (Zamora Echenique, Zamora Mercado, & Gorritty P., 2015) que propone una solución al tratamiento de las aguas ácidas por un dren anóxico calizo, como una alternativa al tratamiento actual por precipitación con cal; por otro lado, (Ríos Paz & Gonzáles Leytón, 1986) han analizado las consecuencias para la salud y el desgaste económico que se hace en el tratamiento del agua de la cuenca Milluni en su trabajo denominado “Contaminación de la cuenca Milluni”; también la Contraloría General del Estado en el año 2013 emitió el informe de auditoría ambiental respecto a la contaminación en la cuenca del río La Paz. (Aguilar, 2009) “Alternativas técnico económicas del embalse Khaluyo para la planta potabilizadora de Achachicala”, es uno de los primeros documentos que propone la construcción de una presa en la parte superior de la cuenca del río Choqueyapu para la reducción de la contaminación aplicando regulación de caudales; (Lavadenz Carpio, 2007) “Análisis de sensibilidad y de escenarios de calidad del río Choqueyapu” realiza la calibración de modelos matemáticos para ríos y también presenta una metodología para la evaluación de escenarios de calidad de agua en el río Choqueyapu. (Rivera & Bellot, 1995) presentan una modelación con el software “QUAL2E”, este trabajo se constituye en una guía para la realización de modelaciones en ríos, al igual que el trabajo de (Paz & Rivera, 1991) “Contaminación de aguas superficiales, contaminación del río Choqueyapu” y “Evolución de calidad del río Choqueyapu”, en el que se realiza uno de los primeros estudios de diagnóstico de la contaminación del río Choqueyapu.

El análisis de sensibilidad realizado con diversos escenarios ha demostrado que es posible la reducción en la contaminación de estos contaminantes gracias a la dilución y la capacidad de



autopurificación del río Khaluyo, también ha permitido plantear recomendaciones con respecto a la operación de las presas para mantener concentraciones por debajo de las recomendaciones de la NB-512 para agua potable.

Esta investigación es una herramienta muy útil y práctica que ayudará en la toma de decisiones a las autoridades competentes para controlar las concentraciones de los contaminantes en función de los caudales regulados a través de operaciones específicas en las válvulas de las tres presas.

Este trabajo también ha surgido como respuesta a la siguiente afirmación sobre la investigación de calidad de agua en el río Choqueyapu del año 2007: ***“Se demostró que se considera pertinente considerar entre otras alternativas novedosas de saneamiento, el aumento del caudal base de dilución de la corriente, al paso por la parte alta de la cuenca”*** (Lavadenz Carpio L. , 2007)

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

En la cuenca de aporte de la presa Chacaltaya se ha identificado pasivos ambientales dejados en el lugar por actividad minera con concentración elevadas de hierro, manganeso, aluminio y antimonio, las cuales se unirán a las aguas provenientes de las presas Pampalarama y Alpaquita, posteriormente serán captadas en el río y serán llevadas a la planta de tratamiento de Achachicala (planta que no considera estas concentraciones) para después ser utilizadas en el sistema de abastecimiento de agua potable para la ciudad de La Paz.

Si bien una opción ambiental sería trabajar en el tratamiento de los pasivos ambientales directamente en la fuente de la Cuenca Achachicala (EPSAS no considera esta alternativa), el presente trabajo ha demostrado que es posible la reducción en la concentración de estos metales pesados por dilución gracias a la aplicación de escenarios de operación, entendidos como mecanismos que regulen el caudal de las 3 presas, de manera que se reduzca la concentración y estas aguas sean aptas para el abastecimiento del agua. La herramienta para realizar estas simulaciones ha sido el modelo Hec Ras (Hidrologic Engineering Center - River Analysis System) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers) de distribución libre sin costos adicionales.

## CAPÍTULO II

### OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

#### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la influencia de la variación del caudal en la reducción de la concentración de aluminio, hierro y manganeso en el río Khaluyo proponiendo escenarios de operación en las presas Chacaltaya, Pampalarama y Alpaquita aplicando el modelo matemático Hec Ras

#### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diagnóstico del sistema de presas y recopilación de la información
2. Calibración del modelo hidrodinámico Hec Ras
3. Calibración del modelo de calidad de agua del Hec Ras
4. Análisis de sensibilidad aplicando el modelo Hec Ras
5. Análisis de resultados y recomendaciones de operación para las presas

#### 2.3 METODOLOGÍA

##### 2.3.1 HIPÓTESIS

“La regulación de caudales de operación de las presas Chacaltaya, Pampalarama y Alpaquita reducirá las concentraciones de hierro, manganeso y aluminio en el río Khaluyo de manera que el tratamiento de estas aguas sea mínimo en la Planta de Tratamiento de Achachicala y pueda ingresar dentro de los parámetros de la NB-512”.

##### 2.3.1.1. DEFINICION DE VARIABLES

- **Variables independientes:** Escenarios de operación de las presas Chacaltaya, Pampalarama y Alpaquita
- **Variable dependiente:** Concentraciones de hierro, manganeso y aluminio
- **Variable interviniente:** Modelo matemático Hec Ras

##### 2.3.2 ANÁLISIS METODOLÓGICO

##### 2.3.2.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Investigación aplicada del conocimiento de modelación de calidad de ríos para reducir las concentraciones de los contaminantes en río Khaluyo.

#### **2.3.2.2. CLASIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

De acuerdo con el tiempo, es retrospectiva porque se utilizaron datos históricos de una campaña de muestreos; de acuerdo con la evolución del fenómeno es longitudinal, porque se ha introducido al modelo Hec Ras las concentraciones iniciales en la cabecera de los ríos y se ha analizado su variación a lo largo de todo el sistema hídrico del río Khaluyo; de acuerdo con la comparación de poblaciones es descriptivo, porque se ha descrito y analizado la información calculada; y es comparativo, porque se ha realizado un análisis de correlación entre los valores de muestreos con valores calculados por el modelo matemático Hec Ras; de acuerdo con la interferencia del observador es observacional, porque se ha realizado una observación sistematizada de las variaciones en la calidad del agua del río Khaluyo bajo diferentes escenarios planteados.

#### **2.3.2.3. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN**

Se han utilizados los siguientes métodos de investigación:

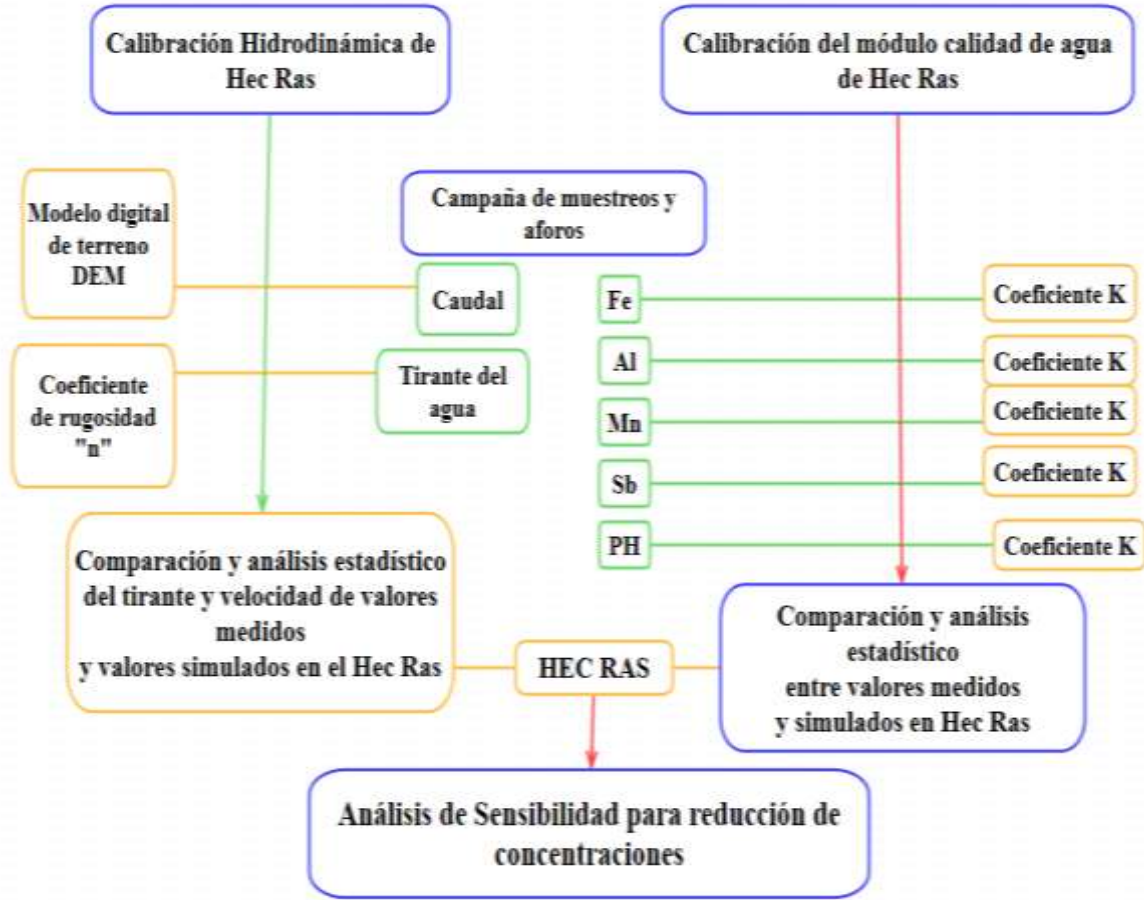
- Método inductivo. - A partir de los resultados de investigaciones, tesis e información recolectada en combinación con la teoría de modelación matemática de ríos en Hec Ras, se ha determinado las conclusiones sobre los efectos de las presas en la calidad del agua en el río Khaluyo
- Método deductivo. – De acuerdo a las leyes de modelación matemática, hidráulica, procesos físicos de depuración de aguas, química del agua, y autopurificación de ríos se han definido los resultados de la calidad de agua en función de los escenarios de operación y funcionamiento de las 3 presas.
- Método analítico. – Se realizó un análisis estadístico de toda información recolectada, para luego utilizar esta información en una herramienta de modelo matemático denominado Hec Ras 5.0.7 con el que se planteó escenarios de posibles operaciones de las presas para determinar su impacto en la calidad del río Khaluyo

#### **2.3.2.4. ESQUEMA METODOLÓGICO**

A continuación, se presenta en esquema la metodología que se utilizó para el presente trabajo:

#### **CALIBRACION DEL MODELO:**

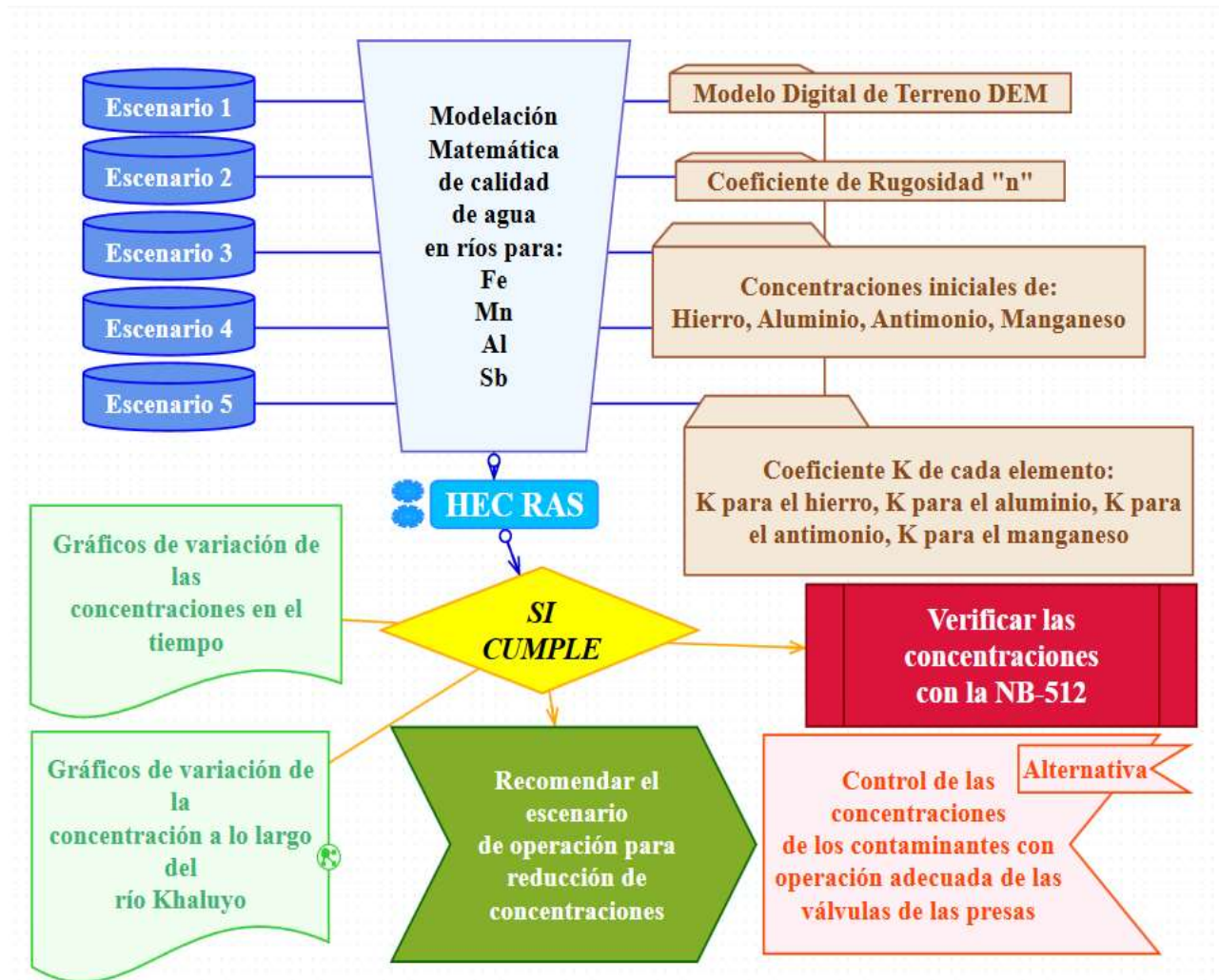
Figura 1. Diagrama de calibración hidrodinámica y de calidad de agua para Hec Ras



Fuente: Elaboración propia

## ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD:

Figura 2. Diagrama de análisis de sensibilidad para cada escenario planteado



Fuente: Elaboración propia



## CAPÍTULO III

### SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA Y CONTAMINACIÓN MINERA EN LA CIUDAD DE LA PAZ

#### 3.1 SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA CIUDAD DE LA PAZ

El sistema de abastecimiento de la ciudad de La Paz este compuesto por 4 sistemas correspondientes a las plantas de tratamiento y tanques de almacenamiento dispuestos en la ciudad, dos de estos sistemas son compartidos con la ciudad de El Alto. Las presas objeto de este estudio abastecerán al sistema de Achachicala, actualmente se realizan tomas intermitentemente directamente del río Choqueyapu con caudales variables dependiendo de la demanda solicitada; las presas Pampalarama, Chacaltaya y Alpaquita, por el momento son descargadas directamente al río Khaluyo y posteriormente captadas directamente en el río Choqueyapu y llevadas a la planta potabilizadora de Achachicala para su tratamiento. La tabla 1 y la figura 1 muestran la distribución de fuentes de agua, capacidad de almacenamiento, zonas beneficiarias y porcentajes de cobertura del sistema de abastecimiento de agua en la ciudad de La Paz.

**Tabla 1. Sistema de abastecimiento de la ciudad de La Paz**

	Sistema de Abastecimiento									
	Achachicala			Chuquiaguillo		Pampahasi			El Alto	
	Nombre de la fuente	Capacidad (m3)	% de aporte al sistema	Nombre de la fuente	Capacidad (m3)	Nombre de la fuente	Capacidad (m3)	% de aporte al sistema	Nombre de la fuente	Capacidad (m3)
Fuentes de agua para cada sistema	Presa Milluni y Presa Jankho Khota	10,845,625.00	81.00%	Presa Incachaca y embalses auxiliares: Sorajahuirea, Estrellani, Quinquillosa y Jacha Tocolo	4,218,077.00	Presa Hampaturi bajo	3,174,257.00	73.00%	Presa Tuni Condoriri	21,548,940.00
	Presa Pampalarama	3,405,952.00	19.00%			Presa Hampaturi alto	6,000,000.00	27.00%	Pozos Tilata	-
	Presa Chacaltaya	2,863,987.00				Presa Ajuan Qhota y embalses auxiliares: Serqe Khota, Qunqa Huiqhara y Miqaya	3,460,457.00		Programa Multipropósito	-
	Presa Alpaquita	1,369,086.00								
Plantas de tratamiento	Planta de Tratamiento Achachicala			Nueva planta de tratamiento en Chuquiaguillo		Planta de tratamiento Pampahasi			Planta El Alto	
Zonas de distribución	centro de La Paz			Ladera este de La Paz		San Antoonio			Talud Oeste de La Paz	
	Ladera Oeste de La Paz					Zona Sur			El Alto	
	El Alto					Mallasa				
Conexiones	29,772.00			53,036.00						
%Doméstico	75.70%			91.50%						
Habitantes	194,974.00			218,756.00						
Cobertura	97.50%			84.50%						

Fuente: (Campanini Gonzales, Agua y minería en Bolivia. ¿ Riesgos lejanos?, 2017)

Figura 3. Esquema del sistema de abastecimiento en la ciudad de La Paz, Bolivia, que muestra la captación de agua en diferentes plantas de EPSAS.



Fuente: (Villa, 2013)

La planta de tratamiento de Achachicala tienen los siguientes componentes y procesos de tratamiento (ver Anexo 1):

- Sensores en línea para control y registro de calidad del agua al ingreso (PH, turbiedad y conductividad)
- Caudalímetro al ingreso (máximo hasta 1000 l/s)
- Sedimentador
- Disipador de energía
- Tolvas de dosificadores de reactivos (Cal hidratada y sulfato de aluminio)
- Agitadores mecánicos
- Floculadores
- Sedimentadores
- Lecho filtrante (12 filtros)
- Cloradores

## 3.2 CONTAMINACIÓN MINERA EN LAS FUENTES DE AGUA

### 3.2.1 CONTAMINACIÓN DE CUERPOS DE AGUA POR ACTIVIDAD MINERA

Los metales pesados son componentes naturales de la corteza terrestre, pero no pueden ser degradados o ser destruidos, en un grado pequeño se incorporan a nuestros cuerpos por medio de los alimentos, en el agua potable, suelo y aire. Son elementos químicos metálicos que tienen una relativa alta densidad y son tóxicos y/o venenosos en concentraciones bajas.

Al contrario de los contaminantes orgánicos, los metales pesados, generalmente, no se eliminan de los ecosistemas acuáticos por procesos naturales debido a que no son biodegradables (Fórstner y Prosi, 1979; Fórstner y Wittmann, 1981; Murray, 1996).

El transporte de metales pesados se modela en suspensión, resuspensión y sedimentación. La advección longitudinal y la dispersión turbulenta son los principales mecanismos de transporte que deben modelarse para las sustancias vertidas a una corriente (Chapra 1997). La tabla 2 muestra la contaminación derivada por las diferentes actividades industriales.

**Tabla 2. Principales actividades industriales generadoras de metales pesados**

Industria	Metales	Contaminación derivada
Minería de metales ferrosos	Cd, Cu, Ni, Cr, Co, Zn	Drenaje ácido de mina, relaves, escombreras
Extracción de minerales	As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	Presencia en las menas como en los subproductos
Fundición	As, Cd, Pb, Tl	Procesado del mineral para obtención de metales
Metalúrgica	Cr, Cu, Mn, Pb, Sb, Zn	Procesado térmico de metales
Aleaciones y aceros	Pb, Mo, Ni, Cu, Cd, As, Te, U, Zn	Fabricación, eliminación y reciclaje de metales. Relaves y escoriales
Gestión de Residuos	Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Hg, Mn	Incineración de residuos o en lixiviados
Corrosión Metálica	Fe, Cr, Pb, Ni, Co, Zn	Inestabilidad de los metales expuestos al medio ambiente
Galvanoplastia	Cr, Ni, Zn, Cu	Los efluentes líquidos de procesos de recubrimiento
Pinturas y pigmentos	Pb, Cr, As, Ti, Ba, Zn	Residuos acuosos procedentes de la fabricación y el deterioro de la pintura vieja.
Baterías	Pb, Sb, Zn, Cd, Ni, Hg	Fluido de la pila de residuos, la contaminación del suelo y las aguas subterráneas.
Electrónica	Pb, Cd, Hg, Pt, Au, Cr, As, Ni, Mn	Residuos metálicos acuosa y sólida desde el proceso de fabricación y reciclaje
Agricultura y Ganadería	Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn, As, Mn, Cu	Contaminación de escorrentía, aguas superficiales y subterráneas, la bioacumulación planta

Fuente: (Caviendes, Muñoz, Perdomo, Rodríguez, & Sandoval, 2015)



### 3.2.2 EFECTOS EN LA SALUD POR CONTAMINACIÓN DE ACTIVIDAD MINERA EN LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

La contaminación por aguas ácidas proveniente de actividad minera tiene consecuencias muy importantes para la salud de la población, en el siguiente cuadro se muestran algunas consecuencias a la salud (ver tabla 3):

**Tabla 3. Síntomas de la intoxicación típicos y los niveles de contaminación máximos**

Metal Pesado	Toxicidad	Dosis letal en dieta humana mg/día	NCM (mg/L)	
			USEPA	Colombia
As	Manifestaciones cutáneas, cánceres viscerales, enfermedad vascular	50 - 340	0,05	0,1 - 0,5
Cd	Daño renal, trastorno renal y efectos carcinógenos	1,5k - 9 k	0,01	0,1
Cr	Dolor de cabeza, diarrea, náuseas, vomito, carcinógeno	3k - 8k	0,05	0,5
Cu	Daños hepáticos, enfermedad de Wilson, insomnio	175 - 250	0,25	1
Ni	Dermatitis, náuseas, asma crónica, tos, carcinógeno humano	--	0,2	0,5
Zn	Depresión, letargo, signos neurológicos y aumento de la sed	6k	0,8	3
Pb	Teratogenicidad cerebral, enfermedades renales, vasculares y neuronales	10k	0,006	0,2 - 0,5
Hg	Artritis reumatoidea y enfermedades renales, vasculares y neuronales	150 - 300	0,00003	0,02

K: Significa miles de miligramos/día.

Fuente: (Caviendes, Muñoz, Perdomo, Rodríguez, & Sandoval, 2015)

A continuación, se presentan las principales características de los contaminantes estudiados en este trabajo:

#### **ALUMINIO (Al)**

El aluminio es el tercer elemento más abundante de la tierra, constituye aproximadamente el 8% de su corteza. Sólo el Silicio y el oxígeno son más abundantes.

Sólo existe en la naturaleza en combinación con otros materiales (silicatos y óxidos) muy estables. Se encuentra normalmente en forma de silicato de aluminio puro o mezclado con otros metales como sodio, potasio, hierro, calcio y magnesio, pero nunca como metal libre

#### **ANTIMONIO (Sb)**

El antimonio abunda en la naturaleza, en forma de trisulfuro (estibina y antimonita) reaccionan con los metales más electronegativos, con el oxígeno y con los halógenos

## **HIERRO (Fe)**

Es un catión muy importante desde el punto de vista de la contaminación, aparece en dos formas: ión ferroso  $Fe^{++}$  e ión férrico  $Fe^{+++}$ . El ión manganeso se comporta en la mayoría de los casos muy parecido al ión hierro. El hierro es más común pero frecuentemente se encuentran juntos. No son peligroso para la salud.

Varios estudios incluyen el efecto de la degradación del denominado metal activo total que representa la suma de las concentraciones de hierro y manganeso, metales presentes en las aguas y que se oxidan en la presencia de oxígeno. Existen en formas particuladas y disueltas dependiendo de las concentraciones de oxígeno disuelto, en aguas oxigenadas la mayor parte se encuentra en forma de macropartículas, mientras que en condiciones anóxicas estos elementos se disuelven formando sulfuros y carbonatos en fase sólida (Zouiten, 2012).

El hierro y manganeso pueden darle al agua un sabor, olor y color indeseable. El hierro causa manchas rojizas-cafés en la ropa, porcelana, platos, utensilios, vasos, lavaplatos, accesorios de plomería y concreto.

## **MANGANESO (Mn)**

El manganeso causa manchas cafés negras en los mismos materiales. Los detergentes no remueven estas manchas. El cloro casero y los productos alcalinos (sodio y bicarbonato) pueden intensificar las manchas.

El agua contaminada con hierro y manganeso usualmente contiene bacterias de hierro y manganeso. Estas bacterias se alimentan de los minerales que hay en el agua. No causan problemas de salud, pero si forman una baba rojiza-café (hierro) o café-negra (manganeso) en los tanques de los inodoros y pueden tapar los sistemas de agua.

## CAPÍTULO IV

### FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO DEL NUEVO SISTEMA DE PRESAS EN EL RÍO KHALUYO

#### 3.1 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE LAS TRES PRESAS

Las tres presas Pampalarama, Chacaltaya y Alpaquita tienen la particularidad de funcionar como reguladoras de caudal, las válvulas descargan sus aguas al mismo río aguas abajo de la presa. Inicialmente las aguas provenientes de la presa Pampalarama se unen con las aguas de la presa Alpaquita y después con las de la presa Chacaltaya en el sector denominado como puente Khaluyo, el caudal final de las tres presas recorre todo el río Khaluyo hasta convertirse en el río Choqueyapu y a la altura de la Planta de tratamiento de Achachicala se tiene una obra de toma de la cual se extrae el agua periódicamente como muestra la Figura 2.

Figura 4. Sistema de presas del río Khaluyo



Fuente: Elaboración propia

#### 3.2 DIAGNÓSTICO Y OPERACIÓN DE LA PRESA PAMPALARAMA

##### 3.2.1 DIAGNÓSTICO DE LA PRESA PAMPALARAMA

###### 3.2.1.1. SITUACIÓN ACTUAL DE LA PRESA

La presa Pampalarama actualmente está en operación, cuenta con galerías al interior de la presa y también cuenta con instrumentos de medición de última tecnología que permite monitorear la cantidad de agua que se infiltra en la estructura, la presión del agua en la estructura, el nivel del

agua en el embalse y si existe algún movimiento de las juntas entre bloques de hormigón vaciados. La tabla 4 y figura 5 muestra los datos generales de la presa Pampalarama y la figura 6, 7 y 8 muestra el interior de la galería de inspección dentro de la presa.

**Figura 5. Presa Pampalarama concluida**



Fuente: elaboración propia

**Tabla 4. Datos generales Presa Pampalarama**

<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>PRESA</b>	<b>VOLUMEN m3</b>	<b>ALTURA m</b>	<b>LONGITUD m</b>
<b>PAMPALARAMA</b>	3,405,952	23	452

Fuente: Elaboración propia

**Figura 6. Galería al interior de la presa Pampalarama**



Fuente: Elaboración propia

La figura 7 muestra las instalaciones eléctricas de instrumentos al interior de la presa Pampalarama.

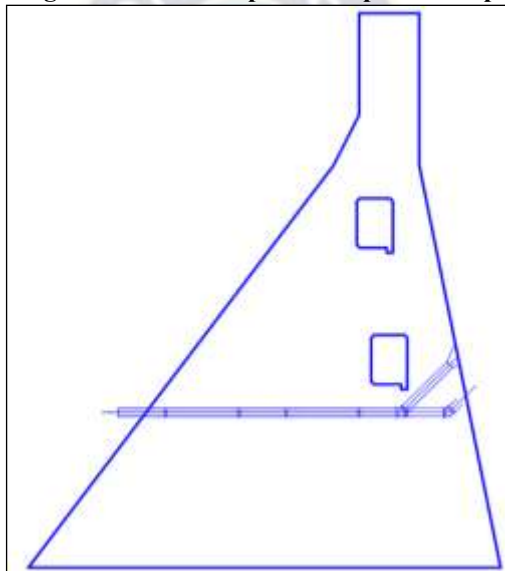
**Figura 7. Instalación de equipos al interior de la galería en la presa Pampalarama**



Fuente: Elaboración propia

La figura 8 presenta un esquema de la sección típica transversal de la presa Pampalarama, en el que se puede observar la disposición transversal de las galerías de inspección.

**Figura 8. Sección Típica de la presa Pampalarama**



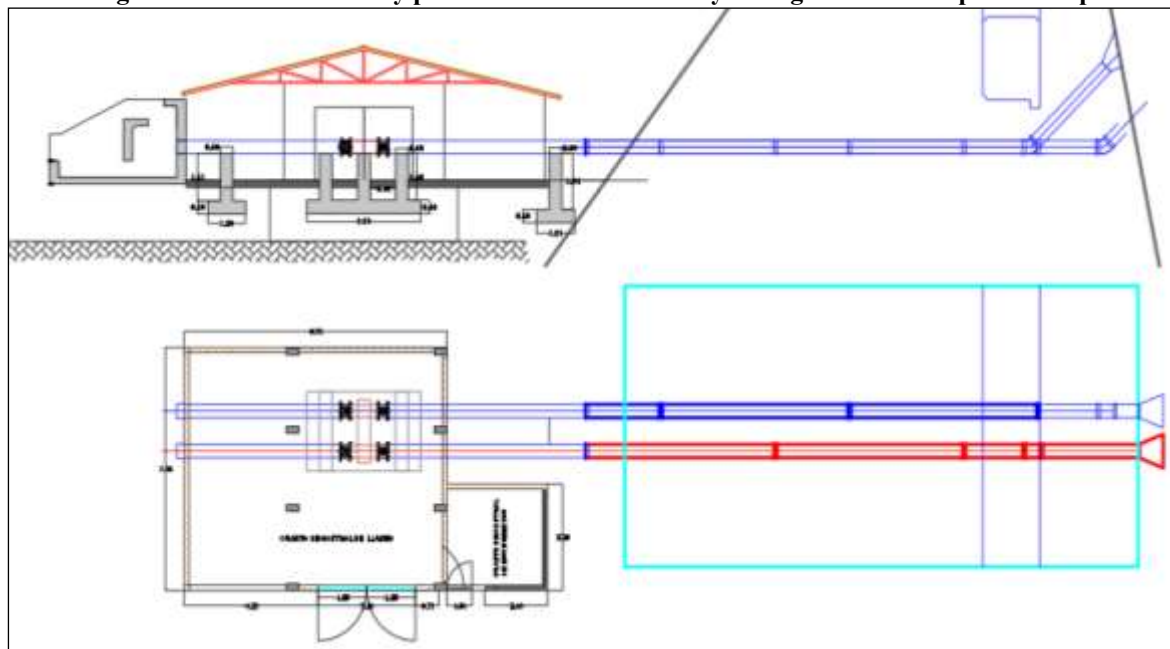
Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social , 2019)

En la figura 7 se presenta la disposición de las tuberías a la salida de la presa Pampalarama, consta de dos tuberías de acero de 400 mm de diámetro, una para la toma de agua y la otra para la descarga de fondo y evacuación de sedimentos, sin embargo, por el momento, las dos tuberías tienen salida al mismo río a través de un dissipador de impacto y piscinas de disipación de energía hasta llegar al nivel natural del río.

La figura 9 muestra la disposición de las tuberías de toma y de fondo que son utilizadas por separada o de manera conjunta, tanto para la toma de agua y también para un posible desague. Tambien e muestra un detalle de la cámara de válvulas.



**Figura 9. Detalle de Perfil y planta de la obra de toma y desfog de azolves presa Pampalarama**



Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social , 2019)

### 3.2.1.2. CALIDAD DE AGUA EN LA PRESA

Se ha realizado un análisis de la calidad de agua en la etapa de la elaboración del estudio, a continuación, en la Tabla 5, se presentan los resultados de dicho análisis:

**Tabla 5. Análisis de calidad de agua en la presa Pampalarama**

Nº	fecha	Descripción	Resultado	Unidades	NB-512	Obs.
1	8/8/2017	Bacterias Coliformes Totales	5.5x10 <sup>-3</sup>	U.F.C./100 ml	<1	Cumple
2	8/8/2017	Escherichia Coli	<1	U.F.C./100 ml	<1	Cumple
3	8/8/2017	Color verdadero	7	UCV	15	Cumple
4	8/8/2017	Turbiedad	2	UNT	5	
5	8/8/2017	Sólidos Disueltos	28	mg/l	1000	
6	8/8/2017	PH	7.16	-	6.5-9.0	Cumple
7	8/8/2017	Conductividad eléctrica	41.000	μS/cm	1500	Cumple
8	8/8/2017	Dureza total	14.000	mgCaCO <sub>3</sub> /l	500	Cumple
9	8/8/2017	Calcio	4.010	mgCa <sup>2+</sup> /l	200	Cumple
10	8/8/2017	Magnesio	0.970	mg Mg <sup>2+</sup> /l	150	Cumple
11	8/8/2017	Alcalinidad Total	10.000	mgCaCO <sub>3</sub> /l	370	Cumple
12	8/8/2017	De Bicarbonato	10.000	mgCaCO <sub>3</sub> /l		Cumple
13	8/8/2017	De carbonato	0.000	mgCaCO <sub>3</sub> /l		
14	8/8/2017	De hidróxido	0.000	mgCaCO <sub>3</sub> /l		
15	8/8/2017	Hierro Total	<0.05	mg Fe/l	0.3	Cumple
16	8/8/2017	Manganeso Total	<0.05	mg Mn/l	0.1	Cumple

17	8/8/2017	Sodio	3.200	mg Na/l	200	Cumple
18	8/8/2017	Sulfato	4.360	mg SO4 /l	400	Cumple
19	8/8/2017	Cloruro	<0.25	mg Cl-/l	250	Cumple

Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social , 2019)

De acuerdo al análisis de calidad presentado se puede observar que se cumplen con los parámetros de calidad, esto seguramente se debe a que el agua proviene directamente de los nevados.

### 3.2.1.3. CURVA VOLUMEN vs ALTURA

La curva altura versus volumen del embalse ha permitido determinar la variación del caudal de descarga de la presa en función a la altura de agua en el embalse y el tiempo de vaciado de la presa con determinadas aperturas de las válvulas.

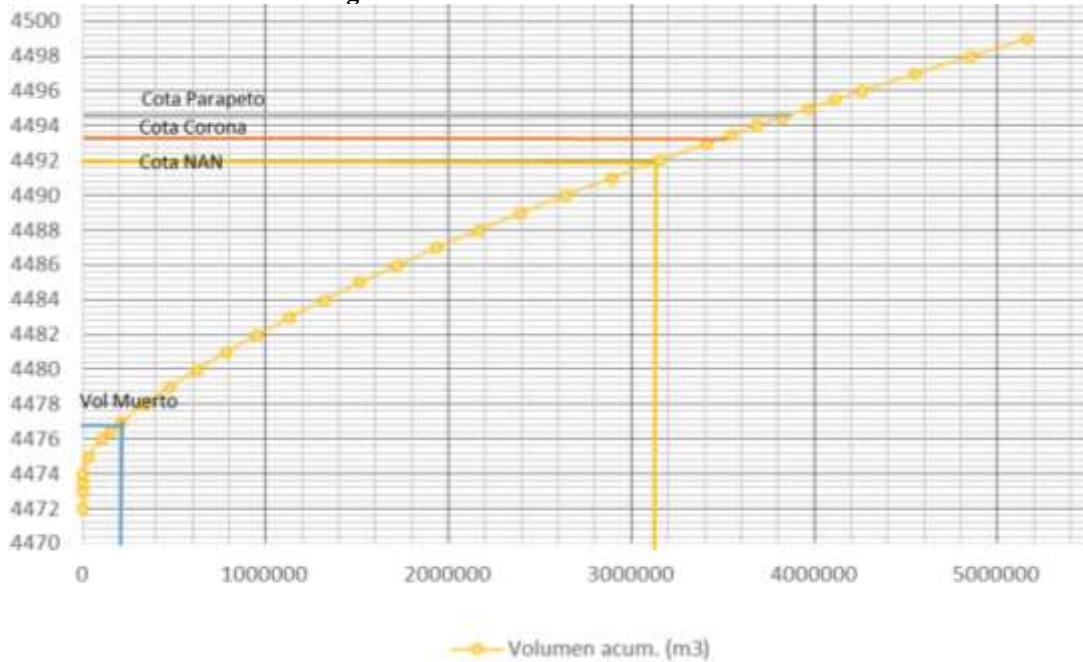
La Tabla 6 y el Grafico 10 muestran las variaciones de caudal en función de las alturas correspondientes.

**Tabla 6. Altura vs Volumen, presa Pampalarama**

Elevación (msnm)	Altura (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen entre curvas (m <sup>3</sup> )	Volumen acum. (m <sup>3</sup> )	Volumen acum. ( hm <sup>3</sup> )	Área acum. (m <sup>2</sup> )	Área (ha)	OBSERVACIONES
4472	0	4.80	0	0	0.0000	4.8	0.00	
4473	1	225.34	88	87.7	0.0001	230.1	0.02	
4473.5	1.5	1,693.79	423	510.5	0.0005	1923.9	0.17	
4474	2	3,162.24	1195	1705.6	0.0017	5086.2	0.32	
4475	3	62,691.27	283679	285384.3	0.2854	67777.4	6.27	Volumen incluye la laguna
4476	4	93,947.51	77794	363178.6	0.3632	161725.0	9.39	
4476.5	4.5	104,490.42	49586	412764.7	0.4128	266215.4	10.45	
4477	5	115,033.33	54860	467624.6	0.4676	381248.7	11.50	0.468 E. Muerto
4478	6	132,834.32	123827	591451.7	0.5915	514083.0	13.28	
4479	7	145,919.56	139326	730777.4	0.7308	660002.6	14.59	
4480	8	156,333.30	151097	881874.0	0.8819	816335.9	15.63	
4481	9	165,297.73	160795	1042668.7	1.0427	981633.6	16.53	
4482	10	174,042.54	169651	1212320.0	1.2123	1155676.2	17.40	
4483	11	182,691.39	178349	1390669.5	1.3907	1338367.5	18.27	
4484	12	191,386.87	187022	1577691.8	1.5777	1529754.4	19.14	
4485	13	199,505.50	195432	1773123.9	1.7731	1729259.9	19.95	
4486	14	212,058.91	205750	1978874.2	1.9789	1941318.8	21.21	
4487	15	219,485.51	215762	2194635.8	2.1946	2160804.3	21.95	
4488	16	229,047.39	224249	2418885.2	2.4189	2389851.7	22.90	
4489	17	237,180.54	233102	2651987.4	2.6520	2627032.3	23.72	
4490	18	250,469.86	243795	2895782.4	2.8958	2877502.1	25.05	
4491	19	255,523.36	252992	3148774.8	3.1488	3133025.5	25.55	
4492	20	262,027.35	258769	3407543.3	3.4075	3395052.8	26.20	3.408 NAN
4493	21	268,064.02	265040	3672583.3	3.6726	3663116.9	26.81	
4493.5	21.5	271,975.88	135009	3807592.1	3.8076	3935092.7	27.20	3.808 CORONA
4494	22	275,887.74	136965	3944556.8	3.9446	4210980.5	27.59	
4494.5	22.5	285,125.30	140247	4084803.7	4.0848	4496105.8	28.51	4.085 PARAPETO
4495	23	284,362.85	142372	4227175.7	4.2272	4780468.6	28.44	
4495.5	23.5	287,641.54	143000	4370176.0	4.3702	5068110.2	28.76	
4496	24	290,920.22	144640	4514815.7	4.5148	5359030.4	29.09	
4497	25	297,693.02	294300	4809115.8	4.8091	5656723.4	29.77	
4498	26	304,881.70	301280	5110396.1	5.1104	5961605.1	30.49	
4499	27	312,846.89	308856	5419251.8	5.4193	6274452.0	31.28	

Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social , 2019)

**Figura 10. Curva Volumen del embalse vs Altura**



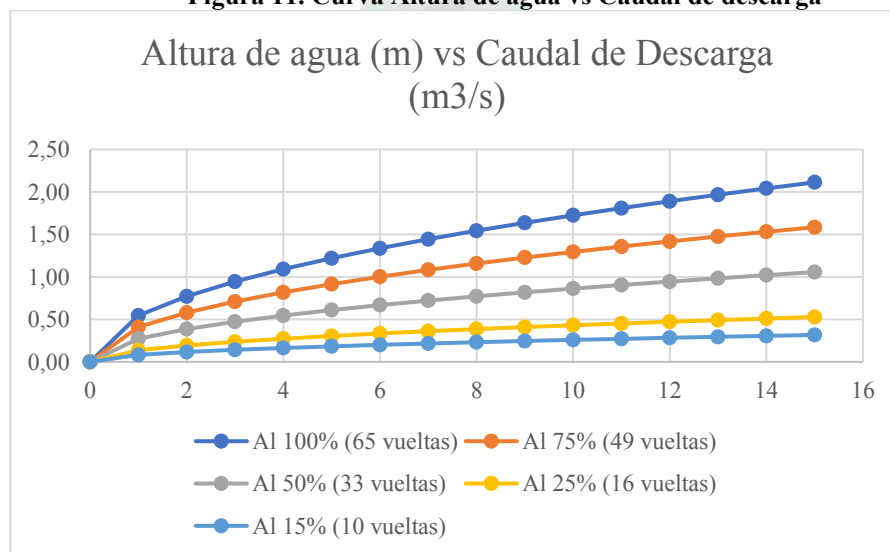
Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social , 2019)

### 3.2.2 OPERACIÓN DE LA PRESA PAMPALARAMA

#### 3.2.2.1. CURVA DE DESCARGA ALTURA vs CAUDAL

Se ha realizado un análisis de la descarga de la presa en función de altura de agua en el embalse, con diferentes porcentajes de apretura de válvulas en función del número de vueltas, 100%, 75%, 50%, 25% y 15% de apertura de válvula (ver figura 11).

**Figura 11. Curva Altura de agua vs Caudal de descarga**



Fuente: Elaboración propia



Considerando que EPSAS de acuerdo a lo solicitado al FPS, a previsto utilizar un caudal de 500 l/s como incremento al abastecimiento de agua en la ciudad de La Paz, se puede concluir lo siguiente:

- A presa llena, con 15 mca (metros de columna de agua) se necesitaria aperturar al 25% la Valvula Reguladora o 16 vueltas completas para obtener un caudal de salida de 528 litros por segundo.
- A presa con solo 1 mca de volumen se necesita el 100% de la apertura de valvulas o 65 vueltas completas para brindar un caudal de 545 litros por segundo.
- La valvula Mariposa debe estar siempre abierta al 100% (a 35 vueltas) antes de la apertura de la Valvula Reguladora de Caudal y Viceversa para el cierre.

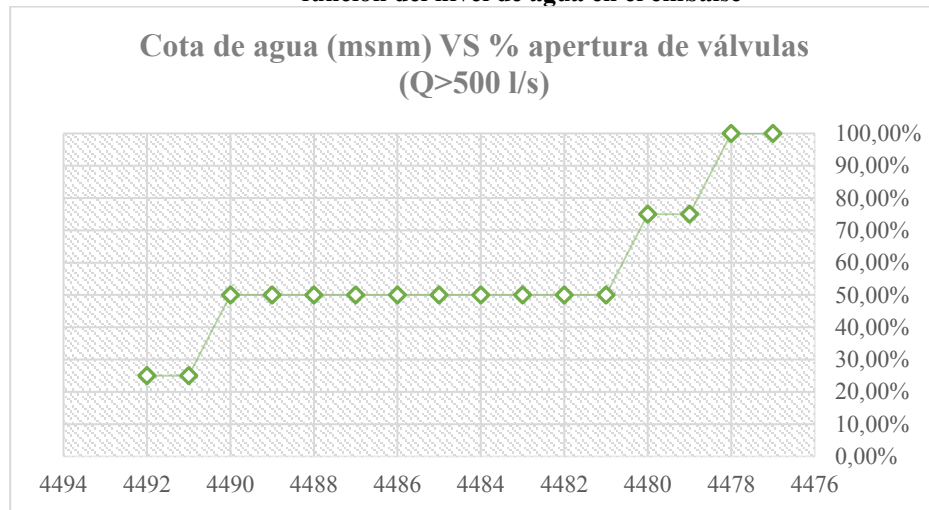
A continuación se muestra en la tabla 7 y figura 12 el porcentaje de apertura que se debe aplicar para conseguir un caudal mínimo requerido de 500 l/s.

**Tabla 7. Cota de agua en el embalse y porcentaje de apertura de las válvulas necesarias para mantener un caudal de descarga mínimo de 500 l/s**

Cota y altura de agua en la presa		Caudal de salida de la presa (m <sup>3</sup> /s), en función del % de apertura de la valvula y número de vueltas, para Cd=0.98				
Cota (m.s.n.m.)	Altura de agua (m)	Al 100% (65 vueltas)	Al 75% (49 vueltas)	Al 50% (33 vueltas)	Al 25% (16 vueltas)	Al 15% (10 vueltas)
4492	15	2.11	1.58	1.06	0.53	0.32
4491	14	2.04	1.53	1.02	0.51	0.31
4490	13	1.97	1.48	0.98	0.49	0.30
4489	12	1.89	1.42	0.94	0.47	0.28
4488	11	1.81	1.36	0.90	0.45	0.27
4487	10	1.72	1.29	0.86	0.43	0.26
4486	9	1.64	1.23	0.82	0.41	0.25
4485	8	1.54	1.16	0.77	0.39	0.23
4484	7	1.44	1.08	0.72	0.36	0.22
4483	6	1.34	1.00	0.67	0.33	0.20
4482	5	1.22	0.91	0.61	0.30	0.18
4481	4	1.09	0.82	0.55	0.27	0.16
4480	3	0.94	0.71	0.47	0.24	0.14
4479	2	0.77	0.58	0.39	0.19	0.12
4478	1	0.55	0.41	0.27	0.14	0.08
4477	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Area de apertura de la válvula (M2) (tubería de 400 mm)</b>		<b>0.1257</b>	<b>0.0942</b>	<b>0.0628</b>	<b>0.0314</b>	<b>0.0188</b>

Fuente: Elaboración propia

**Figura 12. Porcentaje de apertura de válvulas para mantener un caudal de salida de 500 l/s, en función del nivel de agua en el embalse**

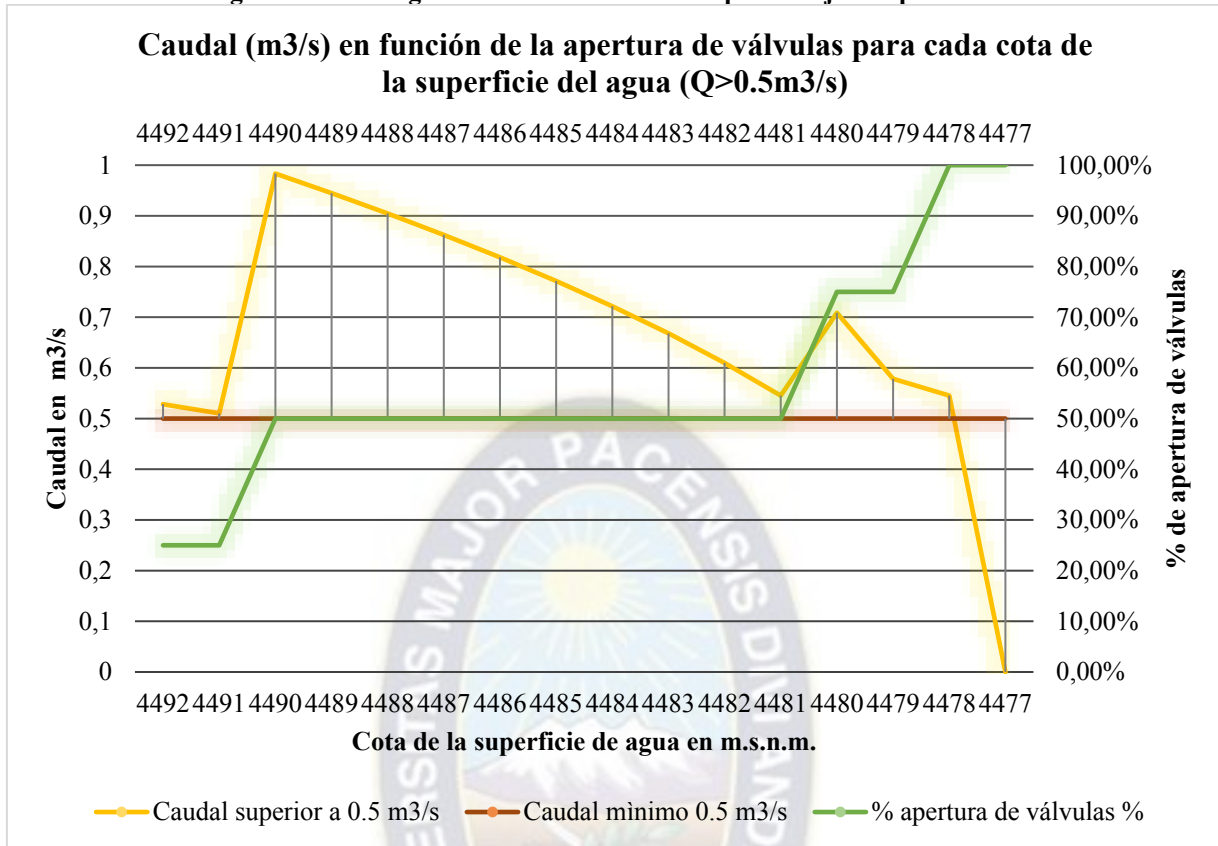


Fuente: Elaboración propia

La tabla 7 y figura 12, se muestra la secuencia de apertura de válvulas que debería seguirse para mantener un caudal de descarga mínimo de 500 l/s; inicialmente se comienza con 25% de apertura suficiente para descarga 510 l/s, lo que ocasiona una disminución del nivel del agua del embalse hasta llegar a la cota 4490 m.s.n.m., con lo que se debería aumentar la apertura de la válvula al 50%, esto mantiene un caudal de descarga superior a 500 l/s hasta llegar a la cota 4480 m.s.n.m., momento en el cual se debería abrir la válvula al 75% hasta el nivel de 4479 m.s.n.m., por debajo de este nivel las válvulas deberían abrirse al 100% para descargar mínimamente 500 l/s. Este procedimiento se puede utilizar para el caso del vaciado total de la presa.

La figura 13 muestra la descarga de caudal en las presas en función de la apertura de válvulas y su comparación con el caudal mínimo requerido de 500 l/s.

Figura 13. Descarga de caudal en función del porcentaje de apertura de válvulas



Fuente: Elaboración propia

En resumen de acuerdo al nivel del agua en el embalse se deberá modificar el porcentaje de apertura de las válvulas para mantener un caudal mínimo de 500 l/s, de la siguiente manera:

- Hasta el nivel 4491 m.s.n.m, se puede mantener las válvulas al 25% de apertura (16 vueltas)
- Si el nivel del agua esta entre 4490 a 4481 m.s.n.m., se debería mantener por lo menos una apertura de 50% en las válvulas (33 vueltas)
- Si el nivel del agua está entre 4480 a 4479 m.s.n.m. mantener una apertura de válvulas de 75% (49 vueltas)
- Si el nivel baja de 4479 m.s.n.m. se deberá mantener una apertura de 100% (65 vueltas)

### 3.2.2.2. TIEMPO DE VACIADO DE LA PRESA vs CAUDAL DE SALIDA

Se ha realizado un análisis del tiempo de vaciado de la presa en función del porcentaje de apertura de sus válvulas. Se ha utilizado la siguiente fórmula hidráulica:

**Ecuación 1. Tiempo de descarga desde el nivel y1 al nivel y2**

$$t = \frac{2 \cdot A_r}{C_d \cdot A_o \cdot \sqrt{2g}} (y_1^{1/2} - y_2^{1/2})$$

(Ven Te Chow, 1994)

Donde:

t: tiempo que se requiere para descargar de una profundidad y1 una profundidad y2

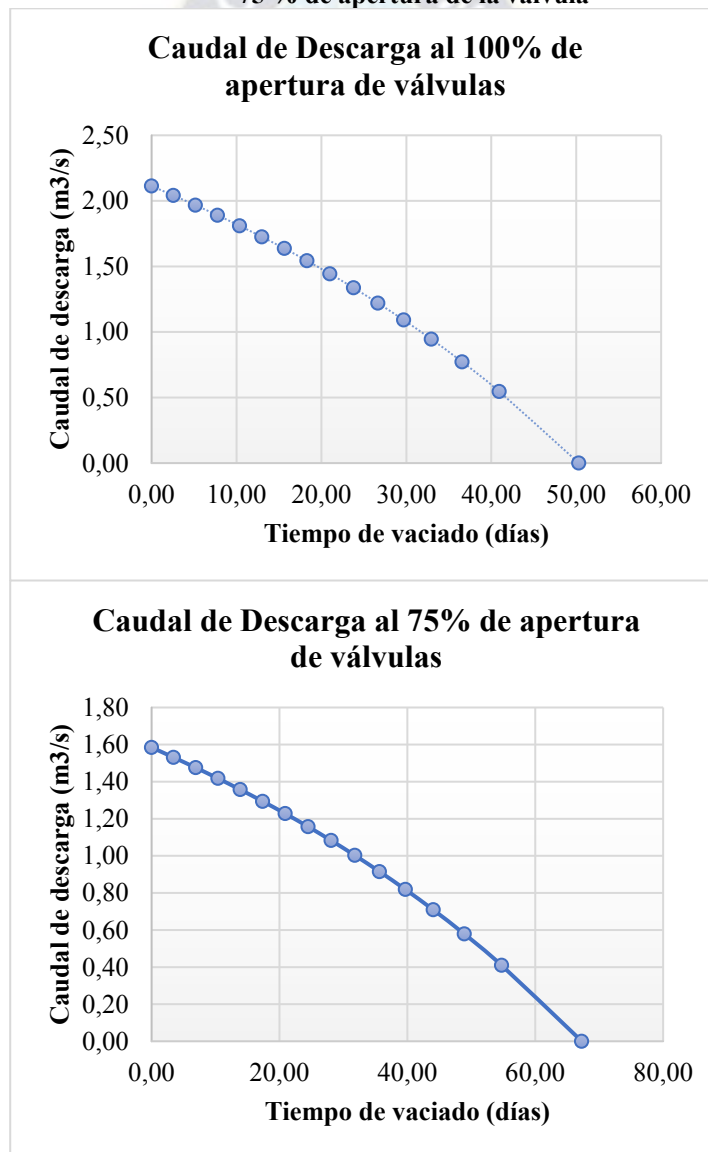
At: Área transversal de las curvas de nivel (promedio entre 2 curvas de nivel)

Ao: área de la tubería (diámetro 400 mm de tubería)

Cd: Coeficiente de descarga (0.55 de acuerdo a las válvulas)

y1, y2: Niveles del agua en el embalse

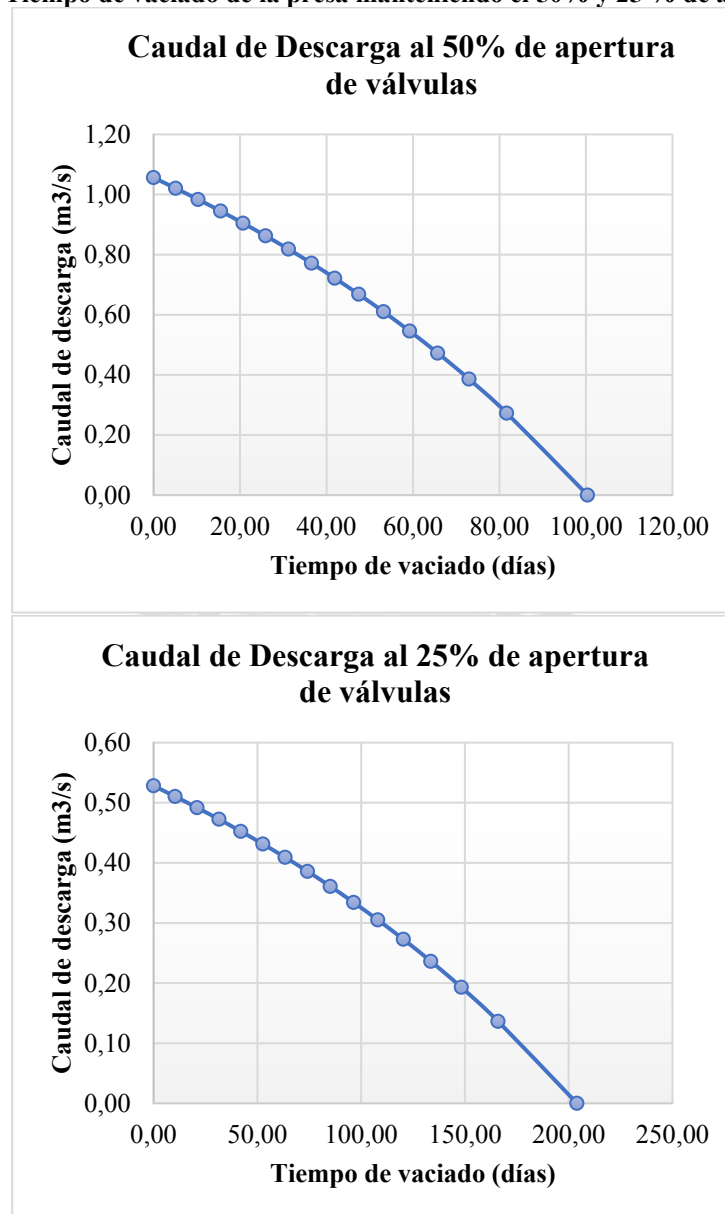
**Figura 14. Tiempo de vaciado de la presa manteniendo un caudal mínimo de 500 l/s, con 100% y 75 % de apertura de la válvula**



Fuente: Elaboración propia

El grafico 7 muestra que si se mantiene abiertas las válvulas al 100%, la presa se vaciaría en 50 días y si mantiene las válvulas abiertas al 75%, la presas se vaciaría completamente en 67 días. En los dos casos se podría mantener el cuadal mínimo de 500 l/s requerido por EPSAS.

**Figura 15. Tiempo de vaciado de la presa manteniendo el 50% y 25 % de apertura de la válvula**

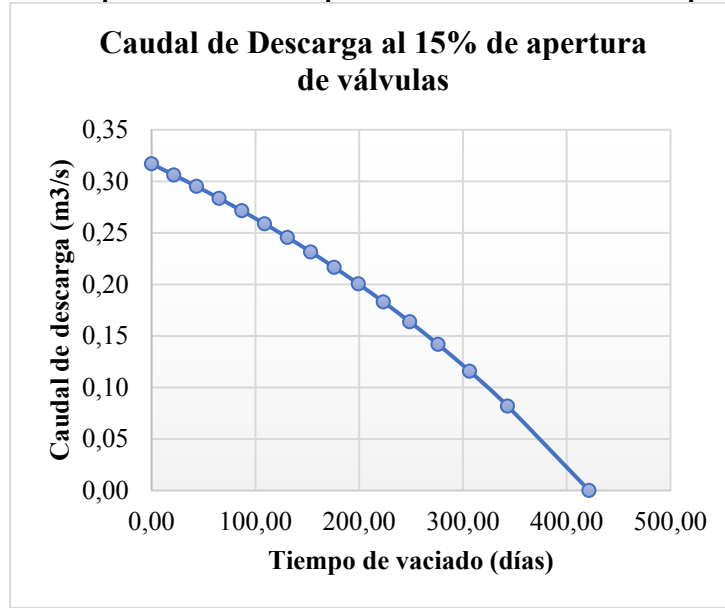


Fuente: Elaboración propia

Se puede ver en la figura 15 que si se mantiene las válvulas abiertas al 50 %, la presa se vaciaría en 100 días (3 meses) y los caudales mantendría un caudal mínimo requerido de 500 l/s, hasta los 70 días, después de los cuales se descargaría menos del caudal requerido.

Para el caso de una apertura del 25% la presa se vaciaría en 204 días (casi 7 meses) pero solamente se mantendría la descarga mínima de 500 l/s hasta los 20 días.

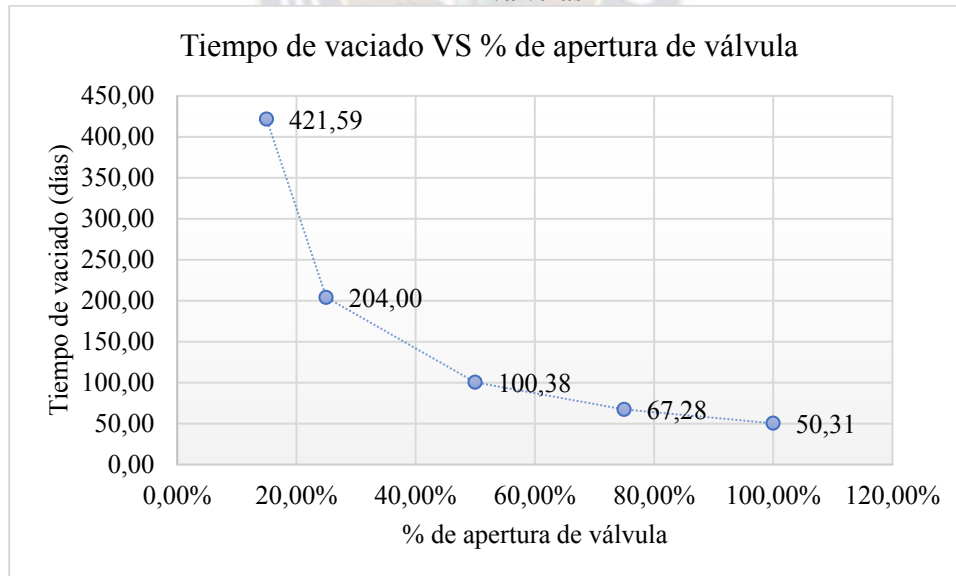
**Figura 16. Tiempo de vaciado de la presa manteniendo el 15 % de apertura de la válvula**



Fuente: Elaboración propia

Para el caso de una apertura de 15% de la válvula, la presa se vaciaría en 421 días (14 meses), pero no se podría mantener la descargar del caudal mínimo requerido.

**Figura 17. Resumen del tiempo de vaciado de la presa en función del porcentaje de apertura de válvulas**



Fuente: Elaboración propia

### 3.3 DIAGNÓSTICO Y OPERACIÓN DE LA PRESA CHACALTAYA

#### 3.3.1 DIAGNÓSTICO DE LA PRESA CHACALTAYA

##### 3.3.1.1. SITUACIÓN ACTUAL DE LA PRESA

Actualmente la presa Chacaltaya se encuentra en funcionamiento, cuenta con cámaras de inspección aguas abajo para verificar si se presenta o no la tubificación en función de la concentración de sedimentos en las tuberías de los drenes basales.

**Figura 18. Presa Chacaltaya**



Fuente: elaboración propia

La tabla 8 presenta los datos generales más importantes de la presa Chacaltaya: capacidad total de almacenamiento aproximadamente 2.8 hectómetros cúbicos, altura total de la presa de 34 m desde la fundación hasta la corona y finalmente la longitud total del coronamiento es de 337 metros lineales medidos con respecto al eje principal de la presa.

**Tabla 8. Datos generales Presa Chacaltaya**

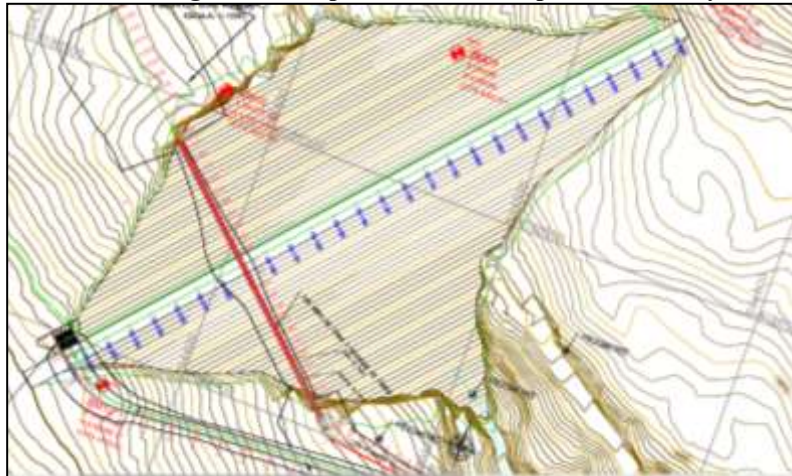
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>PRESA</b>	<b>VOLUMEN m<sup>3</sup></b>	<b>ALTURA m</b>	<b>LONGITUD m</b>
<b>CHACALTAYA</b>	2,863,987	34	337

Fuente: elaboración propia

A continuación, la figura 19 muestra el emplazamiento de la presa en el que se puede ver el eje de la presa, el talud de la presa de tierra y su intersección con el terreno natural.



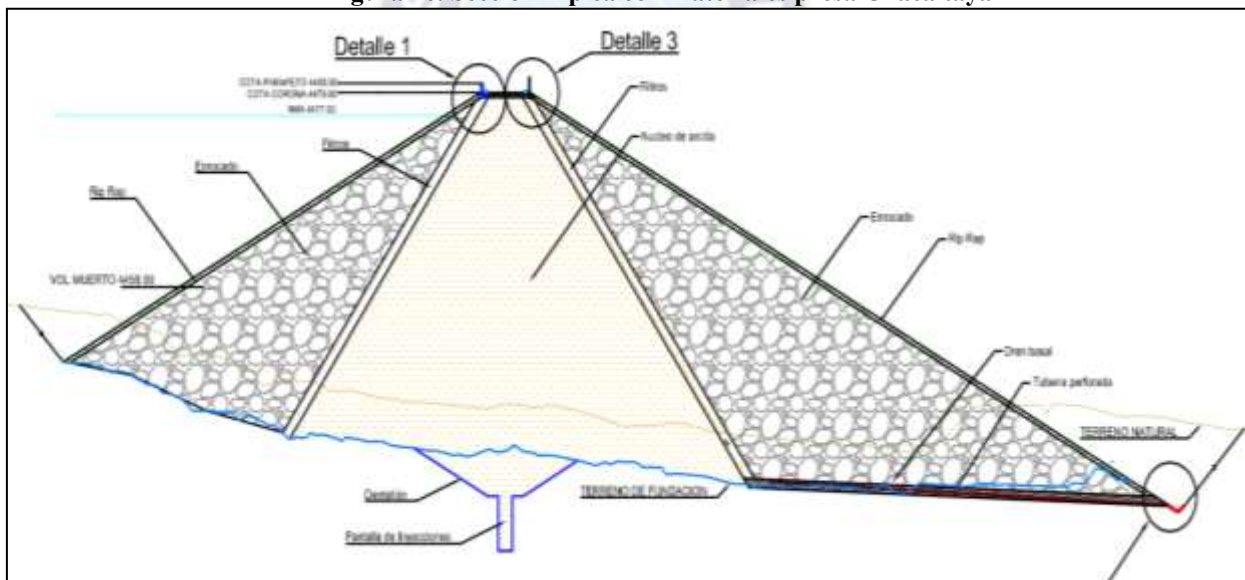
**Figura 19. Emplazamiento de la presa Chacaltaya**



Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social , 2019)

La figura 20 muestra la sección típica de la presa Chacaltaya en el cual se detalla los diferentes materiales que componen la presa: enrocado con núcleo de arcilla.

**Figura 20. Sección Típica con materiales presa Chacaltaya**

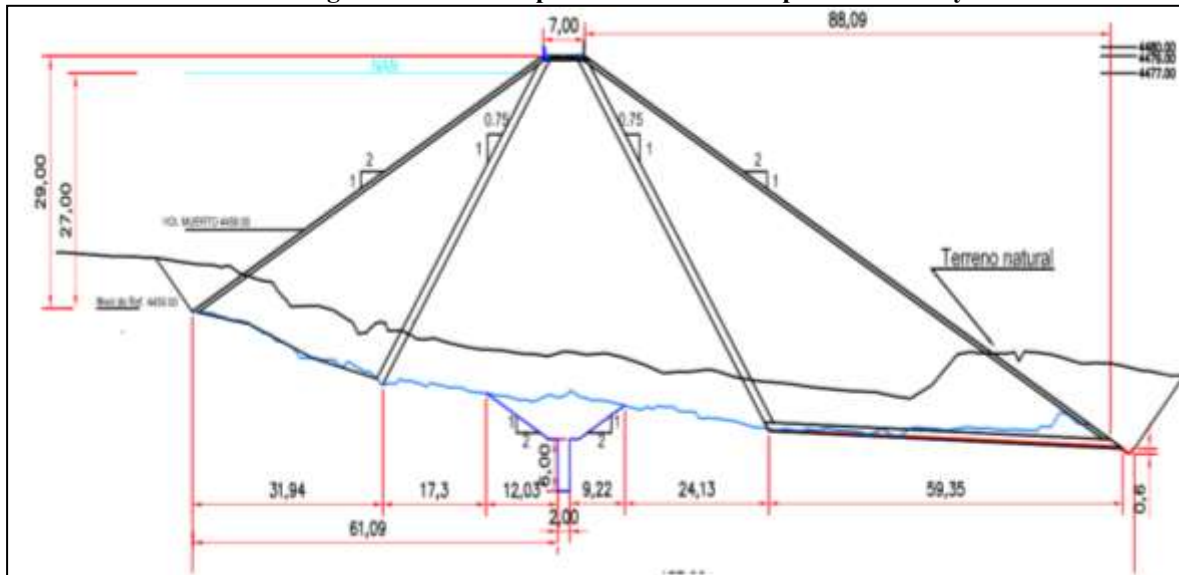


Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social , 2019)

La figura 21 detalla las dimensiones más importantes de la presa, ancho de corona de 7 metros, pendiente del talud exterior 2 a 1 y pendiente interna del núcleo de arcilla de 0.75 a 1.



**Figura 21. Sección típica con dimensiones presa Chacaltaya**



Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social , 2019)

La presa Chacaltaya es de materiales sueltos, esta construido con enrocado y un núcleo central de arcilla, filtros de arena, con geotextil. Entre el enrocado y el núcleo se tiene un material graduado como filtro y en la parte inferior aguas abajo se ha construido un dren basal para la recolección de las aguas que fluyen por la presa, estas aguas son drenadas a través del dren basal hasta llegar a 2 cámaras de inspección con vertedero para control de caudales de filtración y verificación de tubificación.

### **3.3.1.2. CALIDAD DE AGUA EN LA PRESA**

Lamentablemente en varios sectores de la cuenca de aporte a la presa Chacaltaya, se ha evidenciado la presencia de pasivos ambientales dejados por la actividad minera, por lo que se han realizado tomas de muestras en el embalse para determinar la calidad de agua.

**Figura 22. Calidad de agua en la presa Chacaltaya**



Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social , 2019)

En la figura 12 se puede observar que los elementos contaminantes Aluminio, Antimonio, Hierro, Manganeso y Mercurio, tienen concentraciones superiores a las recomendadas para abastecimiento de agua potable de acuerdo a la NB-512 (ver anexo III). Por este motivo en este trabajo se han considerado a estos elementos como contaminantes principales y se ha determinado la necesidad de conocer su impacto real en el río Khaluyo.

Los análisis muestran un pH muy por debajo de la norma boliviana, mostrando como resultado agua ácida, las actividades antrópicas (explotación minera) que se realizan aguas arriba del punto de muestreo puede ser la causa de este resultado, toda vez que se utilizan estas aguas para los procesos mineros y el agua residual de esta acción es vertida a la cuenca sin tratamiento alguno.

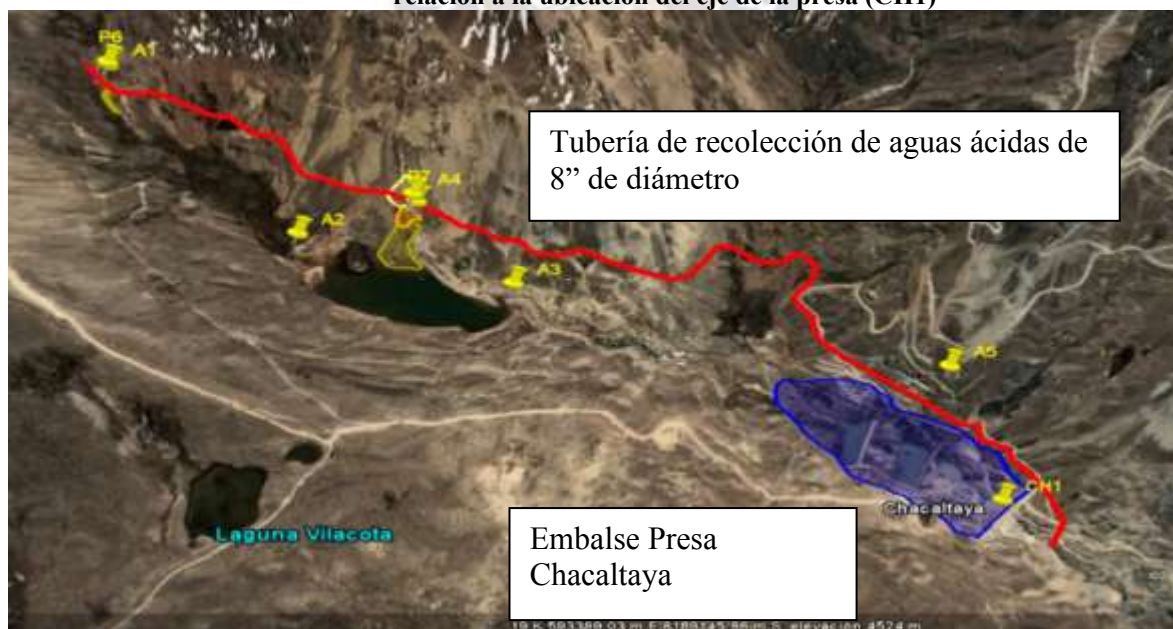
Las concentraciones de hierro y manganeso son muy elevadas en función a las máximas permisibles, por esta razón se pueden presentar manchas en el agua, que afecte el sabor y según últimos estudios, el exceso de manganeso en el agua podría afectar al desarrollo intelectual de los niños.

El exceso de aluminio no es significativo en la muestra, si bien no es perjudicial para la salud, pero puede afectar a la coloración del agua.

Las concentraciones elevadas de antimonio, puede afectar a la salud de la población si se expone a cantidades relativamente altas (ojos, piel y pulmones).

Se han identificado los pasivos ambientales dejados por la actividad minera, los mismos se presentan en el siguiente mapa de ubicación:

**Figura 23. Ubicación de pasivos ambientales (A1, A2, A3, A4 y A5) y colector de aguas ácidas con relación a la ubicación del eje de la presa (CH1)**



Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social, 2018)

En la figura 23, se observa un sistema de recolección de todas las aguas ácidas que emergen de los pasivos ambientales identificados, de manera que las aguas ácidas no ingresen directamente

al espejo de agua de la presa. Sin embargo, este colector descarga aguas abajo de la presa en el lecho del río. La obra de toma se encuentra a más de 15 km (en la planta de Achachicala), por lo que, aunque se haya evitado que los contaminantes lleguen al espejo de agua de la presa Chacaltaya, las aguas ácidas contaminarán el río Khaluyo antes de llegar a la obra de toma en Achachicala.

La figura 24 muestra la ubicación de las presas con relación a la ciudad de La Paz y la obra de toma de Achachicala.

**Figura 24. Ubicación de las presas y la obra de toma**



Fuente: Elaboración propia

De la calidad de agua realizada en el río por las empresas que han ejecutado el diseño y la construcción de las presas se puede observar que se tiene elevadas concentraciones de Aluminio, Antimonio, Hierro, Manganeso y Mercurio (ver tabla 9)

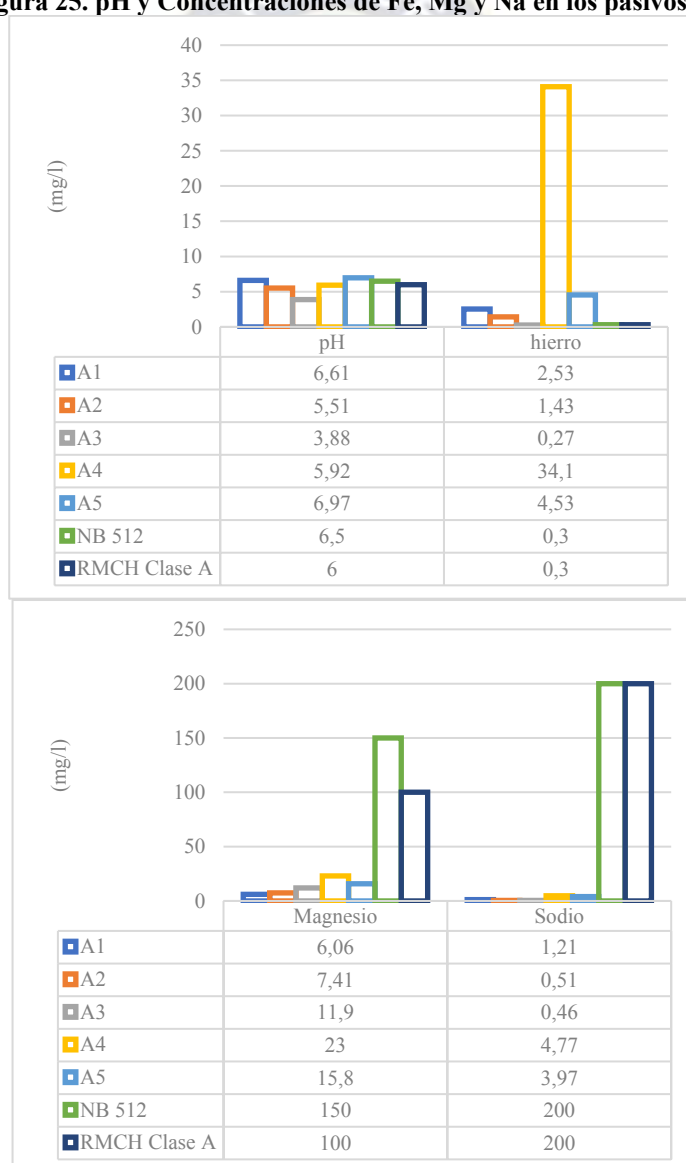
A solicitud de EPSAS no se tiene previsto ejecutar una planta de tratamiento debido al costo y la operación adicional que esto implicaría, sin embargo, se pretende incluir estas aguas en la planta de tratamiento de Achachicala; para reducir los costos que podrían implicar el tratamiento de estos contaminantes; en esta investigación se trabajó en procesos de dilución con la regulación de caudales para que las concentraciones sean menores.

**Tabla 9. Resultados de laboratorio muestrados en cada pasivo ambiental**

Parámetro	Unidad	Puntos de muestreo					Límite máximo aceptable	
		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	RMCH Clase A	NB 512
pH		6.61	5.51	3.88	5.92	6.97	6 - 8,5	6,5-9
Hierro	mg/l	2.53	1.43	0.27	34.1	4.53	0.3	0.3
Magnesio	mg/l	6.06	7.41	11.9	23	15.8	100	150
Manganeso	mg/l	0.974	1.179	1.578	1.671	0.361	0.5	0.1
Sodio	mg/l	1.21	0.51	0.46	4.77	3.97	200	
Aluminio	mg/l	<0,001	0.0048	0.095	0.022	0.014	0.2	0.1
Cobre	mg/l	<0,01	0.01	0.14	<0,01	<0,01	0.05	1
Zinc	mg/l	0.53	1.22	1.42	0.13	0.05	0.2	5
Plomo	mg/l	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0.05	0.01
Mercurio	mg/l	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0.001	0.001
Antimonio	mg/l	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0.01	0.005
Plata	mg/l	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0.05	

Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social, 2018)

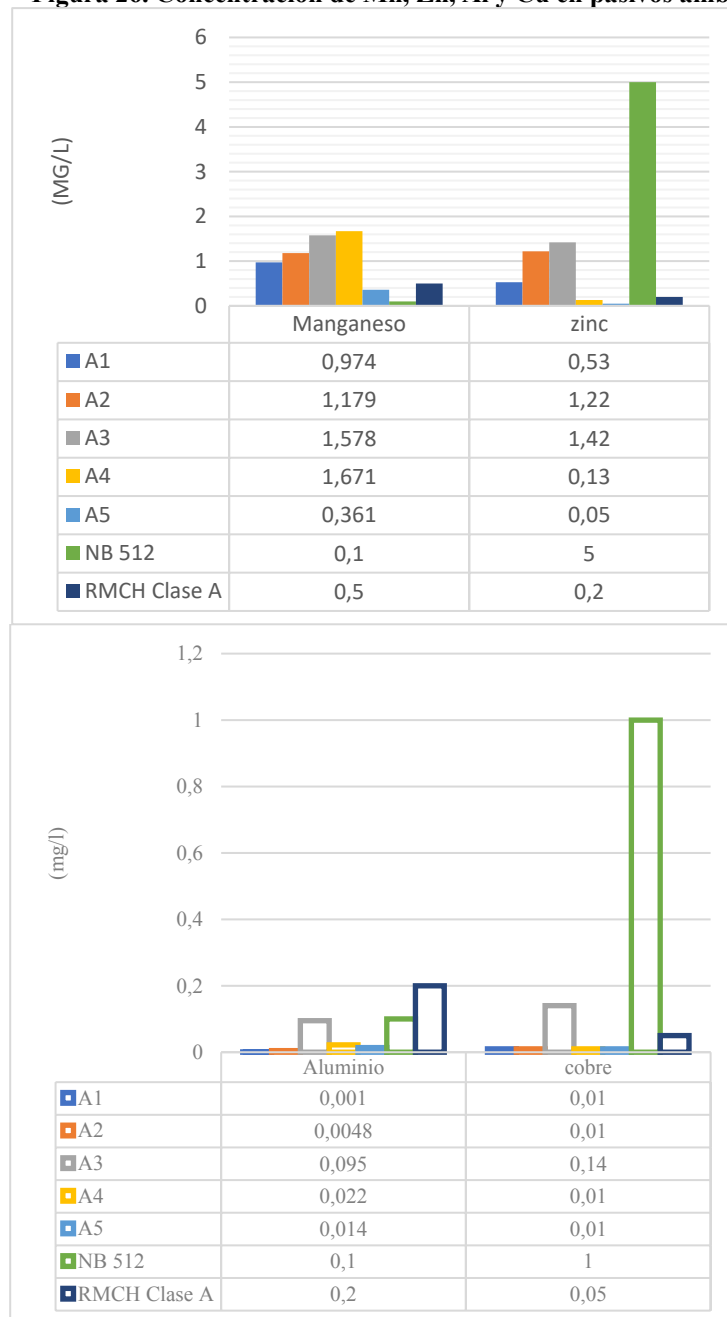
**Figura 25. pH y Concentraciones de Fe, Mg y Na en los pasivos ambientales**



Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social, 2018)

La figura 25 muestra que el pH esta por debajo del recomendado en los puntos A2, A3 y A4 (los puntos A1 y A5 están por encima); la concentración de hierro en los puntos A1, A2, A4 y A5 están por encima de lo recomendado por la NB-512 y el RMCH (Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica) para clase A (sólo el punto A3 está por debajo pero muy cerca al límite). Para el caso de la concentración del magnesio y sodio las concentraciones en todos los puntos (A1, A2, A3, A4 y A5) estan muy por debajo de las recomendaciones mencionadas.

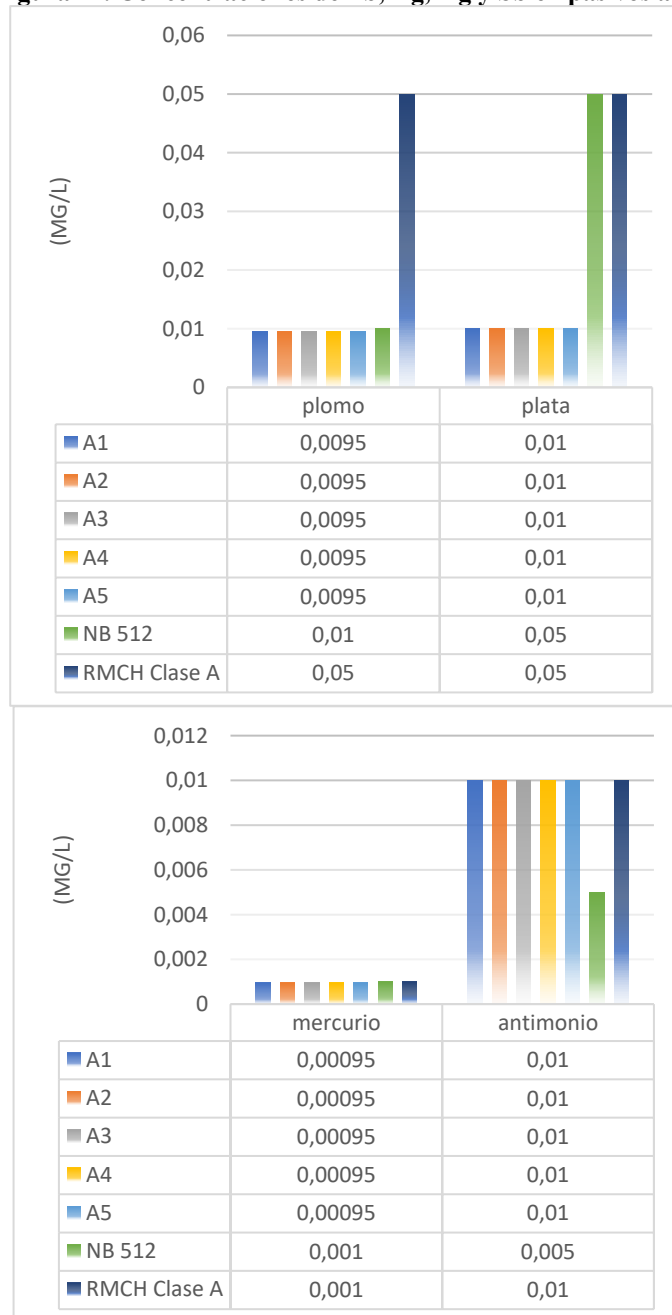
**Figura 26. Concentración de Mn, Zn, Al y Cu en pasivos ambientales**



Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social, 2018)

La figura 26 muestra que las concentraciones de manganeso en todos los puntos (A1, A2, A3, A4 y A5) están por encima de las concentraciones recomendadas por la NB-512 y el RMCH Clase A (sólo el punto A5 esta sensiblemente por debajo de lo recomendado por el RMCH Clase A). En el caso del zinc y el cobre las concentraciones en todos los puntos están muy por debajo de lo recomendado en la NB-512. En cambio, para el caso del aluminio y el cobre, todos los puntos (A1, A2, A3, A4 y A5) estan por debajo de lo recomendado en la NB-512

**Figura 27. Concentraciones de Pb, Ag, Hg y Sb en pasivos ambientales**



Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social, 2018)



La figura 27 muestra que las concentraciones de plomo, plata y mercurio están por debajo de lo recomendado en la NB-512 en todos los puntos de pasivos ambientales (A1, A2, A3, A4 y A5). En el caso del antimonio las concentraciones en todos los puntos están por debajo de lo recomendado en el RMCH Clase A (el laboratorio muestra un valor <0.01mg/l, pero no puede ser comparado con la NB-512)

### 3.3.1.3. CURVA ALTURA vs VOLUMEN

La curva altura vs volumen almacenamiento (Tabla 10 y figura 28) ha sido de mucha utilidad para la determinación de caudales de descarga y tiempos de vaciado de la presa.

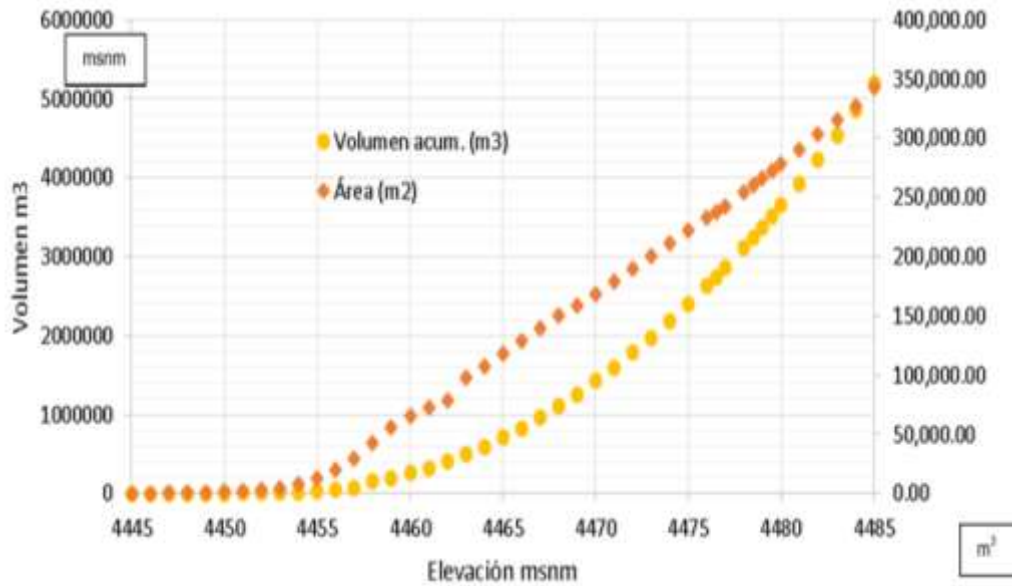
**Tabla 10. Volumen de almacenamiento de la presa Chacaltaya en función de la altura del espejo de agua en el embalse**

Elevación (msnm)	Altura (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen entre curvas (m <sup>3</sup> )	Volumen acum. (m <sup>3</sup> )	Volumen acum. ( hm <sup>3</sup> )	Área acum. (m <sup>2</sup> )	Área (ha)	OBSERVACIONES
4447	2	411.98	0.0	0.0	0.0000	412.0	0.04	
4448	3	855.11	620.2	620.2	0.0006	1267.1	0.09	
4449	4	1,177.95	1012.2	1632.4	0.0016	2445.0	0.12	
4450	5	1,691.85	1427.2	3059.6	0.0031	4136.9	0.17	
4451	6	2,351.39	2012.6	5072.2	0.0051	6488.3	0.24	
4452	7	3,004.95	2671.5	7743.7	0.0077	9493.2	0.30	
4453	8	4,556.57	3753.9	11497.6	0.0115	14049.8	0.46	
4454	9	8,345.48	6356.2	17853.8	0.0179	22395.3	0.83	
4455	10	13,434.09	10789.3	28643.2	0.0286	35829.4	1.34	
4456	11	20,038.91	16626.8	45270.0	0.0453	55868.3	2.00	
4457	12	29,767.56	24743.3	70013.3	0.0700	85635.8	2.98	
<b>4458</b>	<b>13</b>	<b>42,461.20</b>	<b>78388.2</b>	<b>148819.7</b>	<b>0.1488</b>	<b>128097.0</b>	<b>4.25</b>	Vol muerto+ vol ataguías
4459	14	55,375.17	48775.5	197595.2	0.1976	183472.2	5.54	
4460	15	64,933.95	60091.2	257686.3	0.2577	248406.2	6.49	
4461	16	72,127.07	68499.0	326185.4	0.3262	320533.2	7.21	
4462	17	78,476.09	75279.3	401464.6	0.4015	399009.3	7.85	
4463	18	97,344.97	87741.3	489205.9	0.4892	496354.3	9.73	
4464	19	107,318.48	102291.2	591497.1	0.5915	603672.8	10.73	
4465	20	118,291.32	112760.4	704257.5	0.7043	721964.1	11.83	
4466	21	128,452.38	123337.0	827594.5	0.8276	850416.5	12.85	
4467	22	139,109.17	133745.4	961339.9	0.9613	989525.6	13.91	
4468	23	149,836.20	144439.5	1105779.4	1.1058	1139361.8	14.98	
4469	24	158,954.58	154372.9	1260152.3	1.2602	1298316.4	15.90	
4470	25	168,750.98	163828.4	1423980.7	1.4240	1467067.4	16.88	
4471	26	179,280.70	173989.3	1597970.0	1.5980	1646348.1	17.93	
4472	27	189,594.03	184413.3	1782383.3	1.7824	1835942.1	18.96	
4473	28	200,418.39	194981.2	1977364.5	1.9774	2036360.5	20.04	
4474	29	211,424.86	205897.1	2183261.6	2.1833	2247785.4	21.14	
4475	30	222,385.99	216882.3	2400143.9	2.4001	2470171.3	22.24	
4476	31	232,389.53	227369.4	2627513.3	2.6275	2702560.9	23.24	
4476.5	31.5	237,123.00	117376.1	2744889.5	2.7449	2939683.9	23.71	
<b>4477</b>	<b>32</b>	<b>242,162.18</b>	<b>237259.1</b>	<b>2864772.4</b>	<b>2.8648</b>	<b>2944723.1</b>	<b>24.22</b>	2.865 NAN
4478	33	254,310.61	248211.6	3112984.0	3.1130	3199033.7	25.43	
4478.5	33.5	260,000.00	128575.0	3241559.1	3.2416	3459033.7	26.00	
<b>4479</b>	<b>34</b>	<b>266,682.25</b>	<b>260471.9</b>	<b>3373456.0</b>	<b>3.3735</b>	<b>3465715.9</b>	<b>26.67</b>	3.373 Corona
4479.5	34.5	272,321.00	266136.7	3507695.8	3.5077	3731354.7	27.23	
<b>4480</b>	<b>35</b>	<b>278,766.15</b>	<b>272701.9</b>	<b>3646157.9</b>	<b>3.6462</b>	<b>3744482.1</b>	<b>27.88</b>	3.646 Parapeto
4481	36	290,823.70	284773.7	3930931.5	3.9309	4035305.8	29.08	
4482	37	303,197.26	296989.0	4227920.5	4.2279	4338503.0	30.32	
4483	38	315,336.33	309246.9	4537167.4	4.5372	4653839.4	31.53	
4484	39	327,870.11	321582.9	4858750.3	4.8588	4981709.5	32.79	
4485	40	343,186.65	335499.2	5194249.6	5.1942	5324896.1	34.32	

Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social, 2018)



Figura 28. Altura vs Volumen de almacenamiento presa Chacaltaya



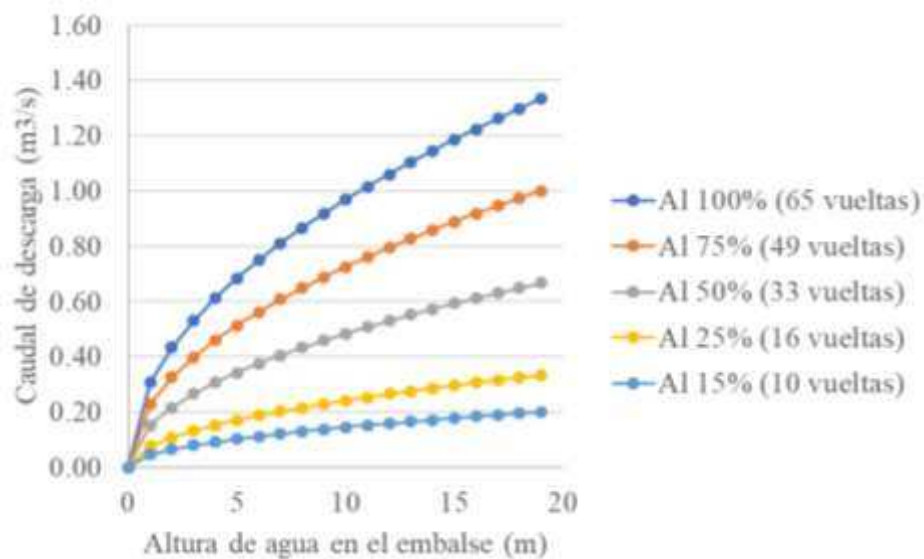
Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social, 2018)

### 3.3.2 OPERACIÓN DE LA PRESA CHACALTAYA

#### 3.3.2.1. CURVA DE DESCARGA ALTURA vs CAUDAL

Con los datos de volúmenes de almacenamiento de la presa se ha calculado la relación de altura de agua en el embalse con la descarga de caudal, en función del porcentaje de apertura de la válvula (Figura 29).

Figura 29. Altura de embalse vs Caudal de descarga, en función del porcentaje de apertura de válvulas



Fuente: Elaboración propia

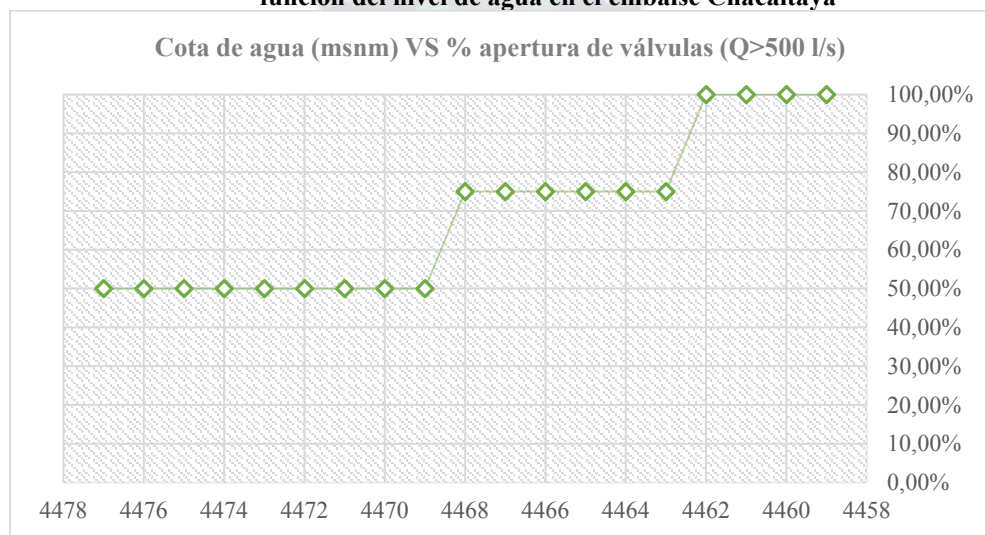
Considerando el requerimiento mínimo que solicita EPSAS de 500 l/s. se ha desarrollado unas curvas que permitan descargar el requerimiento de 500 l/s en función de diferentes porcentajes de apertura de válvulas, como se muestra en la tabla 11 y figura 30.

**Tabla 11. Cota de agua en el embalse y porcentaje de apertura de las válvulas necesarias para mantener un caudal de descarga mínimo de 500 l/s**

Cota y altura de agua en la presa		Caudal de salida de la presa (m <sup>3</sup> /s), en función del % de apertura de la válvula y número de vueltas, para Cd=0.55				
Cota (m.s.n.m.)	Altura de agua (m)	Al 100% (65 vueltas)	Al 75% (49 vueltas)	Al 50% (33 vueltas)	Al 25% (16 vueltas)	Al 15% (10 vueltas)
4477	19	1.33	1.00	0.67	0.33	0.20
4476	18	1.30	0.97	0.65	0.32	0.19
4475	17	1.26	0.95	0.63	0.32	0.19
4474	16	1.22	0.92	0.61	0.31	0.18
4473	15	1.19	0.89	0.59	0.30	0.18
4472	14	1.15	0.86	0.57	0.29	0.17
4471	13	1.10	0.83	0.55	0.28	0.17
4470	12	1.06	0.80	0.53	0.27	0.16
4469	11	1.02	0.76	0.51	0.25	0.15
4468	10	0.97	0.73	0.48	0.24	0.15
4467	9	0.92	0.69	0.46	0.23	0.14
4466	8	0.87	0.65	0.43	0.22	0.13
4465	7	0.81	0.61	0.40	0.20	0.12
4464	6	0.75	0.56	0.37	0.19	0.11
4463	5	0.68	0.51	0.34	0.17	0.10
4462	4	0.61	0.46	0.31	0.15	0.09
4461	3	0.53	0.40	0.27	0.13	0.08
4460	2	0.43	0.32	0.22	0.11	0.06
4459	1	0.31	0.23	0.15	0.08	0.05
4458	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Area de apertura de la válvula (M2) (tubería de 400 mm)		0.1257	0.0942	0.0628	0.0314	0.0188

Fuente: Elaboración propia

**Figura 30. Porcentaje de apertura de válvulas para mantener un caudal de salida de 500 l/s, en función del nivel de agua en el embalse Chacaltaya**



Fuente: Elaboración propia

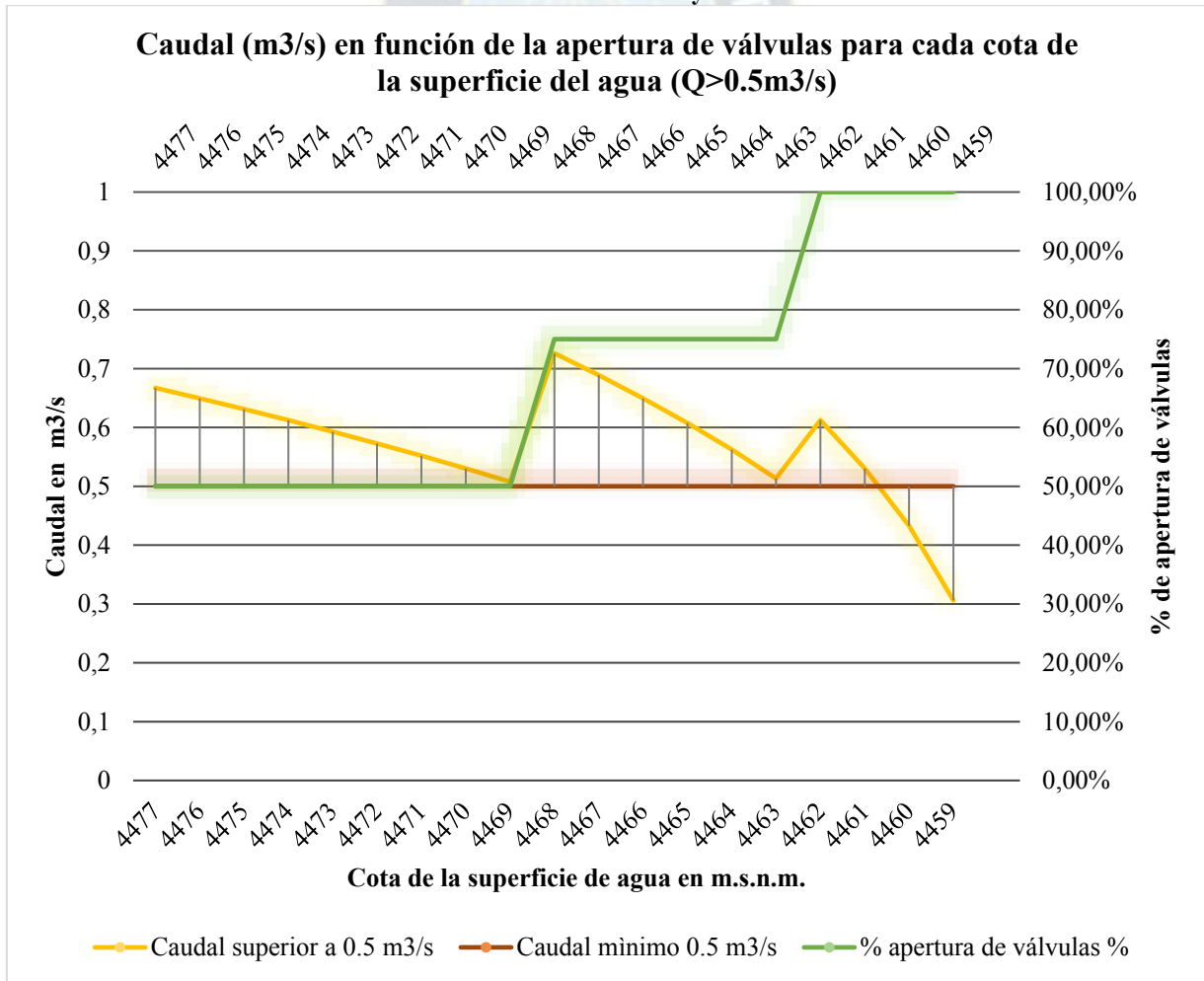
En la tabla 11 y figura 30 se observa que para mantener una descarga mínima de 500 l/s en la presa, se debe considerar las siguientes aperturas de válvulas:

- Cuando la cota del agua esta entre 4477 y 4469 m.s.n.m., se puede mantener una apertura en las válvulas de 50 % (33 vueltas)
- Si el nivel del agua en el embalse baja a una cota entre 4468 a 4463 m.s.n.m. se debería abrir las válvulas a 75%
- Si la cota del agua baja del nivel 4463 m.s.n.m. se debe abrir las válvulas al 100%.

Este procedimiento puede servir para realizar el vaciado de la presa o tambien para realizar un control de la apertura de válvulas en función del nivel del agua en el embalse, para mantener un caudal mínimo de 500 l/s en todo momento.

La figura 31 muestra el caudal de descarga de la presa Chacaltaya en función del porcentaje de apertura de válvulas, manteniendo un caudal mínimo requerido de 500 l/s.

**Figura 31. Descarga de caudal en función del porcentaje de apertura de válvulas. Embalse Chacaltaya**



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.2.2. TIEMPO DE VACIADO DE LA PRESA vs CAUDAL

Se ha realizado el análisis del tiempo de vaciado de la presa en función del porcentaje de apertura de las válvulas y el requerimiento mínimo solicitado por EPSAS de 500 l/s. Se ha utilizado la siguiente fórmula hidráulica:

**Ecuación 2. Tiempo de descarga desde el nivel  $y_1$  al nivel  $y_2$**

$$t = \frac{2 \cdot A_r}{C_d \cdot A_o \sqrt{2g}} (y_1^{1/2} - y_2^{1/2})$$

(Ven Te Chow, 1994)

Donde:

t: tiempo que se requiere para descargar de una profundidad  $y_1$  una profundidad  $y_2$

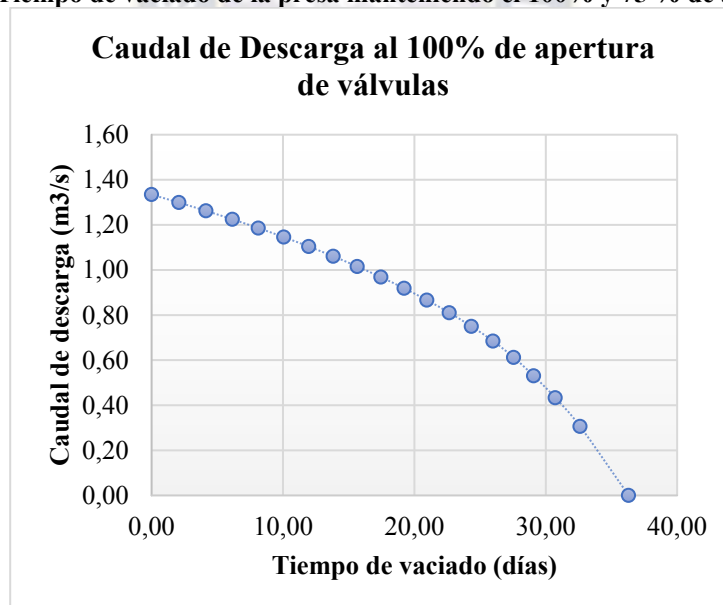
$A_t$ : Área transversal de las curvas de nivel (promedio entre 2 curvas de nivel)

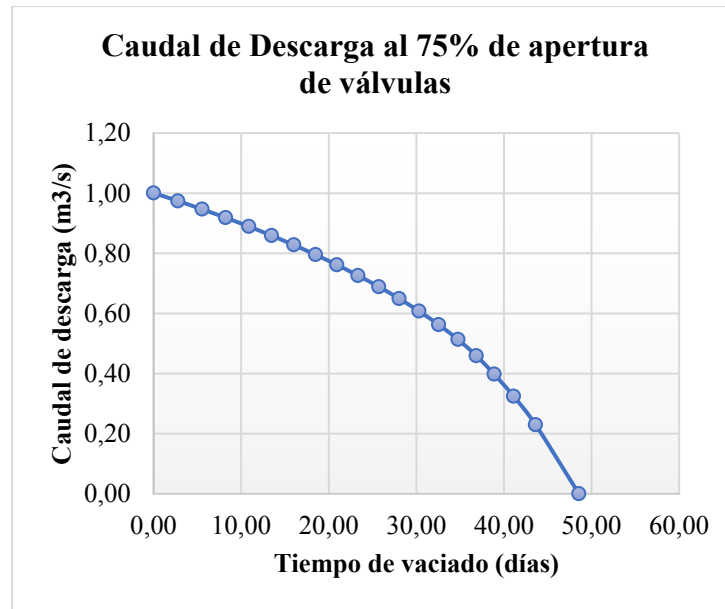
$A_o$ : área de la tubería (diámetro 400 mm de tubería)

$C_d$ : Coeficiente de descarga (0.55 de acuerdo a las válvulas)

$y_1, y_2$ : Niveles del agua en el embalse

**Figura 32. Tiempo de vaciado de la presa manteniendo el 100% y 75 % de apertura de la válvula**

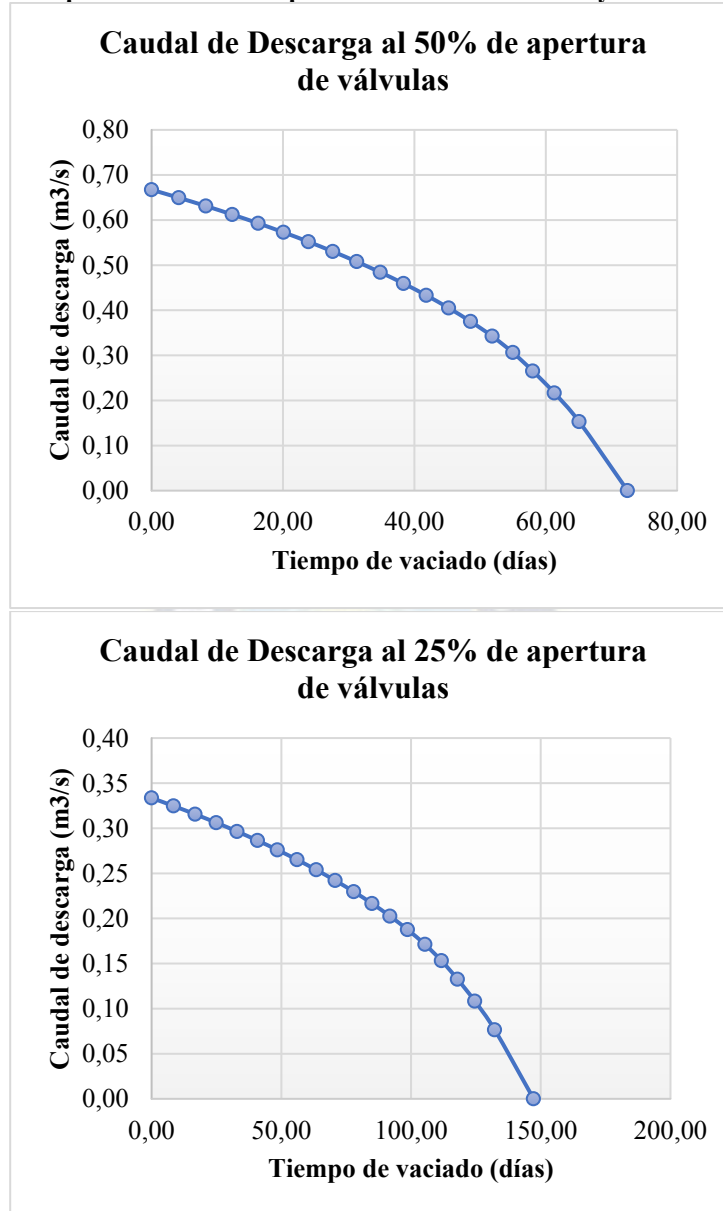




Fuente: Elaboración propia

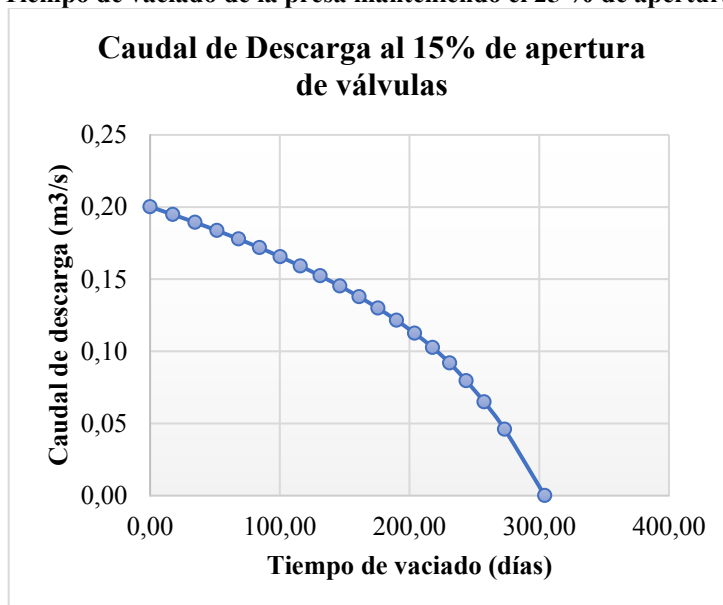
La figura 32 muestra que si se mantiene una apertura de válvulas constante del 100%, la presa Chacaltaya se vaciará en 36 días y se mantendría el requerimiento mínimo de caudal de 500 l/s hasta el día 29; por otro lado si se mantiene una apertura de las válvulas de 75%, la presa se vaciaría en 48 días y se mantendría el suministro mínimo de 500 l/s hasta el día 35. A su vez la figura 33 y 34 muestra el valor del caudal de descarga y el tiempo de vaciado de la presa Chacaltaya, para un porcentaje de apertura de la válvula de 50%, 25% y 15%, finalmente la figura 35 muestra en resumen el tiempo de vaciado final de la presa en función de diferentes porcentajes de apertura de valvulas de la presa Chacaltaya (100%, 75%, 50%, 25% y 15%).

**Figura 33. Tiempo de vaciado de la presa manteniendo el 50% y 25 % de apertura de la válvula**



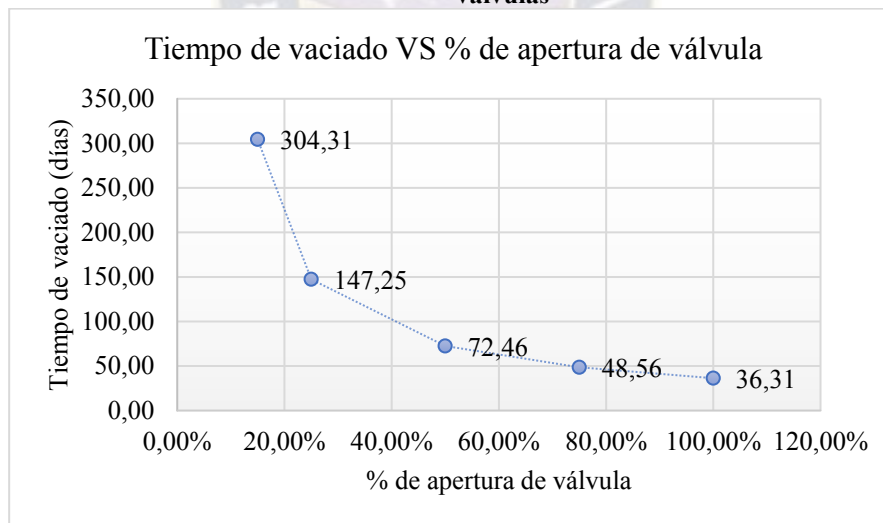
Fuente: Elaboración propia

**Figura 34. Tiempo de vaciado de la presa manteniendo el 25 % de apertura de la válvula**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 35. Resumen del tiempo de vaciado de la presa en función del porcentaje de apertura de válvulas**



Fuente: Elaboración propia

En resumen, se puede recomendar la siguiente operación de la presa Chacaltaya, con el objetivo de mantener la descarga permanente mínima de 500 l/s:

- Si la cota de agua está entre 4477 m a 4469m, se recomienda abrir mínimamente el 50% de la válvula
- Si la cota de agua está entre 4468 m a 4463 m, se recomienda una apertura de válvula de 75%



- Si la cota del agua está entre 4462 m a 4461 m, se recomienda una apertura de la válvula de 100%.

Para los tiempos de vaciado de la presa se puede indicar los siguiente:

- Con una apertura constante de 100% de la válvula, la presa se vaciará en 36 días, de los cales solamente, se mantendría la descarga mínima de 500 l/s hasta los 29 días
- Con una apertura de 75%, la presa se vaciaría en 48 días, de los cales se mantendría el requerimiento mínimo de caudal hasta los 35 días
- Con una apertura de 50 %, la presa se vaciaría en 72 días y se mantendría el caudal mínimo de 500 l/s hasta el día 31
- Con una apertura de 25%, la presa se vaciaría en 147 días, pero no se podría mantener el requerimiento de descarga mínima de 500 l/s
- Para una apertura de 15%, la presa se vaciaría en 304 días (10 meses), pero no se podría descargar el requerimiento mínimo de 500 l/s.

### **3.4 DIAGNÓSTICO Y OPERACIÓN DE LA PRESA ALPAQUITA**

#### **3.4.1 DIAGNÓSTICO DE LA PRESA ALPAQUITA**

##### **3.4.1.1. SITUACIÓN ACTUAL DE LA PRESA**

La presa Alpaquita está en operación empezando a almacenar agua, pero se tendrá que esperar toda la época de lluvias para realizar las pruebas y verificaciones hidráulicas con embalse lleno. La presa es de materiales sueltos (enrocado con núcleo de arcilla), con un revestimiento de “Rip Rap” para su protección. La presa cuenta con filtros entre el enrocado y el núcleo de arcilla, este material de filtro es arena bien graduada protegida por geotextiles, uno de ellos se denomina “Nabento”, en el que se tiene bentonita compacta encerrada en el geotextil (ver tabla 12 y figura 37).

Figura 36. Presa Alpaquita



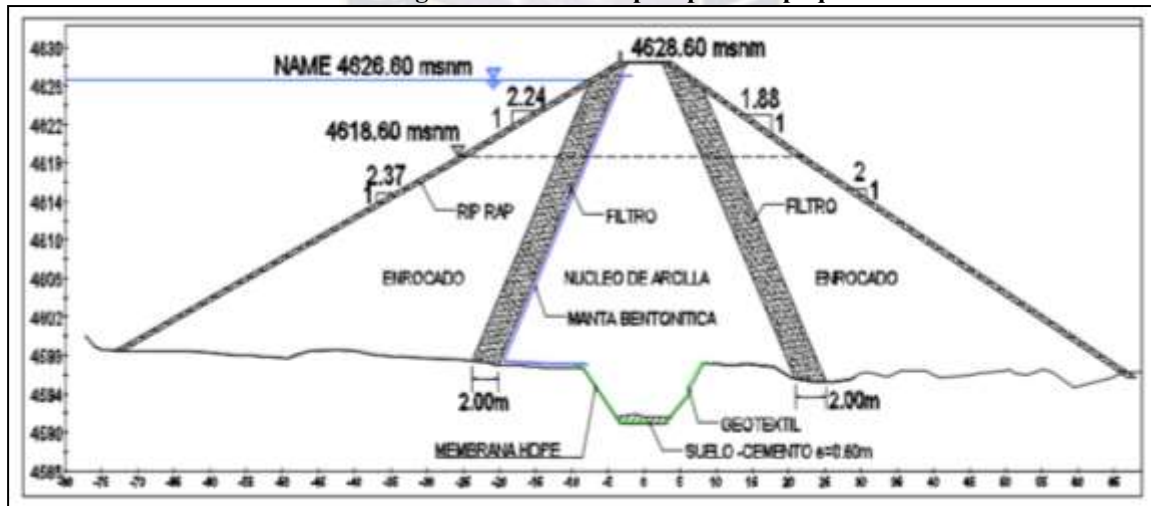
Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Datos generales, presa Alpaquita

DATOS GENERALES			
PRESA	VOLUMEN m3	ALTURA m	LONGITUD m
ALPAQUITA	1,369,086	31	300

Fuente: Elaboración propia

Figura 37. Sección Típica presa Alpaquita



Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social , 2019)

### 3.4.1.2. CALIDAD DE AGUA EN LA PRESA

Con respecto a la calidad de agua de la presa Alpaquita, se ha recopilado los resultados del análisis de laboratorio presentado en el informe ambiental del estudio a diseño final (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social , EDTP presas Pampalarama, Chacaltaya y Alpaquita, 2019), en la figura 38 se muestra los puntos de muestreo realizado por la consultora:

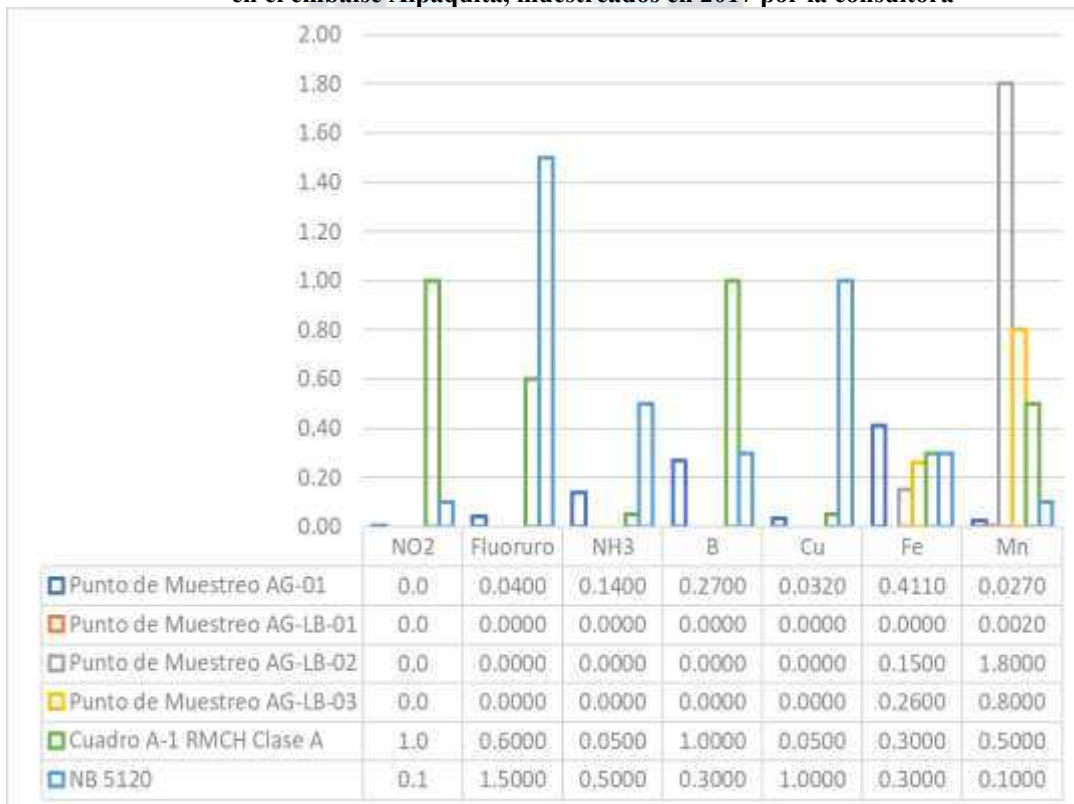
**Figura 38. Puntos de muestreo realizado en la etapa de elaboración del diseño final de la presa Alpaquita**

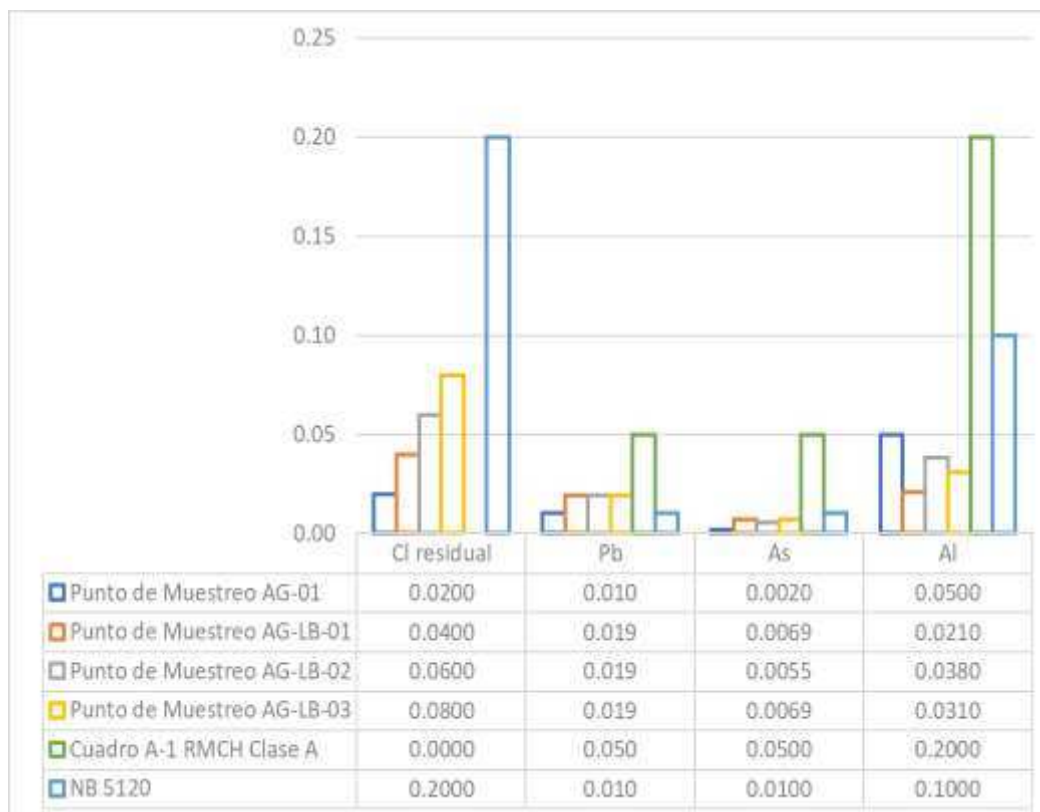


Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social, 2019)

En la figura 39 y figura 40 se muestran las concentraciones de varios indicadores de contaminación del agua en comparación con las recomendaciones de la NB-512.

**Figura 39. Concentraciones de NO<sub>2</sub>, Fluoruros, NH<sub>3</sub>, B, Cu, Fe, Mn, Cloro residual, Pb, As y Al en el embalse Alpaquita, muestreados en 2017 por la consultora**

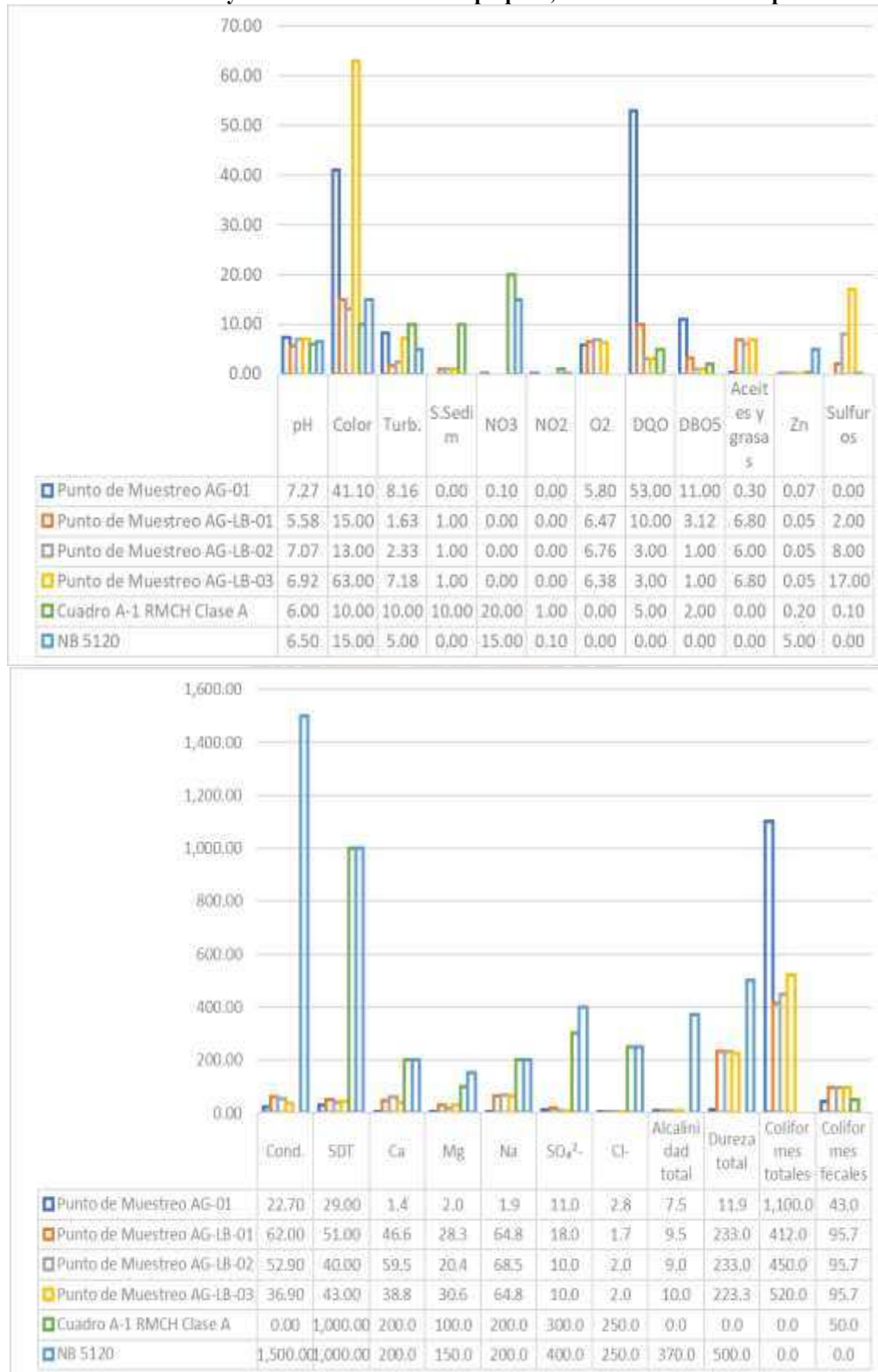




Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social , 2019)

En la figura 39 se observa que las concentraciones de nitritos, fluoruro, amoníaco, boro, cobre, cloro residual, arsénico y aluminio, están por debajo de las concentraciones máximas recomendadas en la NB-512. Por el contrario las concentraciones de hierro, manganeso y plomo se encuentran por encima de los valores aceptables en la NB-512.

**Figura 40. Valores muestreados de pH, color, turbiedad, sólidos sedimentables, NO3, O2, DQO, DBO5, aceites, grasas, Zn, sulfuros, SDT, Ca, Mg, Na, SO4, Cl-, Alcalinidad, Dureza total Coliformes totales y fecales en el embalse Alpaquita, muestreados en 2017 por la consultora**



Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social , 2019)



La figura 40 muestra que las concentraciones de nitratos, nitritos, zinc, calcio magnesio, sodio, sulfatos y cloruros, están por debajo de los máximos recomendables en la NB-512; los indicadores que están fuera del rango recomendable son: pH, color, turbiedad, sólidos sedimentables, DQO, DBO5, aceites y grasas, sulfuros y los coliformes.

De acuerdo al estudio los análisis de calidad de agua efectuados en la microcuenca indican que el agua que deriva en el área de inundación, presenta valores de pH ligeramente ácidos a neutro, por otro lado, se observa la presencia de Coliformes, aporte presumiblemente generado por la presencia de ganadería camélida en el área del proyecto.

No obstante, el estudio señala que estas concentraciones pueden ser eliminadas parcialmente o totalmente por procesos de dilución con aguas superficiales de cuerpos de agua de otras cuencas aguas abajo como la mezcla con el río Pampalarama, o por procesos de aireación, alcalinización, floculación, sedimentación, adsorción con cuarzo o antracita (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social , EDTP presas Pampalarama, Chacaltaya y Alpaquita, 2019).

#### **3.4.1.3. CURVA ALTURA vs VOLUMEN**

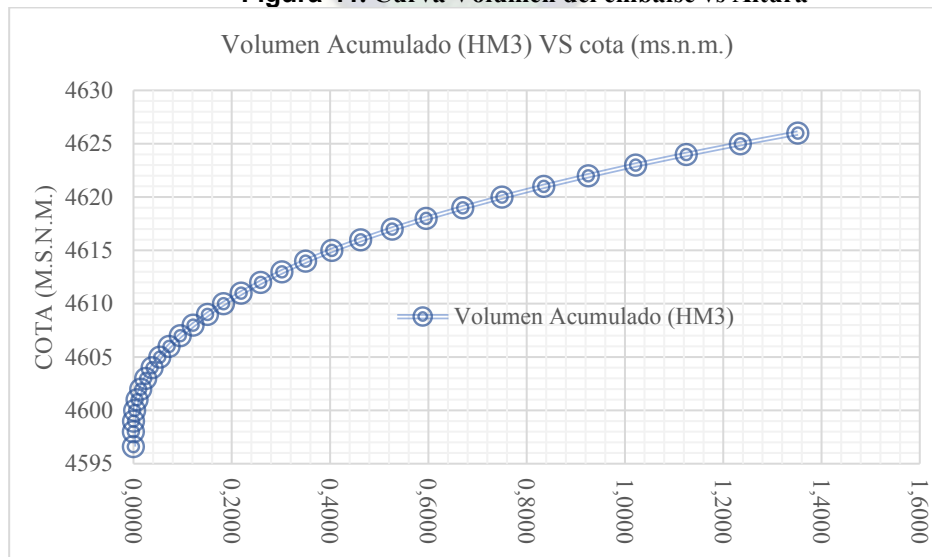
La curva de altura versus Volumen de almacenamiento ha permitido determinar el caudal de descarga de la presa en función del nivel de agua en el embalse, así también con esta curva se ha podido determinar el tiempo de vaciado de la presa (ver tabla 13 y figura 41).

**Tabla 13. Volumen de almacenamiento de la presa Alpaquita en función de la altura del espejo de agua en el embalse**

Cota	Area Parcial (m2)	Area Promedio (m2)	Volumen Parcial [Hm3]	Volumen Acumulado[H m3]	Altura Presa	Observaciones
4596.60	0.00					
4598.00	12.60	6.30	0.00001	0.0000	1.40	
4599.00	831.02	421.81	0.00042	0.0004	2.40	
4600.00	3,690.17	2,260.60	0.00226	0.0027	3.40	
4601.00	6,103.92	4,897.05	0.00490	0.0076	4.40	
4602.00	8,935.31	7,519.62	0.00752	0.0151	5.40	
4603.00	11,540.16	10,237.74	0.01024	0.0253	6.40	
4604.00	14,298.71	12,919.44	0.01292	0.0383	7.40	Volumen Muerto
4605.00	17,343.63	15,821.17	0.01582	0.0541	8.40	
4606.00	20,698.60	19,021.12	0.01902	0.0731	9.40	
4607.00	24,354.52	22,526.56	0.02253	0.0956	10.40	
4608.00	27,808.05	26,081.29	0.02608	0.1217	11.40	
4609.00	30,965.68	29,386.87	0.02939	0.1511	12.40	
4610.00	34,153.85	32,559.77	0.03256	0.1837	13.40	
4611.00	37,675.83	35,914.84	0.03591	0.2196	14.40	
4612.00	41,624.07	39,649.95	0.03965	0.2592	15.40	
4613.00	45,590.19	43,607.13	0.04361	0.3028	16.40	
4614.00	50,700.99	48,145.59	0.04815	0.3510	17.40	
4615.00	55,870.85	53,285.92	0.05329	0.4043	18.40	
4616.00	61,564.88	58,717.87	0.05872	0.4630	19.40	
4617.00	66,711.00	64,137.94	0.06414	0.5271	20.40	
4618.00	71,887.69	69,299.35	0.06930	0.5964	21.40	
4619.00	77,192.96	74,540.33	0.07454	0.6710	22.40	
4620.00	82,279.43	79,736.20	0.07974	0.7507	23.40	
4621.00	87,617.60	84,948.52	0.08495	0.8356	24.40	
4622.00	93,427.30	90,522.45	0.09052	0.9262	25.40	
4623.00	99,653.57	96,540.44	0.09654	1.0227	26.40	
4624.00	106,400.26	103,026.92	0.10303	1.1257	27.40	
4625.00	113,514.62	109,957.44	0.10996	1.2357	28.40	
4626.00	120,459.95	116,987.29	0.11699	1.3527	29.40	
4626.60	122,977.67	121,718.81	0.07303	1.4257	30.00	NAME
4627.00	127,211.60	125,094.64	0.05004	1.4757	30.40	
4628.00	134,906.72	131,059.16	0.13106	1.6068	31.40	
4628.60	137,602.34	136,254.53	0.08175	1.6886	32.00	Coronamiento

Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social , 2019)

**Figura 41. Curva Volumen del embalse vs Altura**



Fuente: (Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social , 2019)

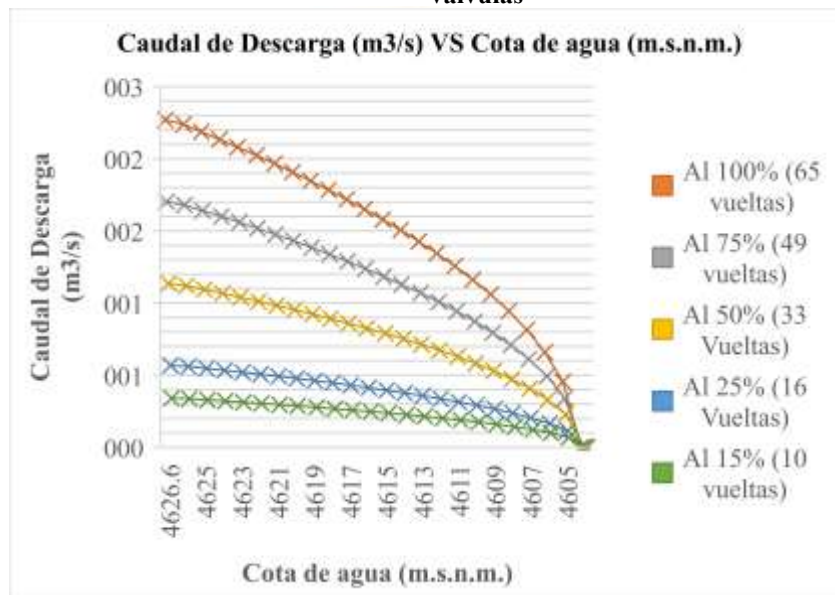


### 3.4.2 OPERACIÓN DE LA PRESA ALPAQUITA

#### 3.4.2.1. CURVA DE DESCARGA ALTURA vs CAUDAL

Se ha realizado un análisis de caudal de descarga de la presa en función de la altura del agua en el embalse y el porcentaje de apertura de las válvulas. En la figura 42 se presenta las curvas altura versus caudal de descarga de la presa Alpaquita, en función del porcentaje de apertura de la válvula de salida.

**Figura 42. Altura de embalse vs Caudal de descarga, en función del porcentaje de apertura de válvulas**



Fuente: Elaboración propia

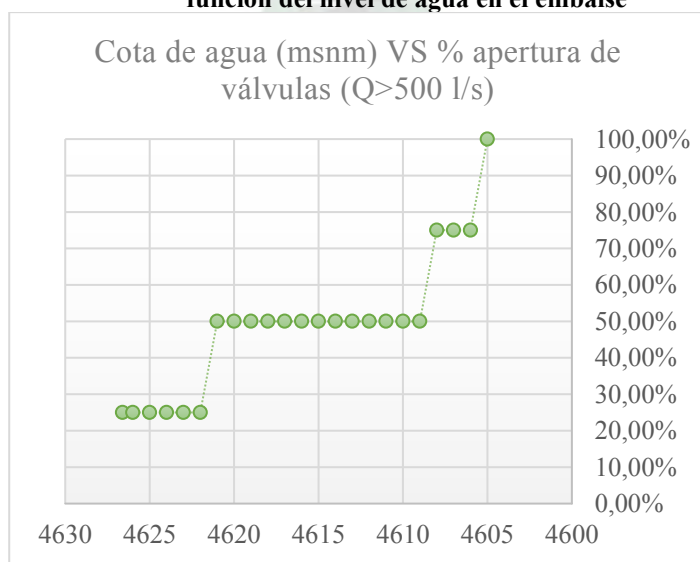
En la tabla 14 y figura 43, se muestra el resultado del análisis de la operación de las válvulas en función de la altura del agua en el embalse, el porcentaje de apertura de la válvula y de acuerdo al requerimiento de caudal mínimo (500 l/s requerido por EPSAS) para el incremento del abastecimiento de agua.

**Tabla 14. Cota de agua en el embalse y porcentaje de apertura de las válvulas necesarias para mantener un caudal de descarga mínimo de 500 l/s**

Cota y Altura de agua en la presa		Caudal de salida de la presa (m3/s), en función del % de apertura de la válvula, para Cd=0.55 y diametro del tubo 500 mm				
Cota	Altura de la presa desde el Nivel de volumen muerto	Al 100% (65 vueltas)	Al 75% (49 vueltas)	Al 50% (33 Vueltas)	Al 25% (16 Vueltas)	Al 15% (10 vueltas)
4626.6	22.5	2.27	1.70	1.13	0.57	0.34
4626	21.9	2.24	1.68	1.12	0.56	0.34
4625	20.9	2.19	1.64	1.09	0.55	0.33
4624	19.9	2.13	1.60	1.07	0.53	0.32
4623	18.9	2.08	1.56	1.04	0.52	0.31
4622	17.9	2.02	1.52	1.01	0.51	0.30
4621	16.9	1.97	1.47	0.98	0.49	0.29
4620	15.9	1.91	1.43	0.95	0.48	0.29
4619	14.9	1.85	1.38	0.92	0.46	0.28
4618	13.9	1.78	1.34	0.89	0.45	0.27
4617	12.9	1.72	1.29	0.86	0.43	0.26
4616	11.9	1.65	1.24	0.83	0.41	0.25
4615	10.9	1.58	1.18	0.79	0.39	0.24
4614	9.9	1.51	1.13	0.75	0.38	0.23
4613	8.9	1.43	1.07	0.71	0.36	0.21
4612	7.9	1.34	1.01	0.67	0.34	0.20
4611	6.9	1.26	0.94	0.63	0.31	0.19
4610	5.9	1.16	0.87	0.58	0.29	0.17
4609	4.9	1.06	0.79	0.53	0.26	0.16
4608	3.9	0.94	0.71	0.47	0.24	0.14
4607	2.9	0.81	0.61	0.41	0.20	0.12
4606	1.9	0.66	0.49	0.33	0.16	0.10
4605	0.9	0.45	0.34	0.23	0.11	0.07
4604	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

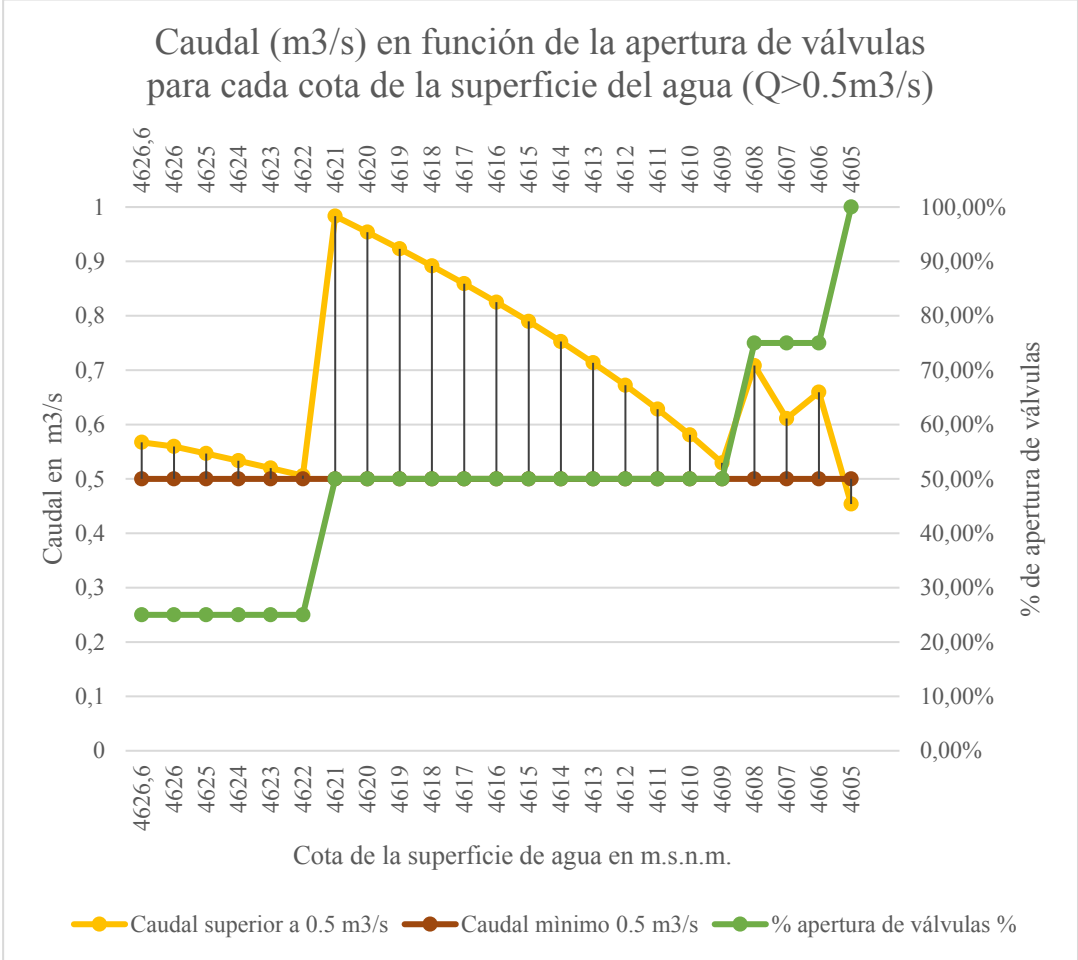
**Figura 43. Porcentaje de apertura de válvulas para mantener un caudal de salida de 500 l/s, en función del nivel de agua en el embalse**



Fuente: Elaboración propia

En la figura 43 se muestran los caudales de descarga en función del porcentaje de apertura de válvulas y la altura del nivel del agua en el embalse. Para mantener una descarga mínima de 500 l/s, se puede mantener la apertura de la válvula al 25%, mientras la cota de agua del embalse esté dentro de los límites de 4626.6 m a 4622 m, por debajo de estos niveles es necesario abrir las válvulas al 50% entre los niveles de agua 4621 m a 4609 m, cuando el nivel desciende a los niveles 4608 m a 4606 m, las válvulas deben estar abiertas al 75% para mantener una descarga mínima de 500 l/s, cuando el nivel del agua está entre 4605 m, a 4604 m, aunque se habrán las válvulas al 100% no se puede descargar un caudal mínimo de 500 l/s. (ver figura 44).

**Figura 44. Descarga de caudal en función del porcentaje de apertura de válvulas**



Fuente: Elaboración propia

**3.4.2.2. TIEMPO DE VACIADO DE LA PRESA vs CAUDAL**

Se ha realizado un análisis del tiempo de vaciado de la presa Alpaquita, en función de la apertura de válvulas y el nivel de agua en el embalse, manteniendo un caudal mínimo requerido de 500 l/s. Se ha utilizado la siguiente fórmula hidráulica:

**Ecuación 3. Tiempo de descarga desde el nivel y1 al nivel y2**

$$t = \frac{2 \cdot A_r}{C_d \cdot A_o \cdot \sqrt{2g}} (y_1^{1/2} - y_2^{1/2})$$

(Ven Te Chow, 1994)

Donde:

t: tiempo que se requiere para descargar de una profundidad y1 una profundidad y2

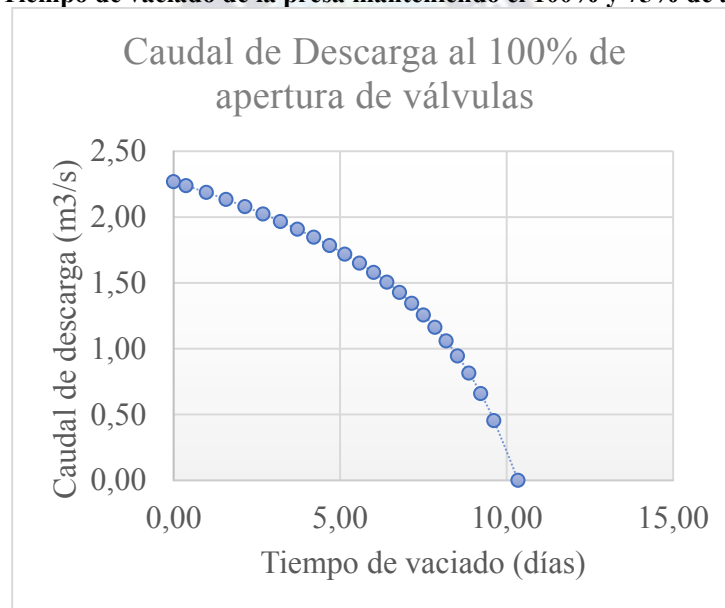
At: Área transversal de las curvas de nivel (promedio entre 2 curvas de nivel)

Ao: área de la tubería (diámetro 500 mm de tubería)

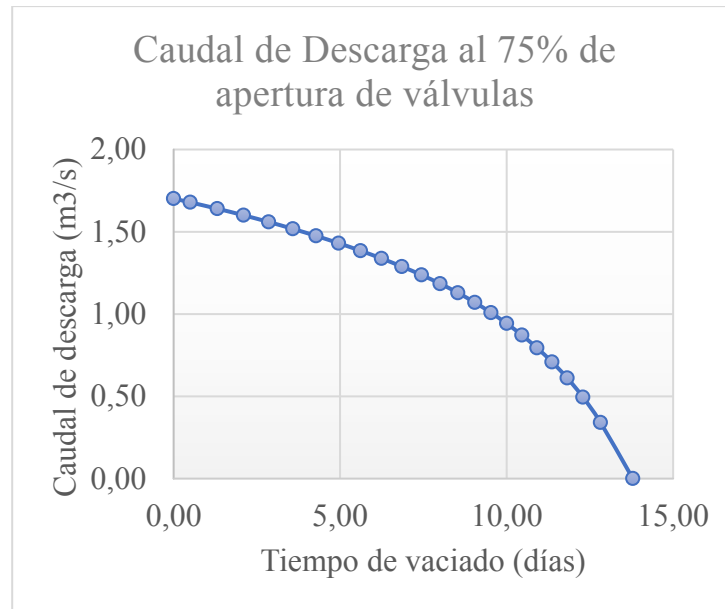
Cd: Coeficiente de descarga (0.55 de acuerdo a las válvulas)

y1, y2: Niveles del agua en el embalse

**Figura 45. Tiempo de vaciado de la presa manteniendo el 100% y 75% de apertura de la válvula**



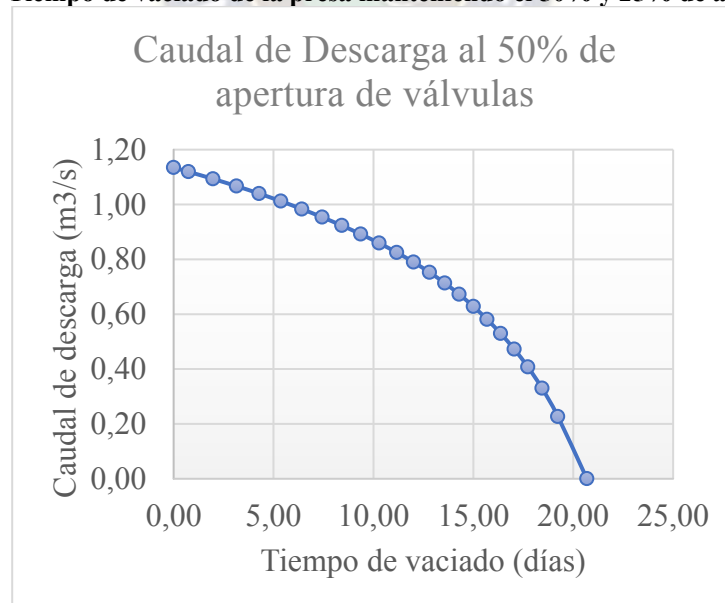
Fuente: Elaboración propia

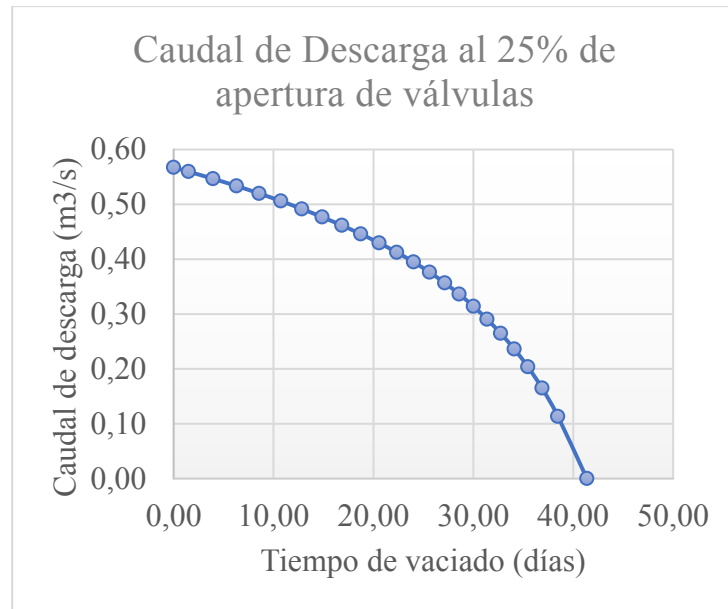


Fuente: Elaboración propia

En la figura 45 se puede observar que, si se mantiene al 100% abierta la válvula, la presa se vaciaría por completo en 10 días, manteniendo una descarga mínima de 500 l/s por el lapso de 9 días; si las válvulas se mantienen abiertas al 75%, la presa Alpaquita se vaciaría en 13 días, manteniendo un caudal mínimo de 500 l/s por el lapso de los 12 días iniciales.

**Figura 46. Tiempo de vaciado de la presa manteniendo el 50% y 25% de apertura de la válvula**

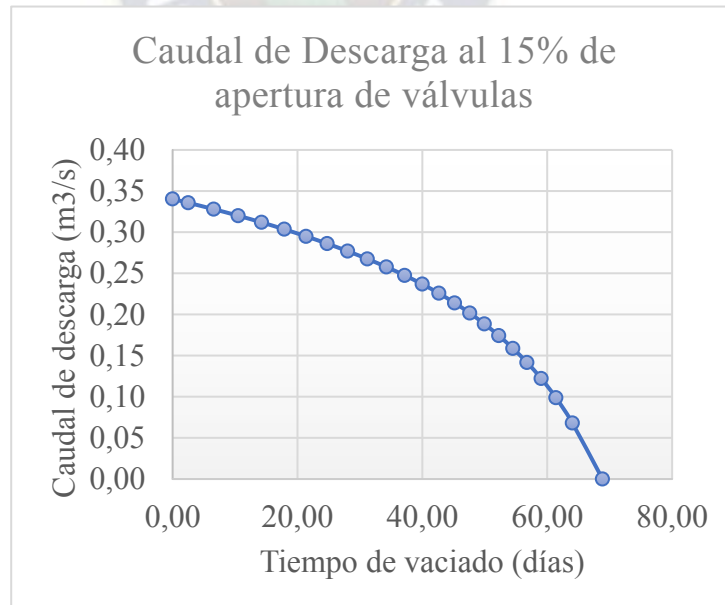




Fuente: Elaboración propia

La figura 46 muestra que, si se mantiene las válvulas abiertas al 50%, la presa se vaciaría en 20 días, manteniendo un caudal mínimo de descarga de 500 l/s en los primeros 16 días. Por otro lado, si se descarga constantemente el agua con una apertura del 25%, la presa se vaciaría en 41 días, de los cuales sólo se mantendría la descarga mínima de 500 l/s en los primeros 10 días.

**Figura 47. Tiempo de vaciado de la presa manteniendo el 15% de apertura de la válvula**

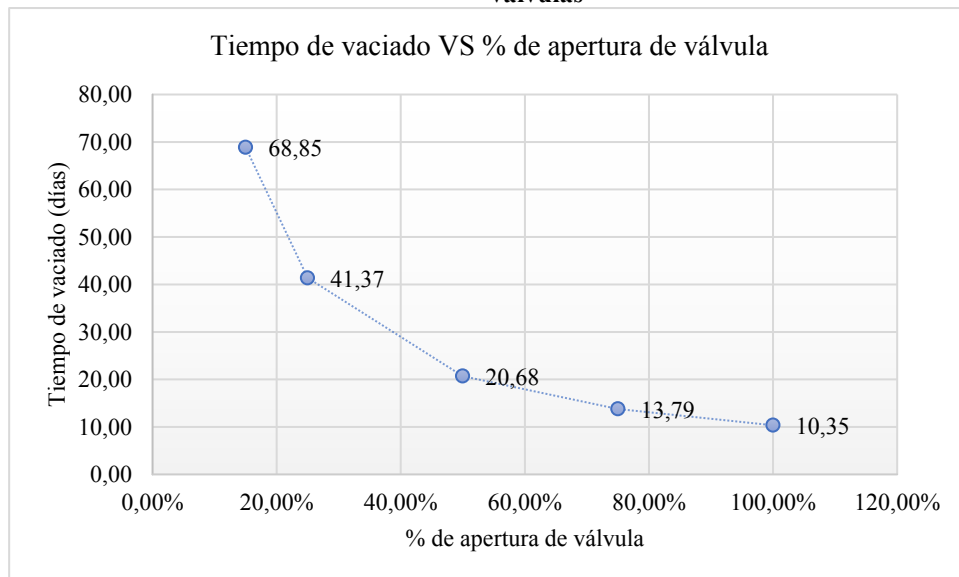


Fuente: Elaboración propia

La figura 47 muestra el caso de una apertura de válvulas al 15%, con esta apertura la presa se vaciaría en 69 días, pero no se podría mantener la descarga mínima requerida de 500 l/s. Por lo

tanto, esta apertura de válvulas no puede descargar el caudal requerido y no es el más aconsejable.

**Figura 48. Resumen del tiempo de vaciado de la presa en función del porcentaje de apertura de válvulas**



Fuente: Elaboración propia

En la figura 48 se presenta un resumen, con el que se puede recomendar los siguientes aspectos para la operación de esta presa, considerando el caudal mínimo requerido de 500 l/s:

- Para una cota de agua de 4626.6 m a 4622 m, se recomienda descargar el agua con una apertura de 25% (16 vueltas)
- Para una cota de agua de 4621 m a 4609 m, se recomienda abrir las válvulas al 50% (33 vueltas)
- Para una cota de agua de 4608 m a 4606 m, se debería descargar el agua con una apertura de 75% de la válvula (49 vueltas)
- Para una cota de agua de 4605 m a 4604 m, aunque se realice una apertura de 100% de la válvula, no será posible mantener una descarga mínima de 500 l/s.



## CAPÍTULO V

### MODELACIÓN DE CALIDAD DE AGUA EN RÍOS CON HEC RAS Y QGIS

#### 5.1 MODELO QGIS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

##### 5.1.1 CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO

Es un software para manejar datos de información geográfica o SIG, en el que permite fácilmente realizar mapas con diferente temática con datos georreferenciados. A diferencia del Arc GIS, el QGIS es un software libre sin costo, se encuentra en constante actualización y su entorno es muy amigable, de fácil manejo y visualización.

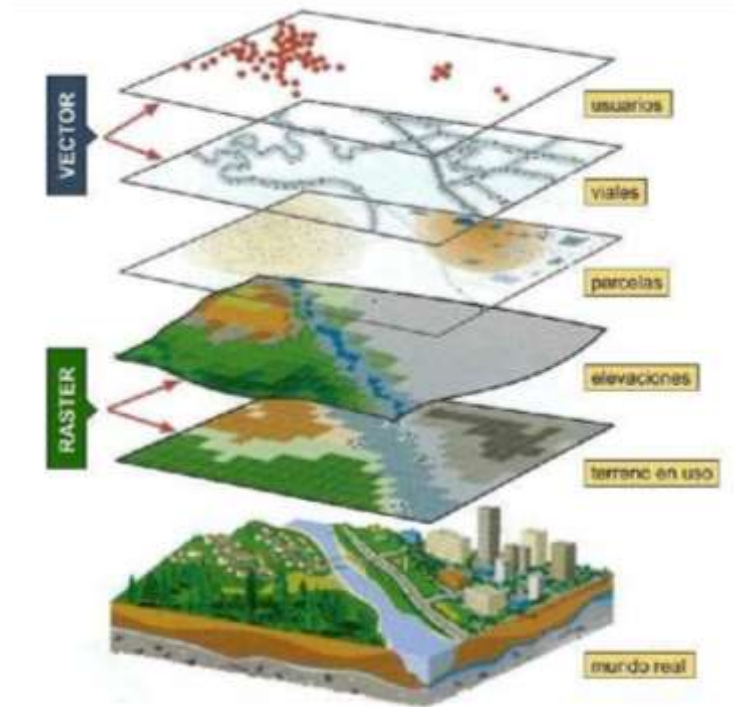
Debido a la gran cantidad de información que se genera en Qgis, es recomendable tener orden en la utilización de los datos, por ejemplo, se recomienda utilizar el siguiente orden en las carpetas:

- 00\_Modelos\_hidrológicos
- 01\_Shapefile
- 02\_Documentos
- 03\_DEM\_topografía
- 04\_Tablas
- 05\_Estilos
- 06\_Archivos\_GIS
- 07\_Mapas\_temáticos
- 08\_Diagramas\_Flujo

El Qgis permite manejar información georreferenciada para diferentes fines, se pueden sobreponer mapas temáticos de manera que se tenga una mejor interpretación. Se pueden utilizar diferentes tipos de datos espaciales como ráster, vectores, modelos digitales, etc.

El QGIS cuenta con varias aplicaciones adicionales denominadas “pluggins” desarrollados por los mismos usuarios, uno de ellos es el RIVERGIS, que permite la elaboración de la geometría de un río (eje del río, secciones transversales) para después exportarlo al Hec Ras.

Figura 49. Tipos de datos espaciales en QGIS



Fuente: (Municipalidad de Loja, 2010)

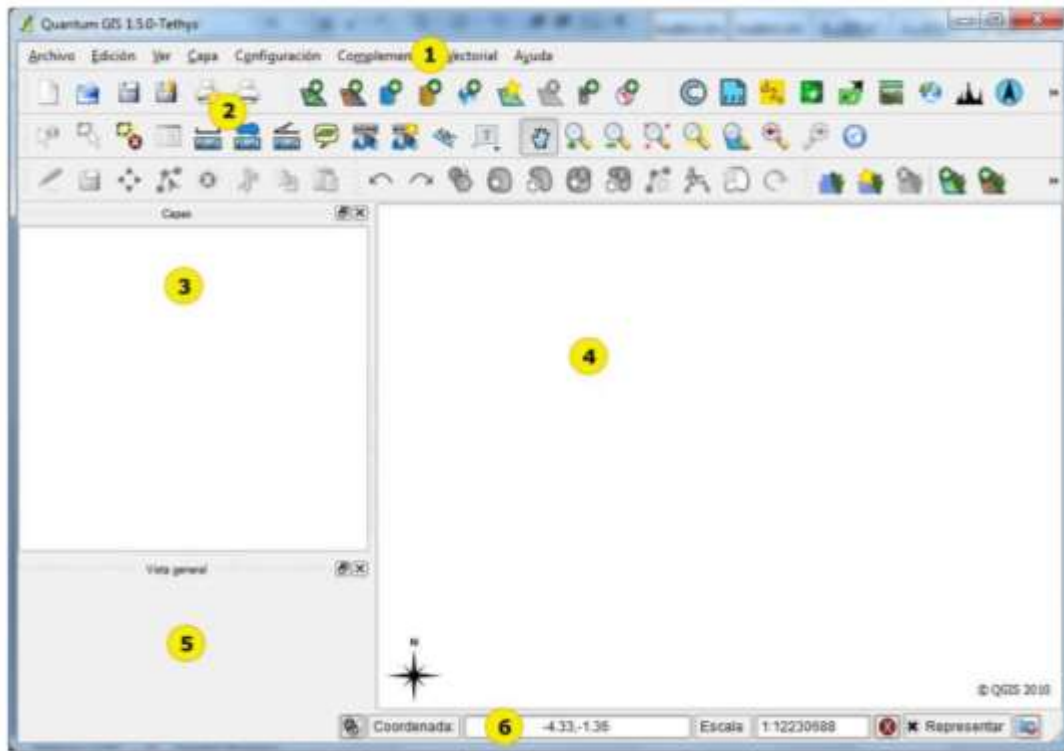
La figura 49 muestra como se puede trabajar en QGIS sobreponiendo diversos mapas con distintas temáticas como elevaciones, vista en planta, fotos satelitales, datos de usuarios, etc. Cada elemento está georeferenciado, así que resulta bastante práctico y útil para el análisis bajo diferentes disciplinas.

### 5.1.2 ELEMENTOS DEL MODELO QGIS

En la figura 50 se presenta la interfaz gráfica de usuario del programa informático QGIS, para una fácil aplicación y visualización de los resultados, la interfaz gráfica está dividida en seis áreas:

1. Barra de menús
2. Barra de herramientas
3. Capas
4. Vista del mapa
5. Vista general del mapa
6. Barra de estado

**Figura 50. Entorno de trabajo en Qgis**



Fuente: (Municipalidad de Loja, 2010)

Qgis admite datos vectoriales en distintos formatos tales como: Shape de ESRI, Mpinfo MIF y Mapinfo TAB, también admite capas de PostGIS en una base de datos PostgreSQL.

El formato de archivo estándar usado en QGIS es el “shapefile” de ESRI, que consiste en múltiples archivos, de los cuales se requiere obligatoriamente los siguientes:

- .shp archivo que contiene las geometrías del objeto espacial
- .dbf archivo que contiene atributos en formato dBase
- .shx archivo de índices
- .prj archivo con información del proyecto

El QGIS soporta diversos sistemas de referencia espacial, dentro de los cuales los más utilizados en nuestro medio son:

- Coordenadas Geográficas y datum global WGS84
- Coordenadas UTM EPSG:32719 WGS84/UTM zone 19S

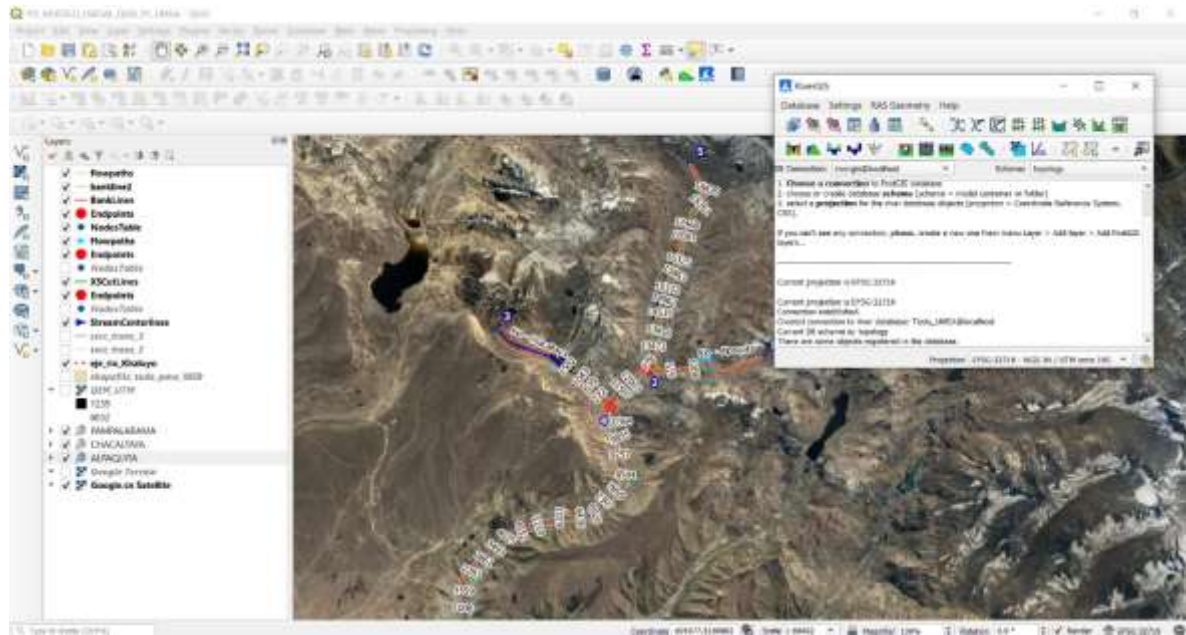
### 5.1.3 FUNCIONAMIENTO DEL MODELO QGIS

Se puede numerar las siguientes etapas para la utilización del modelo QGIS, para la exportación al Hec Ras:

- Recopilación de información con respecto a la georeferenciación del lugar de estudio y el modelo digital del terreno del IGM o GeoBolivia
- Digitalización del río con todas sus áreas de inundación y áreas cercanas, así como la cuenca de aporte correspondiente para cada presa (creación de polígonos en QGIS)
- Verificación de la sobreposición y unión adecuada de cada polígono, a través de sus puntos o vértices.
- Asignación de coeficientes de rugosidad a cada polígono
- Aplicación del componente RIVERGIS, con el que se tiene que digitalizar toda la geometría del sistema hidráulico:
  - Inicialmente se debe instalar una aplicación de manejo de datos denominado PostgreSQL, con el que se puede transferir datos al Hec Ras, crear una base de datos y habilitar las opciones de topología y georeferenciación.
  - También es necesario descargar la aplicación RIVERGIS de las aplicaciones disponibles de la misma plataforma del QGIS.
  - Una vez descargado el RIVERGIS, se ha graficado el eje del río y sus afluentes, ayudado de un mapa satelital que incluye el QGIS.
  - Posteriormente se ha delimitado las fajas marginales (“bankline”) del río o áreas de inundación en función de las condiciones reales del lugar
  - Después se ha conformado las secciones transversales a lo largo de todo el eje y con un ancho adecuado para que el tirante del río se pueda observar fácilmente
  - Finalmente se ha delimitado los “flowpaths” para indicar la dirección del río y el límite de inundación máxima del río.
  - Por último, se hizo reconocer toda la geometría del sistema hidráulico con la aplicación RIVERGIS y se exportó al Hec Ras.

En la figura 51 se presenta la aplicación del modelo QGIS y RiverGis a la digitalización del eje y las secciones transversales del sistema hidráulico del río Khaluyo, para posteriormente exportar la información al modelo Hec Ras.

**Figura 51. Aplicación del modelo QGIS y RIVERGIS para la exportación de la geometría del cauce al Hec Ras**



Fuente: Elaboración propia

Los insumos necesarios para conformar el modelo en QGIS son los siguientes:

- Imágenes satelitales de la cuenca de estudio y el tramo del río en estudio. Esto puede ser recopilado de Google Earth o de imágenes satelitales que tiene incorporado el QGIS en varios formatos y bajo diferentes organismos internacionales.
- Modelos de Elevación Digital, recopilada de la página GeoBolivia
- Georreferenciación de los lugares de estudio

La secuencia del proceso ha sido la siguiente:

1. Identificación del lugar de emplazamiento de las presas
2. Recopilación de un DEM (Modelo Digital de Terreno del lugar), de la página del IMG Bolivia
3. Delimitación del lugar de estudio
4. Digitalización de las zonas con diferentes coeficientes de rugosidad, en función del material en la zona (creación de polígonos en QGIS)
5. Aplicación del componente RiverGIS parte del programa QGIS para la exportación de la geometría del río y sus afluentes



- a. Primero se debe instalar un programa de manejo de datos espaciales, se aplica el software PostgresQ11, este programa ayuda a recopilar y transferir información del QGIS al Hec Ras
- b. Digitalización del eje de los ríos
- c. Creación de secciones transversales
- d. Creación de Bank Station (zonas de inundación)
- e. Creación de Flowpaths (direcciones de flujo)
- f. Exportación al Hec Ras

Como productos del modelo QGIS se pueden mencionar los siguientes:

- Digitalización de terreno
- Digitalización del eje del río
- Conformación de secciones transversales
- Manejo de imágenes satelitales para la ubicación de puntos específicos
- Georreferenciación de puntos requeridos

Como ventajas del modelo QGIS se pueden indicar las siguientes:

- De acceso y descarga libre, no tiene costos adicionales
- El modelo está constantemente en actualización
- Se tiene una comunidad que lo respalda
- Se tienen aplicaciones externas adicionales como los “pluggins” que se crean constantemente por varios usuarios, que facilitan el trabajo en muchos casos
- Uno puede desarrollar sus propios “pluggins” o aplicaciones programando en python y hacerlos conocer a la comunidad
- El programa soporta varios tipos de formato de imágenes satelitales, pueden ser descargado de manera gratuita
- La digitalización es más sencilla que otros programas
- Es compatible con muchos programas modeladores como Hec Ras, IBER, Modflow, etc.
- Se tiene varios tutoriales elaborados por los mismos usuarios
- Tiene muchas herramientas que hace posible un gran número de acciones que mejoran y hacen más rápido muchos procesos.

Como desventajas de QGIS se pueden citar las siguientes:

- Al ser libre uso, algunos de sus “pluggins” no están actualizados a las últimas versiones del programa principal QGIS
- Algunos iconos y herramientas siguen en inglés y no han sido traducidos
- No se tienen tutoriales específicos para la utilización de QGIS para modelación de calidad de agua en ríos con Hec Ras.

## 5.2 MODELO MATEMÁTICO HEC RAS

### 5.1.1 CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO HEC RAS

HEC-RAS es un software de uso libre, en cuyo proceso evolutivo ha venido desarrollando nuevas herramientas de trabajo para el análisis de flujo en diferentes condiciones. Esta evolución va desde las versiones 2.2, la cual analiza el flujo de forma unidimensional en condiciones permanentes, hasta la actual versión 5.0, que permite la modelización en una y dos dimensiones para condiciones permanentes y no permanentes. Para dar una idea de la evolución del software, se muestra la Tabla 15 y Figura 52, donde se detalla el tipo de modelización y las herramientas que han sido incorporadas en cada una de las versiones desarrolladas. (Lluén Chero & Blade Castellet, 2015)

**Tabla 15. Evolución del tipo de modelización y herramientas de análisis de Hec Ras**

Versión HEC-RAS	Modelización 1D	Modelización Cuasi-2D	Modelización 2D	Flujo Permanente	Flujo No Permanente	Análisis de Transporte de Sedimentos	Análisis de Calidad de Agua
2.2	✓			✓			
3.1.3	✓			✓	✓		
4.1.0	✓	✓		✓	✓	✓	✓
5.0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: (Lluén Chero & Blade Castellet, 2015)



Figura 52. Evolución de la interfaz de HEC RAS a lo largo de sus diferentes versiones



Fuente: (Lluén Chero & Bladé i Castellet, Tesis de Master: Aplicación de la nueva herramienta Hec Ras 5.0 para calculos bidimensionaels del flujo de agua en ríos, 2015)

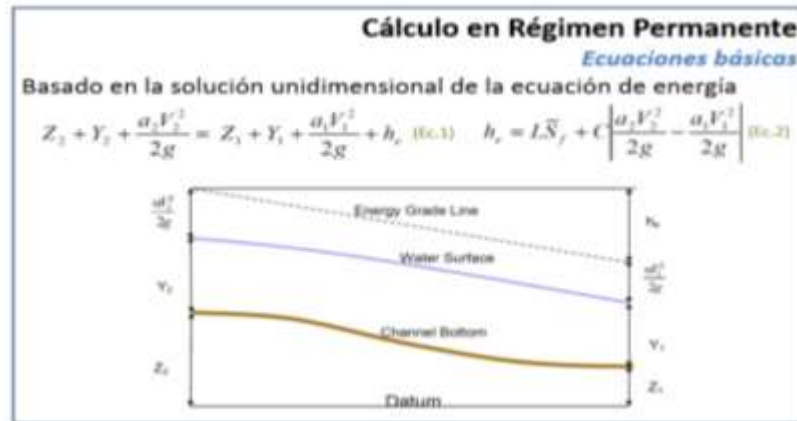
HEC-RAS está diseñado para realizar cálculos hidráulicos de una y dos dimensiones para una red completa de canales naturales y construidos. La siguiente es una descripción de las principales capacidades de HEC-RAS.

- Interfaz de usuario
- Componentes de análisis hidráulico
- Almacenamiento y gestión de datos
- Gráficos e informes
- RAS Mapper

Por defecto el HEC-RAS realiza 20 iteraciones por sección, en el caso de no contar con una solución adecuada, compara la altura crítica con el menor error de la iteración. Si no concuerda con la altura con el régimen del problema y su error es menor de 10 cm el programa entrega ese valor. En caso de no cumplir con el régimen, arroja altura crítica en esa sección (Sánchez

Delgado, 2017). Las figuras 53 y 54 muestran las fórmulas y esquemas que utiliza el Hec Ras para realizar la modelación hidráulica de un río:

Figura 53. Ecuación de energía



Fuente: Hidráulica Fluvial, Clases HEC RAS, Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires

Donde:

$Z_1, Z_2$  = Cota de la solera del canal en los puntos 1 y 2

$Y_1, Y_2$  = Tirante en las secciones 1 y 2

$V_1, V_2$  = Velocidades en las secciones 1 y 2

$\alpha_1, \alpha_2$  = Coeficientes de Coriolis en cada sección, corrige el hecho que la distribución de velocidad en la sección se aleja de una distribución uniforme

$g$  = aceleración de la gravedad

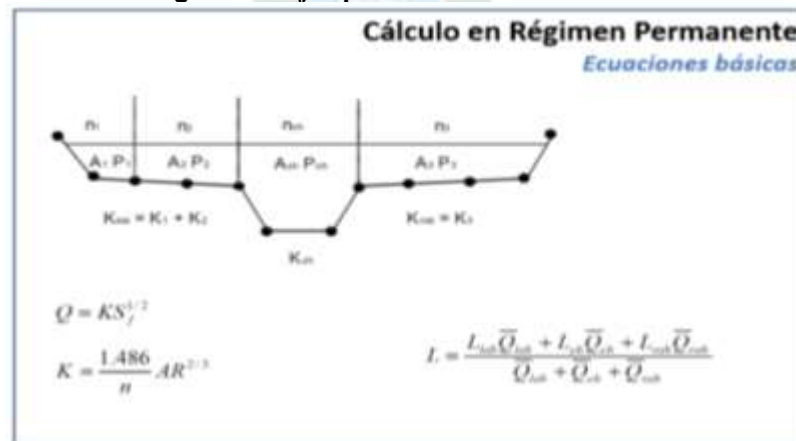
$h_e$  = Pérdida de carga de energía

$L$  = Longitud del tramo donde hay una contracción o una expansión

$S_f$  = Pendiente de fricción representada entre dos secciones

$C$  = Coeficiente de pérdidas por expansión o contracción

Figura 54. Ejemplo de sección transversal del río



Fuente: Hidráulica Fluvial, Clases HEC RAS, Facultad e Ingeniería Universidad de Buenos Aires

### 5.1.2 DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELO

La figura 55 muestra un diagrama de procesos con el que se realiza las modelaciones hidráulicas en el Hec Ras. Inicialmente se debe completar un preproceso, que es la inclusión al programa de los datos de entrada (geometría y condiciones de contorno del flujo), con estos datos se realiza el cálculo con esquemas numéricos y finalmente se puede tener los resultados en el postproceso.

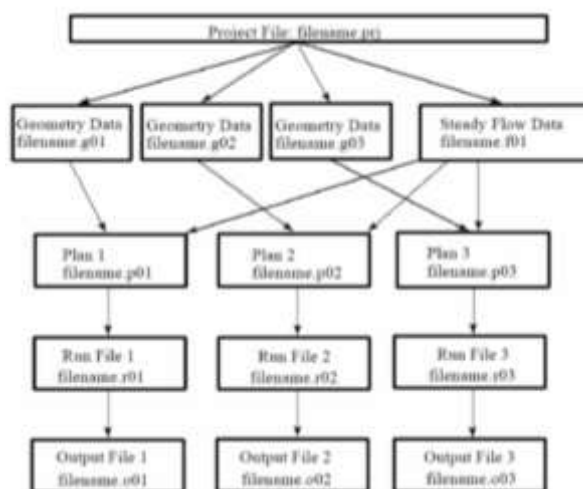
**Figura 55. Diagrama de procesos en Hec Ras**



Fuente: (Grupo de ingeniería del agua y del medio ambiente, 2019)

La figura 56 presenta un esquema de la estructura de un proyecto en Hec Ras, el documento principal es denominado “project file” con extensión “.prj”, este documento generará otros archivos secundarios como los “geometry data”, en el que se guardan todas las geometrías del río, pudiendo tener varios archivos como variaciones de geometría se requieran en el estudio. Así también, se tiene los archivos “Plan” que son las combinaciones de los archivos de geometría con los archivos “steady flow data” en el que se guardan los datos de caudales, finalmente se tiene los archivos “run file” y “output file” que son las diferentes corridas del programa y sus resultados para diversas combinaciones.

**Figura 56. Estructura de un proyecto en Hec Ras**



Fuente: (Hydraulic Reference Manual, 2019)

### 5.1.3 COMPONENTES PARA EL DESARROLLO DEL MODELO HEC RAS

HEC-RAS está diseñado para realizar cálculos hidráulicos de una y dos dimensiones para una red completa de canales naturales y construidos. La siguiente es una descripción de los principales componentes del HEC-RAS (Toda la información desarrollada se puede encontrar en [www.hec.usace.army.mil](http://www.hec.usace.army.mil)).

- [Interfaz de usuario](#)
- [Componentes de análisis hidráulico](#)
- [Almacenamiento y gestión de datos](#)
- [Gráficos e informes](#)
- [RAS Mapper](#)

### 5.1.4 INSUMOS

Se puede mencionar como insumos los siguientes datos que son necesario introducir al modelo Hec Ras:

- Datos de plan
- Datos geométricos
- Datos de flujo estacionario
- Datos de flujo no estacionario
- Datos de diseño hidráulico

Para iniciar se debe tener las siguientes consideraciones:

- Elección de un modelo numérico:
  - 1d, 2d, 3d, (velocidad, precisión, datos necesarios). Para este estudio se consideró 1d
  - Estacionario o transitorio. Para este estudio se consideró estacionario
- Elección del tramo a modelar
- Discretización del dominio espacial (secciones, malla)
- Calibración

### 5.1.5 PROCEDIMIENTO

El HEC-RAS en su versión 5.0, puede realizar un análisis de calidad de agua, en el que se puede introducir las concentraciones iniciales de varios contaminantes, se pueden incluir campañas de

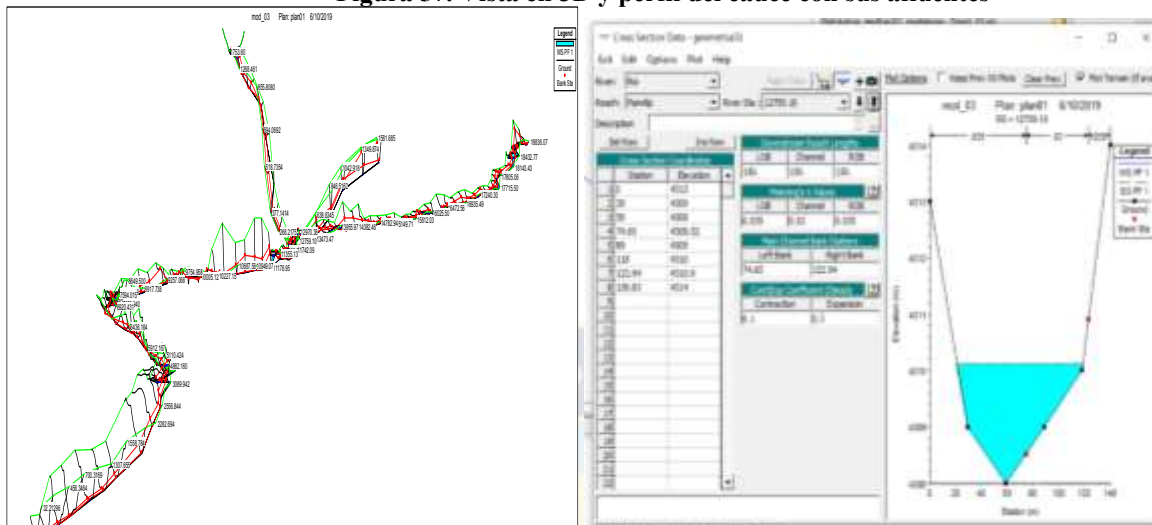
muestreo y también algunos datos referenciales para comparación. A continuación, se presenta el procedimiento que se ha seguido para la realización de este trabajo:

- Primero se ha realizado la digitalización de toda la geometría del sistema hidráulico del río Khaluyo en el programa QGIS y se han exportado estos datos a través de la aplicación RIVERGIS a archivos con extensión “.sdf” que es un formato que reconoce el Hec Ras.
- Se ha importado el archivo de geometría realizado en QGIS.
- Se ha incluido las alcantarillas respectivas a la salida de las presas Alpaquita y Pampalarama y la alcantarilla múltiple en el sector del puente Khaluyo.
- Se debe determinar los coeficientes de rugosidad para cada sección transversal tanto en el eje del río como en las fajas marginales
- Se ha incorporado los caudales iniciales como condiciones de borde
- Finalmente se procede al cálculo hidráulico
- Una vez realizado el cálculo hidráulico se utilizó la aplicación “water quality” para ingresar las concentraciones de los contaminantes considerados (Fe,Al,Mn y Sb), estos contaminantes simularon con la opción “constituyentes arbitrarios”
- Se ha incluido también las concentraciones determinadas en la campaña de muestreo de fecha 15 de mayo de 2019
- Se ha incluido también los límites determinados en la NB-512 para agua destinada al abastecimiento de agua potable.
- Se procedió al cálculo de la simulación considerando un tiempo de cálculo para el transporte del contaminante y se puede ver los resultados con dos opciones, la primera a lo largo del río con una gráfica de perfil hidráulico y la segunda se pueden observar las concentraciones en cada sección transversal en función del tiempo considerado para la simulación



## 5.1.6 RESULTADOS QUE MUESTRA EL MODELO HEC RAS

Figura 57. Vista en 3D y perfil del cauce con sus afluentes

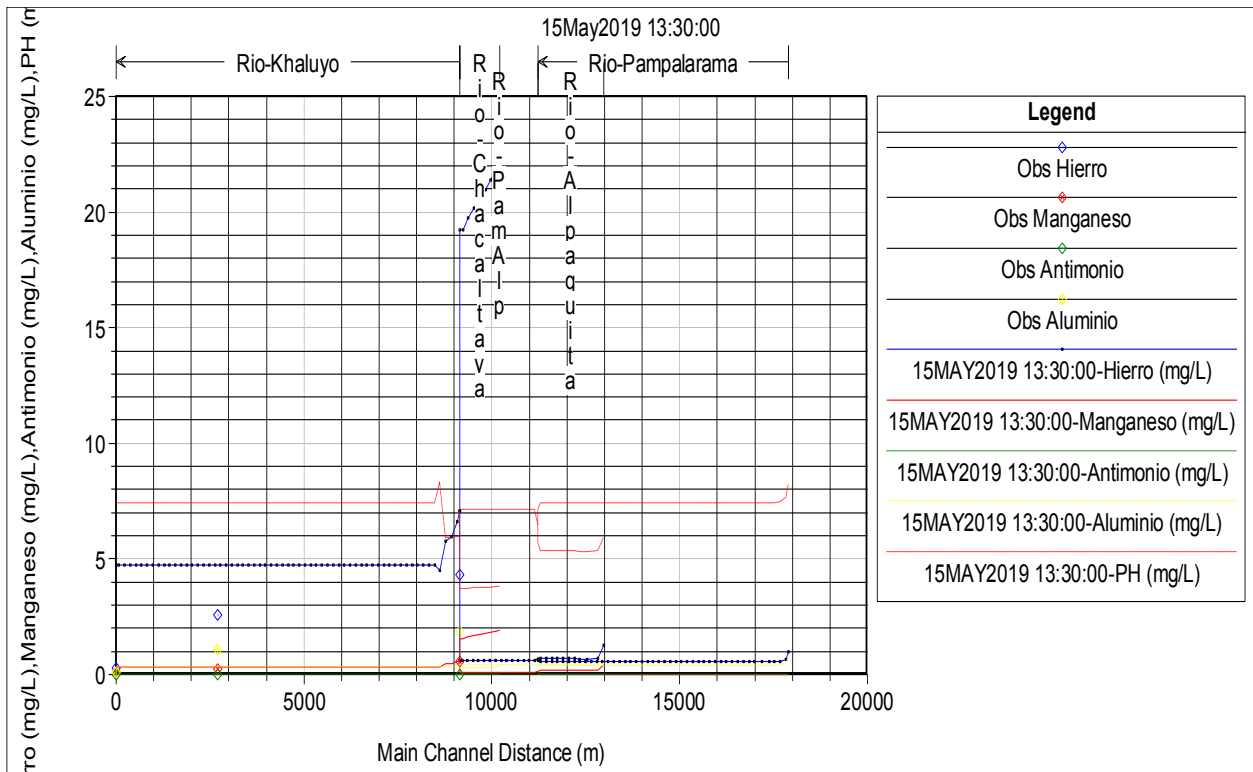


Fuente: Elaboración propia

La figura 57 muestra el sistema hidráulico completo del río Khaluyo digitalizado en el Hec Ras con sus ejes de los ríos (línea roja) y todas las secciones transversales consideradas numeradas cada una; en el lado derecho se muestra un ejemplo de una sección transversal, en el que se puede ver en el lado izquierdo las coordenadas de los puntos que conforman la sección transversal, en el medio se tienen las distancias a la siguiente sección transversal, el coeficiente de Manning en el eje y áreas de inundación, las coordenadas del canal principal y los coeficientes de contracción y expansión; así también se muestra de forma visual la sección transversal con la superficie del agua calculada.

En la figura 58 se presenta un ejemplo del resultado de la simulación de calidad de agua realizada en Hec Ras para todo el sistema del río Khaluyo, en el que se puede ver todos los contaminantes considerados con diferentes líneas y colores a lo largo del río principal y sus tributarios, el análisis se hace en función del tiempo y a lo largo del río. Es necesario procesar la información en gráficos más entendibles como se hizo en esta investigación, dado que los resultados no están listos para imprimir y hacer un reporte (por las escalas y gráficos muy básicos), sin embargo, presenta muchas ventajas en la operación y visualización de resultados en el mismo programa, una vez analizado los resultados, se debe realizar un proceso de interpretación en Excel para mejorar la presentación.

**Figura 58. Resultados de la simulación de calidad de agua para cada contaminante, con respecto al tiempo y para cada sección transversal**



Fuente: Elaboración propia

### 5.1.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Como ventajas se pueden mencionar las siguientes:

- Puede realizar la simulación de constituyentes arbitrarios, que es la opción que mejor se aproxima a una contaminación con elementos producto de actividad minera.
- Combina la simulación hidráulica con la simulación de calidad de agua, lo que proporciona resultados más confiables
- Permite fácilmente la calibración del modelo en función de estructuras conocidas como alcantarillas y puentes
- Permite la simulación de contaminantes de cualquier tipo como metales pesados.
- La simulación de contaminantes lo realiza a lo largo del río y a lo largo de un tiempo determinado, considerando la variación de las propiedades hidráulicas a lo largo del río (tirante, velocidad, número de Reynolds, etc.), paralelamente calcula el balance de masa para compuestos conservativos en las uniones de los ríos y finalmente resuelve la ecuación del balance de masa para compuestos no conservativos a lo largo de todo el



tramo del río y en un tiempo determinado, dado que la variación en la concentración del contaminante estará en función directa con el tiempo.

- Se pueden incluir datos observados de diferentes campañas de muestreos para poder realizar las comparaciones en el proceso de calibración del modelo
- Se pueden añadir también valores límites superiores, inferiores o también un rango aceptable, para realizar comparaciones con las normativas correspondientes, de manera que se pueda tener una interpretación más rápida y gráfica.
- En las últimas versiones se han añadido resultados más entendibles con variación de colores para las diferentes concentraciones mostradas en planta en todo el sistema hidráulico y también se tiene un detalle en tablas.
- El Hec Ras presenta dos opciones de visualización de resultados: “WQ Spatial Plot” y “WQ Time Series Plot”; en la primera opción se puede visualizar los resultados a lo largo de los ríos y en la segunda opción se muestra la variación de las concentraciones en cada sección transversal a lo largo del tiempo de modelación

Desventajas: A continuación, se mencionarán algunas de las limitaciones de la modelización en HEC-RAS 1D, para su versión 5.0:

- El software no modela calidad de agua con una simulación hidrodinámica en 2D, solo con una simulación hidrodinámica en 1D; es decir, no es posible todavía determinar las concentraciones producidas por una simulación realizada con una grilla 2D (inundaciones), en la aplicación “Ras Mapper” necesariamente se debe introducir secciones transversales para que se habilite la aplicación “Water Quality”, la variación en las concentraciones de los contaminantes son calculadas para cada sección transversal, aun no se tiene la modalidad de cálculo de calidad de agua en una grilla 2D sin secciones transversales.
- Los mensajes de error deben ser bien interpretados, por este motivo se hace un proceso de prueba y error hasta determinar exactamente el problema.
- Los gráficos no son muy didácticos, requieren un proceso previo para ser presentados en informes.

## CAPÍTULO VI

### RESULTADOS DE LA MODELACIÓN EN HEC RAS

#### 6.1 TRABAJO DE CAMPO -CAMPAÑA DE MUESTREO

Con el objetivo de calibrar el modelo Hec Ras se realizó la medición de caudales y toma de muestras para determinar la concentración de Fe, Mn, Sb, Al y Hg en 5 lugares denominados puntos de control.

A continuación, se presenta un mapa (Figura 59, 60, 61 y 62) con la ubicación de los puntos de muestreo:

Figura 59. Ubicación de los puntos de muestreo



Fuente Elaboración propia

Figura 60. Puntos de aforo y muestreo 1 y 2



Fuente Elaboración propia

**Figura 61. Puntos de aforo y muestreo 3 y 4**



Fuente Elaboración propia

**Figura 62: Punto de muestreo 5**



Fuente Elaboración propia

Se identificaron las siguientes estructuras de secciones conocidas para realizar las mediciones de caudal y al mismo tiempo se realizaron los muestreos para el análisis de calidad de agua:

- Tubo de acero corrugado de 1m de diámetro a la salida de la presa Alpaquita
- Alcantarilla doble de cemento de 1 m de diámetro a la salida de la presa Pampalarama
- Vertedero de descarga de aguas ácidas a la salida de la presa Chacaltaya
- Alcantarilla múltiple (7 tubos múltiples de cemento) en el lugar denominado puente Khaluyo
- Puente Limanipata, antes de entrar a la ciudad de La Paz
- Estación de Achachicala (datos proporcionados por el SENAMHI)

Los resultados del aforo y las concentraciones de los parámetros de contaminación del agua se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 16. Resultados del aforo y calidad de agua**

N°	Ubicación	Calidad de Agua (campaña de muestreo MAYO 2019)						
		Caudal medido (l/s)	Hierro (mg/l)	Manganes o (mg/l)	Antimonio (mg/l)	Aluminio (,g/l)	Merurio (mg/l)	PH
1	Presa Alpaquita	14.51	1.4977	0.508	0.008	0.92	0	5.9
2	Presa Pampalarama	96.56	1.0275	0	0.008	0.764	0	8.2
3	Presa Chacaltaya	6.28	34.396	2.987	0.007	0.484	0	3.8
4	Puente Khaluyo	119.10	4.3315	0.542	0.008	1.875	0	8.2
5	Puente Limanipata	-----	2.5845	0.245	0.009	1.08	0	7.9
6	Estación Achachicala	193.4	Dato proporcionado por el SENAMHI					

Fuente Elaboración propia

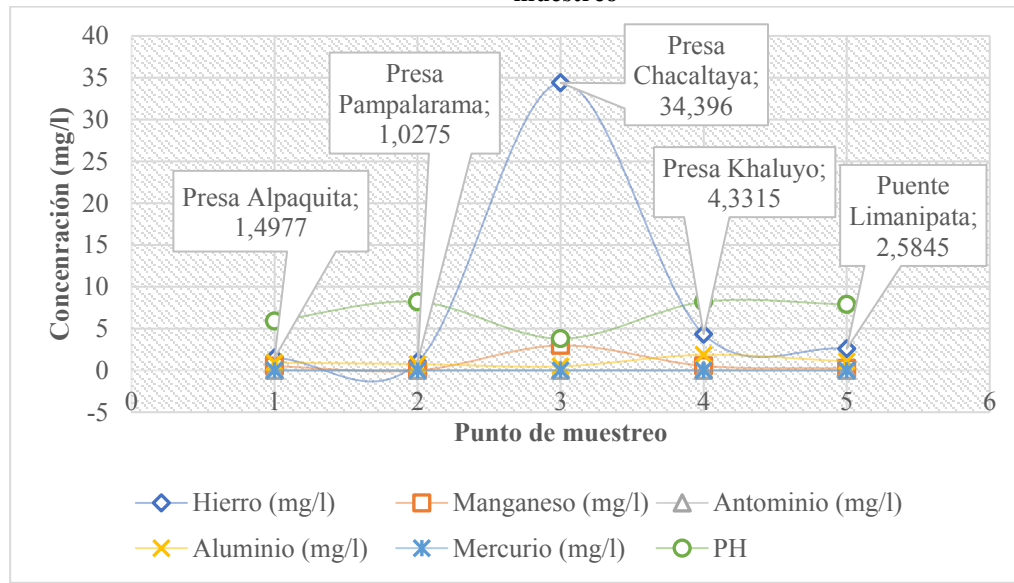
En el cuadro de la tabla 16 se puede apreciar que existe una reducción en las concentraciones de Fe, Mn y Al desde el punto 4 al punto 5, lo que indica que existe una recuperación de la calidad del agua del río, en cambio, en el caso del aluminio existe un incremento. Con respecto al PH se tiene un valor bajo en Alpaquita (ácido) y alto en Pampalarama (alcalino), en cambio en la presa Chacaltaya se tiene un valor muy bajo (ácido) por la presencia de las descargas de aguas ácidas. Pero se puede apreciar una mejora en el valor de PH en el punto 5 (final del tramo antes de llegar a la ciudad de La paz)

En las muestras analizadas no se encontró presencia de Mercurio, por lo que no se consideró este contaminante en este análisis.

Para una mejor comprensión se presenta la figura 63, donde se aprecia la evolución de las concentraciones de los contaminantes a lo largo de los 5 puntos de control:

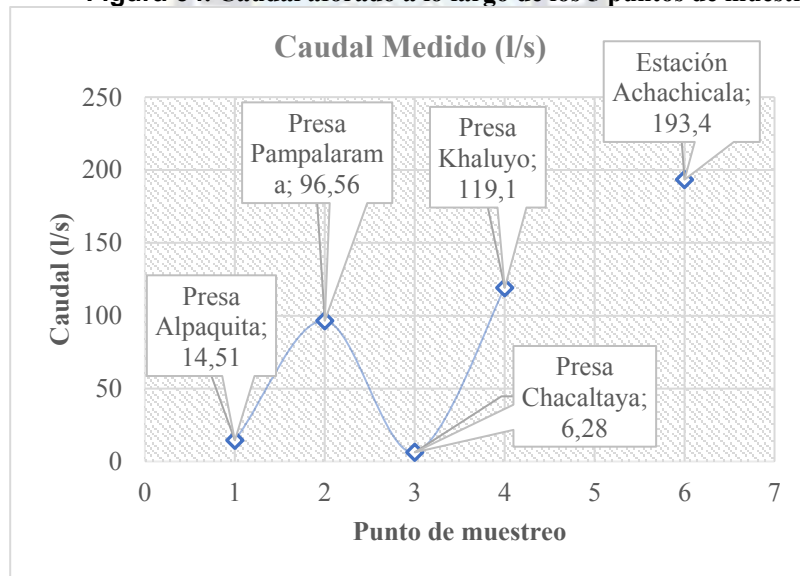


**Figura 63. Evolución de las concentraciones de contaminantes a lo largo de los 5 puntos de muestreo**



Fuente Elaboración propia

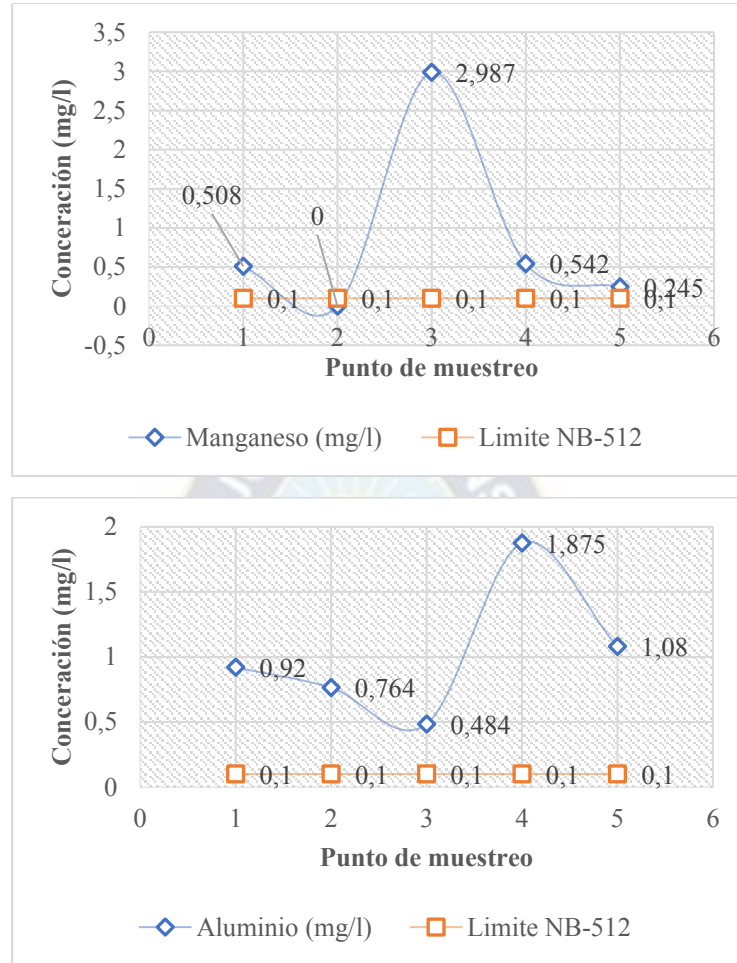
**Figura 64. Caudal aforado a lo largo de los 5 puntos de muestreo**



Fuente Elaboración propia

En la figura 64 se puede observar los caudales medidos en 4 puntos de la campaña de muestreo y el sexto punto es un dato recolectado del SENAMHI en la estación de Achachicala. Los tres primeros valores de concentración y caudal no tienen relación debido a que no se encuentran en el mismo río, están ubicados en los tres tributarios del río Khaluyo (Alpaquita, Pampalarama y Chacaltaya), en cambio los puntos 4 y 6 están sobre el mismo río Khaluyo.

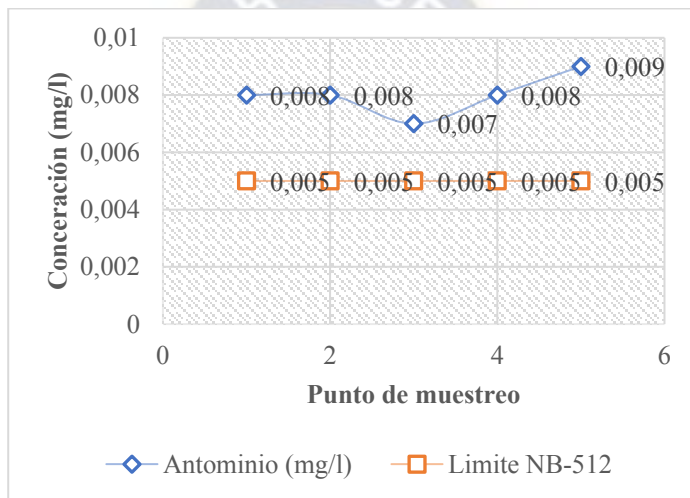
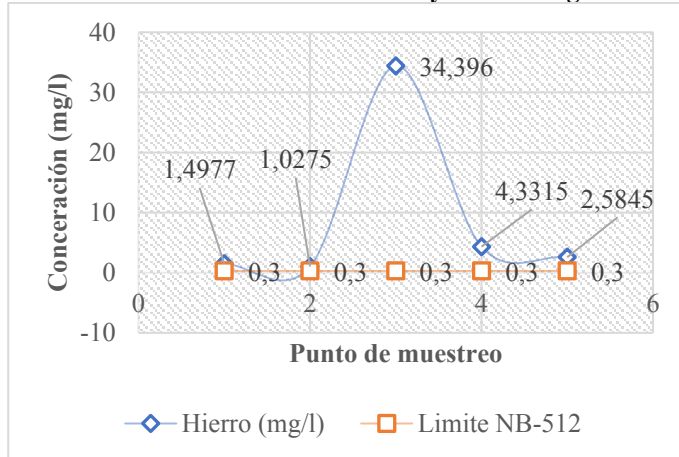
**Figura 65. Evolución de la concentración de Mn y Al a lo largo de los 5 puntos de muestreo**



Fuente Elaboración propia

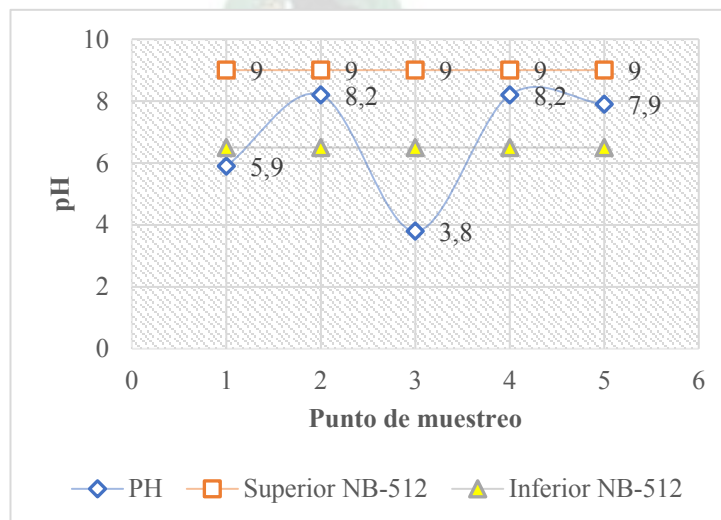
En la figura 65 se observa lo siguiente: En el punto 1 (Alpaquita) y 2 (Pampalarama) se puede observar que las concentraciones de Mn y Al son bajas, en el punto 3 (Chacaltaya) las concentraciones de Mn y Al son altas por la presencia de actividad minera, por lo que en el punto 4 (puente Khaluyo) tienen una elevada concentración principalmente del Mn, pero se muestra una reducción de su concentración en el punto 5 (puente Limanipata). A continuación (figura 66 y 67), se muestra la evolución de las concentraciones de los siguientes contaminantes: Fe y Sb, así como los valores de pH.

**Figura 66. Evolución de la concentración de Fe y Sb a lo largo de los 5 puntos de muestreo**



Fuente Elaboración propia

**Figura 67. Variación del PH en los 5 puntos de muestreo**



Fuente Elaboración propia



Analizando los puntos 4 y 5 que están sobre el mismo río, se nota una reducción en la concentración del Fe, Mn, Al y un ligero incremento en la concentración de Sb (ver figuras 65 y 66).

## **6.2 CALIBRACIÓN HIDRODINÁMICA DEL MODELO**

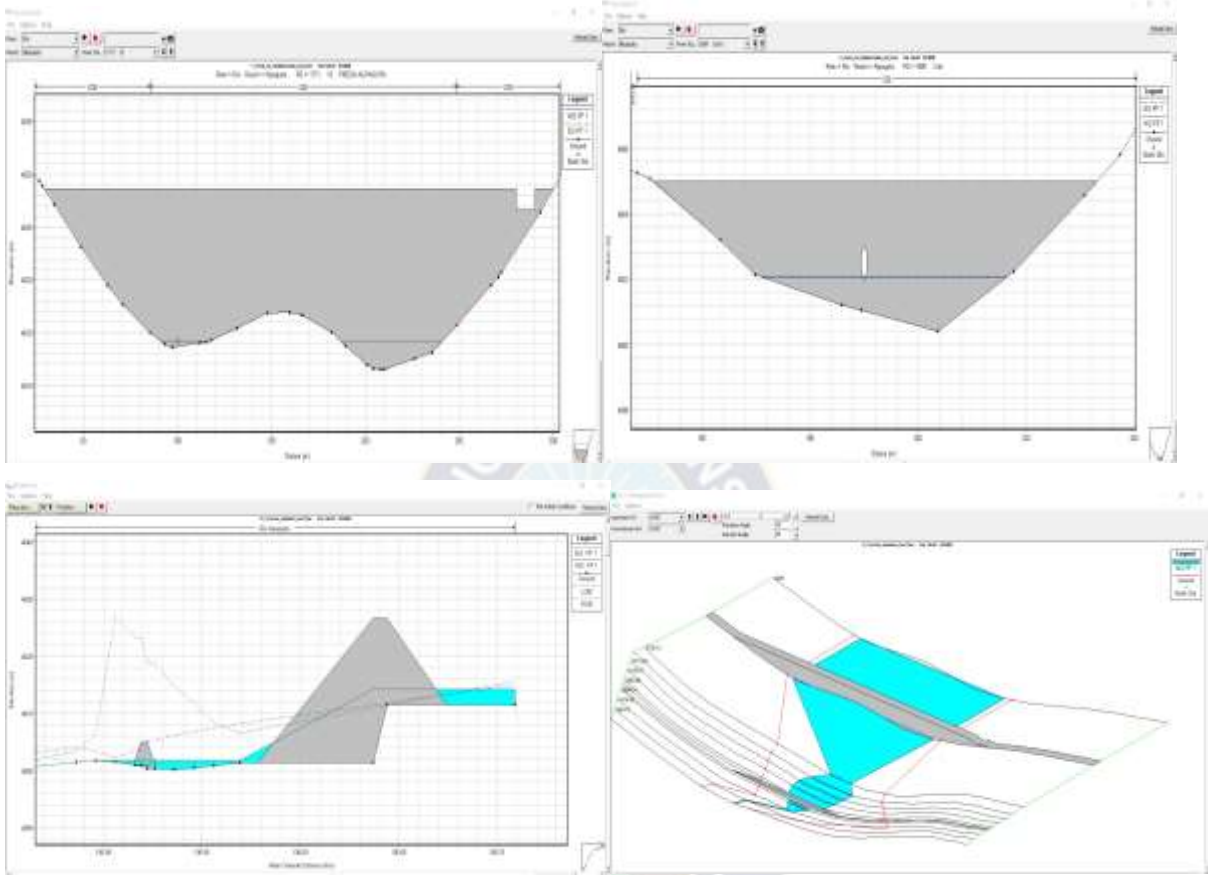
Para calibrar el modelo hidrodinámico se utilizó como variable independiente el coeficiente de rugosidad de Manning y como variable dependiente el tirante del agua, dado que el caudal es un dato de partida que debe ser introducido al Hec Ras para satisfacer la condición de la continuidad.

Se realizaron varias modificaciones al coeficiente de rugosidad “n” y se compararon los valores de tirante en los puntos de control donde se realizaron los aforos, se escogieron 4 estructuras presentes en el sistema, en estas se realizaron los aforos por el método del flotador a través de las siguientes estructuras hidráulicas:

1. Alcantarilla simple de 1m de diámetro con tubo de cemento, a la salida de la presa Alpaquita, que sirve como parte del acceso de los vehículos
2. Alcantarilla doble con dos tubos metálicos corrugados de 1m de diámetro cada uno, a la salida de la presa Pampalarama
3. Alcantarilla múltiple de 7 tubos de cemento construido recientemente por la ABC en el lugar llamado “puente Khaluyo”
4. Estación meteorológica de Achachicala (datos proporcionados por el SENAMHI), donde se tiene un limnómetro (regla graduada) con el que se registra el tirante del agua todos los días y cada fin de semana se realiza el aforo del río con caudalímetros calibrados por el SENAMHI.

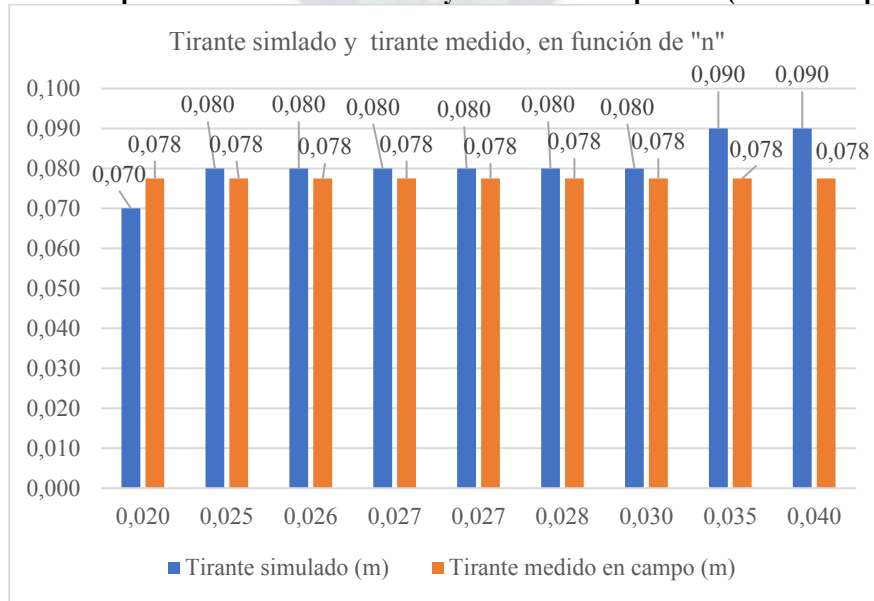
La figura 68 muestra la modelación en Hec Ras de la primera sección de control correspondiente a la alcantarilla simple delante de la presa Alpaquita, se muestra la sección transversal de la presa Alpaquita, la sección transversal de la alcantarilla simple como estructura de control, el perfil longitudinal de las dos estructuras y finalmente la vista en tres dimensiones de las dos estructuras, además se muestra el nivel del agua en cada una de las secciones con el que se realizó la calibración hidrodinámica en el primer punto de control.

**Figura 68. Presa Alpaquita y alcantarilla modelados en Hec Ras**



Fuente Elaboración propia

**Figura 69. Comparación del tirante medido y simulado en el punto 1 (cerca de la presa Alpaquita)**

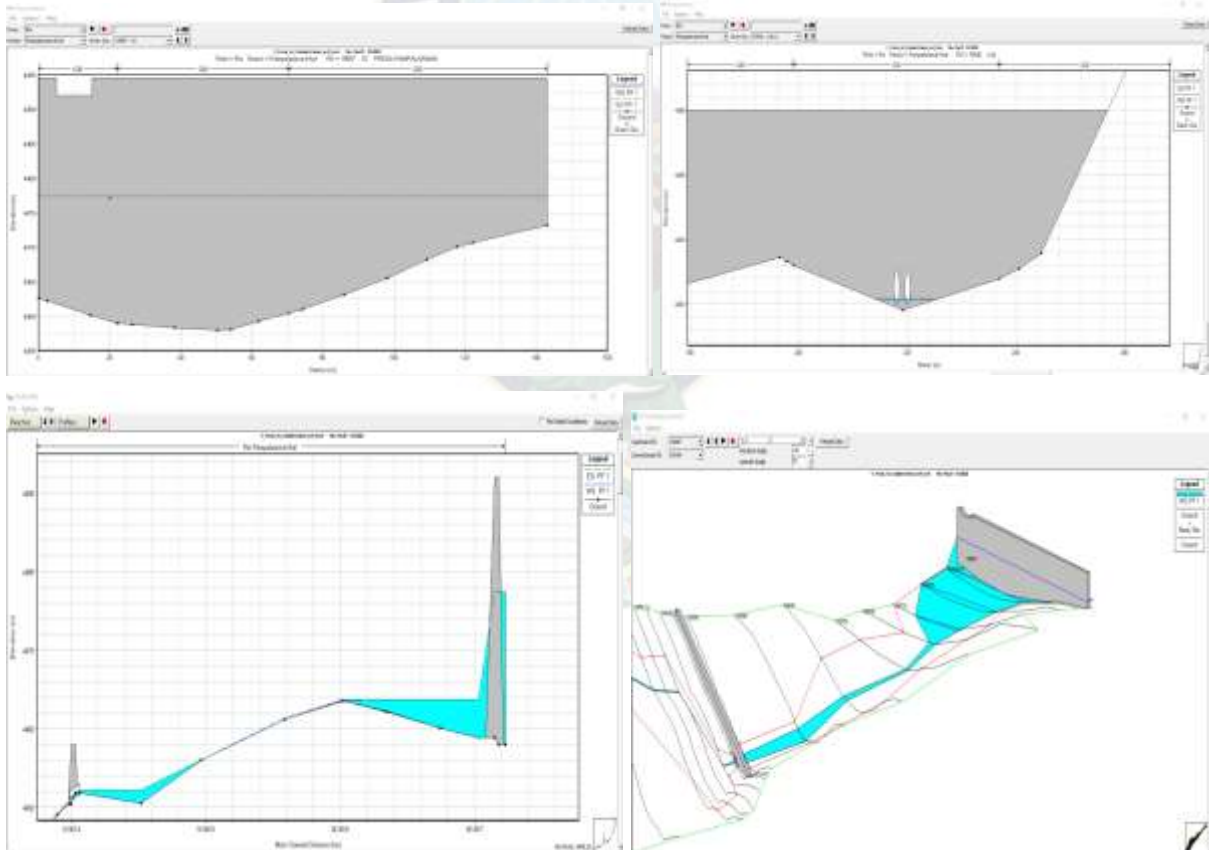


Fuente Elaboración propia

La figura 69 muestra los resultados de la calibración hidrodinámica, con diferentes valores del coeficiente de rugosidad “n” para la tubería corrugada de la alcantarilla (desde 0.020 hasta 0.040), con estos valores se han calculado diferentes tirantes en la estructura de control (alcantarilla) y se han comparado con los valores medidos en campo, dando como resultado valores de “n” que reproduce el tirante medido en campo (0.078 m) desde el valor de 0.025 hasta 0.030, estos valores tienen relación con la bibliografía que indica un rango de valores desde 0.021 hasta 0.030 (véase anexo VI) para conductos cerrados de metal corrugado.

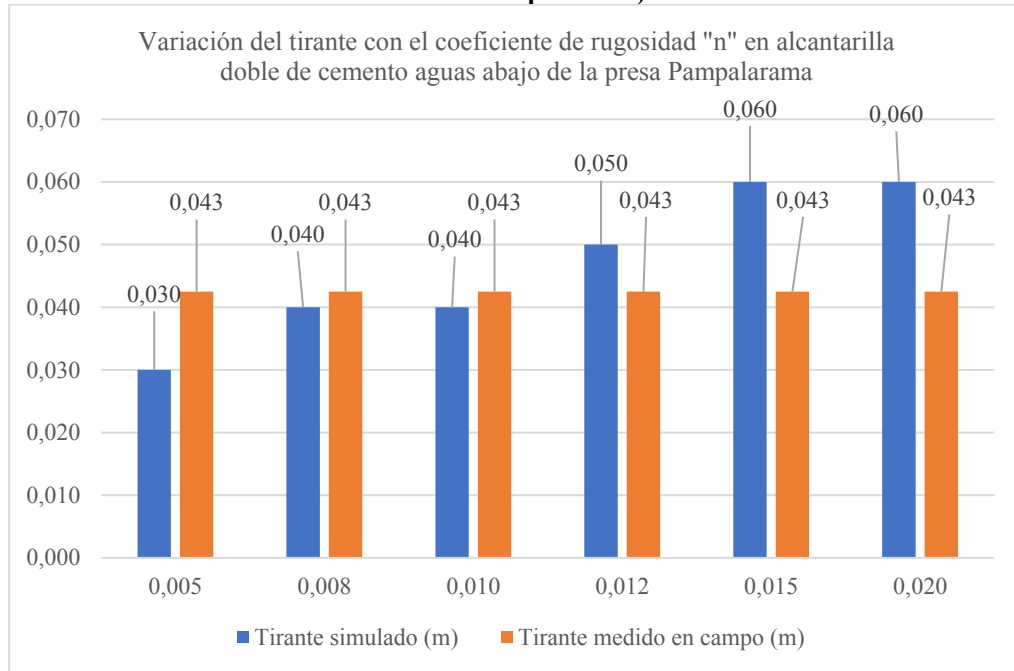
En la figura 70 se muestra la alcantarilla y la presa Pampalarama modelada en Hec Ras, considerada como segundo punto de control, se muestra la sección transversal de la presa Pampalarama, la sección transversal de la alcantarilla delante de la presa, el perfil longitudinal y finalmente la vista tridimensional de las dos estructuras, cada una de las vistas presenta el nivel del agua considerado para la calibración hidrodinámica.

**Figura 70. Presa Pampalarama y alcantarilla doble modelados en Hec Ras**



Fuente Elaboración propia

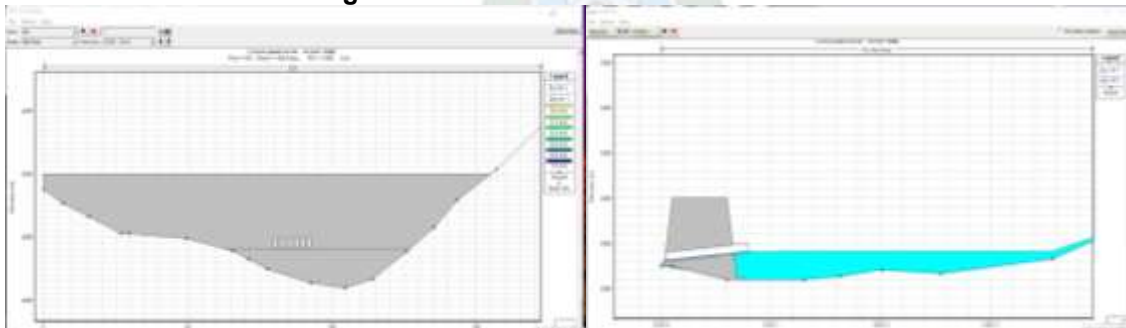
**Figura 71. Comparación del tirante medido y simulado en el punto 2 (cerca de la presa Pampalarama)**

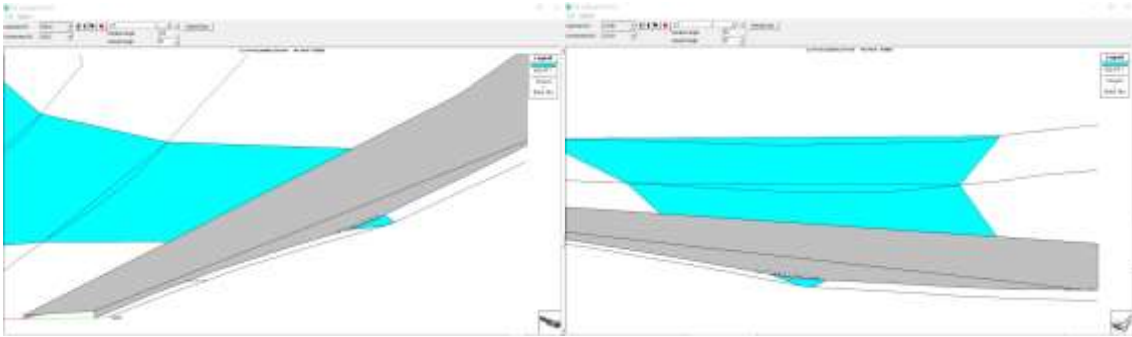


Fuente Elaboración propia

La Figura 71 muestra los resultados de la calibración hidrodinámica en la alcantarilla doble “aguas abajo” de la presa Pampalarama, se han calculado varios tirantes para diferentes coeficientes de rugosidad “n”, estos tirantes han sido comparados con los tirantes medidos en la campaña de muestreo en el mismo lugar. Se observa que el valor del tirante medido es reproducido en el modelo para los valores del coeficiente de rugosidad “n” desde 0.008 hasta 0.010, lo cual tiene relación con la bibliografía recomendada para tuberías de cemento (véase Anexo VI).

**Figura 72. Alcantarilla de siete tubos modelado en Hec Ras**

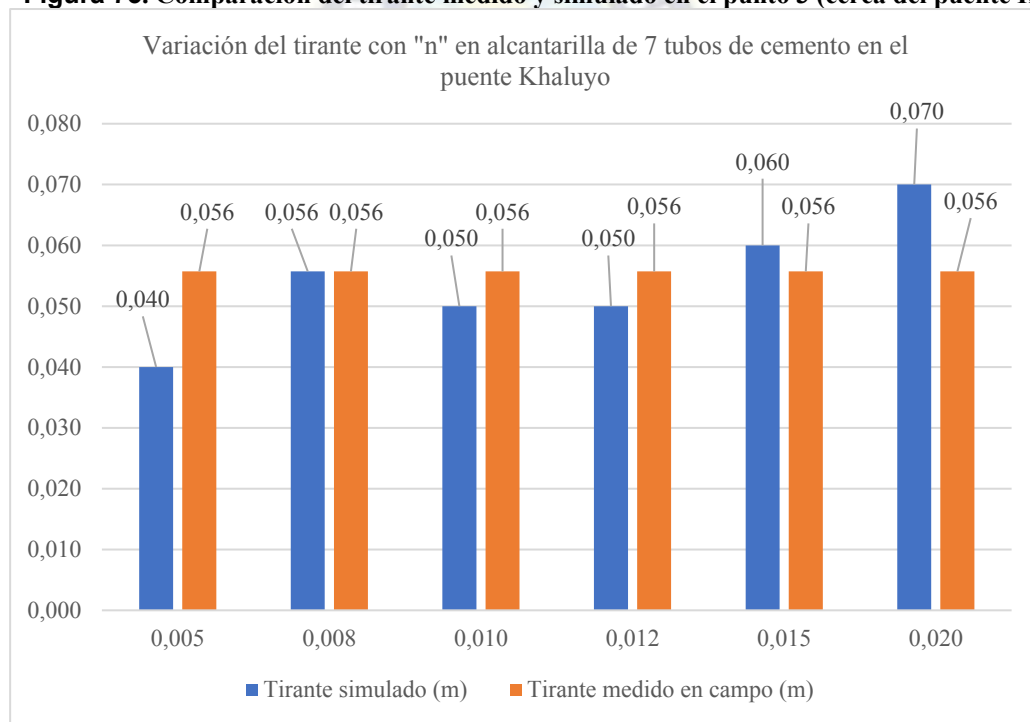




Fuente Elaboración propia

La figura 72 muestra la alcantarilla de siete tubos que se encuentra cerca al puente Khaluyo, se puede observar la sección trasnversal, el perfil longitudinal y las vistas en tres dimensiones de la estructura considerada como punto de control 3.

**Figura 73. Comparación del tirante medido y simulado en el punto 3 (cerca del puente Khaluyo)**



Fuente Elaboración propia

En la figura 73 se muestran la comparación del tirante simulado con el Hec Ras y el tirante medido en campo, se puede observar que el tirante simulado se acerca mucho al tirante medido en campo para valores del coeficiente de rugosidad “n” desde 0.008 a 0.015, que tiene relación con los valores recomendados en la bibliografía (ver Anexo VI). El valor de “n” que reproduce el valor más cercano al tirante medido es de 0.015.

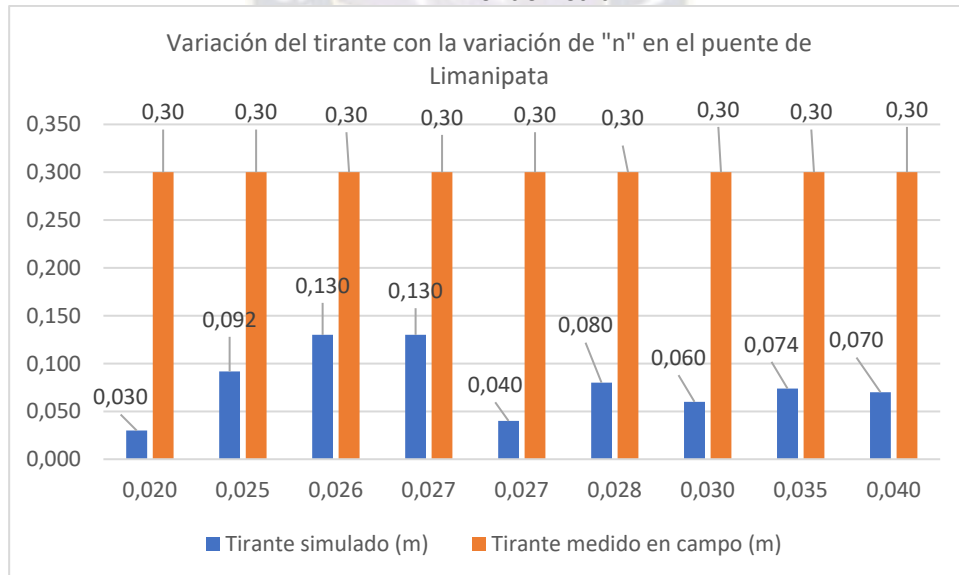
**Figura 74. Velocidad calculada en los puntos 1,2 y 3 y sus coeficientes de correlación respecto a “n”**



Fuente Elaboración propia

En la figura 74 se muestra el punto final del estudio, a la altura de la estación Achachicala, donde el SENAMHI realiza mediciones periódicas de tirante del agua y caudal con caudalímetro calibrado, esta información fue proporcionada por el SENAMHI para el mismo día en la que se ha realizado la campaña de muestreos para esta investigación.

**Figura 75. Resultados de la Calibración hidrodinámica en el punto de control 4, Estación Achachicala**



Fuente Elaboración propia

.La figura 75 muestra los valores de tirante de agua simulados en el Hec Ras para diferentes coeficientes de rugosidad “n”, los cuales han sido comparados con el tirante medido por el SENAMHI en el mismo lugar (Estación Achachicala) y en la misma fecha en la que se ha realizado la campaña de muestreos 15 de mayo de 2019. Los resultados indican que para los coeficientes de rugosidad de 0.026 y 0.027 los tirantes simulados están más cerca a los valores



medidos en campo, estos resultados están dentro de los parámetros recomendados en las tablas de la bibliografía consultada (ver Anexo VI).

### **6.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO DE CALIDAD DE AGUA**

Para la calibración del modelo de calidad de agua, se utilizó la aplicación de “modelización de constituyentes arbitrarios” en el módulo “water quality” del Hec Ras. Como indicadores de contaminación se utilizaron los siguientes elementos:

- Aluminio
- Antimonio
- Hierro
- Manganeso

Se ha realizado dos tipos de análisis: balance de masa para flujo conservativo (en las uniones o de los ríos) y balance de masa para flujo no conservativo (a largo del río). A continuación, se presentan las fórmulas y las consideraciones que se han tomado para cada caso.

#### **6.3.1 ECUACIÓN DE BALANCE DE MASA PARA COMPUESTOS CONSERVATIVOS (APLICABLE A LAS CONFLUENCIAS DE LOS RÍOS)**

El balance de masa para compuestos conservativos es aplicable en las uniones de los ríos, dado que en estos lugares puntuales se desprecia cualquier tasa de decaimiento o crecimiento de la concentración del contaminante, considerando que no se tiene ni el espacio ni el tiempo necesario para considerarlo como un reactor. En la presente investigación, se tienen dos uniones de ríos:

1. Unión 1: Confluencia entre el flujo proveniente de la presa Pampalarama y la presa Alpaquita
2. Unión 2: Confluencia entre los flujos combinados anteriores (presa Pampalarama y presa Alpaquita) y la unión con el flujo proveniente de la presa Chacaltaya



#### Ecuación 4. Balance de masa para compuestos conservativos

$$\sum_{i=1}^N Q_{entrada_i} \cdot C_{entrada_i} - \sum_{j=1}^M Q_{salida_j} \cdot C_{salida_j} = 0$$
$$C_{salida_j} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{entrada_i} \cdot C_{entrada_i}}{\sum_{j=1}^M Q_{salida_j}}$$

Fuente Manual Hec Ras

Donde:

$Q_{entrada}$ : Caudal de ingreso

$C_{entrada}$ : Concentración del contaminante a la entrada al sistema

$Q_{salida}$ : Caudal de salida

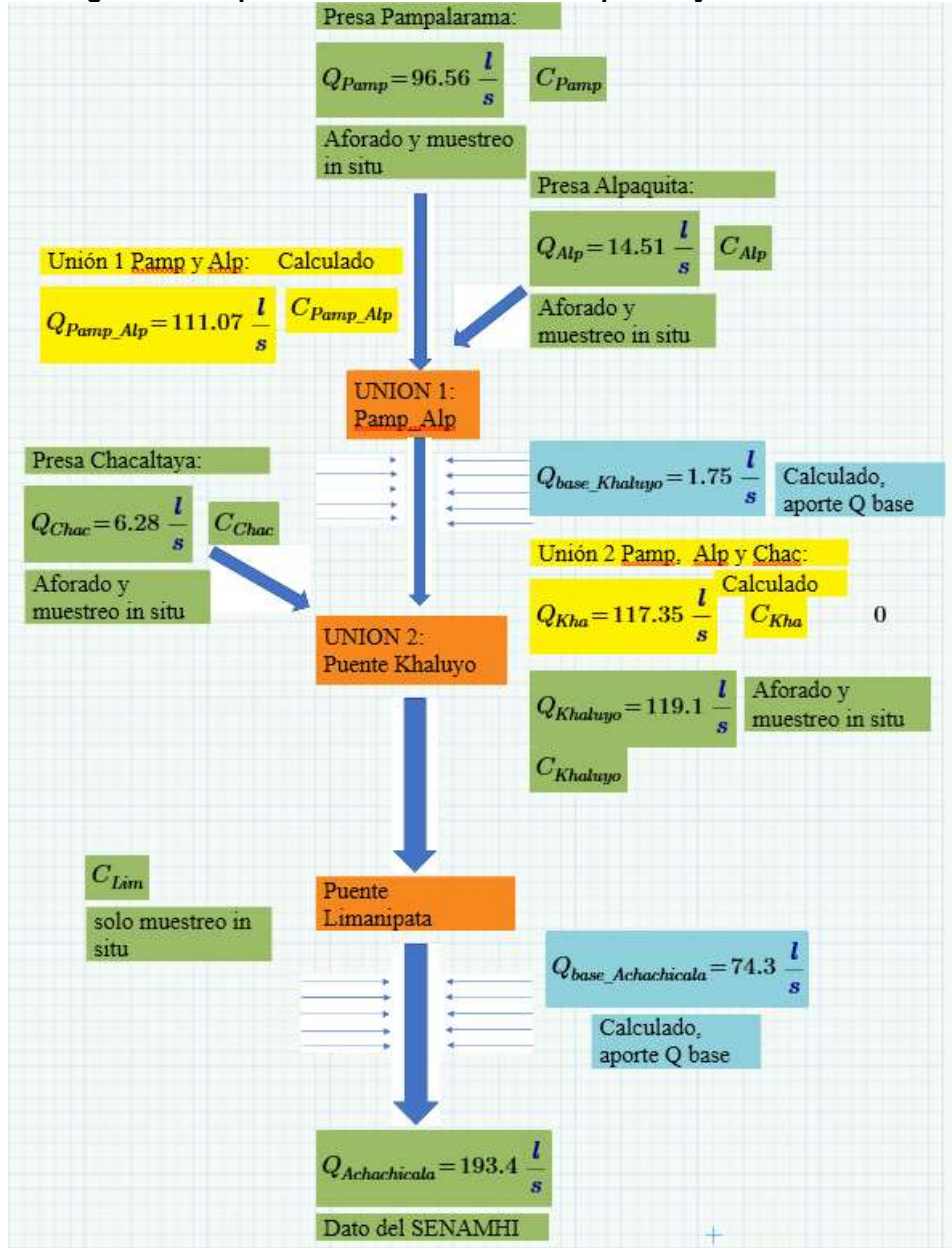
$C_{salida}$ : Concentración del contaminante a la salida del sistema

La ecuación 4 considera que la concentración solamente depende del caudal (dilución), por lo tanto, la concentración del contaminante es proporcionalmente inversa al incremento del caudal y no considera ningún tipo de constante de decaimiento ni incremento. Este balance de masa se aplicó a las dos confluencias del sistema (Unión 1: Pampalarama y Alpaquita, Unión 2: Pampalarama, Alpaquita y Chacaltaya); en

En la figura 76 se presenta la ventana de selección de constituyente arbitrario incorporada en el modelo "Water Quality" del Hec Ras, en el cual se puede observar que se debe incorporar una coeficiente K de crecimiento o decaimiento del contaminante.

El cálculo de estas concentraciones se ha realizado manualmente, para posteriormente ser incorporado como condición de borde en el Hec Ras, esta es una condición necesaria para el programa.

Figura 76. Esquema de todo el sistema de presas y las uniones de los ríos



Fuente Elaboración propia

### 6.3.1.1 CÁLCULO DE LAS CONCENTRACIONES EN LA UNION 1 (FLUJOS PROVENIENTES DE LAS PRESAS PAMPALARAMA Y ALPAQUITA)

Considerando las concentraciones muestreadas en las presas Pampalarama y Alpaquita, así como sus caudales respectivos, se ha calculado la concentración resultante de la unión de estos dos ríos aplicando el balance de masa para compuestos conservativos:

### Ecuación 5. Concentraciones en la Unión 1 (Pampalarama y Alpaquita)

Hierro:

$$C_{Pamp\_Alp\_Fe} := \frac{(Q_{Pamp} \cdot C_{Pamp\_Fe} + Q_{Alp} \cdot C_{Alp\_Fe})}{Q_{Pamp} + Q_{Alp}} = 1.089 \frac{mg}{l}$$

Manganeso:

$$C_{Pamp\_Alp\_Mn} := \frac{(Q_{Pamp} \cdot C_{Pamp\_Mn} + Q_{Alp} \cdot C_{Alp\_Mn})}{Q_{Pamp} + Q_{Alp}} = 0.0663643 \frac{mg}{l}$$

Antimonio:

$$C_{Pamp\_Alp\_Sb} := \frac{(Q_{Pamp} \cdot C_{Pamp\_Sb} + Q_{Alp} \cdot C_{Alp\_Sb})}{Q_{Pamp} + Q_{Alp}} = 0.008 \frac{mg}{l}$$

Aluminio:

$$C_{Pamp\_Alp\_Al} := \frac{(Q_{Pamp} \cdot C_{Pamp\_Al} + Q_{Alp} \cdot C_{Alp\_Al})}{Q_{Pamp} + Q_{Alp}} = 0.7843796 \frac{mg}{l}$$

#### 6.3.1.2 CÁLCULO DE LAS CONCENTRACIONES EN LA UNIÓN 2 (FLUJOS PROVENIENTES DE LAS PRESAS PAMPALARAMA, ALPAQUITA y CHACALTAYA)

Considerando las concentraciones calculadas en la Unión 1 (Pampalarama y Alpaquita), las concentraciones muestreadas a la salida de la presa Chacaltaya y sus caudales respectivos; se ha calculado las concentraciones correspondientes a las aguas provenientes de la Unión 1 con las aguas provenientes de la presa Chacaltaya, aplicando el balance de masa para compuestos conservativos:

### Ecuación 6. Concentraciones en la Unión 2 (Unión 1 y Chacaltaya)

Hierro:

$$C_{Khaluyo\_Fe} := \frac{(Q_{Pamp\_Alp} \cdot C_{Pamp\_Alp\_Fe} + Q_{Chac} \cdot C_{Chac\_Fe})}{Q_{Pamp\_Alp} + Q_{Chac}} = 2.871 \frac{mg}{l}$$

Manganeso:

$$C_{Khaluyo\_Mn} := \frac{(Q_{Pamp\_Alp} \cdot C_{Pamp\_Alp\_Mn} + Q_{Chac} \cdot C_{Chac\_Mn})}{Q_{Pamp\_Alp} + Q_{Chac}} = 1.1905018 \frac{mg}{l}$$

Antimonio:

$$C_{Khaluyo\_Sb} := \frac{(Q_{Pamp\_Alp} \cdot C_{Pamp\_Alp\_Sb} + Q_{Chac} \cdot C_{Chac\_Sb})}{Q_{Pamp\_Alp} + Q_{Chac}} = 1.0310267 \frac{mg}{l}$$

Aluminio:

$$C_{Khaluyo\_Al} := \frac{(Q_{Pamp\_Alp} \cdot C_{Pamp\_Alp\_Al} + Q_{Chac} \cdot C_{Chac\_Al})}{Q_{Pamp\_Alp} + Q_{Chac}} = 1.0565534 \frac{mg}{l}$$

### 6.3.2 ECUACIÓN DE BALANCE DE MASA PARA COMPUESTOS NO CONSERVATIVOS (APLICABLE A LO LARGO DE LOS RÍOS) APLICACIÓN DEL SOFTWARE HEC RAS

La ecuación de balance de masa para compuestos no conservativos es aplicable a los tramos recorridos por ríos de gran magnitud en los cuales se tiene un tiempo determinado de recorrido del flujo y un volumen considerable de agua, debido a estos aspectos se puede considerar al río como un reactor, esto produce un decaimiento o crecimiento en las concentraciones de los contaminantes que es representada por una tasa de reacción (Coeficiente  $r_k = K \cdot C$ ) y este a su vez depende de una constante de velocidad (K). En la presente investigación se ha utilizado el programa computacional Hec Ras para poder realizar el cálculo de las concentraciones resultantes para cada sección transversal del río, aplicando la ecuación de balance de masa para constituyentes no conservativos:

**Ecuación 7. Balance de masa para constituyentes no conservativos**

$$\sum_{i=1}^N Q_{entrada_i} \cdot C_{entrada_i} - \sum_{j=1}^M Q_{salida_j} \cdot C_{salida_j} + \sum_{k=1}^L V \cdot r_k = 0$$

Fuente Manual Hec Ras

Donde:

$Q_{entrada}$ : Caudal de ingreso

$C_{entrada}$ : Concentración del contaminante a la entrada al sistema

$Q_{salida}$ : Caudal de salida

$C_{salida}$ : Concentración del contaminante a la salida del sistema

$V$ : Volumen del sistema

$r_k$ : Tasa a la cual se desarrolla cualquier tipo de reacción, fuente o sumidero dentro del sistema

Para aplicar la ecuación 7, se debe determinar la tasa a la cual se desarrolla la reacción (fuente o consumo), este valor puede ser modelado como una relación de primer orden, en la cual se supone que la tasa de consumo es proporcional a la concentración del material presente en el sistema, como indica la ecuación 6.

**Ecuación 8. Tasa de reacción para compuesto no conservativo**

$$r_k = K_{reactor} \cdot C_{reactor}$$

Fuente Manual Hec Ras

La ecuación general 8 es expresada en el Hec Ras como la ecuación 9 para constituyentes arbitrarios (para sustancias no conservativas), recomendada por el modelo Hec Ras:

**Ecuación 9. Tasa de reacción del componente arbitrario “no conservativo”, modelo Hec Ras**

Constituyente Arbitrario (fuente / sumidero) = KC	
Dónde:	
C	= concentración del componente arbitrario.
K	= constante de velocidad (día <sup>-1</sup> )

Fuente Manual Hec Ras

En el proceso de calibración se ha podido observar que los 3 elementos contaminantes (Fe, Mn y Al) pueden ser modelados con la opción de contaminantes “no conservativos”, dado que esta opción se ha acomodado mejor a los datos medidos en la campaña de muestreos. Esta situación es explicada por que el río se convierte en un reactor que produce un decaimiento en las



concentraciones (efecto de autopurificación del río), debido principalmente al tiempo de recorrido del flujo y el volumen de agua que transporta (considerando las grandes dimensiones de los ríos en el sistema hidráulico), esta consideración explica la reducción de las concentraciones encontradas en la campaña de muestreo entre dos puntos consecutivos (puente Khaluyo y puente Limanipata), producto principalmente de la precipitación de los contaminantes en el lecho del río, sin embargo, también pueden producirse otras reacciones que son representadas en la tasa de reacción “ $r_k$ ” y la constante de velocidad “ $K$ ” .

Por lo tanto, se ha utilizado la opción de contaminantes “no conservativos” con una tasa de decaimiento de primer orden en el Hec Ras como indica la figura 77:

**Figura 77. Ventana de selección de constituyente arbitrario “no conservativo” en el Hec Ras**

Arbitrary Constituent Information

Name: Hierro

Short Name: Fe

Fate

Conservative

First Order Growth

K (1/day):

First Order Decay

K (1/day): -5

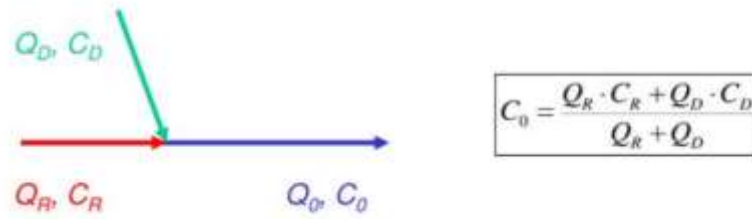
OK Cancel

Fuente Manual Hec Ras

Se siguieron los siguientes pasos:

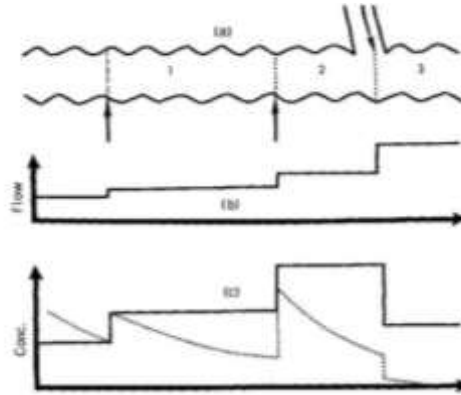
1. Primero se debe tener una simulación hidráulica en Hec Ras, en este caso se utilizó la modelación hidráulica realizada para la calibración hidrodinámica.
2. Como insumos para el Hec Ras se tienen los caudales iniciales y concentraciones iniciales de contaminación, al inicio de cada tramo, así también, en las confluencias es muy importante cumplir con la ecuación de continuidad y la ecuación de balance de masas contaminantes en descargas (Ecuación del balance de masa para compuestos conservativos)

**Ecuación 10. Ecuación de balance de masas para compuestos conservativos**



Fuente: (Méndez Soreano, 2019)

**Figura 78. Efecto de la dilución en la concentración de contaminantes en un río**



Fuente: (Méndez Soreano, 2019)

3. Se ha introducido al Hec Ras varios valores del coeficiente K para cada elemento, con el que se ha realizado las simulaciones
4. Con el modelo Hec Ras se ha simulado el transporte de contaminantes a lo largo del sistema de ríos y los valores simulados se los ha comparado con los valores de concentración determinadas en la campaña de muestreo, principalmente en el punto de control 5 (puente Limanipata), aplicando un análisis estadístico se determinó el coeficiente de correlación entre K y los valores de concentración calculados para cada elemento.
5. El procedimiento del punto 4 se repitió varias veces para diferentes valores de K, de manera que se consiga una buena correlación entre valores muestreados y simulados con el modelo Hec Ras.

A continuación (Tabla 17), se muestran los valores obtenidos en la campaña de muestreo del 15 de mayo de 2019:



**Tabla 17. Resultados de la campaña de aforo y muestreo realizada el 15 de mayo de 2019**

N°	Ubicación	Calidad de Agua (campaña de muestreo MAYO 2019)						
		Caudal medido (l/s)	Hierro (mg/l)	Manganes o (mg/l)	Antimonio (mg/l)	Aluminio (,g/l)	Merurio (mg/l)	PH
1	Presa Alpaquita	14.51	1.4977	0.508	0.008	0.92	0	5.9
2	Presa Pampalarama	96.56	1.0275	0	0.008	0.764	0	8.2
3	Presa Chacaltaya	6.28	34.396	2.987	0.007	0.484	0	3.8
4	Puente Khaluyo	119.10	4.3315	0.542	0.008	1.875	0	8.2
5	Puente Limanipata	-----	2.5845	0.245	0.009	1.08	0	7.9

Fuente Elaboración propia

Los valores de K introducidos como insumos en el modelo de calidad de agua del Hec Ras fueron los siguientes (tabla 18), estos valores fueron aplicados de manera aleatoria buscando una correlación entre K y las concentraciones de cada elemento:

**Tabla 18. Coeficiente de velocidad de reducción de concentración “K” (para un constituyente arbitrario), utilizados para cada contaminante**

Variaciones de K para cada elemento				
N° de iteración	Fe	Mn	Sb	Al
1	-0.6	-0.245	-0.125	-0.576
2	-0.4	-0.244	-0.126	-0.6
3	-0.9	-0.3	-0.3	-0.9
4	-0.2	-0.1	-0.1	-0.2
5	-5	-7	1.04	-5
6	-2.5	-4	0.7	-2.5
7	-10	-10	1.1	-10
8	-1	-1	1	-1
9	-1.5	-1.5	1.5	-1.5
10	-2	-2	2	-2
11	-7	-9	1.7	-7

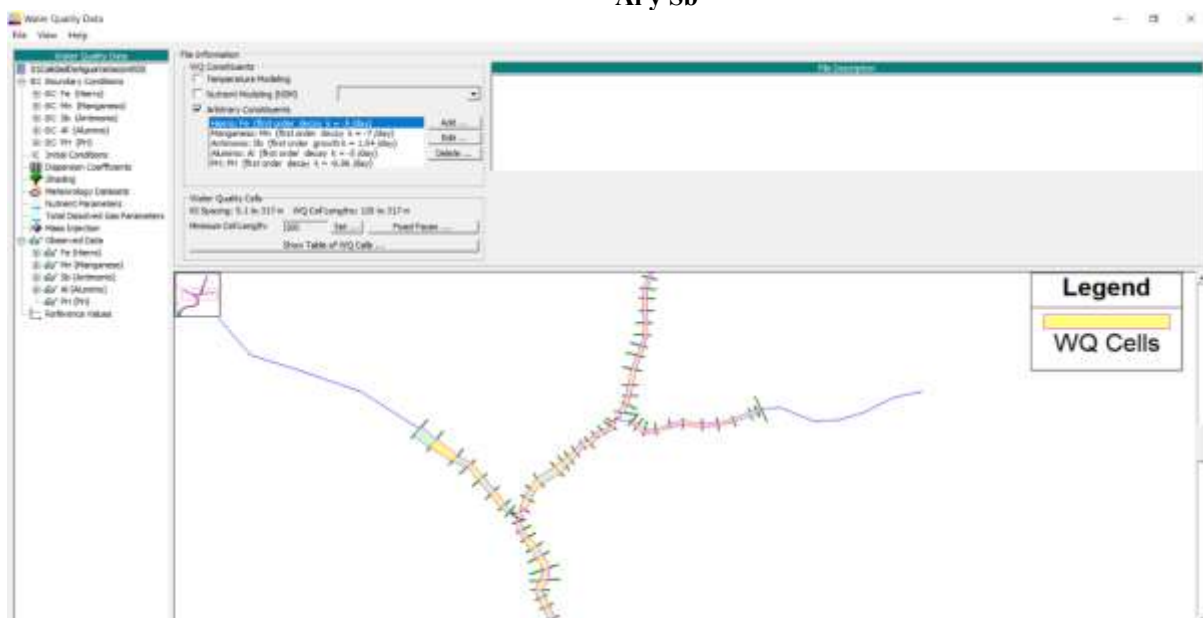
Fuente Elaboración propia

Los valores de K mostrados en la tabla 18 tienen valores negativos para indicar que es una tasa de decaimiento del elemento y tienen un valor positivo para indicar que es una tasa de incremento (esto por un requerimiento de operación del programa Hec Ras). Se han incorporado diversos valores de K al módulo de calidad de agua del Hec Ras y las concentraciones de la campaña de muestreo. Es importante hacer notar que el programa es muy versátil, permite la incorporación del tiempo, para lo cual se ha incluido las horas en las que se ha muestreado en los 5 puntos de referencia, (11:30 a.m. hasta las 14:00).

La figura 75 muestra el módulo “water quality data” del hec Ras, en el que se introducen los datos de calidad de agua; inicialmente se ha escogido el tipo de constituyente en este caso “arbitrary constituents” (en la pestaña “File information”) y se han incluido los 4 contaminantes estudiados con sus respectivos valores de K. Posteriormente se han introducidos los valores de

concentraciones medidos en las presas como condiciones iniciales (Boundary conditions en la pestaña “water quality data”) y tambien en las condiciones iniciales “initial conditions”. Tambien se han introducido las concentraciones de la campaña de muestreos en la sección “Observed Data”; finalmente, en la parte inferior se muestra una gráfica de las celdas que genera el Hec Ras para realizar el análisis.

**Figura 79. Módulo de calidad del Hec Ras utilizado para el análisis de concentraciones de Fe, Mn, Al y Sb**

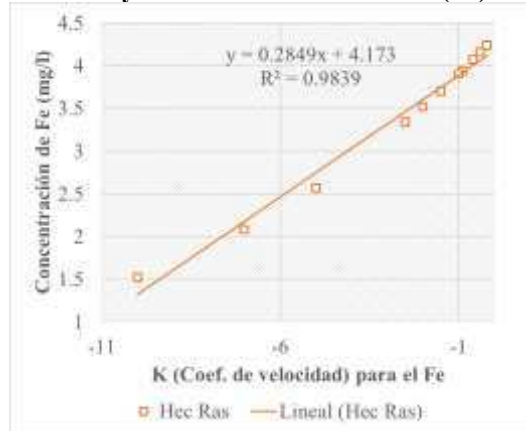


Fuente Elaboración propia

### 6.3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS SIMULADOS EN HEC RAS

Se realizaron 11 iteraciones con diferentes valores de K para cada elemento, determinándose concentraciones de cada contaminante considerado (Fe, Mn, Sb, Al) en el punto de control 5 (puente Limanipata), se determinó la correlación que existe entre cada par de valores y se determinó la curva de tendencia entre K y la concentración de cada elemento, teniendo como referencia la concentración determinada en la campaña de muestreos (ver figuras 76, 77, 78 y 79):

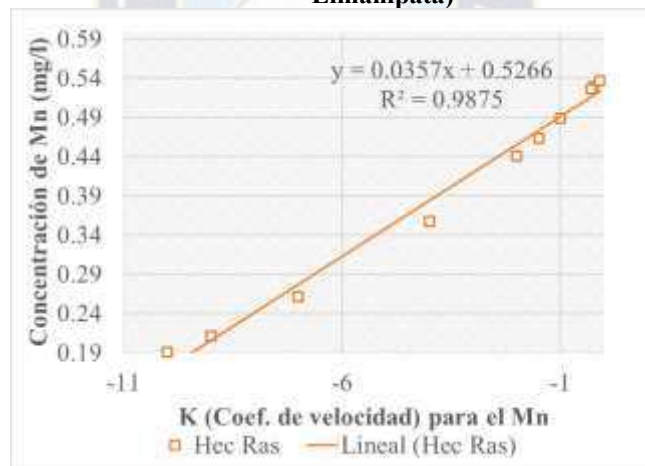
**Figura 80. Correlación entre K y la concentración de Hierro (Fe) en el punto 5 (puente Limanipata)**



Fuente Elaboración propia

En la figura 76 se pueden observar los resultados de las diferentes simulaciones que se han realizado para determinar la concentración del hierro en el punto de control 5, en el que se tiene una correlación de 0.9839.

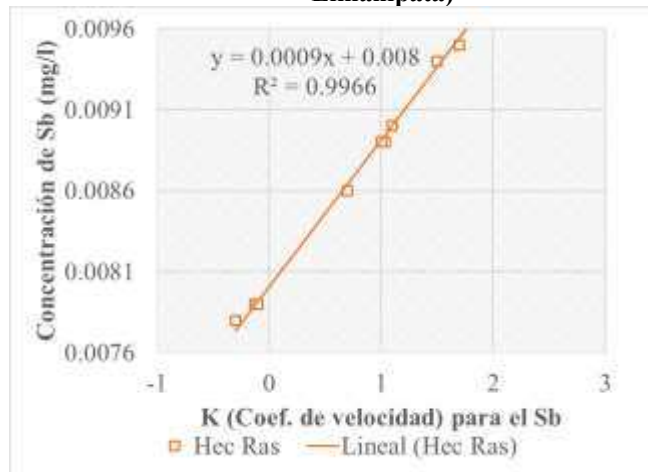
**Figura 81. Correlación entre K y la concentración de Manganeseo (Mn) en el punto 5 (puente Limanipata)**



Fuente Elaboración propia

En la figura 77 se observa que se tiene una correlación de 0.9875 (punto de control 5) entre el coeficiente K y la concentración de manganeso.

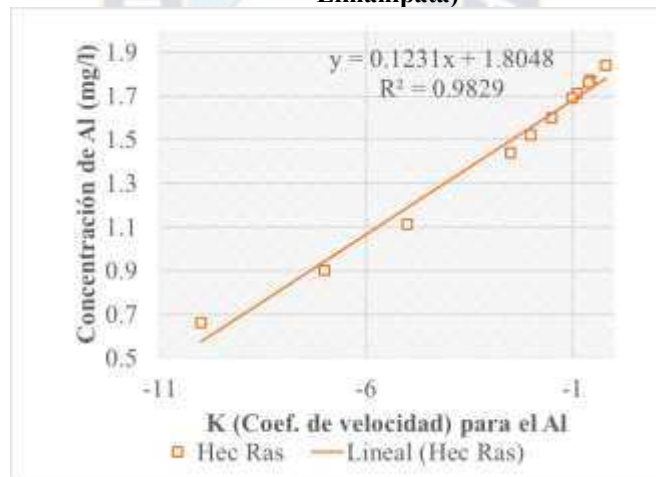
**Figura 82. Correlación entre K y la concentración de Antimonio (Sb) en el punto 5 (puente Limanipata)**



Fuente Elaboración propia

Con relación al antimonio (Figura 78), se tiene una correlación de 0.9960 en el puente Limanipata.

**Figura 83. Correlación entre K y la concentración de Aluminio (Al) en el punto 5 (puente Limanipata)**



Fuente Elaboración propia

En la figura 79 se observa que el aluminio tiene una correlación de 0,9829 con respecto al coeficiente K, en el punto de control 5 (puente Limanipata).

En general se puede decir que para los 4 contaminantes se tiene una muy buena correlación entre sus coeficientes K y sus concentraciones calculadas en el modelo Hec Ras.

Finalmente, los valores del coeficiente K mostrados en la tabla 19 fueron determinados para cada contaminante con la curva de tendencia calculada para cada elemento (figuras 76, 77, 78 y 79) y las concentraciones determinadas en la campaña de muestreo del 15 de mayo de 2019.

Tabla 19. Valores calibrados de K

Valores finales de K para cada elemento				
Descripción	Fe	Mn	Sb	Al
Valore de muestreo en el punto 5	2.5845	0.245	0.009	1.08
K	-5.58	-7.89	1.11	-5.89

Fuente Elaboración propia

Es necesario aclarar que el signo negativo en el valor de K presentado en la tabla 19, indica que se ha considerado una tasa de decaimiento, en cambio el valor positivo indica una tasa de incremento en la concentración del contaminante (es un requerimiento específico del Hec Ras).

#### 6.3.4 ANALISIS Y VERIFICACIÓN DE LOS VALORES K CALCULADOS EN HEC RAS

En esta investigación se ha utilizado el programa computacional Hec Ras como herramienta para la determinación de los valores K (constante de velocidad de reacción) siguiendo un proceso iterativo en el cual se han asumido varios valores de K y se los ha incorporado en el software Hec Ras como insumo y condición inicial (además de las condiciones iniciales hidráulicas ya calibradas), con estos valores el programa ha realizado simulaciones dando como resultado concentraciones a lo largo de todo el sistema y se han comparado con las concentraciones muestreadas en un punto específico (puente Limanipata); apoyados en una correlación estadística se han podido determinar los valores adecuados de K para cada contaminante (calibración del modelo).

Se debe tomar en cuenta que la ecuación de balance de masa para compuestos no conservativos difiere de la correspondiente a los compuestos conservativos en el último término de la ecuación (multiplicación del volumen de agua en el reactor y la tasa de decaimiento o incremento de la concentración del contaminante), como se muestra en las siguientes ecuaciones:

#### Ecuación 11. Diferencias entre las ecuaciones de balance de masa para compuestos conservativos y no conservativos

$$\sum_{i=1}^N Q_{entrada_i} \cdot C_{entrada_i} - \sum_{j=1}^M Q_{salida_j} \cdot C_{salida_j} = 0$$

$$\sum_{i=1}^N Q_{entrada_i} \cdot C_{entrada_i} - \sum_{j=1}^M Q_{salida_j} \cdot C_{salida_j} + \sum_{k=1}^L V \cdot r_k = 0$$

$$r_k = K_{reactor} \cdot C_{reactor}$$

En las ecuaciones anteriores se puede observar la influencia que tiene el volumen de agua que transporta el río (V), en el balance de masa para un compuesto no conservativo, este valor es precisamente el que se ha logrado determinar de manera más exacta con la herramienta computacional Hec Ras, considerando la topografía de los ríos y su funcionamiento hidrodinámico (flujo no uniforme, es decir tirantes y velocidades variables en cada sección transversal, inclusive considera resaltos hidráulicos). Este efecto explica la siguiente afirmación *“la enorme influencia que tiene la presencia de las estructuras de caída y meandros, sobre el tiempo de tránsito del agua, que como veremos más adelante, afecta directamente la calidad del agua”* (Lavadenz Carpio L. , 2007)

#### **6.3.4.1 CONSIDERACIONES SOBRE LOS CAUDALES – ECUACION DE CONTINUIDAD**

Aplicando la ecuación de continuidad se presenta el siguiente análisis de caudales, considerando los caudales aforados en campo y los caudales producto de la continuidad necesaria para que el sistema funcione correctamente:

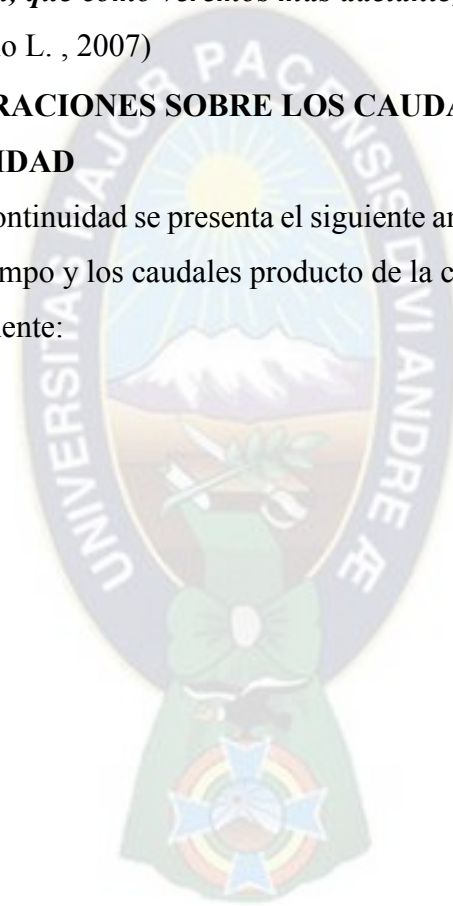
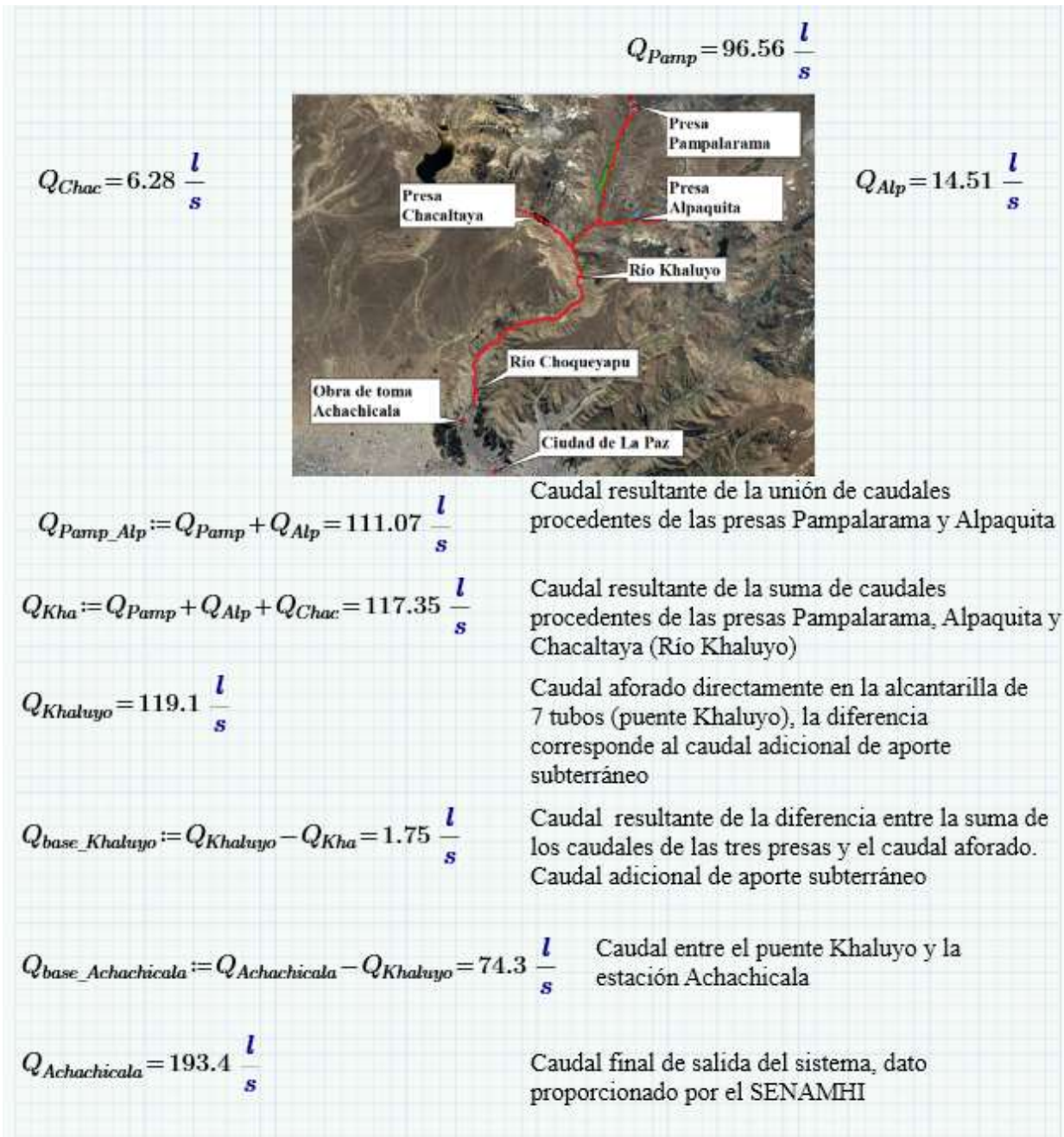




Figura 84. Relación de caudales en el sistema



Fuente Elaboración propia

#### 6.3.4.2 CONCENTRACIONES DE CONTAMINANTES EN EL PUENTE KHALUYO Y PUENTE LIMANIPATA, NECESARIAS PARA DETERMINAR K

Para la determinación de K, se ha utilizado los valores de concentraciones muestreadas en fecha 25 de mayo de 2019 entre dos puntos de control: Puente Khaluyo y Puente Limanipata; entre


estos dos puntos se ha encontrado diferencias en sus concentraciones que permiten la determinación de la tasa de reacción (rk) en función de la constante de velocidad (K):

**Figura 85. Concentraciones de contaminantes en el Puente Khaluyo**

$C_{Kha\_Fe} := 4.3315 \frac{mg}{l}$	Concentración de hierro	
$C_{Kha\_Mn} := 0.542 \frac{mg}{l}$	Concentración de Manganeseo	
$C_{Kha\_Sb} := 0.008 \frac{mg}{l}$	Concentración de Antimonio	
$C_{Kha\_Al} := 1.875 \frac{mg}{l}$	Concentración de Aluminio	
$C_{Kha\_Hg} := 0 \frac{mg}{l}$	Concentración de Mercurio	
$PH_{Kha} := 8.2$	Valor de PH	

Fuente Elaboración propia

**Figura 86. Concentraciones de contaminantes en el Puente Limanipata**

$C_{Lim\_Fe} := 2.5845 \frac{mg}{l}$	Concentración de hierro	
$C_{Lim\_Mn} := 0.245 \frac{mg}{l}$	Concentración de Manganeseo	
$C_{Lim\_Sb} := 0.009 \frac{mg}{l}$	Concentración de Antimonio	
$C_{Lim\_Al} := 1.08 \frac{mg}{l}$	Concentración de Aluminio	
$C_{Lim\_Hg} := 0 \frac{mg}{l}$	Concentración de Mercurio	
$PH_{Lim} := 7.9$	Valor de PH	

Fuente Elaboración propia

En las figuras 85 y 86 se observa que las concentraciones de los contaminantes han bajado tal como se tenía previsto debido a que el río funciona como un reactor, con dimensiones grandes transporta gran cantidad de volumen de agua durante un periodo considerable de tiempo, lo cual se asemeja a la hipótesis de reactor y al efecto de la conocida capacidad de “Autopurificación de un río”

#### 6.3.4.3 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE AGUA TRANSPORTADO POR EL RÍO

El volumen de agua transportado por el río dependerá del número de secciones transversales considerado en la simulación hidrodinámica y de variabilidad de las características hidráulicas

(tirante, velocidad), este volumen es calculado por el Hec Ras entre cada sección transversal y acumulada conforme se va avanzado hacia aguas abajo. Con fines de verificación, se ha simplificado el cálculo utilizando el caudal y el tiempo de muestreo realizado, considerando un flujo uniforme y sin variación de las propiedades hidráulicas a lo largo del sistema. Para este objetivo se ha multiplicado el caudal del tramo considerado y el tiempo que ha transcurrido entre el inicio y fin de la toma de muestras en los dos lugares de control (Puente Khaluyo y Puente Limanipata), como se muestra a continuación:

**Ecuación 12. Volumen de agua transportado por el río**

$t_{muestreo} := 2.5 \text{ hr}$   

$$V = \sum_{k=1}^L \frac{(A_k + A_{k-1})}{2} \cdot L_k$$
 Calculado por el Hec Ras, por secciones transversales  
 $V := Q_{Khaluyo} \cdot t_{muestreo} = 1071.9 \text{ m}^3$ 
 Calculado por el tiempo de muestreo  
 $V = 1071900 \text{ l}$

Fuente Elaboración propia

En las ecuaciones anteriores se muestra el tiempo entre los muestreos realizados: 11:30 a.m. en el puente Khaluyo y 14:00 p.m. en el puente Limanipata. También muestra la ecuación que utiliza el Hec Ras para determinar el volumen de agua entre cada sección transversal y finalmente se presenta la ecuación utilizada para verificar el volumen aproximado en flujo uniforme sin considerar secciones transversales ni variaciones en el régimen hidráulico (Volumen=Caudal x tiempo). Estos dos volúmenes varían en función del régimen de flujo y de la cantidad de secciones transversales consideradas, este apartado tiene el fin de verificar que estos valores tengan una cierta relación y no se salgan de límites congruentes.

**6.3.4.4 DETERMINACIÓN DE K (CONSTANTE DE VELOCIDAD) PARA CADA CONTAMINANTE**

El valor de K fue calculado en el Hec Ras de manera iterativa ingresando varios valores de K y comparando los valores de la concentración muestreados con los simulados por el Hec Ras para el punto final del tramo de calibración (Puente Khaluyo-Puente Limanipata), el Hec Ras ha permitido considerar un régimen hidrodinámico más real en un flujo variable, donde se consideran curvas de remanso, resaltos hidráulicos y acumulaciones de flujo en algunos casos; estas variaciones en el flujo inciden directamente en el tirante y velocidad en cada sección transversal considerada, la determinación del tirante y velocidad en cada sección transversal

permite calcular el volumen de agua transportado en el tramo considerado, lo que permite realizar el balance de masa para compuestos no conservativos, tal como se explica en la ecuación 11 del apartado 6.3.4 (por medio de una tasa de reacción  $r_k$  y una constante de velocidad  $K$ ) (Ver Tabla 19).

Sin embargo, para su verificación se puede calcular el valor de  $K$  de la siguiente manera:

- Considerando un flujo Uniforme
- Sin secciones transversales
- Considerando el tiempo de muestreo entre los dos puntos. 11:30 inicio de la campaña de muestro y 14:00 ultima toma de la muestra (2.5 horas de diferencia entre los puntos muestreados)
- Volumen de agua transportado por el sistema aproximado (calculado por medio del caudal y el tiempo de recorrido del flujo)

**Ecuación 13. Cálculo de  $K$ , constante de velocidad de reacción**

$$\sum_{k=1}^L V \cdot r_k = \sum_{j=1}^M Q_{salida_j} \cdot C_{salida_j} - \sum_{i=1}^N Q_{entrada_i} \cdot C_{entrada_i}$$

$$r_k = \frac{\left( \sum_{j=1}^M Q_{salida_j} \cdot C_{salida_j} - \sum_{i=1}^N Q_{entrada_i} \cdot C_{entrada_i} \right)}{\sum_{k=1}^L V}$$

$$K_{reactor} \cdot C_{reactor} = \frac{\left( \sum_{j=1}^M Q_{salida_j} \cdot C_{salida_j} - \sum_{i=1}^N Q_{entrada_i} \cdot C_{entrada_i} \right)}{\sum_{k=1}^L V}$$

$$K_{reactor} = \frac{\left( \sum_{j=1}^M Q_{salida_j} \cdot C_{salida_j} - \sum_{i=1}^N Q_{entrada_i} \cdot C_{entrada_i} \right)}{\left( \sum_{k=1}^L V \right) \cdot C_{reactor}}$$

Fuente Elaboración propia

En la ecuación 13 se ha despejado el valor de  $K$  de la ecuación general del balance de masa para compuestos no conservativos. A continuación, se presentan los cálculos realizados para determinar  $K$  para cada compuesto:



#### Ecuación 14. Verificación del valor de K para el Hierro

$$C_{Reactor\_Fe} := C_{Lim\_Fe} - C_{Kha\_Fe} = -1.747 \frac{mg}{l}$$
$$K_{Fe} := \frac{Q_{Limaniyata} \cdot C_{Lim\_Fe} - Q_{Khaluyo} \cdot C_{Kha\_Fe}}{V \cdot C_{Reactor\_Fe}} = (6.111 \cdot 10^{-5}) \frac{1}{s}$$
$$K_{Fe} = 5.28 \frac{1}{day}$$

Fuente Elaboración propia

#### Ecuación 15. Verificación del valor de K para el Manganeseo

$$C_{Reactor\_Mn} := C_{Lim\_Mn} - C_{Kha\_Mn} = -0.297 \frac{mg}{l}$$
$$K_{Mn} := \frac{Q_{Limaniyata} \cdot C_{Lim\_Mn} - Q_{Khaluyo} \cdot C_{Kha\_Mn}}{V \cdot C_{Reactor\_Mn}} = (8.323 \cdot 10^{-5}) \frac{1}{s}$$
$$K_{Mn} = 7.191 \frac{1}{day}$$

Fuente Elaboración propia

#### Ecuación 16. Verificación del valor de K para el Antimonio

$$C_{Reactor\_Sb} := C_{Lim\_Sb} - C_{Kha\_Sb} = 0.001 \frac{mg}{l}$$
$$+$$
$$K_{Sb} := \frac{Q_{Limaniyata} \cdot C_{Lim\_Sb} - Q_{Khaluyo} \cdot C_{Kha\_Sb}}{V \cdot C_{Reactor\_Sb}} = (4.153 \cdot 10^{-4}) \frac{1}{s}$$
$$K_{Sb} = 35.881 \frac{1}{day}$$

Fuente Elaboración propia

#### Ecuación 17. Verificación del valor de K para el Aluminio

$$C_{Reactor\_Al} := C_{Lim\_Al} - C_{Kha\_Al} = -0.795 \frac{mg}{l}$$
$$K_{Al} := \frac{Q_{Limaniyata} \cdot C_{Lim\_Al} - Q_{Khaluyo} \cdot C_{Kha\_Al}}{V \cdot C_{Reactor\_Al}} = (6.52 \cdot 10^{-5}) \frac{1}{s}$$
$$K_{Al} = 5.633 \frac{1}{day}$$

Fuente Elaboración propia

### 6.3.4.5 COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE K, CALCULADOS POR EL HEC RAS Y POR EL MÉTODO SIMPLIFICADO, PARA SU VERIFICACIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos se tiene el siguiente cuadro comparativo:

**Tabla 19. Valores de K, comparación y verificación**

Nº	Contaminante	Simbolo	Valores calculados por el Hec Ras	Verificación (calculo simplificado)	Diferencia	Porcentaje de variación
1	Hierro	Fe	5.58	5.28	0.3	5.68%
2	Manganeso	Mn	7.89	7.191	0.699	9.72%
3	Antimonio	Sb	1.11	35.881	-34.771	-96.91%
4	Aluminio	Al	5.89	5.633	0.257	4.56%

Fuente Elaboración propia

En la tabla anterior se observa que los valores de K calculados con ayuda de la herramienta Hec Ras (flujo variable con secciones transversales y condiciones hidrodinámicas más reales) están muy cerca de los valores que se calcula manualmente con métodos simplificados (flujo uniforme sin secciones transversales y considerando solo el caudal y el tiempo de recorrido) para los contaminantes Hierro, Manganeso y Aluminio, sin embargo, para el Antimonio los valores calculados por ambos métodos son demasiado diferentes, por lo que se puede decir inicialmente con esta comparación lo siguiente:

- Se entiende esta variación en los resultados como la diferencia que provoca las distintas formas de determinar el volumen transportado de agua en el río, el primero considerando las condiciones hidrodinámicas más cercanas a la realidad y el segundo calcula el volumen del agua transportado solo en función del caudal y el tiempo de recorrido, es decir un flujo uniforme sin variación en las secciones transversales
- Esta comparación se realizó para verificar que contaminantes pueden ser calculados por el modelo de “constituyentes arbitrarios” del Hec Ras con mayor confiabilidad y en cuales definitivamente no se aconseja o no se acomoda el modelo.
- El modelo representa muy bien los resultados para el Hierro, Manganeso y Aluminio, dado que los porcentajes de variación son bastante bajos y están cerca de lo esperado
- En cambio, en el caso del Antimonio los valores presentados por el modelo Hec Ras, difieren en gran medida con los calculados de manera simplificada. Por lo que el modelo no se acomoda a este contaminante. En el caso del antimonio no es aconsejable utilizar el modelo de constituyentes arbitrarios del Hec Ras (modelo lineal). Por lo tanto, este



valor no será considerado en las recomendaciones para reducir las concentraciones aplicando escenarios de operación de presas.

#### **6.4 ANALISIS DE SENSIBILIDAD PARA DIFERENTES ESCENARIOS DE OPERACIÓN DE LAS PRESAS**

Para los escenarios de operación se han considerado principalmente los caudales que posiblemente puedan descargar las presas en función de la curva de descarga de cada válvula y el requerimiento que se tenga para el abastecimiento de agua a la ciudad de La Paz. Para el caso de la curva de descarga de las válvulas, esta ha sido calculada con valores del documento dejado a EPSAS como manual de operación y mantenimiento de las presas. En este manual indica que EPSAS requiere de un caudal mínimo de 500 l/s, que pueden ser descargados por cualquiera de las tres presas, individualmente o en paralelo, con estos valores se realizaron las curvas de descarga de válvulas de cada presa, en esta investigación interesa la concentración de los contaminantes con los caudales más bajos posibles. No se ha considera la hidrología dado que las presas funcionan como estructuras de control y regulación del caudal, por lo tanto, el caudal de salida no estará sujeto a la hidrología, sino más bien a la curva de descarga de la válvula en función de requerimientos de agua.

Se han considerado los siguientes escenarios de operación para las presas:

- Escenario 1: Válvulas de las Presas cerradas, solo caudal base
- Escenario 2: Descarga mínima 500 l/s solo de la presa Pampalarama
- Escenario 3: Descarga mínima 500 l/s solo de la presa Chacaltaya
- Escenario 4: Descarga mínima 500 l/s solo de la presa Alpaquita
- Escenario 5: Descarga con la mínima apertura de válvulas de las 3 presas (15%)
- Escenario 6: Válvulas cerradas de las 3 presas, con caudales de la campaña de muestreos
- Escenario 7: Presa Alpaquita cerrada y descarga al 15% en las presas Chacaltaya y Pampalarama

##### **6.4.1 ESCENARIO 1: VÁLVULAS CERRADAS, CAUDAL BASE**

Para este escenario se ha considerado los caudales base de los ríos (considerando todas las válvulas cerradas), por lo tanto, se ha introducido los siguientes valores al modelo:

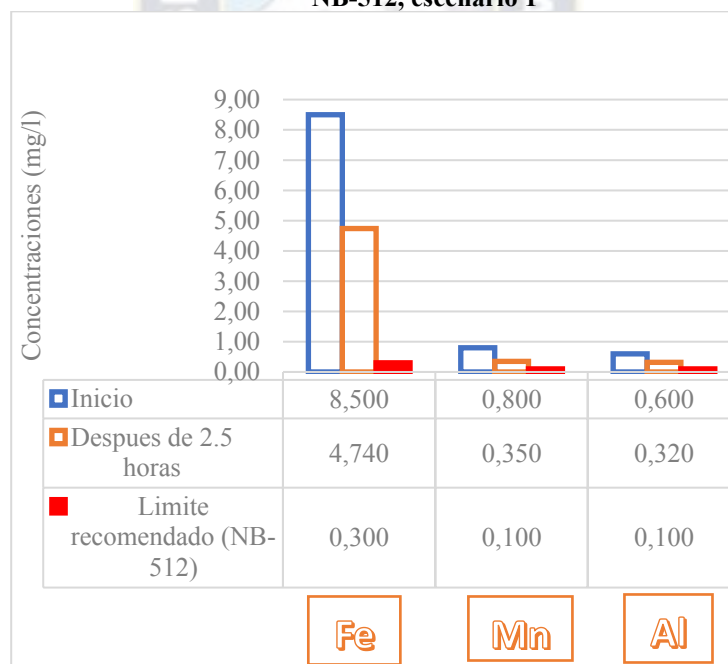
**Tabla 20. Datos introducidos al Hec Ras y resultados para el escenario 1**

N°	Ubicación	Caudal y concentraciones para el análisis de ESCENARIO 1			
		Caudal (m3/s)	Hierro (mg/l)	Manganeso (mg/l)	Aluminio (mg/l)
1	Chacaltaya	0.0034	22.313	1.938	0.314
2	Alpaquita	0.0030	1.244	0.422	0.764
3	Pampalarama	0.0034	0.993	0.000	0.738
4	Unión 1 (Pamp y Alp)	0.0064	1.110	0.196	0.750
5	Unión 2 (Khaluyo)	0.0098	8.496	0.803	0.598
Concentraciones calculadas cerca a la toma de Achachicala (Hec Ras)		Inicio	8.500	0.800	0.600
		Después de 2.5 horas	4.740	0.350	0.320
Limite recomendado (NB-512)			0.300	0.100	0.100

Fuente Elaboración propia

Los resultados del escenario 1 se muestran en la siguiente figura:

**Figura 87. Concentraciones de contaminantes en la toma de Achachicala y recomendación de la NB-512, escenario 1**



Fuente Elaboración propia

El escenario 1, en el que todas las válvulas estarían cerradas es el menos favorable de todos; muestra que las concentraciones de hierro, manganeso, y aluminio están por encima de las recomendaciones de la NB-512, por lo tanto, este escenario no es el más aconsejable.

## 6.4.2 ESCENARIO 2: DESCARGA MÍNIMA DE 500 l/s SOLO PRESA PAMPALARAMA

Para el escenario 2 se considera el caudal de la válvula de la presa Pampalarama en funcionamiento manteniendo el caudal mínimo requerido de 500 l/s, más el caudal base de los ríos correspondientes a la presa Chacaltaya y Alpaquita (ver tabla 20):

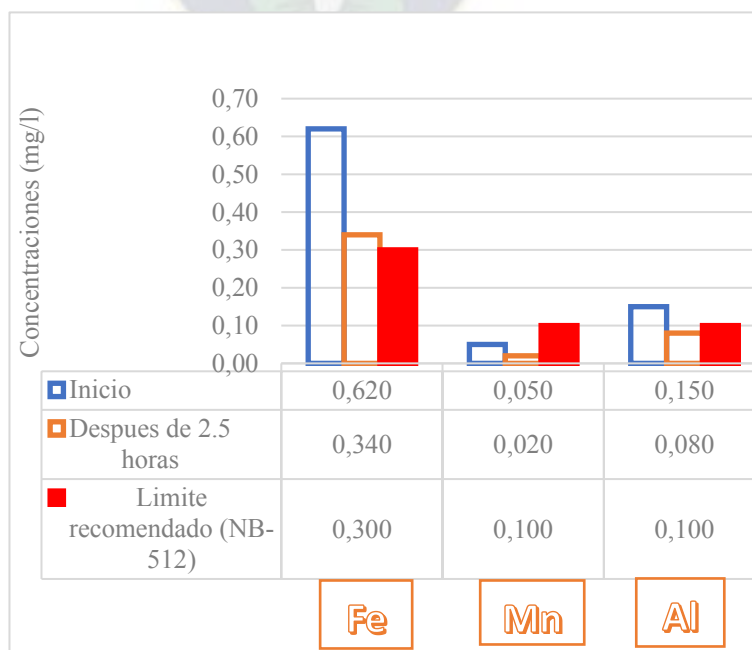
**Tabla 21. Datos introducidos al Hec Ras y resultados para el escenario 2**

N°	Ubicación	Caudal y concentraciones para el análisis de ESCENARIO 2			
		Caudal (m3/s)	Hierro (mg/l)	Manganeso (mg/l)	Aluminio (mg/l)
1	Chacaltaya	0.0063	34.396	2.987	0.484
2	Alpaquita	0.0145	1.498	0.508	0.920
3	Pampalarama	0.5000	0.166	0.000	0.124
4	Unión 1 (Pamp y Alp)	0.5145	0.204	0.014	0.146
5	Unión 2 (Khaluyo)	0.5208	0.616	0.050	0.150
Concentraciones calculadas cerca a la toma de Achachicala (Hec Ras)		Inicio	0.620	0.050	0.150
		Después de 2.5 horas	0.340	0.020	0.080
Limite recomendado (NB-512)			0.300	0.100	0.100

Fuente Elaboración propia

Los resultados del escenario 2 se muestran en la siguiente figura:

**Figura 88. Concentraciones de contaminantes en la toma de Achachicala y recomendación de la NB-512, escenario 2**



Fuente Elaboración propia

Para el caso del escenario 2, en el que se tiene un caudal mínimo requerido de 500 l/s proveniente de la presa Pampalarama, y las válvulas cerradas de las presas Chacaltaya y Alpaquita (sólo caudal base), se observa que la concentración de hierro está por encima de los valores recomendados por la NB-512, en cambio, en el caso del aluminio, se presenta una recuperación importante después de 2.5 horas se reduce la concentración por debajo de los valores recomendables, por otro lado, el manganeso cumple con los requerimientos de la NB-512. Por lo tanto, para este escenario se necesitaría un tratamiento específico solamente para el hierro.

#### 6.4.3 ESCENARIO 3: DESCARGA MÍNIMA DE 500 l/s SOLO PRESA ALPAQUITA

Para el escenario 3 se han considerado solamente el caudal de descarga de la presa Alpaquita de acuerdo a su curva de descarga, con un caudal mínimo de 500 l/s, manteniendo cerradas las válvulas de las presas Chacaltaya y Pampalarama (solamente se consideró su caudal base), en la tabla 21 se muestran los valores.

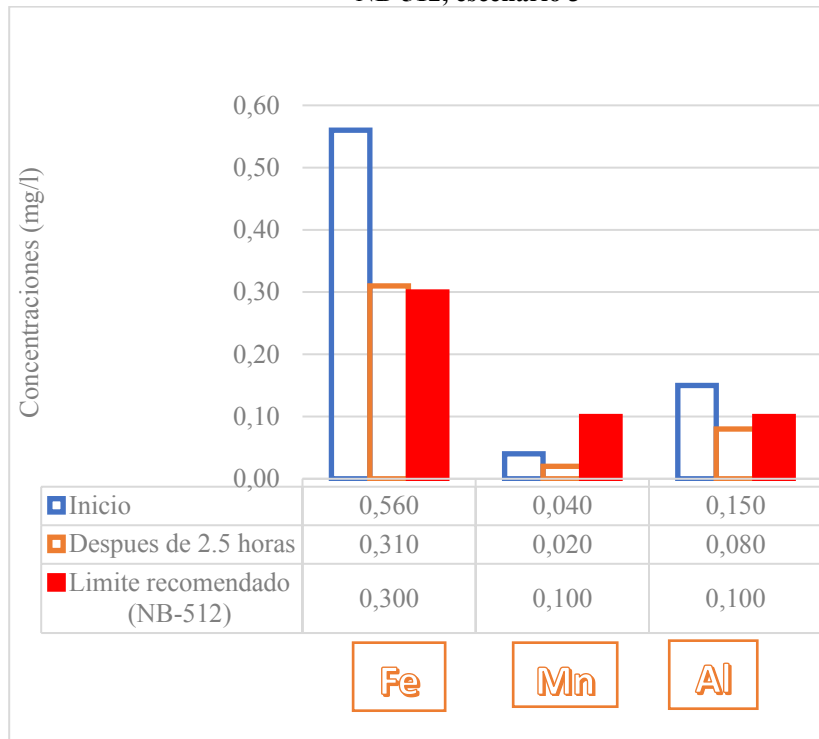
**Tabla 22. Datos introducidos al Hec Ras y resultados para el escenario 3**

N°	Ubicación	Caudal y concentraciones para el análisis de ESCENARIO 3			
		Caudal (m3/s)	Hierro (mg/l)	Manganeso (mg/l)	Aluminio (mg/l)
1	Chacaltaya	0.0063	34.396	2.987	0.484
2	Alpaquita	0.5000	0.042	0.014	0.026
3	Pampalarama	0.0966	1.028	0.000	0.764
4	Unión 1 (Pamp y Alp)	0.5966	0.202	0.012	0.145
5	Unión 2 (Khaluyo)	0.6029	0.558	0.043	0.149
Concentraciones calculadas cerca a la toma de Achachicala (Hec Ras)		Inicio	0.560	0.040	0.150
		Después de 2.5 horas	0.310	0.020	0.080
Limite recomendado (NB-512)			<b>0.300</b>	<b>0.100</b>	<b>0.100</b>

Fuente Elaboración propia

Los resultados del escenario 3 se muestran en la siguiente figura:

**Figura 89. Concentraciones de contaminantes en la toma de Achachicala y recomendación de la NB-512, escenario 3**



Fuente Elaboración propia

En la figura 89 se puede observar que la concentración de hierro está por encima de los límites establecidos por la NB-512, en cambio, en el caso del manganeso su concentración cumple con los requerimientos mínimos de agua potable para estos contaminantes. Para el caso del aluminio se observa una reducción en su concentración después de las 2.5 horas de modelación, con lo que estaría dentro del valor recomendado.

#### **6.4.4 ESCENARIO 4: DESCARGA MÍNIMA DE 500 l/s SOLO PRESA CHACALTAYA**

Para el escenario 4 se considera solamente 500 l/s como mínimo de la válvula de la presa Chacaltaya de acuerdo a su curva de descarga y para el caso de las presas Pampalarama y Alpaquita simplemente se han considerado sus caudales base considerando que tendrían sus válvulas cerradas (ver tabla 22).

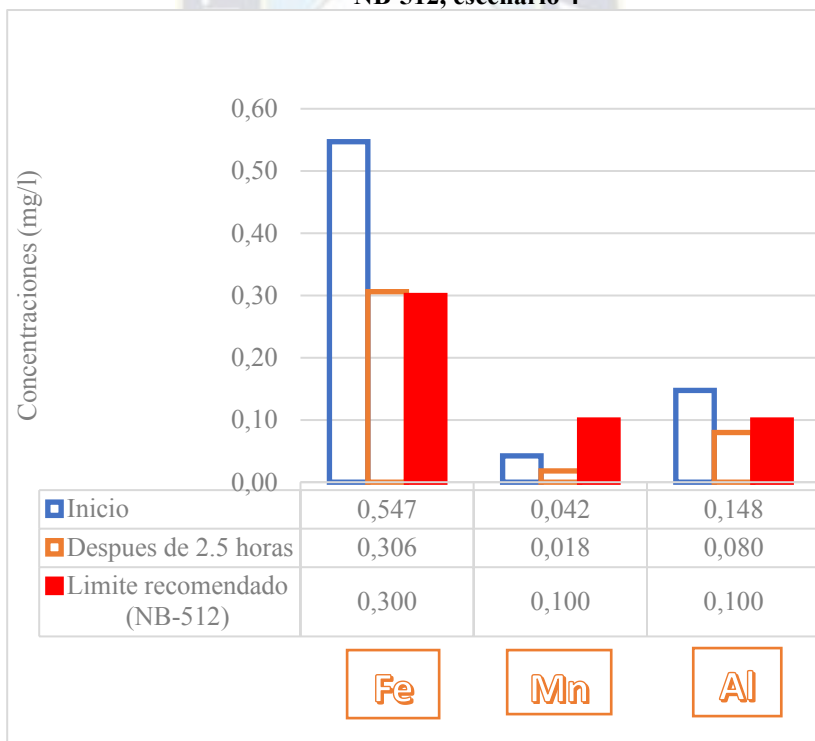
**Tabla 23. Datos introducidos al Hec Ras y resultados para el escenario 4**

N°	Ubicación	Caudal y concentraciones para el análisis de ESCENARIO 4			
		Caudal (m3/s)	Hierro (mg/l)	Manganeso (mg/l)	Aluminio (mg/l)
1	Chacaltaya	0.5000	0.427	0.037	0.006
2	Alpaquita	0.0145	1.498	0.508	0.920
3	Pampalarama	0.0966	1.028	0.000	0.764
4	Unión 1 (Pamp y Alp)	0.1111	1.089	0.066	0.784
5	Unión 2 (Khaluyo)	0.6111	0.547	0.042	0.147
Concentraciones calculadas cerca a la toma de Achachicala (Hec Ras)		Inicio	0.547	0.042	0.148
		Después de 2.5 horas	0.306	0.018	0.080
Limite recomendado (NB-512)			0.300	0.100	0.100

Fuente Elaboración propia

Los resultados se muestran en la siguiente figura:

**Figura 90. Concentraciones de contaminantes en la toma de Achachicala y recomendación de la NB-512, escenario 4**



Fuente Elaboración propia

Para el caso del escenario 4, en la figura 90 se puede observar que el hierro no llega a reducir sus concentraciones por debajo de lo establecido en la NB-512, por otro lado, la concentración



de manganeso y aluminio si llegan a reducir sus concentraciones hasta los valores recomendados para agua potable. Para este escenario se debería considerar un tratamiento específico para el hierro, antes de que el agua llegue al sistema de distribución a la ciudad de La Paz, esto se puede realizar en la planta de tratamiento de Achachicala.

#### 6.4.5 ESCENARIO 5: DESCARGA MÍNIMA DE 500 l/s ENTRE LAS TRES PRESAS

Para este escenario se combinan las tres curvas de descarga de válvulas de las tres presas, de la siguiente manera:

- Presa Pampalarama: apertura de válvulas 15%, 0.32 m<sup>3</sup>/s
- Presa Chacaltaya: apertura de válvulas 15%, 0.20 m<sup>3</sup>/s
- Presa Alpaquita: apertura de válvulas 15%, 0.34 m<sup>3</sup>/s

De acuerdo a sus curvas de descarga de las válvulas estos valores son los menores caudales para la apertura de sus válvulas de regulación (ver tabla 24).

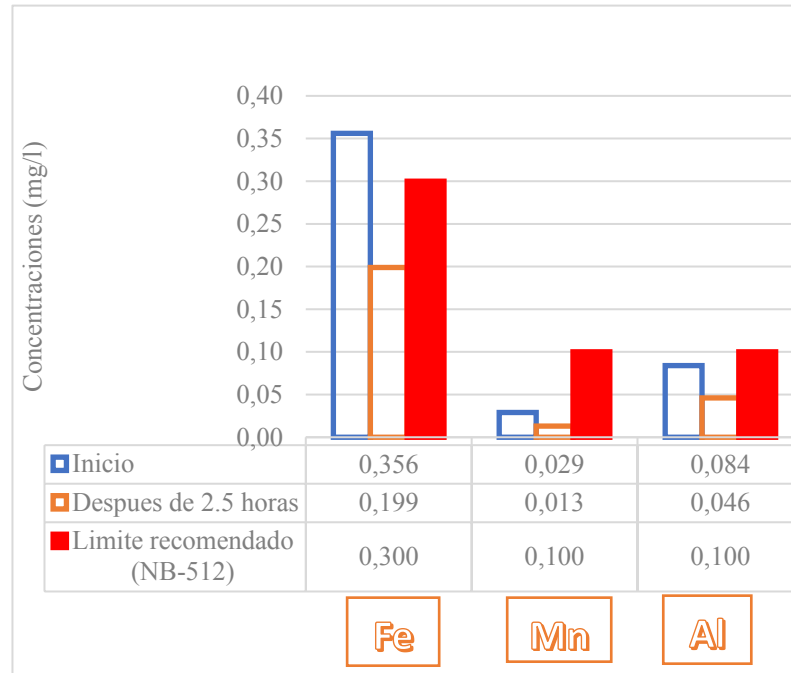
**Tabla 24. Datos introducidos al Hec Ras y resultados para el escenario 5**

N°	Ubicación	Caudal y concentraciones para el análisis de ESCENARIO 5			
		Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Hierro (mg/l)	Manganeso (mg/l)	Aluminio (mg/l)
1	Chacaltaya	0.2000	1.047	0.091	0.015
2	Alpaquita	0.3400	0.061	0.021	0.038
3	Pampalarama	0.3200	0.238	0.000	0.177
4	Unión 1 (Pamp y Alp)	0.6600	0.147	0.011	0.105
5	Unión 2 (Khaluyo)	0.8600	0.356	0.029	0.084
<b>Concentraciones calculadas cerca a la toma de Achachicala (Hec Ras)</b>		<b>Inicio</b>	0.356	0.029	0.084
		<b>Después de 2.5 horas</b>	0.199	0.013	0.046
<b>Limite recomendado (NB-512)</b>			<b>0.300</b>	<b>0.100</b>	<b>0.100</b>

Fuente Elaboración propia

Los resultados se muestran en la siguiente figura:

**Figura 91. Concentraciones de contaminantes en la toma de Achachicala y recomendación de la NB-512, escenario 5**



Fuente Elaboración propia

En la figura 91 se puede observar que el hierro, manganeso y aluminio estarían por debajo del mínimo aceptable. Por lo que en este escenario no se necesitaría utilizar tecnologías de tratamiento de aguas.

Este escenario parece ser el que se utilizará, pero de manera intermitente y con frecuencia dadas las condiciones de demanda y operación de las presas que normalmente realiza EPSAS

Es necesario aclarar que este escenario no podrá ser utilizado permanentemente, dado que con el 15% de apertura constante, la presa Alpaquita se vaciaría en un mes y medio, la presa Pampalarama se vaciaría en 14 meses y la presa Chacaltaya se vaciaría en 10 meses. Por lo tanto, al cabo del mes y medio de vaciada la presa Alpaquita, las condiciones cambiarían.

#### **6.4.6 ESCENARIO 6: VÁLVULAS CERRADAS Y CAUDAL BASE AFORADO EN CAMPAÑA DE MUESTREO (MES DE MAYO)**

Para el escenario 6, se ha considerado que todas las válvulas estarían cerradas, y los tributarios de los ríos estarían circulando solamente con caudal base, pero la diferencia con el escenario 1 sería que el caudal base y las concentraciones son las determinadas en la campaña de muestreo del 15 de mayo de 2019, dado que este dato es una buena referencia del periodo seco (ver tabla 25).

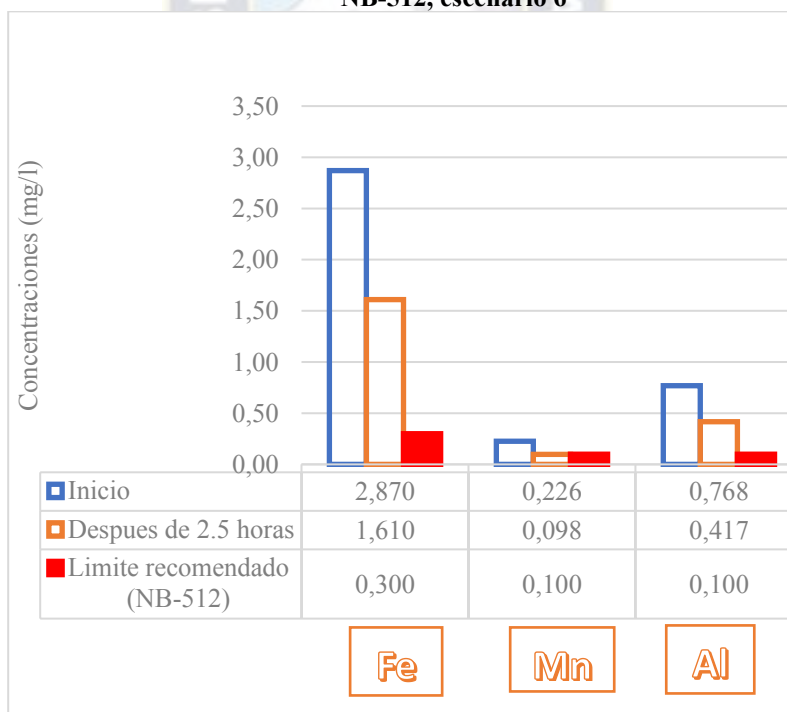
**Tabla 25. Datos introducidos al Hec Ras y resultados para el escenario 6**

N°	Ubicación	Caudal y concentraciones para el análisis de ESCENARIO 6			
		Caudal (m3/s)	Hierro (mg/l)	Manganeso (mg/l)	Aluminio (mg/l)
1	Chacaltaya	0.0063	34.396	2.987	0.484
2	Alpaquita	0.0145	1.498	0.508	0.920
3	Pampalarama	0.0966	1.028	0.000	0.764
4	Unión 1 (Pamp y Alp)	0.1111	1.089	0.066	0.784
5	Unión 2 (Khaluyo)	0.1174	2.871	0.223	0.768
Concentraciones calculadas cerca a la toma de Achachicala (Hec Ras)		Inicio	2.870	0.226	0.768
		Después de 2.5 horas	1.610	0.098	0.417
Limite recomendado (NB-512)			0.300	0.100	0.100

Fuente Elaboración propia

Los resultados se muestran en la siguiente figura:

**Figura 92. Concentraciones de contaminantes en la toma de Achachicala y recomendación de la NB-512, escenario 6**



Fuente Elaboración propia

El escenario 6, considera las válvulas cerradas con una caudal base en todos los tributarios, este, conjuntamente con el escenario 1, son los peores escenarios posibles, dado que como se puede observar en la gráfica anterior, todos los parámetros de contaminación están fuera de los

parámetros admisibles para agua potable recomendados en la NB-512. Por lo tanto, para este escenario se debe considerar tecnologías específicas para el tratamiento de hierro, manganeso, y aluminio, posiblemente en la planta de Achachicala; para aplicar estas tecnologías, se debe realizar el diseño e investigación respectivo, que salen del alcance de este trabajo.

#### 6.4.7 ESCENARIO 7: PRESA ALPAQUITA CERRADA Y DESCARGA AL 15% DE LAS PRESAS CHACALTAYA Y PAMPALARAMA

Para el escenario 7 se ha buscado una solución real factible para poder reducir las concentraciones con caudales que sean reales y posibles de mantener en el tiempo, se ha considerado los siguientes aspectos (ver tabla 26):

- La presa Alpaquita no puede mantenerse abierta todo el tiempo, porque con la mínima descarga de 15%, la presa se vaciaría en un mes y medio, por lo tanto, la descarga de esta presa seguramente será intermitente. Por lo que en este escenario se ha considerado cerrada como peor escenario, solo se consideró su caudal base.
- En el caso de las presas Pampalarama y Chacaltaya, es posible y factible mantener una apertura de sus válvulas al 15% todo el tiempo, de manera que estas se vaciarían en 14 y 10 meses respectivamente, esto alcanza al siguiente periodo de lluvias fácilmente para la nueva recarga de las presas y de este modo no se tendrían estas presas nunca vacías.

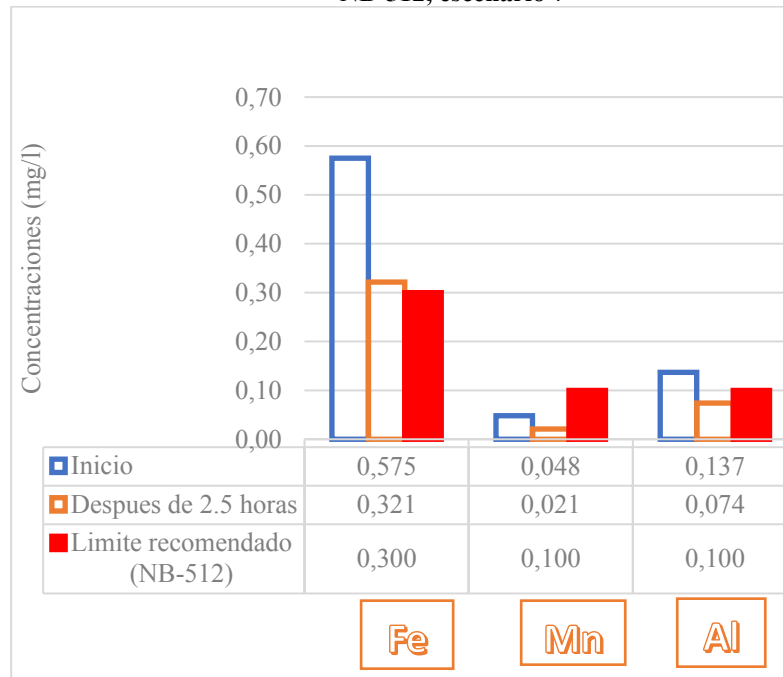
**Tabla 26. Datos introducidos al Hec Ras y resultados para el escenario 7**

N°	Ubicación	Caudal y concentraciones para el análisis de ESCENARIO 7			
		Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Hierro (mg/l)	Manganeso (mg/l)	Aluminio (mg/l)
1	Chacaltaya	0.2000	1.047	0.091	0.015
2	Alpaquita	0.0145	1.498	0.508	0.920
3	Pampalarama	0.3200	0.238	0.000	0.177
4	Unión 1 (Pamp y Alp)	0.3345	0.293	0.022	0.209
5	Unión 2 (Khaluyo)	0.5345	0.575	0.048	0.137
<b>Concentraciones calculadas cerca a la toma de Achachicala (Hec Ras)</b>		<b>Inicio</b>	0.575	0.048	0.137
		<b>Después de 2.5 horas</b>	0.321	0.021	0.074
<b>Limite recomendado (NB-512)</b>			<b>0.300</b>	<b>0.100</b>	<b>0.100</b>

Fuente Elaboración propia

Los resultados se muestran en la figura siguiente:

**Figura 93. Concentraciones de contaminantes en la toma de Achachicala y recomendación de la NB-512, escenario 7**



Fuente Elaboración propia

En la figura 86 se observa que la concentración del hierro en el agua es mayor al límite establecido por la NB-512, por otro lado, se ha podido reducir la concentración de los contaminantes manganeso y aluminio, de manera que lleguen a ser menores a las concentraciones establecidas en la NB-512 para agua potable.

Por lo tanto, para este escenario se debe considerar una tecnología de tratamiento para la reducción en la concentración del hierro solamente, porque para los otros parámetros es posible reducir su concentración con la dilución y regulación del caudal en las presas de la siguiente manera:

- Válvula de la presa Alpaquita cerrada
- Válvula de la presa Chacaltaya abierta al 15% constantemente
- Válvula de la presa Pampalarama abierta al 15% constantemente

#### **6.4.8 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS PARA CADA ESCENARIO CONSIDERADO**

Se han analizado diversas alternativas (Tabla 27) para la reducción de las concentraciones de los contaminantes considerados en este estudio; a continuación, se presentan algunas graficas comparativas de los resultados obtenidos y los escenarios considerados:

**Tabla 27. Resumen general de resultados y escenario planteados**

Escenario	NB 512	Fe	NB 512	Mn	NB 512	Al
Escenario 1	0.300	4.740	0.100	0.350	0.100	0.320
Escenario 2	0.300	0.340	0.100	0.020	0.100	0.080
Escenario 3	0.300	0.310	0.100	0.020	0.100	0.080
Escenario 4	0.300	0.306	0.100	0.018	0.100	0.080
Escenario 5	0.300	0.199	0.100	0.013	0.100	0.046
Escenario 6	0.300	1.610	0.100	0.098	0.100	0.417
Escenario 7	0.300	0.321	0.100	0.021	0.100	0.074

Fuente Elaboración propia

Se ha realizado un análisis comparativo de las soluciones planteadas, a continuación, se muestran las gráficas (figura 94, 95 y 96) comparativas para cada contaminante correspondiente a cada escenario planteado, todos los resultados muestran las concentraciones calculadas por el Hec Ras en el río Choqueyapu a la altura de la toma de planta de tratamiento de Achachicala:

**Figura 94. Concentración de hierro para cada escenario planteado**

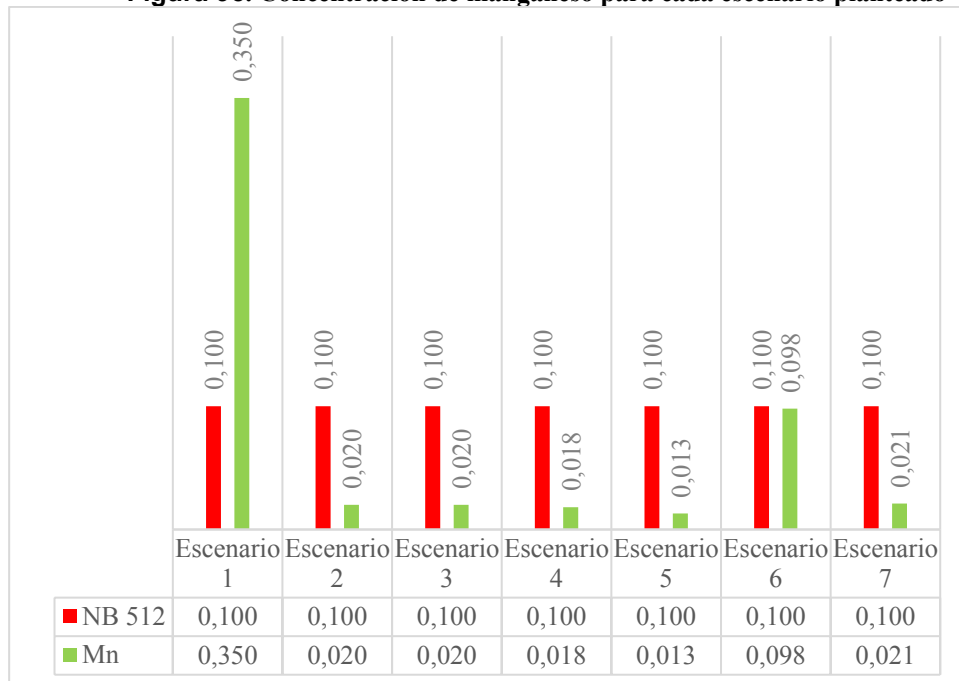


Fuente Elaboración propia

Como se ve en la figura 94, los escenarios 1 y 6 (las tres presas con las válvulas de cerradas) son los peores, los escenarios 2, 3, 4 y 7 no han llegado a la concentración aceptable, sin embargo, se puede decir que está muy cerca. En cambio, para el escenario 5 la concentración de hierro sí se ha podido bajar hasta llegar a los requisitos establecidos en la NB-512 para este contaminante. Este contaminante (hierro) ha definido las recomendaciones realizadas.



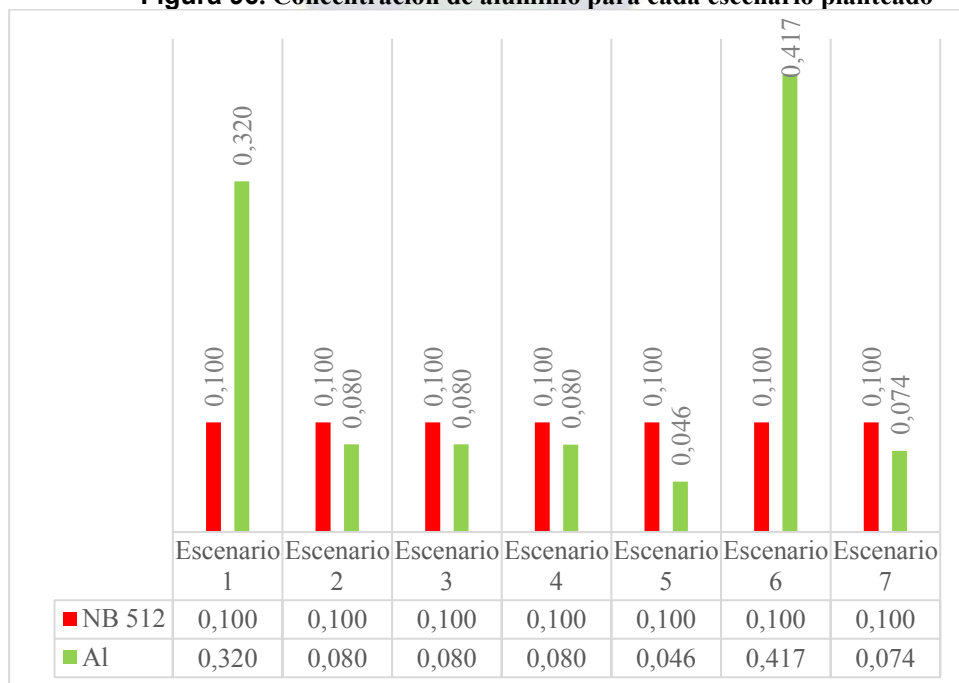
**Figura 95. Concentración de manganeso para cada escenario planteado**



Fuente Elaboración propia

Para el caso del manganeso (figura 95), se ha logrado cumplir con el objetivo de reducir la concentración hasta llegar a los límites sugeridos por la NB-512 para el caso de los escenarios 2, 3, 4, 5, 6 y 7. Pero para el caso del escenario 1, no se ha podido reducir su concentración, debido a que ese escenario es el peor (válvulas cerradas).

**Figura 96. Concentración de aluminio para cada escenario planteado**



Fuente Elaboración propia

En el caso del aluminio (figura 96) se ha podido reducir sus concentraciones en los escenarios 2, 3, 4, 5 y 7, llegando a tener concentraciones de aluminio en el agua menores a los límites permitidos en la NB-512, por lo tanto, aptas para ser usadas para el agua potable. Sin embargo, para los escenarios 1 y 6 las concentraciones no han podido reducirse a los valores recomendados en la NB-512, dado que son los peores escenarios (válvulas cerradas).

En la tabla 28 se presenta un resumen de los caudales considerados y las consideraciones asumidas para cada escenario planteado.

**Tabla 28. Resumen de los caudales y consideraciones para cada escenario**

Escenario	Caudales ingresados al HecRas			Observaciones		
	Chacaltaya	Alpaquita	Pampalarama	Chacaltaya	Alpaquita	Pampalarama
1	0.00340	0.00296	0.00340	Qmin	Qmin	Qmin
2	0.00628	0.01451	0.50000	Q base	Q base	500 l/s
3	0.00628	0.50000	0.09656	Q base	500 l/s	Q base
4	0.50000	0.01451	0.09656	500 l/s	Q base	Q base
5	0.20000	0.34000	0.32000	200 l/s (15%)	340 l/s (15%)	320 l/s (15%)
6	0.00628	0.01451	0.09656	Q base	Q base	Q base
7	0.20000	0.01451	0.32000	200 l/s (15%)	Q base	320 l/s (15%)

Fuente Elaboración propia

**Tabla 29. Resumen de cumplimiento de la NB-512 de cada contaminante**

Escenario	Fe	Mn	Al
Escenario 1	No cumple	No cumple	No cumple
Escenario 2	No cumple	Cumple	Cumple
Escenario 3	No cumple	Cumple	Cumple
Escenario 4	No cumple	Cumple	Cumple
Escenario 5	Cumple	Cumple	Cumple
Escenario 6	No cumple	Cumple	No cumple
Escenario 7	No cumple	Cumple	Cumple

Fuente Elaboración propia

La tabla 28 muestra en resumen todos los escenarios planteados y el cumplimiento de cada contaminante con la NB-512, para ser considerada como agua para consumo humano, en este cuadro se puede observar que se ha podido reducir en gran medida las concentraciones con la aplicación de diferentes caudales que se han considerado reales y factibles en función de un análisis de operación de cada presa. Para la mayoría de los casos es posible la reducción de los contaminantes como el manganeso y aluminio, en cambio, en el caso del hierro, resulta más difícil la reducción de su concentración, dado que sólo fue posible su reducción para el caso del escenario 5, en el que todos los parámetros cumplieron las concentraciones propuestas por la NB-512; por lo que se puede decir que el escenario 5 sería el más favorable de todos los escenarios planteados, pero lamentablemente este escenario tiene una dificultad en el caso de la

presa Alpaquita, dado que para que se cumpla las condiciones de este escenario se requiere la abertura mínima de las válvulas de las tres presas al 15%; la presa Alpaquita con esta apertura se vaciaría en poco menos de 2 meses, lo que hace que la medida no pueda sostenerse por más tiempo; en cambio, las presas Pampalarama y Chacaltaya se vaciarían en más de 10 meses. El siguiente escenario más favorable resulta ser el escenario 7, en el que se mantiene una apertura del 15% en las válvulas de las presas Pampalarama y Chacaltaya, en el caso de la presa Alpaquita las válvulas se mantendrían cerradas, podría funcionar intermitentemente a requerimiento. Los escenarios 2, 3 y 4, tienen el principio de mantener constantemente un caudal de 500 l/s requeridos por EPSAS de cualquiera de las tres presas, lo que resulta también beneficioso para los fines que se persiguen en esta investigación, con estos 3 escenarios se reducen los dos contaminantes (Mn y Al), pero quedaría pendiente la concentración del hierro, la cual debería considerarse su tratamiento posiblemente en la misma planta de Achachicala. Para el caso de los escenarios 1 y 6, son las peores condiciones de operación de las presas para la reducción de los contaminantes, porque ambos están considerando un caudal mínimo aforado en mayo y en agosto, considerando las tres presas con las válvulas cerradas.

Para el escenario más favorable que requiere necesariamente una reducción en la concentración del hierro, esta reducción deberá ser del 7.13 % (de 0.3214 a 0.3 mg/l) lo que se puede considerar fácilmente tratable con aireación o con aplicación de cal en las tolvas usadas para dosificar reactivos de la planta de Achachicala (ver anexo I), según el folleto informativo de EPSAS (ver anexo I) actualmente se aplican reactivos de cal hidratada y sulfato de aluminio.

## **7.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1.1 CONCLUSIONES**

- En el proceso de calibración hidrodinámica se ha podido determinar el coeficiente de rugosidad “n” por medio de la comparación entre el tirante simulado y el medido en un lugar específico, este valor está dentro de lo recomendados en tablas de la literatura consultada (Ven Te Chow, 1994) (Ver Anexo VI), 0.030 para el lecho del río y 0.040 para los márgenes de inundación.
- En el proceso de calibración del modelo de calidad de agua “water quality” del Hec Ras, se ha determinado el coeficiente K “constante de velocidad”, aplicando el modelo de “constituyentes arbitrarios” del software Hec Ras, el cual tiene una excelente correlación

para los 3 contaminantes hierro, manganeso y aluminio, con unos valores de 0.9839, 0.9875 y 0.9829, respectivamente

- Para la verificación y comprobación de los valores de K calculados por el Hec Ras, se han utilizado las concentraciones de la campaña de muestreos del 25 de mayo de 2019, entre dos puntos consecutivos (puente Khaluyo y puente Limanipata), teniendo estas dos concentraciones y resolviendo la ecuación del balance de masa para compuestos no conservativos, considerando un modelo lineal para el coeficiente K y simplificando el régimen del flujo a un flujo uniforme, se ha podido determinar los coeficientes K para cada contaminante. En el caso del hierro, manganeso y aluminio los valores calculados manualmente y con el Hec Ras tienen muy poca diferencia, por lo que se puede decir que se ajustan muy bien al modelo; en cambio para el caso del antimonio, los resultados muestran que existe una diferencia muy grande entre los valores calculados manualmente y con el Hec Ras, por lo que el modelo no es aplicable a este contaminante; cabe hacer notar que las concentraciones muestreadas de este contaminante resultan tener mayores valores aguas abajo, lo cual significaría un incremento en su valor, esto debido fundamentalmente a la actividad de explotación de agregados aguas abajo y al peso específico elevado de este contaminante; posiblemente requiera una investigación específica con otro tipo de modelo para K (constante de velocidad) e hipótesis específicas para este caso. Por lo tanto, para los diferentes escenarios de operación de presas se han considerado las simulaciones realizadas para el hierro, manganeso y aluminio, descartando las concentraciones realizadas para el antimonio.
- Se han realizado 7 escenarios posibles de operación de presas de acuerdo a la curva de descarga de las válvulas y del requerimiento mínimo de 500 l/s (requerido por EPSAS), considerando también los caudales mínimos y caudales base producto de aforos en campo y también se han planteado soluciones reales y factibles para la reducción de la concentración en función de diversas aperturas de las válvulas de las tres presas.
- El escenario 1 es el más desfavorable dado que con el caudal base (medido en agosto por la consultora del proyecto) los cuatro parámetros no cumplen con lo establecido en la NB-512, por lo que se deberían emplear tratamientos específicos para cada elemento. Sin embargo, este escenario sólo se dará en el caso de que las tres presas estén cerradas

y no descargan ningún caudal, por lo que se recomendaría que no se dejen las presas sin descarga de agua en ningún momento

- Para los escenarios 2, 3 y 4, en el que se mantiene una descarga mínima de 500 l/s de cualquiera de las presas, se logra reducir las concentraciones de 2 de los 3 contaminantes estudiados, quedando pendiente la concentración del hierro. Este escenario puede ser favorable si se considera un tratamiento específico para el hierro en la planta de Achachicala
- Para el caso del escenario 5, en el que se tiene una descarga constante de 15% de las válvulas de las tres presas, es el más favorable de todos, pero presenta un problema, la presa Alpaquita con esa descarga vaciaría en poco menos de dos meses, por lo que no resulta sostenible en el tiempo esta medida.
- El escenario 6, es un escenario totalmente desfavorable porque mantiene cerradas las válvulas de las tres presas y sólo se considera los caudales base (aforados en mayo), estos caudales no son suficientes para reducir las concentraciones de los contaminantes, por lo que no se aconseja mantener cerradas las válvulas en ningún momento de las presas
- El escenario 7 considera la apertura al 15% de las válvulas de las presas Chacaltaya y Pampalarama y la válvula cerrada en la presa Alpaquita (puede ser abierta intermitentemente para llegar al escenario 5), con estos caudales se obtiene una reducción en la concentración de los 3 contaminantes (manganeso, hierro y aluminio), sin embargo, en el caso del hierro, se logra reducir la concentración, pero no por debajo de lo establecido en la NB-512. Por lo tanto, para este escenario es muy favorable si se considera un tratamiento específico del 7.13 % (de 0.3214 a 0.3 mg/l) para el hierro en la planta de Achachicala.
- El escenario 4, considera una apertura constante de la válvula de la presa Chacaltaya y se buenos resultados para el manganeso y aluminio; en el caso del hierro está muy cerca del límite establecido en la NB 512 (0.306 mg/l, la NB 512 recomienda 0.3 mg/l).
- Finalmente se puede concluir que es recomendable mantener abierta al 15% las válvulas de las presas Pampalarama y Chacaltaya, ya sea una de ella o si es posible las dos (escenarios 2, 4 y 7). En el caso de Alpaquita, no se puede sostener la apertura de su válvula por más de dos meses (escenario 3).



- No se recomienda cerrar las válvulas de las tres presas. Debe mantenerse una de las presas al menos con una apertura del 15%

### 7.1.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar la modelación hidráulica conjuntamente a la modelación de calidad de agua, dado que no es posible conocer la calidad de agua en un río si no se hace primero una modelación hidráulica adecuada considerando las variaciones del caudal que generan diversos escenarios hidráulicos.
- De acuerdo a las simulaciones realizadas se recomienda no dejar las válvulas cerradas de las tres presas al mismo tiempo, dado que esto producirá una contaminación apreciable de Fe, Mn, y Al.
- Se recomienda dejar abierta las válvulas de al menos una de las presas todo el tiempo con un mínimo de 15% de apertura de válvulas.
- Se recomienda aplicar tecnologías de tratamiento para la reducción del hierro para el caso de los escenarios 1, 2, 3, 6 y 7.
- El hierro varía generalmente con la presencia de aire y es necesario considerar el efecto de la aireación a lo largo del cauce (más de 20 km). Sin embargo, el programa no permite realizar la aireación específica para el hierro, para este fin es necesario realizar campañas de muestreo más grandes con mayores puntos de control y con mayores variables como el oxígeno disuelto, también se debería buscar una relación específica para el oxígeno y el Hierro, posiblemente esto se pueda realizar en futuras investigaciones. En el caso del Antimonio, se debe considerar los procesos de sedimentación que pueda tener mucha influencia en este elemento, para esto sería necesario realizar muchas campañas de muestreo y hacer un análisis muy similar al caso de transporte de sedimentos, pero considerando ciertas características peculiares del Antimonio. Se recomienda se pueda realizar en futuras investigaciones.
- Se recomienda que se anule o se cierre cualquier concesión minera en la zona de las fuentes de agua para la población de La Paz por el nivel de alto riesgo que esto pueda significar o en su defecto se debe garantizar que las mismas desarrollen sistemas de tratamiento que garanticen calidad mínima de agua para consumo humano.



## 7.2 ALCANCE Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

- En la presente investigación se ha logrado realizar la calibración hidrodinámica y la calibración del componente “constituyentes arbitrarios” de calidad de agua del Hec Ras (arbitrary constituents - wáter quality), para los contaminantes: hierro, manganeso y aluminio.
- El modelo de calidad de agua del Hec Ras ha sido verificado con la resolución manual de la ecuación de balance de masa para compuestos no conservativos, utilizando datos de la campaña de muestreos del 25 de mayo de 2019, bajo suposiciones hidráulicas simplificadas. Para realizar una campaña de validación para otros escenarios se requiere una nueva campaña de muestreos diferente a la utilizada, bajo otro escenario hidrodinámico y posiblemente bajo otros escenarios de actividad minera en el sector, esta tarea podría ser parte de una nueva investigación futura, dado que esta actividad no está dentro de los objetivos ni el alcance de este trabajo.
- Los resultados obtenidos del coeficiente  $k$  (constante de velocidad de reacción) han sido comparados con los resultados calculados con métodos simplificados y han logrado tener una buena consistencia, en el entendido de que las herramientas computacionales no reemplazan los cálculos realizados a mano, sino más bien, facilitan la operación de métodos numéricos que mejoran los resultados acercándose más a la realidad.
- Se ha observado que existe una diferencia entre los valores de  $K$  calculados con el Hec Ras y calculada por el método simplificado, como era de esperarse en un valor menor al 10% para el Hierro, Manganeso y Aluminio. Sin embargo, para el caso del Antimonio la variación es demasiado grande (96.91%), por lo que se puede concluir dos cosas: el modelo no es aplicable a concentraciones como el aluminio, quizá pueda modelarse mejor como compuesto conservativo; segundo, se debe estudiar otros fenómenos adicionales para poder reducir este contaminante dado que parece ser insensible a la autopurificación de ríos.
- Los escenarios de operación de las presas pueden producir reducciones en la concentración de los contaminantes debido al efecto de “autopurificación del río”, lo cual se explica con el balance de masa de compuestos no conservativos y considerando al río como un reactor dadas las grandes dimensiones y el tiempo considerable de recorrido del flujo en el sistema. Sin embargo, esto no representa en sí mismo una tecnología de tratamiento de aguas, la presente investigación representa un procedimiento que se debería realizar para identificar

la contaminación real en los cuerpos de agua, así también, plantea soluciones prácticas para reducir las concentraciones con caudales mayores (dilución y procesos de autopurificación de ríos)

- La presente investigación es exclusivamente para contaminantes de aguas ácidas producto de la actividad minera, que se comporten como contaminantes no conservativos, no es recomendable la utilización en contaminantes orgánicos que sean sensibles al oxígeno disuelto o temperatura, o compuestos que tengan alguna otra reacción con el agua que genere otro tipo de fenómenos.



## BIBLIOGRAFÍA

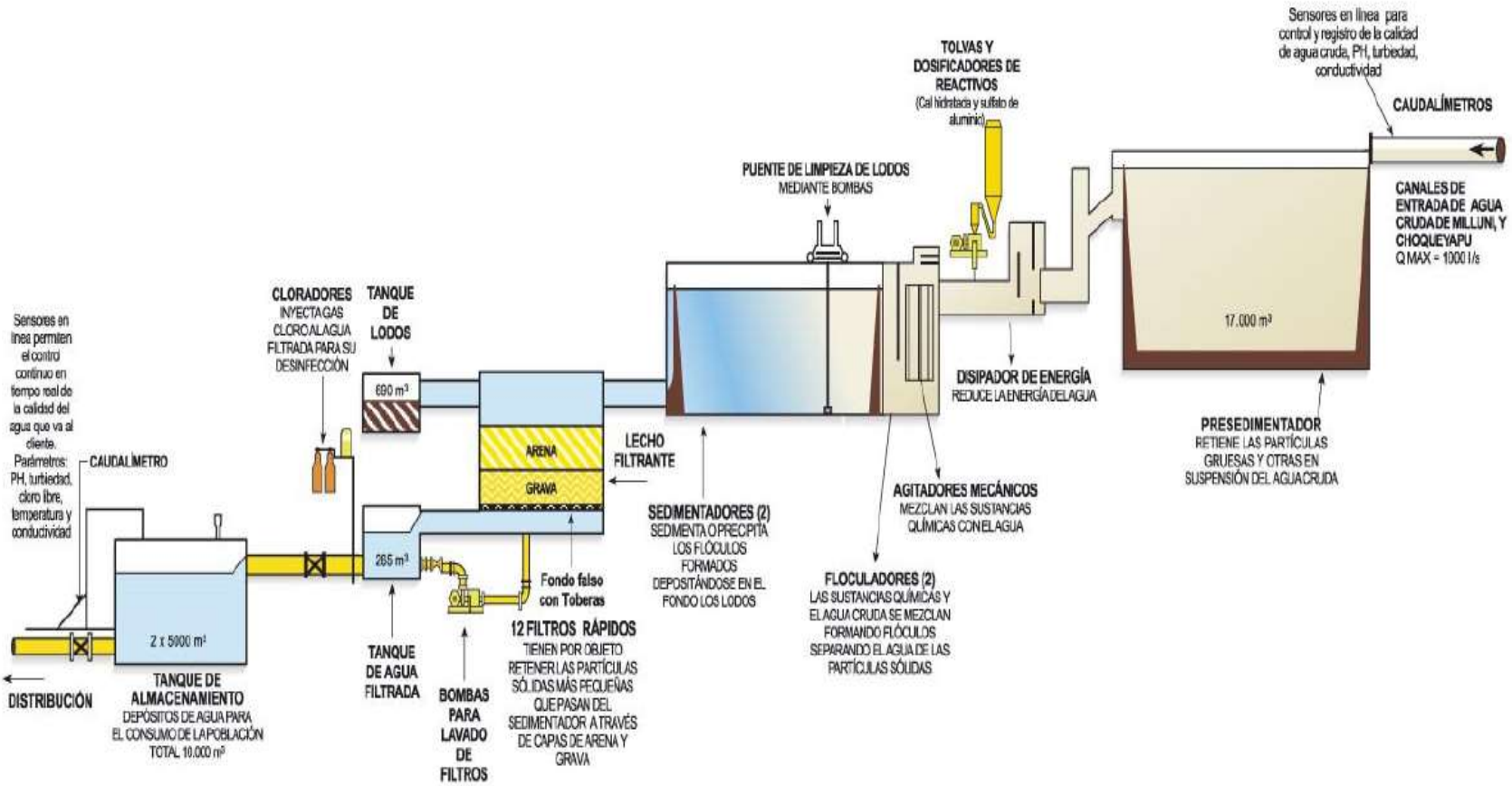
- Aguilar, N. (2009). *Alternativas técnico económicas del ambalse Kaluyo para la planta potabilizadora de Achachicala*. 2009: Carrera de Ingeniería Civil UMSA.
- Alonso, d. (25 de 09 de 2019). *MappingGis*. Obtenido de MappingGis: <https://mappinggis.com/2018/01/ejemplo-practico-aplicacion-del-modelador-qgis-video/>
- Bellot, F. (2007). *Apuntes - Tecnología de Procesos Ambientales*. La Paz: IIS UMSA.
- Campanini Gonzales, O. (2014). Agua y Minería en Bolivia . *Pueblo y Soberanía*, 1-30.
- Campanini Gonzales, O. (2017). Agua y minería en Bolivia. ¿ Riesgos lejanos? *Recursos Naturales*, 34-44.
- Caviendes, D., Muñoz, R., Perdomo, A., Rodriguez, D., & Sandoval, I. (2015). Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales, una revisión. *Ingeniería y región*, 2015;13(1):73-90.
- Contraloría General del Estado de Bolivia. (2013). *Auditoria Ambiental*. La Paz, Bolivia: Comunicación El País S.A. "LA RAZON".
- Cueva Portal, M., Cañon Barriga, J., & Cea, L. (2018). El modelo Iber como herramienta docente de ayuda al aprendizaje y análisis de fenómenos de flujo bidimensionales. *XXV Congreso Nacional de Hidráulica*, 2.
- Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social . (2019). *EDTP PRESAS PAMPALARAMA, CHACALTAYA Y ALPAQUITA*. LA PAZ: FPS.
- Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social. (2018). *Construcción Presa Chacaltaya (La Paz)*. La Paz Bolivia: FPS Oficina Central.
- Grupo de ingeniería del agua y del medio ambiente. (26 de 09 de 2019). *slideplayer*. Obtenido de slideplayer: <https://slideplayer.es/slide/8442943/>
- Hardenbergh, W., & Rodie, E. (1975). *Ingeniería Sanitaria*. México.
- Hydraulic Reference Manual. (2019). *Estructura de un proyecto* . Hec ras US Army.
- Lavadenz Carpio , L. (2007). *Tesis de Maestría: "Análisis de sensibilidad y de escenarios de calidad del río Choqueyapu"*. La Paz: Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Lavadenz Carpio, L. (2007). *Análisis de sensibilidad y de escenarios de calidad del río Choqueyapu*. La Paz: Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental UMSA.
- Lluén Chero, W., & Blade Castellet, E. (2015). Aplicación de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para cálculos bidimensional del flujos de agua en ríos. *IV Jornadas de Ingeniería del Agua*, A9.
- Lluén Chero, W., & Bladé i Castellet, E. (2015). *Tesis de Master: Aplicación de la nueva herramienta Hec Ras 5.0 para calculos bidimensionaels del flujo de agua en ríos*. Barcelona, España: Escuela técnica superior de ingeniería de caminos, Ingeniería del Agua.
- Méndez Soreano, J. (16 de 10 de 2019). *slidePplayer.es*. Obtenido de slidePplayer.es: <https://slideplayer.es/slide/14478754>
- Mesa Giraldo, S. (2012). *Desarrollo de un sistema de información geográfica Web para el análisis espacial y temporal de finanzas del reino de CAstilla en el siglo XVI*. Madrid, España: Facultad de geografía, Universidad Complutense de Madrid.

- Minimal Blog by WPinterface. (26 de 09 de 2019). *Survey*. Obtenido de Survey: <http://www.n2survey.com/index.php/blog/>
- Municipalidad de Loja. (2010). *Curso de GIS*. Loja: Municipalidad de Loja.
- NIPON KOEI CO LTDA, & PCA Consultores. (2007). *Revisión y Actualización del Plan MAestro de Drenaje para la ciudad de La Paz*. La Paz.
- Paz , O., & Rivera, G. (1991). *Contaminación de aguas superficiales contaminación del río Choqueyapu*. La Paz: IIS UMSA.
- Paz , O., & Rivera, G. (1991). *Evolución de la calidad del río Choqueyapu*. La Paz: IIS UMSA.
- Paz Rada, O., & Bellot, F. (2001). *Determinación automática de las constantes de la demanda bioquímica de oxígeno DBO*. La Paz: IIS UMSA.
- Paz Rada, O., & Días Benavente, J. (1999). *Modelización ecológica de un río*. La Paz: IIS UMSA.
- Paz, O. (2007). *Apuntes - Calidad de agua*. La Paz: IIS UMSA.
- Ramalho, R. (1993). *Tratamiento de aguas residuales*. Inglaterra.
- rauhermi. (25 de 02 de 2015). *Es el agua*. Obtenido de Es el agua: <http://eselagua.com/2015/02/28/transitorios-hidraulicos-en-tuberias/>
- Ríos Paz, S., & Gonzáles Leytón, L. (1986). *Contaminación de la cuenca Milluni*. La Paz: Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria.
- Rivera, G., & Bellot, F. (1995). *Aplicación del modelo de simulación de calidad de agua QUAL2E en la cuenca del río La Paz*. La Paz: IIS UMSA.
- Rojas, R. (2001). *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios*. 2001.
- Sansoloni Company, V. (2019). Vámulas y elemntos de control para el sector de presas y centrales hidroeléctricas. *Comeval a company of the armaturen Group*, 1-28.
- Santiago, I., & Oficina de Gerencia y Presupuesto. (2017). *Tutorial Quantum QGIS 2.18 versión "Las Palmas de Gran Canaria"*. España: Oficina de gerencia y presupuesto.
- Ven Te Chow. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. California: MacGraw-Hill.
- Villa, M. (13 de junio de 2013). 19 desafíos para nueva empresa, el primero, hallar fuente de agua. *La rRzón*.
- Weber, J. (2003). *Control de la calidad del agua, procesos fisicoquímicos*. España.
- Zamora Echenique, G., Zamora Mercado, V., & Gorrity P., M. (2015). Propuesta de tratamiento de las aguas ácidas de la mina Milluni mediante drenes anóxicos calizos. *Revista metalúrgica, Universidad Técnica de Oruro*, N° 36.
- Zouiten, H. (2012). *Análisis mediante modelado avanzado de procesos de eutrofización en lagunas litorale. Aplicación a masas de agua atlánticas y mediterráneas, tesis doctoral*. Tesis doctoral.

## **Anexo I**

### **Planta de tratamiento de Achachicala**

## Anexo 1. Esquema de la planta de tratamiento de agua en Achachicala



Fuente: Folletos informativos de EPSAS



## **Anexo II**

# **Situación Minera y el Abastecimiento de agua en Bolivia**

Las normas y políticas desde antes que exista Bolivia entregaron el agua a la minería nacional e internacional, esta política se mantiene y se profundiza con la Ley 535 de Minería y Metalurgia. Como la oligarquía minera en nuestro país es la que ha desarrollado las leyes y normas, estas han puesto el agua a disposición de la actividad minera sin costos adicionales y sin ningún control. A continuación, se resume algunos datos importantes (Campanini Gonzales, 2014):

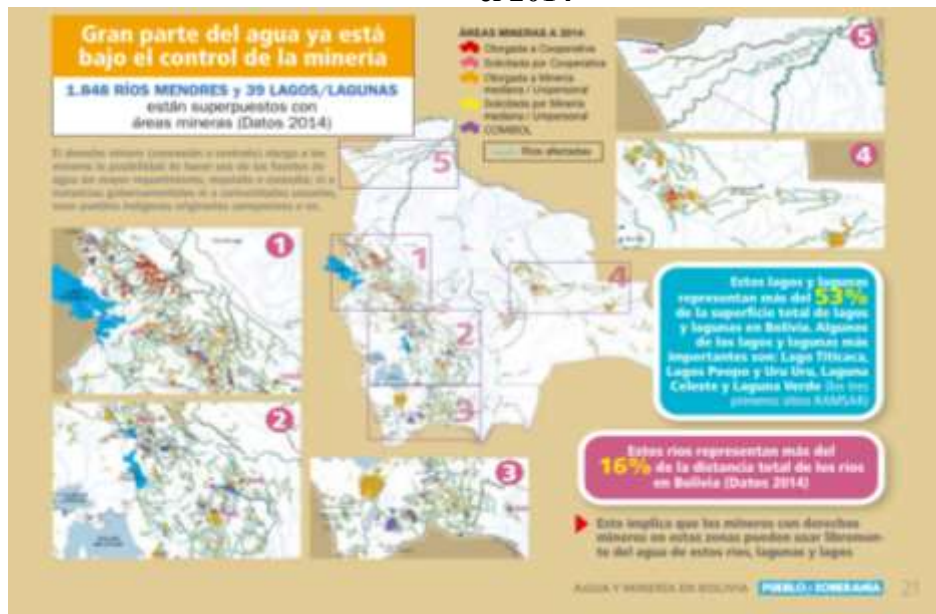
- La Ley de aguas elaborada en 1879 y elevada a rango de Ley en 1906, entrega la propiedad del agua en la mina al minero (art.35)
- Desde entonces todos los códigos entregan el agua en la mina a libre disposición de la actividad minera: Ley de minería 1880 (art. 25), código de minería 1925 (art. 114-122), Decreto de Ley 1965 y elevado a rango de ley en 1991 (art. 85,87 y 90), Código minero 1997 (art. 36-38)
- La ley 535 de Minería y Metalurgia de 2014 (art. 13, IV) reconoce a todos los mineros derechos preconstituidos, es decir el adquirido con todas las normas anteriores

Gracias a este marco normativo se tiene los siguientes datos:

- 109 áreas mineras que cubren una superficie de 69.780 hectáreas fueron entregadas como concesión de agua
- Las 8.249 áreas mineras (concesiones y contratos) vigentes hasta el 2014 tienen derecho de usar libremente el agua

El carácter “estratégico y de interés o necesidad pública” ha sido el pretexto permanente para el uso y abuso del agua por la minería.

## Anexo 2. Distribución de áreas mineras y los recursos hídricos en el país hasta el 2014



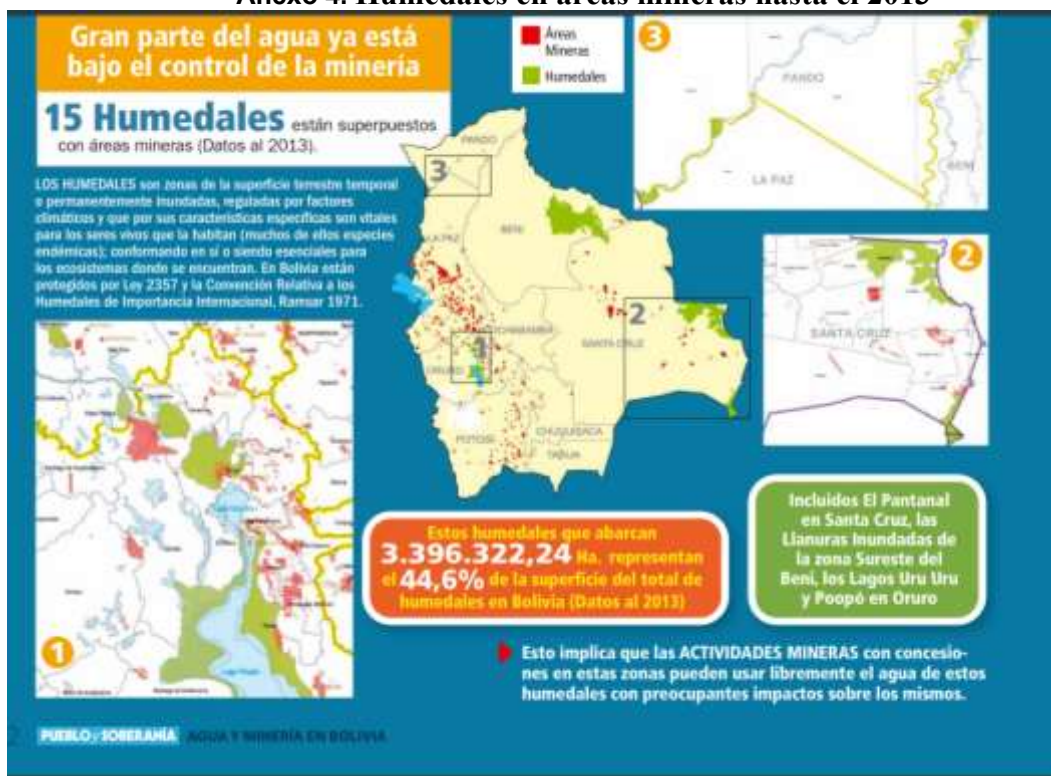
Fuente: (Campanini Gonzales, 2014)

## Anexo 3. Número de áreas mineras con fuentes de agua superficiales



Fuente: (Campanini Gonzales, 2014)

#### Anexo 4. Humedales en áreas mineras hasta el 2013



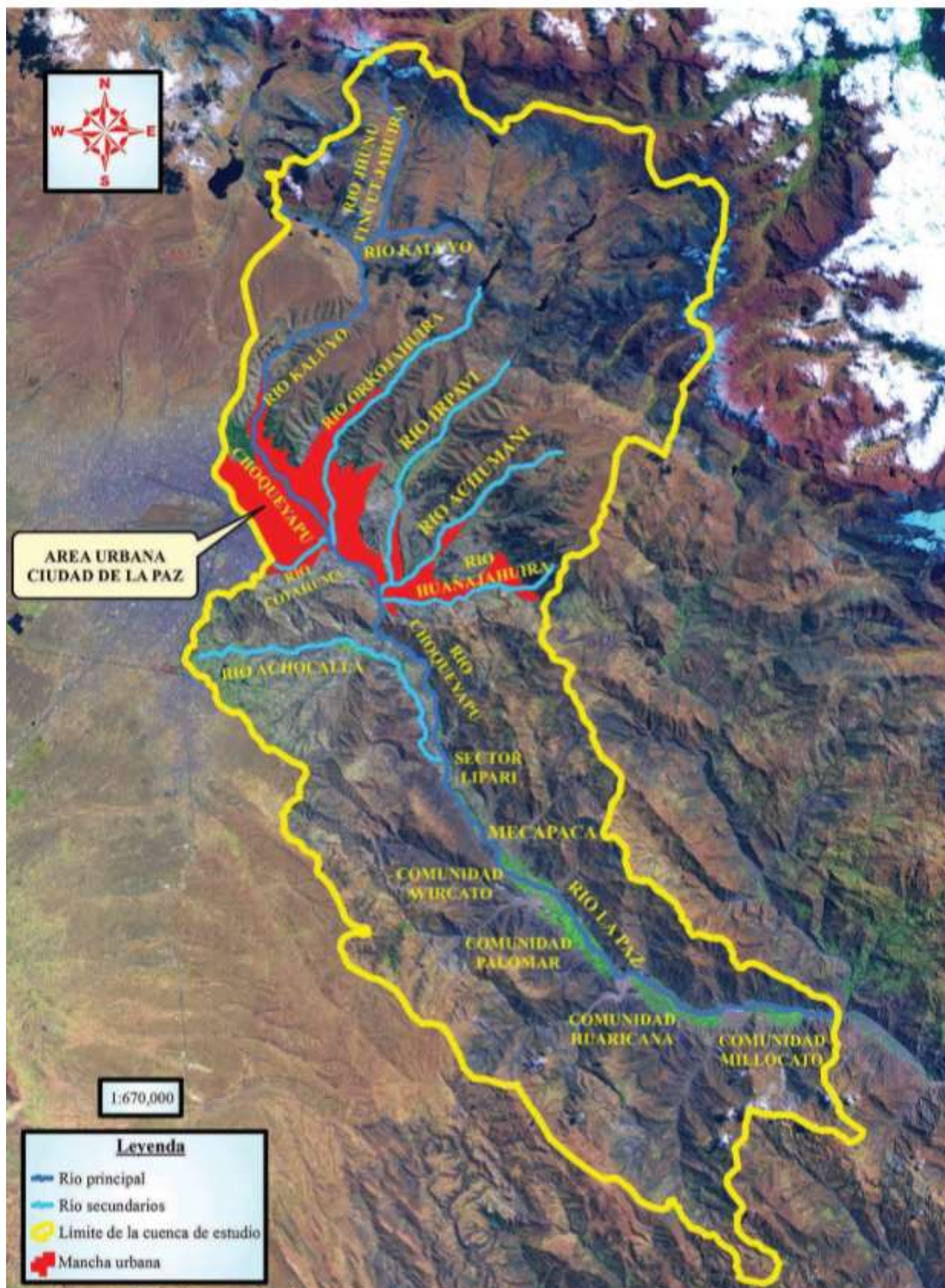
Fuente: (Campanini Gonzales, 2014)

Algunos datos muy preocupantes se mencionan a continuación:

- Para obtener 1 gramo de oro se requiere 230 litros de agua
- En Bolivia, 2011, las minas a cielo abierto explotaron 1.8 toneladas de oro, consumiendo al menos 414 millones de litros de agua
- El plomo, arsénico, mercurio y Cadmio son algunas de las sustancias tóxicas que la minería usa y genera
- El arsénico es categorizado como cancerígeno, produce bronquitis, cáncer de esófago, laringe, pulmón y vejiga, así como hepatotoxicidad, enfermedades vasculares y polineuritis
- La generación de drenaje ácido de roca puede durar hasta más de 100 años

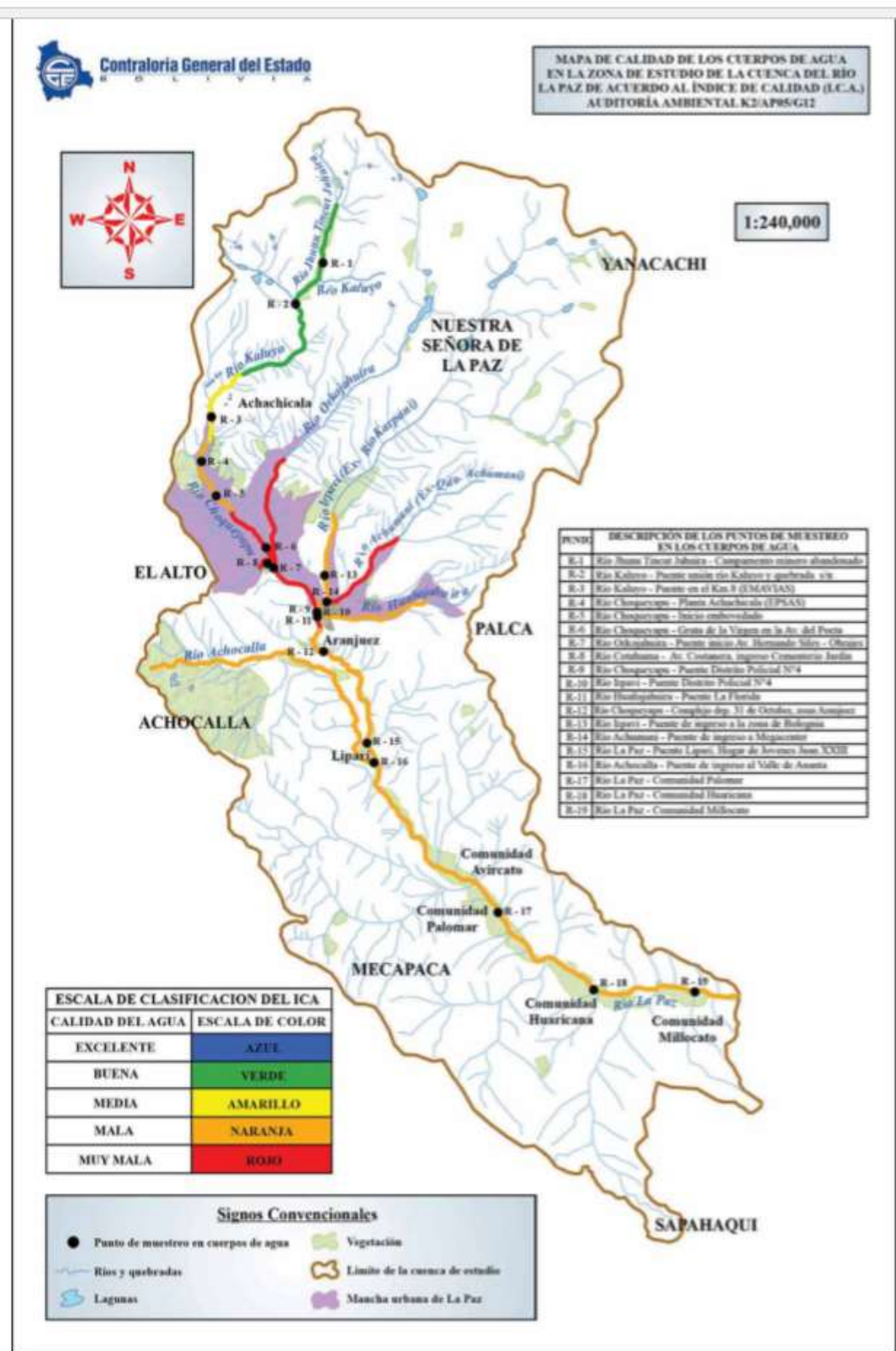


### Anexo 5. Mapa de la cuenca del río La Paz



Fuente: (Contraloría General del Estado de Bolivia, 2013)

## Anexo 6. Mapa de calidad de los cuerpos de agua en la cuenca del río La Paz



Fuente: (Contraloría General del Estado de Bolivia, 2013)



## Anexo 7. Metales pesados presentes en drenaje ácido de minas de socavones Mina Milluni

Tabla 2 Metales pesados presentes en drenaje ácido de minas de socavones Mina Milluni				
ELEMENTO	DAM (época húmeda) [mg/L]	DAM (época seca) [mg/L]	LÍMITE MÁXIMO de descargas en cuerpos de agua Clase D [mg/L]	Estimado de DESCARGA ANUAL [Ton/año]
As	<0,002	1,67	1,0	5,27
Cd	0,91	0,045	0,3	0,14
Cu	2,54	0,852	1,0	2,69
Mn	-	32,7		
Fe total	296,63	576,1	1,0	1.816,79
Sb	-	<0,4	1,0	1,26
Pb	<0,03	0,41	0,6	1,29
Zn	190,88	154,2	3,0	486,29

Fuente: (Campanini Gonzales, Agua y minería en Bolivia. ¿ Riesgos lejanos?, 2017)

## Anexo 8. Parámetros promedio fuera de los límites establecidos por normativa del agua cruda que ingresa a la planta de Achachicala

Tabla 3 Parámetros promedio fuera de los límites establecidos por normativa del agua cruda que ingresa a la Planta de Achachicala					
PARÁMETRO	VALOR PROMEDIO 2007	VALOR PROMEDIO 2008	VALOR PROMEDIO 2009	VALOR PROMEDIO 2011	LÍMITE MÁXIMO POR NORMA
Sólidos suspendidos totales [mg/L]	562,75	243,71	471,11	658,33	60
Coliformes fecales [NMP/100 ml]	101.000	615.575	171.138	491.667	1.000
pH	5,62	5,62	6,28	5,25	6-9
Zinc [mg/L]	12,74	39,70	14,34	23,30	3
Hierro Total [mg/L]	21,62	31,51	48,21	32,20	1

\* Los valores son promedios anuales. Durante la época de estiaje se incrementa la contaminación por Zinc, Hierro y Manganeseo pues es la presa de Milluni el principal aportante; mientras que en época de flujos el río Choqueyapu reemplaza en buena medida el aporte de Milluni y se incrementa el aporte de sólidos disueltos y Coliformes fecales.

Fuente: (Campanini Gonzales, Agua y minería en Bolivia. ¿ Riesgos lejanos?, 2017)

## Anexo 9. Parámetros de agua tratada en la planta de Achachicala que superan la NB512

Tabla 4 Parámetros de agua tratada en la planta de Achachicala que superan la Norma NB512						
PARÁMETRO	2007	2008	2009	2011	LÍMITE MÁXIMO permitido según norma NB512	Límite "VALOR MODIFICADO TRANSITORIO"
Sulfatos [mg/L]	318,13	314,57	350,96	413,25	400	600
Aluminio [mg/L]	0,03	0,04	0,034	0,12	0,10	0,20
Arsénico [µg/L]	2,00	3,30	8,02	15,94	10	100

Fuente: (Campanini Gonzales, Agua y minería en Bolivia. ¿ Riesgos lejanos?, 2017)

### Anexo 10. Derechos mineros sobrepuestos o en las zonas de recarga de las presas Incachaca y Hampaturi (2014)



Fuente: (Campanini Gonzales, Agua y minería en Bolivia. ¿ Riesgos lejanos?, 2017)

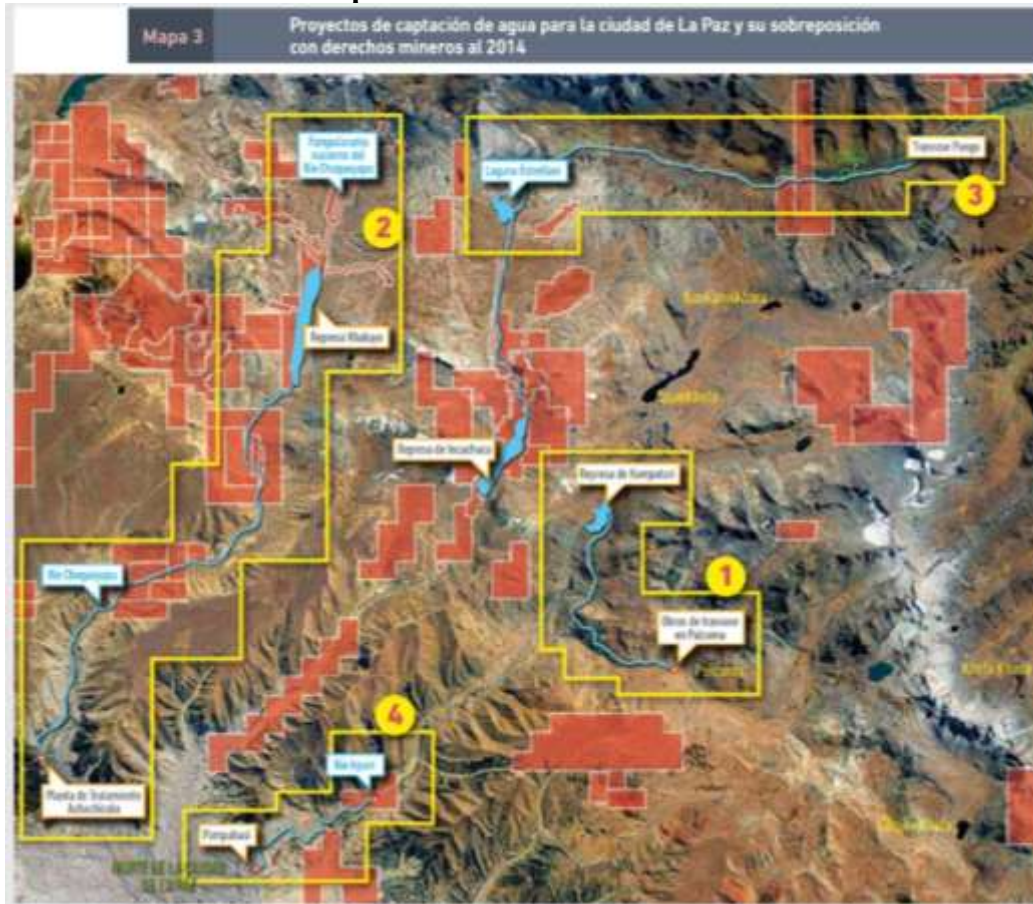
### Anexo 11. Derechos mineros sobrepuestos o en las zonas de recarga de las presas Milluni y Janqo Khota (2014)



Fuente: (Campanini Gonzales, Agua y minería en Bolivia. ¿ Riesgos lejanos?, 2017)



## Anexo 12. Proyectos de captación de agua para la ciudad de La Paz y su sobreposición con derechos mineros al 2014



Fuente: (Campanini Gonzales, Agua y minería en Bolivia. ¿ Riesgos lejanos?, 2017)

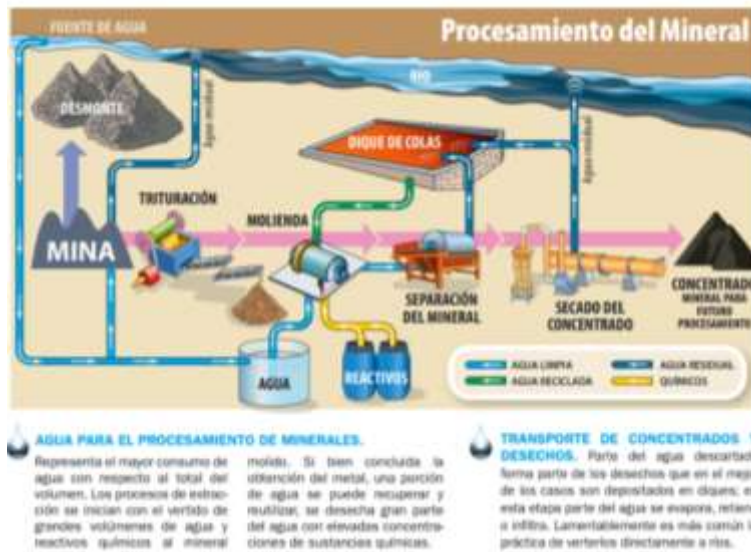
### **ESTADÍSTICAS Y DATOS IMPORTANTES DE CONTAMINACIÓN DE AGUA POR ACTIVIDAD MINERA**

La minería utiliza el agua para varias actividades propias de la actividad minera, se puede resumir en las siguientes:

- Agua para consumo domestico
- Agua para exploración (perforaciones)
- Agua para la explotación (perforaciones)
- Agua para el transporte del mineral conjuntamente con le agua

En el siguiente cuadro se puede apreciar el uso del agua en el procesamiento de minerales:

### Anexo 13. Procesamiento del mineral



Fuente: (Campanini Gonzales, 2014)

### Anexo 14. Datos económicos sobre la minería en Bolivia



Fuente: (Campanini Gonzales, 2014)

## Anexo 15. Cantidad de agua utilizada en la minería en Bolivia

### ¿Cuánta agua consume la minería en Bolivia?

Cuando se trata de estimar el consumo de agua de los distintos sectores, es importante concentrarse en el espacio de la cuenca. En nuestro país, la minería es la GRAN CONSUMIDORA de agua en las cuencas donde se encuentra ubicada. Algunos casos críticos del alto consumo de agua de la minería en Bolivia se presentan en la siguiente comparación.



Operación	Cantidad de agua utilizada (L/día)	Equivalencia de consumo en agua potable con la ciudad de Oruro	Fuente	Referencia
ORUO CHACA	3.468.483	3%	Agua potable Río Desaguadero	Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental proyecto Oru Chaca (2002)
ORUO HOLLÓ	22.040.000	20%	Agua subterránea Río Desaguadero	Manifiesto Ambiental Mina Fort Rollo, 1987
Tanque Taji ORUO HOLLÓ	6.262.231	6%	Río Desaguadero	Plan de cierre y rehabilitación operación Fort Rollo, 2002 Plan de manejo de aguas para el lago del Taji Fort Rollo, 2003
SINCHI WARRA PÓPO	952.054	1%	Provisión local de pozos	Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental Análisis Integral, 2000
SINCHI WARRA BOLNAR	4.147.200	4%	Agua subterránea Río Santa y medio, zona Huanchi e interior mina	Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental, 2001
HUANURI	28.320.000	26%	Río Pocho	Auditoría ambiental a mina Huanchi, 1985
Cd. MINA TINACACU S.A.	777.460	1%	Río Pocho	Auditoría Ambiental de Línea Base, 1995
MINA SAN CRISTÓBAL	43.828.000	40%	Carga de pasta de óxido de hierro	Informe descriptivo de los recursos MINCOS Mina San Cristóbal, 2010

Fuente: (Campanini Gonzales, 2014)

## Anexo 16. Contaminación del agua por la minería en Bolivia

### Contaminación del Agua por la Minería en Bolivia

#### ¿Cómo la minería contamina o afecta el agua?

La actividad minera genera aguas ácidas que resultan del contacto de ciertos minerales con el agua y oxígeno, denominadas "agua de minas", en términos más precisos Drenaje Ácido de Minas (DAM) y Drenaje Ácido de Roca (DAR). Estas "aguas de minas" resultan de procesos químicos e hidrobiológicos que pueden durar cientos de años.

**DRENAJE DE AGUAS DE MINAS SUBTERRÁNEAS**

La minería subterránea, al perforar socavones en el subsuelo genera espacios por los cuales fluyen aguas subterráneas, que para poder extraer y trabajar en las minas, deben bombear al exterior.

**DRENAJE DE TRABAJO EN TAJOS**

La minería a cielo abierto trabaja a la intemperie perforando "tajos abiertos" de gran profundidad (hasta 400 m). Estos tajos pueden afectar aguas subterráneas y las lluvias que "inundan" el tajo y "laván" sus paredes también generan agua de minas.

**DRENAJE DE PROCESOS DE LIXIVIACIÓN**

Uno de los procesos más peligrosos –por la concentración de sustancias nocivas– es el resultante de los lixiviados acumulados para lixiviación y el agua residual que de este resulta y no se reusa.

**EFLUENTES DE DESMONTES (ACUMULACIÓN DE DESECHOS)**

Los desechos de mineral (o ganga) son acumulados en espacios que son "lavados" por la lluvia.

Las "COLAS" o residuos del procesamiento del mineral que contienen agua y desechos, son también fuente de contaminación. El agua requerida para el tratamiento del mineral al ser desechada contiene químicos y minerales en altas concentraciones, muchos de ellos tóxicos. Estas colas son almacenadas en diques; donde el agua se evapora, rebene o infiltra; lamentablemente es más común que sean vertidas directamente a ríos.

Fuente: (Campanini Gonzales, 2014)

## **Anexo III**

# **Marco Normativo de agua potable y minería en Bolivia**



## NB 512

Le Reglamento nacional para el control de calidad del agua para consumo humano, presenta los siguientes límites de concentraciones:

### Anexo 17. Parámetros de control de la NB-512

Tabla N° 1. PARÁMETROS DE CONTROL MÍNIMO

Parámetro	Valor máximo aceptable
pH	6,5 – 9,0
Conductividad	1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}^*$
Turbiedad	5 UNT
Cloro residual	0,2 – 1,0 mg/l
Coliformes termoresistentes	0 UFC/100 ml

Tabla N° 2. PARÁMETROS DE CONTROL BÁSICO

Parámetro	Valor máximo aceptable
<b>Físicos</b>	
Color	15 UCV
<b>Químicos</b>	
Sólidos totales disueltos	1.000 mg/l
<b>Químicos Inorgánicos</b>	
Alcalinidad total	370,0 mg/l de $\text{CaCO}_3$
Calcio	200,0 mg/l
Cloruros	250,0 mg/l
Dureza	500,0 mg/l de $\text{CaCO}_3$
Hierro total	0,3 mg/l
Magnesio	150,0 mg/l
Manganeso	0,1 mg/l
Sodio	200,0 mg/l
Sulfatos	400,0 mg/l

Tabla N° 3. PARÁMETROS DE CONTROL COMPLEMENTARIO

Parámetro	Valor máximo aceptable
<b>a) Químicos Inorgánicos</b>	
Aluminio	0,1 mg/l
Amoniaco	0,5 mg/l
Arsénico	0,01 mg/l
Boro	0,3 mg/l
Cobre	1,0 mg/l
Fluoruro	1,5 mg/l
Nitritos	0,1 mg/l
Nitratos	45,0 mg/l
Plomo	0,01 mg/l
Zinc	5,0 mg/l

Tabla N° 4. PARÁMETROS DE CONTROL ESPECIAL

Parámetro	Valor máximo aceptable
<b>Químicos Inorgánicos</b>	
Antimonio	0,005 mg/l
Bario	0,7 mg/l
Cadmio	0,005 mg/l
Cianuro	0,07 mg/l
Cromo Total	0,05 mg/l
Mercurio	0,001 mg/l
Niquel	0,05 mg/l
Sabor y olor	Aceptable
Selenio	0,01 mg/l

## **LEY DE AGUAS (1879, 1906)**

CAPITULO IV: EL DOMINIO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS. Art. 35:” Los concesionarios de pertenencias mineras, socavones o galerías generales de desagüe de minas, tienen la propiedad de las aguas halladas en sus labores, mientras conserven la de sus minas respectivas”

## **LEY DE MINERÍA (1880)**

**Artículo 25°.** - “Los mineros son dueños de las aguas que encuentren en sus trabajos”.

## **CÓDIGO DE MINERÍA (1925)**

### **CAPÍTULO V: USO Y APROVECHAMIENTO DE AGUAS:**

**Artículo 114°.** - Los mineros tendrán derecho de hacer uso de las aguas que discurriesen libremente por sus pertenencias, ya sea para aprovechamiento de fuerza hidráulica o ya para cualquier otro uso aplicable a la explotación y beneficio de las minas, con la obligación de restituir las al antiguo cauce, después del uso.

**Artículo 115°.** - Si las aguas que necesita el minero fueren de regadío, no podrá hacer uso de ellas sin previo acuerdo con el propietario, o después de los trámites de expropiación establecidos en los artículos anteriores, procediendo a la indemnización correspondiente al uso que se lo haga de aquéllas.

**Artículo 116°.** - Si empleadas las aguas en el beneficio de minerales, y vueltas al cauce natural, resultaren inservibles para regadío, el minero que haya sido causa de su alteración, queda obligado a indemnizar los perjuicios al propietario del fundo a quien haya irrogado el daño.

**Artículo 117°.** - Cuando el propietario del fundo superficial desee variar el curso de las aguas corrientes, lo hará saber al minero del subsuelo. Si éstos en el transcurso de diez días de su notificación, no se presentaren ante la autoridad a reclamar el derecho de utilizarlas, se entenderá que lo renuncian.

**Artículo 118°.** - El minero que al trabajar sus labores alumbrase ojo de agua, o corriente subterránea, se hace dueño absoluto del caudal que obtuviese y puede emplearlo en cualquier

uso y darle el desagüe que más le conviniere, variándolo cuantas veces le fuese necesario, siempre que no cause perjuicio de inundación a las labores contiguas.

**Artículo 119°.** - Los mineros vecinos podrán aprovecharse de las aguas alumbradas en propiedad colindante, una vez que haya dejado de servirse de ellas el propietario que las alumbró.

**Artículo 120°.** - Los mineros colindantes que aprovecharan de las aguas alumbradas en propiedad vecina, prescriben en su favor ese derecho, si durante seis meses el propietario que las alumbró no varía el curso del desagüe.

**Artículo 121°.** - El minero que trate de aprovechar el uso de aguas del dominio público, formalizará su petición ante la Superintendencia de Minas Departamental, indicando el caudal que necesita y la propiedad minera para la que se desea utilizarlas. El Superintendente, constándole que el peticionario es dueño de la mina que se trata de beneficiar, transmitirá el pedido en las mismas condiciones y plazos que se han establecido para la adjudicación de pertenencias.

**Artículo 122°.** - Las aguas superficiales de propiedad de un minero, por cualquier título que fuese, son susceptibles de expropiación en favor de otro minero que las necesite, pero sólo cuando el primero haya hecho uso de ellas para su industria con toda amplitud. Si el dueño minero no las usa por el momento, el segundo minero, tendrá derecho de exigir señale el lugar en que ubicará sus maquinarias en lo futuro, para tomar el caudal que necesite el cauce en que ellas discurran, respetando aquella ubicación. Tercero, cuarto y siguientes mineros, podrán proceder en la misma forma con los mineros antecedentes, según orden de prelación. La controversia u oposición que susciten será transmitida y resuelta como en los casos de expropiación de terreno superficial.

## **CÓDIGO MINERO (1997)**

### **TITULO III DE LOS DERECHOS Y DE LAS OBLIGACIONES DE LOS CONCESIONARIOS MINEROS**

## **CAPITULO I DE LOS DERECHOS**

Artículo 36. Los concesionarios mineros, para la realización de sus actividades, pueden usar y aprovechar las aguas de dominio público y las que se alumbren o discurran por sus concesiones, con la obligación de protegerlas y restituir las a su cauce o cuenca natural, cumpliendo con lo establecido en el presente Código, la Ley de Aguas, la Ley del Medio Ambiente, sus reglamentos y otras disposiciones referentes a los recursos hídricos.

Artículo 38. Cuando el concesionario minero necesite variar un curso de aguas lo hará saber por escrito a los propietarios del suelo, a los concesionarios mineros colindantes, a los propietarios de plantas de beneficio o fundición y a los colindantes y vecinos, si los hubiere. Si en el transcurso de noventa días, de su notificación ninguno de ellos se presentare ante el Superintendente de Minas de la jurisdicción a reclamar su derecho a usarlas, se entenderá que renuncian a éste.

### **LEY 535 DE MINERÍA Y METALURGIA (2014)**

#### **ARTÍCULO 13. (ÁREA MINERA, PARAJES MINEROS Y PRIORIDAD).**

IV. Para fines de reconocimiento o de adecuación de derechos previstos en la presente Ley, las ex-concesiones mineras por pertenencias o cuadrículas denominadas Autorizaciones Transitorias Especiales de acuerdo al Decreto Supremo N° 726, de fecha 6 de diciembre de 2010, tienen áreas mineras sobre las que se reconocen derechos pre-constituidos o derechos adquiridos.

## **Anexo IV**

# **Capacidad de autopurificación de ríos, cargas y balance de masas**

## **PROCESO DE AUTOPURIFICACIÓN DE RÍOS**

Cualquier cuerpo de agua tiene una capacidad para asimilar una cierta cantidad de polución, sin perjuicios serios, es decir un cuerpo de agua tiene una capacidad de recuperación de su calidad ambiental; la capacidad de recuperación de un determinado río dependerá de sus condiciones ambientales iniciales y la cantidad de materia contaminante descargada sobre este.

En ríos con contenido orgánico bajo, existe poco material nutriente para sustentar la vida acuática así que, aunque estarán presentes muchos tipos de organismos, el número relativo de individuos de cada especie será bajo. En ríos con contenido orgánico alto, el medio es inadecuado para animales y plantas superiores, así que las bacterias predominan, el número de especies es pequeño y el número de individuos de cada especie es alto.<sup>1</sup>

Las características más importantes del agua residual en el estudio de polución de ríos son:

- Compuestos tóxicos, que produce la inhibición de la actividad biológica
- Materiales que afectan el balance de oxígeno en el agua:
  - Sustancias que consumen oxígeno disuelto (material orgánico biodegradable).
  - Sustancias que impiden la reoxigenación del agua (aceites, detergentes)
  - Descargas de alta temperatura.
- Concentraciones altas de sólidos inertes o disueltos.

En la auto-purificación se presenta los siguientes procesos:

- Sedimentación ayudada por floculación biológica o mecánica.
- Oxidación química de agentes reductores.
- Mortalidad bacterial.
- Oxidación bioquímica.

La concentración de un elemento esta medido en mg/l, lo cual depende directamente de la cantidad de agua considerada, además se debe tomar en cuenta la “capacidad de auto purificación de los ríos”, que es una combinación de varios procesos que interactúan en el río como por ejemplo la sedimentación y la aireación. La concentración de un contaminante es afectada directamente por estos procesos físicos que se desarrollan a lo largo de todo el río, evidentemente mientras más largo sea el río y mayor sea el volumen del agua, el efecto será mayor. Por otro lado, para realizar este análisis se debe considerar el comportamiento hidráulico e hidrológico de un río para poder simular condiciones lo más cercanas a la realidad. Esto sugiere que no es suficiente con conocer que existe presencia de un contaminante en un río, sino que es necesario evaluar el impacto que tiene ese contaminante contra la capacidad de auto purificación natural que tiene un río.

## **CARGAS EN RÍOS**

En un río la descarga de contaminantes puede ser puntual o no puntual (distribuida). Los ejemplos de descargas puntuales son los de alcantarillado, plantas de tratamiento; y ejemplos de descarga distribuida son la escorrentía o el riego sobre áreas grandes.

Suponiendo que una descarga puntual se mezcla inmediatamente con el río y que la descarga distribuida ocurre en un tramo de longitud L, se tiene:

---

<sup>1</sup> Jairo Alberto Romero Rojas, “Tratamiento de Aguas Residuales, teoría y principios de diseño”, Colombia 2001.



$$q_w = \frac{Q_w}{L}$$

$$q_w X = Q_{wx}$$

$$Q = Q_R + Q_W$$

$$C_o = \frac{C_R Q_R + C_W Q_W}{Q}$$

En el tramo de descarga distribuida 0-L:

$$Q_X = Q_R + q_w X$$

$$Q_X = Q_R + Q_{WX}$$

$$C_X = \frac{Q_R C_R + C_W q_w X}{Q_X}$$

$$C_X = \frac{Q_R C_R + C_W Q_{WX}}{Q_X}$$

Donde:

- q<sub>w</sub>: Descarga uniforme por unidad de longitud del río (m<sup>3</sup>/md)
- X: Distancia recorrida desde el punto de descarga (m)
- Q<sub>w</sub>: Caudal total de la descarga contaminante (m<sup>3</sup>/d)
- Q<sub>wx</sub>: Caudal acumulado para descarga distribuida en x (m<sup>3</sup>/d)
- L: Longitud del tramo de descarga distribuida (m)
- Q: Caudal del río después de la descarga contaminante (m<sup>3</sup>/d)
- Q<sub>R</sub>: Caudal del río antes de la descarga contaminante (m<sup>3</sup>/d)
- C<sub>O</sub>: Concentración después de la descarga contaminante (mg/l)
- C<sub>R</sub>: Concentración en el río antes de la descarga contaminante (mg/l)
- C<sub>W</sub>: Concentración de la descarga contaminante (mg/l)
- C<sub>X</sub>: Concentración en el punto x (mg/l)

Después del tramo de descarga distribuida:

$$Q = Q_R + q_w L = Q_R + Q_W$$

$$C_o = \frac{Q_R C_R + C_W q_w L}{Q} = \frac{Q_R C_R + Q_W C_W}{Q}$$

## TRANSFORMACIÓN DE UNA FUENTE PUNTUAL

Generalmente se supone que las constantes que gobiernan la transformación de una sustancia, por un fenómeno natural, son de primer orden:

$$r = -KC$$

$$\frac{dC}{dt} = -KC$$

Ignorando variaciones de velocidad, es decir, suponiendo tramos de velocidad constante, flujo pistón, se tiene:

$$C = C_o e^{-Kt} = \left( \frac{C_R Q_R + C_W Q_W}{Q} \right) e^{-Kt}$$

## BALANCE DE MASAS

La masa total del compuesto  $C$  [M/L<sup>3</sup>] que entra a través de la sección de control de la figura siguiente, en un intervalo de tiempo  $\Delta t$  es:

$$\boxed{Q \cdot C \cdot \Delta t}$$

La masa de contaminante que sale del volumen de control a través de una cara situada a una distancia  $\Delta x$  de la zona de entrada está dada por:

$$\boxed{(Q + \Delta Q) \cdot \left( C + \frac{\partial C}{\partial x} \Delta x \right) \cdot \Delta t}$$

A partir de las definiciones anteriores, la variación de la masa del compuesto  $C$  dentro del volumen de control debido a la entrada y salida de contaminante, sobre el intervalo de tiempo  $\Delta t$  es:

$$\boxed{V \cdot \Delta C = Q \cdot C \cdot \Delta t - (Q + \Delta Q) \cdot \left( C + \frac{\partial C}{\partial x} \Delta x \right) \cdot \Delta t}$$

Al expandir la ecuación anterior y dividir por el intervalo de tiempo,  $\Delta t$ , y el volumen  $V$  ( $A \cdot \Delta x$ ), se tiene:

$$\boxed{\frac{\Delta C}{\Delta t} = -\frac{Q}{A} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{C}{A} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta x} - \frac{\Delta Q}{A} \cdot \frac{\partial C}{\partial x}}$$

Si ahora tomamos el límite cuando el tamaño de la separación,  $\Delta x$ , y el intervalo de tiempo,  $\Delta t$ , se aproximan a cero podemos escribir:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{C}{A} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x}$$

o escrito en forma más reducida:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial(Q \cdot C)}{\partial x}$$

Las ecuaciones anteriores representan la ecuación diferencial básica para el estudio de un sistema simple y no dispersivo. Este modelo asume que no existe mezcla (o dispersión) y se conoce comúnmente como modelo advectivo o modelo de máximo gradiente. Una condición de borde característica para este modelo es:

$$C = C_0(t) \text{ en } x = 0$$

Si ahora incorporamos el efecto de la dispersión turbulenta (efecto de mezcla) la ecuación diferencial anterior debe ser modificada de la siguiente forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial(Q \cdot C)}{\partial x}$$

donde  $\varepsilon$  es el coeficiente de difusión turbulento.

Si incorporamos el efecto de una reacción,  $r$ , que consume el compuesto en estudio se tiene:

$$V \cdot \Delta C = Q \cdot C \cdot \Delta t - (Q + \Delta Q) \cdot \left( C + \frac{\partial C}{\partial x} \Delta x \right) \cdot \Delta t - r \cdot V \cdot \Delta t$$

↓

**VARIACION**

↓

**ENTRADA**

↓

**SALIDA**

↓

**REACCIONES**

Al expandir la ecuación anterior y dividir por el intervalo de tiempo,  $\Delta t$ , y el volumen  $V$  ( $A \cdot \Delta x$ ), se tiene:

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = -\frac{Q}{A} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{C}{A} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta x} - \frac{\Delta Q}{A} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - r$$

Si ahora tomamos el límite cuando el tamaño de la separación,  $\Delta x$ , y el intervalo de tiempo,  $\Delta t$ , se aproximan a cero podemos escribir:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{C}{A} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} - r$$

o escrito en forma más reducida:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial(Q \cdot C)}{\partial x} - r$$

Si r es una reacción de primer orden (decaimiento lineal) con:

$$r = K \cdot C$$

se tiene:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial(Q \cdot C)}{\partial x} - K \cdot C$$

### RÉGIMEN PERMANENTE COMPUESTOS CONSERVATIVOS

En esta situación, K es igual a cero, y los otros dos parámetros de la ecuación de balance, Q y A, así como la concentración de la descarga se suponen constantes.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{C}{A} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} - K \cdot C$$

El supuesto de régimen permanente permite escribir:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad y \quad C = C_0 \quad en \quad x = 0$$

Si los parámetros Q y A son constantes en el espacio:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad y \quad A = A_0$$

Finalmente, la ecuación de balance de masas se escribe como:

$$0 = -\frac{Q}{A} \cdot \frac{dC}{dx} = -u \cdot \frac{dC}{dx}$$

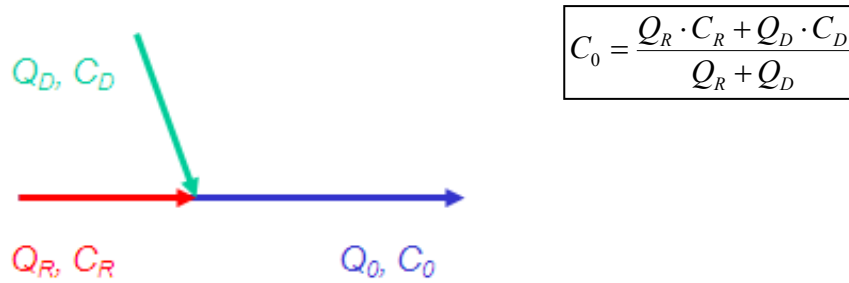
La solución de la ecuación diferencial anterior es obviamente una constante, el valor de la cual se puede determinar a partir de la condición de borde en la descarga.

$$-u \cdot \frac{dC}{dx} - K \cdot C = 0$$

$$C = C_0 \quad en \quad x = 0$$

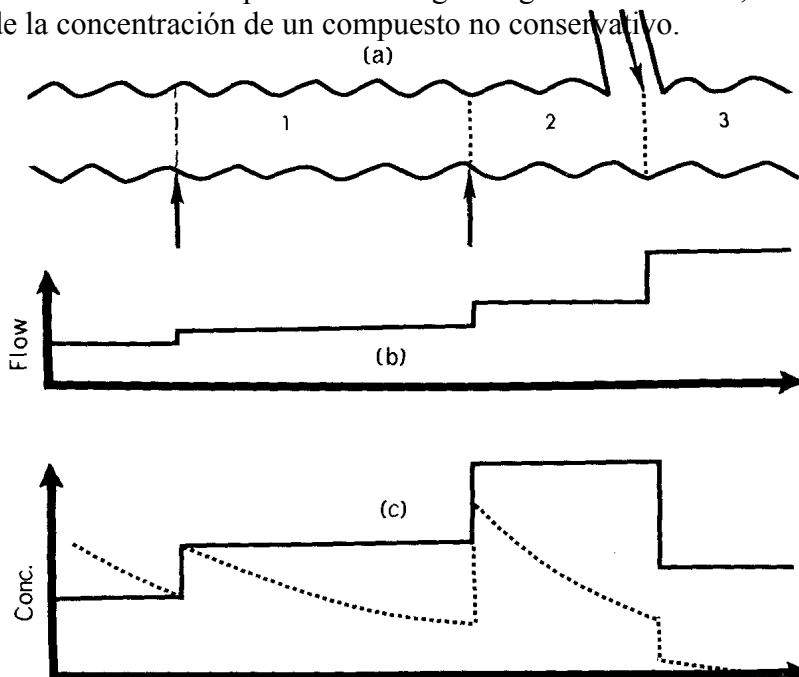
$$C(x) = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{K}{u} \cdot x\right)$$

La concentración  $C_0$  se puede calcular con un balance de masas en la descarga tal que:



$$C_0 = \frac{Q_R \cdot C_R + Q_D \cdot C_D}{Q_R + Q_D}$$

En contraste con el caso de un compuesto conservativo, para el caso de un compuesto no conservativo, su concentración decae en forma exponencial con la distancia en el río. La solución anterior es válida en todo un tramo de río hasta que una nueva descarga cambia las condiciones de borde. Los esquemas de la figura siguiente muestran, con línea punteada, la variación de la concentración de un compuesto no conservativo.



### RÉGIMEN PERMANENTE COMPUESTOS NO CONSERVATIVOS

En esta situación,  $K$  es distinto de cero, y los otros dos parámetros de la ecuación de balance,  $Q$  y  $A$ , así como la concentración de la descarga se suponen constantes.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{C}{A} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} - K \cdot C$$

El supuesto de régimen permanente permite escribir:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad \text{y} \quad C = C_0 \quad \text{en} \quad x = 0$$

Si los parámetros Q y A son constantes en el espacio:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad y \quad A = A_0$$

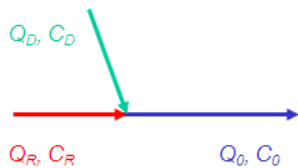
Finalmente, la ecuación de balance de masas se escribe como:

$$0 = -\frac{Q}{A} \cdot \frac{dC}{dx} - K \cdot C = -u \cdot \frac{dC}{dx} - K \cdot C$$

La solución de la ecuación diferencial anterior es obviamente una constante, el valor de la cual se puede determinar a partir de la condición de borde en la descarga.

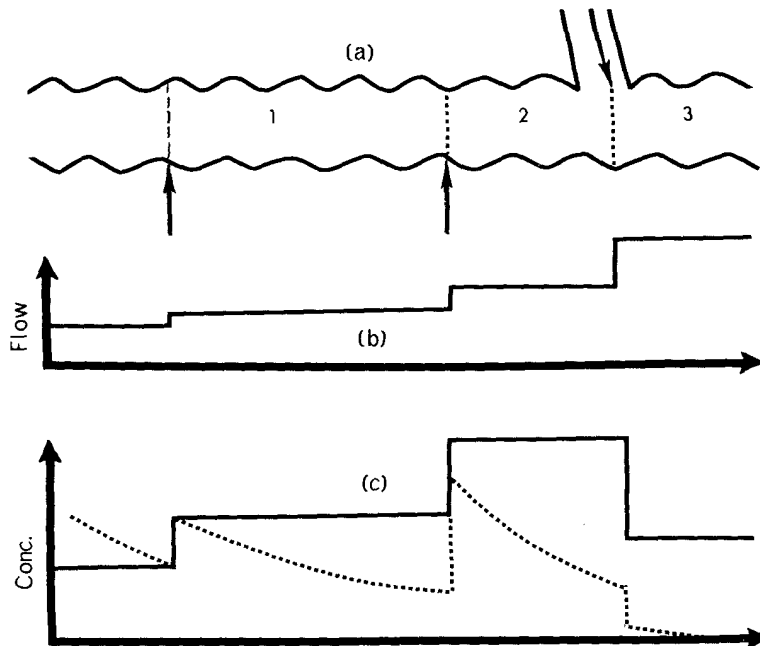
$$-u \cdot \frac{dC}{dx} - K \cdot C = 0 \quad C = C_0 \quad \text{en} \quad x = 0 \quad C(x) = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{K}{u} \cdot x\right)$$

La concentración C0 se puede calcular con un balance de masas en la descarga tal que:



$$C_0 = \frac{Q_R \cdot C_R + Q_D \cdot C_D}{Q_R + Q_D}$$

En contraste con el caso de un compuesto conservativo, para el caso de un compuesto no conservativo, su concentración decae en forma exponencial con la distancia en el río. La solución anterior es válida en todo un tramo de río hasta que una nueva descarga cambia las condiciones de borde. Los esquemas de la figura siguiente muestran, con línea punteada, la variación de la concentración de un compuesto no conservativo.

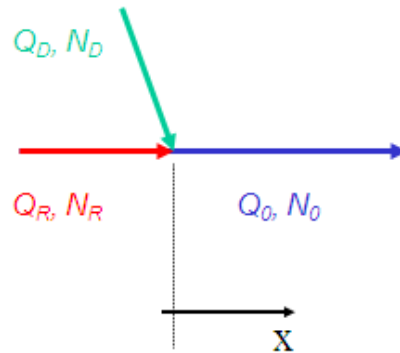




La situación de un compuesto no conservativo reproduce el decaimiento de los Coliformes Fecales dentro de un curso de agua:

$$N_0 = \frac{Q_R \cdot N_R + Q_D \cdot N_D}{Q_R + Q_D}$$

$$N(x) = N_0 \cdot \exp\left(-\frac{k_b}{u} \cdot x\right)$$



## **Anexo V**

# **Recomendaciones para la operación de válvulas en presas**

Anexo 18. Número de vueltas y apertura de válvulas

VALVULA CORTINA		VALVULA MARIPOSA	
# de Vueltas	% de Apertura	# de Vueltas	% de Apertura
65	100%	35	100%
62	95%	33	95%
59	90%	32	90%
55	85%	30	85%
52	80%	28	80%
49	75%	26	75%
46	70%	25	70%
42	65%	23	65%
39	60%	21	60%
36	55%	19	55%
33	50%	18	50%
29	45%	16	45%
26	40%	14	40%
23	35%	12	35%
19	30%	11	30%
16	25%	9	25%
13	20%	7	20%
10	15%	5	15%
6	10%	3	10%
3	5%	2	5%
0	0%	0	0%

## **Anexo VI**

# **Estimación del coeficiente de rugosidad de Manning “n”**

## **DEFINICIÓN**

El coeficiente de rugosidad de Manning es muy variable y depende de diferentes factores como son la rugosidad de la superficie, vegetación, irregularidad del canal, alineamiento del canal, sedimentación, erosión y obstrucción entre otros parámetros. Para este trabajo de investigación utilizaremos dos métodos diferentes para la determinación del coeficiente de rugosidad de Manning, para lo cual primero se determinó el mapa de uso de suelos como se puede apreciar en la imagen 4.16.

## **METODO DE COWAN**

El estudio y evaluación de todos los factores anteriormente mencionados ofrecerán una buena base para determinar el valor de  $n$  apropiado para el análisis. El primer método utilizado en este estudio es el propuesto por Cowan que desarrollo un procedimiento para estimar el valor de  $n$ , este método consiste en la selección de diferentes valores de corrección en relación a diferentes parámetros para una rugosidad inicial y describe mediante la siguiente ecuación:

### **Anexo 19. Coeficiente de rugosidad en función de varios parámetros**

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5$$

Donde:

$n_0$ : Valor básico de  $n$  para un canal recto, uniforme y liso (de tablas)

$n_1$ : Valor para corregir el efecto de las rugosidades superficiales

$n_2$ : Valor para considerar las variaciones en forma y tamaño de la sección transversal del cana

$n_3$ : Valor para considerar obstrucciones

$n_4$ : Valor para considerar vegetación y las condiciones de flujo

$m_5$ : Factor de corrección de los efectos por meandros en el canal

**Anexo 20. Valores para el coeficiente de rugosidad por el método de Cowan**

Condiciones del canal		Valores	
Material involucrado	Tierra	$n_0$	0.02
	Corte en roca		0.025
	Grava fina		0.024
	Grava gruesa		0.028
Grado de irregularidad	Suave	$n_1$	0
	Menor		0.005
	Moderado		0.01
	Severo		0.02
Vacaciones de la sección transversal	Gradual	$n_2$	0
	Ocasionalmente alternante		0.005
	Frecuentemente alternante		0.010 - 0.015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	$n_3$	0
	Menor		0.010 - 0.015
	Apreciable		0.020 - 0.030
	Severo		0.040 - 0.060
Vegetación	Baja	$n_4$	0.005 - 0.010
	Media		0.010 - 0.025
	Alta		0.025 - 0.050
	Muy alta		0.050 - 0.100
Grado de los efectos por meandros	Menor	$m_5$	1
	Apreciable		1.15
	Severo		1.3

Fuente: (Ven Te Chow, 1994)

**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD POR TABLAS**

Este método se basa en la selección de un valor del coeficiente de rugosidad de Manning según el mapa de usos de suelos, esta selección se realizó utilizando la tabla N°5.6 “Valores del coeficiente de rugosidad  $n$ ”, presentado en el libro de Hidráulica de Canales Abiertos de Ven Te Chow



## Anexo 21. Coeficiente de Rugosidad para cauces naturales

Tabla 5-6. Valores del coeficiente de rugosidad  $n$   
(las cifras en **negritas** son los valores generalmente recomendados para el diseño)


Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
<b>A. Conductos cerrados que fluyen parcialmente llenos</b>			
<b>A-1. Metal</b>			
<i>a.</i> Latón, liso	0.009	<b>0.010</b>	0.013
<i>b.</i> Acero			
1. Estriado y soldado	0.010	0.012	0.014
2. Riveteado y en espiral	0.013	0.016	0.017
<i>c.</i> Hierro fundido			
1. Recubierto	0.010	0.013	0.014
2. No recubierto	0.011	0.014	0.016
<i>d.</i> Hierro forjado			
1. Negro	0.012	0.014	0.015
2. Galvanizado	0.013	0.016	0.017
<i>e.</i> Metal corrugado			
1. Subdrenaje	0.017	0.019	0.021
2. Drenaje de aguas lluvias	0.021	<b>0.024</b>	0.030
<b>A-2. No metal</b>			
<i>a.</i> Lucita	0.008	0.009	0.010
<i>b.</i> Vidrio	0.009	<b>0.010</b>	0.013
<i>c.</i> Cemento			
1. Superficie pulida	0.010	0.011	0.013
2. Mortero	0.011	0.013	0.015
<i>d.</i> Concreto			
1. Alcantarilla, recta y libre de basuras	0.010	0.011	0.013
2. Alcantarilla con curvas, conexiones y algo de basuras	0.011	<b>0.013</b>	0.014
3. Bien terminado	0.011	0.012	0.014
4. Alcantarillado de aguas residuales, con pozos de inspección, entradas, etc., recto	0.013	0.015	0.017
5. Sin pulir, formaleta o encofrado metálico	0.012	0.013	0.014
6. Sin pulir, formaleta o encofrado en madera lisa	0.012	<b>0.014</b>	0.016
7. Sin pulir, formaleta o encofrado en madera rugosa	0.015	0.017	0.020
<i>e.</i> Madera			
1. Machihembrada	0.010	0.012	0.014
2. Laminada, tratada	0.015	0.017	0.020
<i>f.</i> Arcilla			
1. Canaleta común de baldosas	0.011	<b>0.013</b>	0.017
2. Alcantarilla vitrificada	0.011	0.014	0.017
3. Alcantarilla vitrificada con pozos de inspección, entradas, etc.	0.013	0.015	0.017
4. Subdrenaje vitrificado con juntas abiertas	0.014	0.016	0.018
<i>g.</i> Mampostería en ladrillo			
1. Barnizada o lacada	0.011	0.013	0.015
2. Revestida con mortero de cemento	0.012	0.015	0.017
<i>h.</i> Alcantarillados sanitarios recubiertos con limos y babas de aguas residuales, con curvas y conexiones	0.012	0.013	0.016
<i>i.</i> Alcantarillado con batea pavimentada, fondo liso	0.016	0.019	0.020
<i>j.</i> Mampostería de piedra, cementada	0.018	0.025	0.030

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
<i>b.</i> Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			
1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2. Fondo: cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
D-2. Planicies de inundación			
<i>a.</i> Pastizales, sin matorrales			
1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
<i>b.</i> Áreas cultivadas			
1. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
<i>c.</i> Matorrales			
1. Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
4. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
5. Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
<i>d.</i> Árboles			
1. Sauces densos, rectos y en verano	0.110	0.150	0.200
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
3. Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.080
4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
5. Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0.100	0.120	0.160
D-3. Corrientes mayores (ancho superficial en nivel de creciente > 100 pies). El valor de <i>n</i> es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menos efectiva.			
<i>a.</i> Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0.025	.....	0.060
<i>b.</i> Sección irregular y rugosa	0.035	.....	0.100

Fuente: (Ven Te Chow, 1994)

## **Anexo VII**

# **Resultados del Análisis de calidad del Agua de la campaña de muestreos del 15 de mayo de 2019**

	<b>CENTRO DE INVESTIGACION MINERO Y AMBIENTAL "CIMA-JICA-UATF"</b> <i>Unidad de Análisis Químico "U A Q" ANALISIS QUIMICO - BACTERIOLOGICO: AGUAS, SUELOS, SEDIMENTOS y MINERALES</i>	FG-5.10-01
		VERSION 01
		FECHA: 2017-04-28

**INFORME DE ENSAYO**

Nº:	230	Fecha Recepción:	2019/06/04	Hrs	Fecha de Entrega	2019/06/19
-----	-----	------------------	------------	-----	------------------	------------

**I. 1. DATOS DEL CLIENTE:**

Nombre/Razón social	GUILLERMO MANRIQUE		
Dirección		Teléfono/Fax	
E-mail	-----	NIT	
Persona de contacto			

**2. DATOS DE LA MUESTRA:**

Procedencia:	Ciudad de La Paz				
Tipo de Muestra:	Agua de Recarga	Fecha de muestreo:	2019/05/25	Hora de muestreo:	11:00 A 11:30
Muestreado por :	Cliente:				

**3. RESULTADOS: DE AGUA**

Parámetros		Hierro
Límite de detección del método		0,298
Unidad		mg/l
Método de Ensayo		POE-1-07 (Fe)
Fecha Ensayo		2019/06/19
Cod. Laboratorio	Cod. Original	
UAQ_1_230_1	M-1 chacaltaya-salida	34,3960
UAQ_1_230_2	M-2 alpaquita-salida-presa	1,4977
UAQ_1_230_3	M-3 pampalarama	1,0275
UAQ_1_230_4	M-4 puente kaluyo-union de las3 presas	4,3315
UAQ_1_230_5	M-5 puente-2 lugar de extraccion de agregados antes de achachicala	2,5845





CENTRO DE INVESTIGACION MINERO Y AMBIENTAL "CIMA-JICA-UATF"  
Unidad de Análisis Químico "U A Q" ANALISIS QUIMICO - BACTERIOLOGICO: AGUAS,  
SUELOS, SEDIMENTOS y MINERALES

FG-5.10-01

VERSION 01

FECHA:2017-04-28

#### 4.- OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES:

El presente informe, es el resultado del análisis físico-químico de la muestra.  
El presente informe, se emite dentro del alcance de acreditación concedido por la Dirección Técnica de Acreditación, la cual se puede consultar en la página web [www.ibmetro.gob.bo](http://www.ibmetro.gob.bo).

Parámetros	Manganeso	Antimonio	Aluminio	Mercurio	pH	
Límite de detección del método	0,02	<0,001	0.002	0,0005	NA	
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	pH	
Método Estándar Aplicado	JISK0102 56.2	JISK 0102 15	JISK 0102 55.2	JISK 0102 66.1.1	POE-1-01	
Fecha Ensayo	2019/06/19	2019/06/19	2019/06/19	2019/06/19	2019/06/10	
Cod. Laboratorio	Cod. Original					
UAQ_1_230_1	M-1 chacaltaya-salida	2,987	0,007	0,484	<0,0005	3,8
UAQ_1_230_2	M-2 alpaquita-salida-presa	0,508	0,008	0,920	<0,0005	5,9
UAQ_1_230_3	M-3 pampalarama	<0,02	0,008	0,764	<0,0005	8,2
UAQ_1_230_4	M-4 puente kaluyo-union de las 3 presas	0,542	0,008	1,875	<0,0005	8,2
UAQ_1_230_5	M-5 puente-2 lugar de extraccion de agregados antes de achachicala	0,245	0,009	1,080	<0,0005	7,9

Los resultados NO constituyen garantía de la representatividad de la muestra del (o los) bienes y estrictamente están relacionadas con la(s) muestra(s) El CIMA UATF NO asume ninguna responsabilidad en relación con el origen o fuente extraída.  
El CIMA UATF solo reconoce como válidos, informes de ensayo emitido en soporte físico, con el debido sello y firma correspondiente.

Lic. Lisbeth C. VISCARRÁ TEJADA  
RESPONSABLE UAQ

Av. Arce esq. Villazon s/n. Edificio Facultad de Ingeniería Minera bloque I. Segundo piso

Página 2 de 2



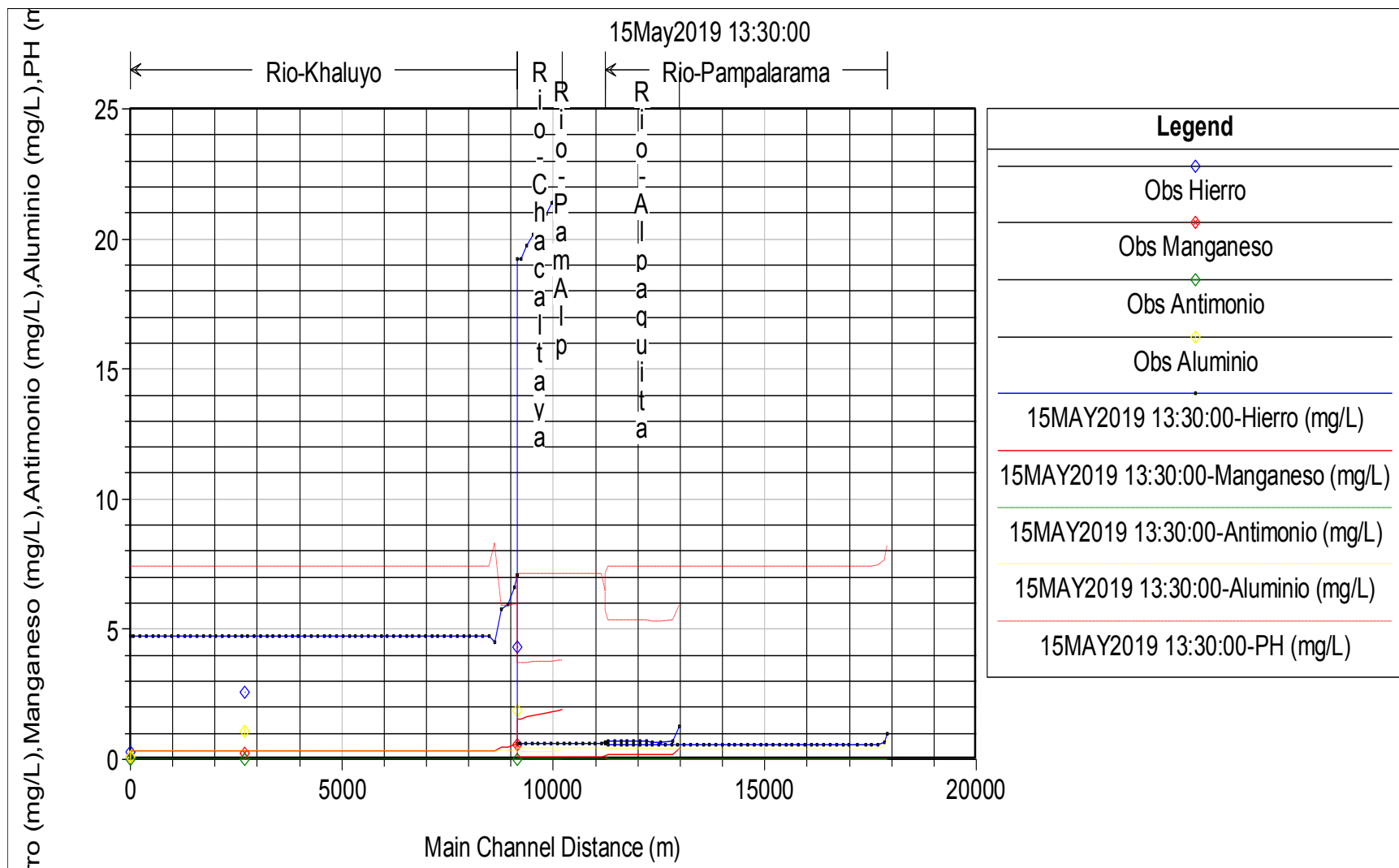
## **Anexo VIII**

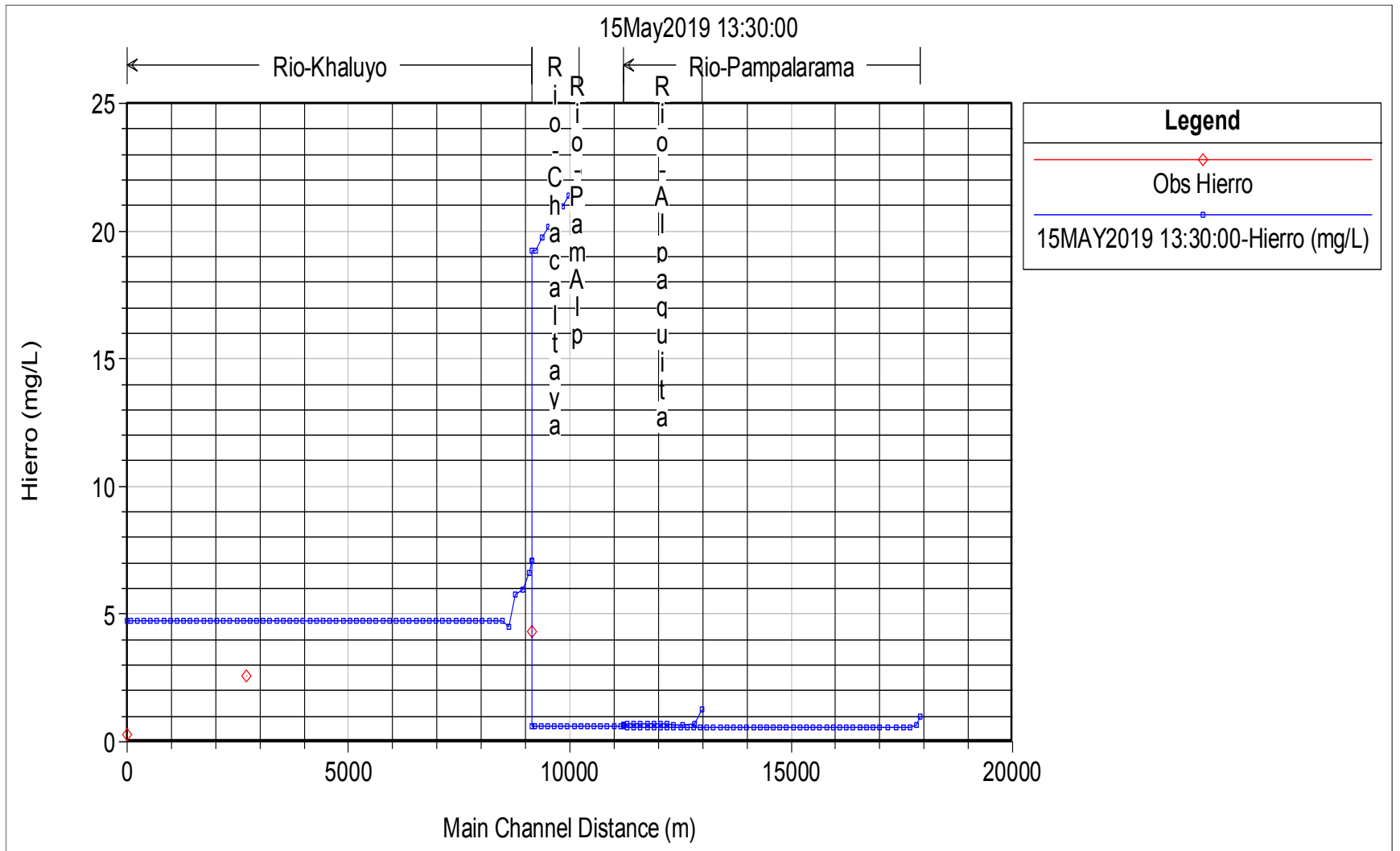
### **Resultados de la modelación en Hec Ras**

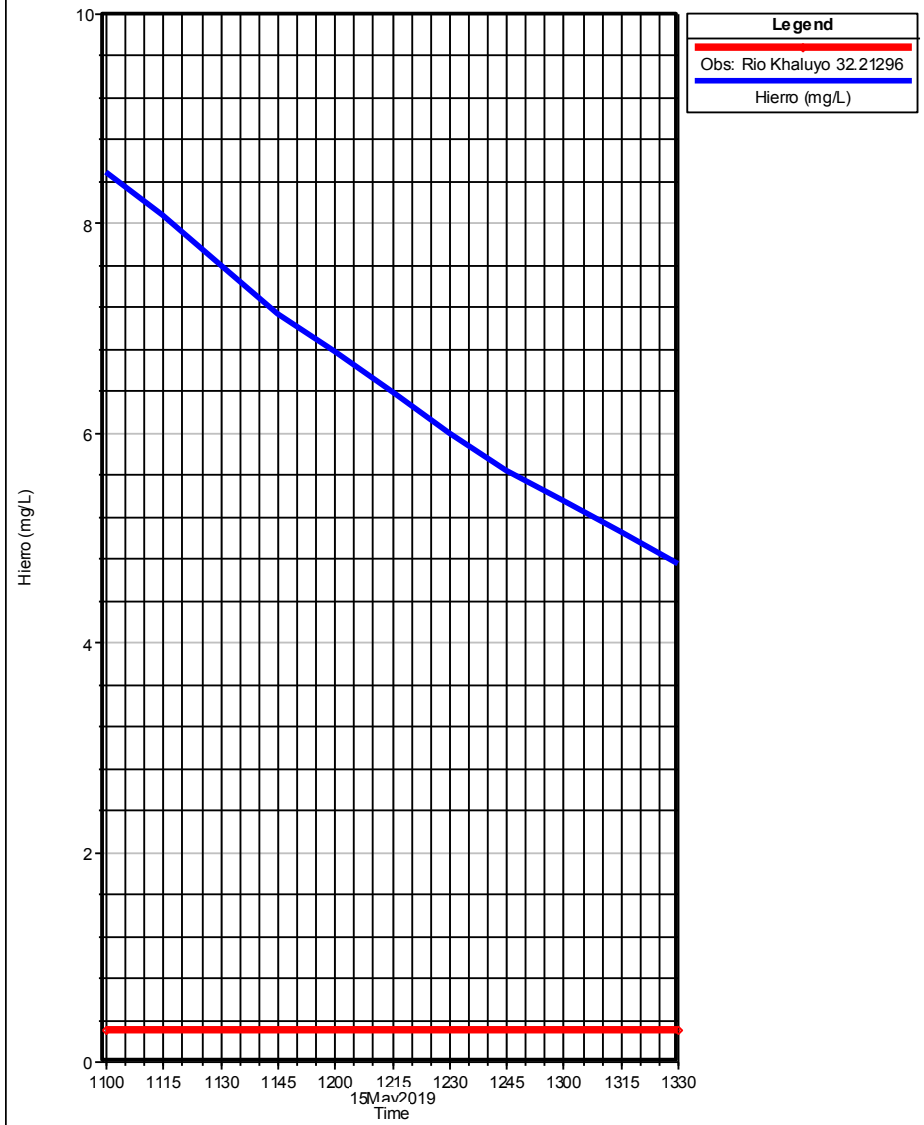


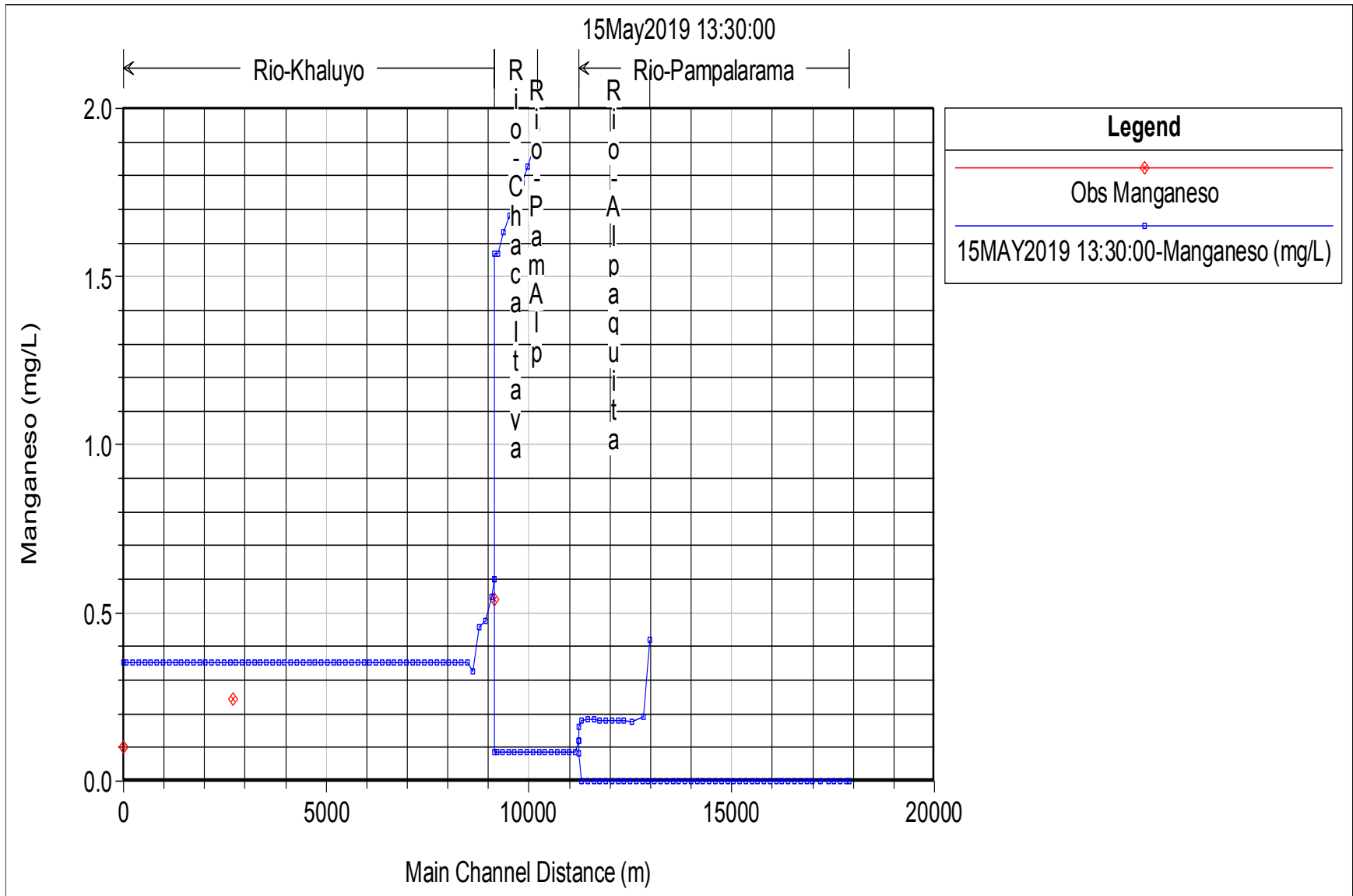
### ESCENARIO 1

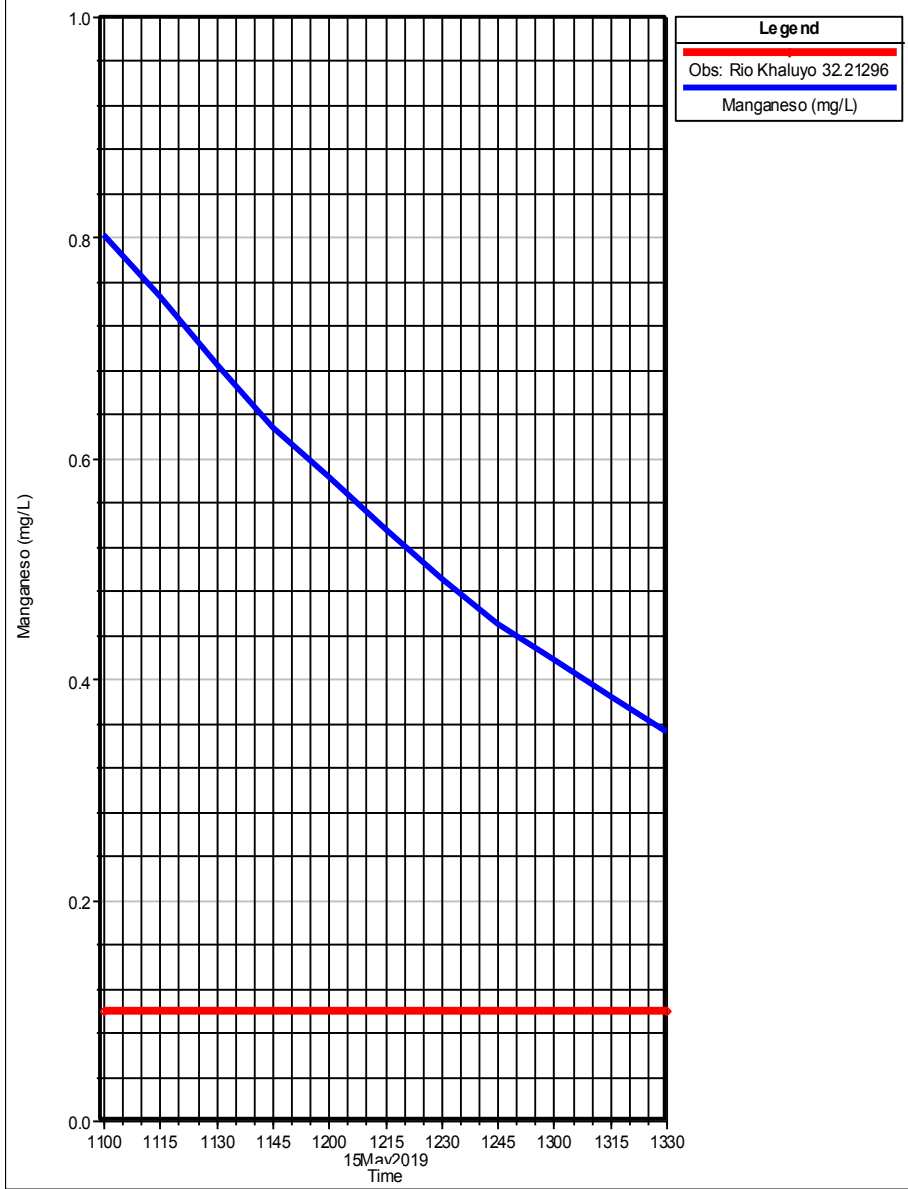
### CONCENTRACIONES EN PERFIL LONGITUDINAL Y EN SECCION FINAL DEL TRAMO

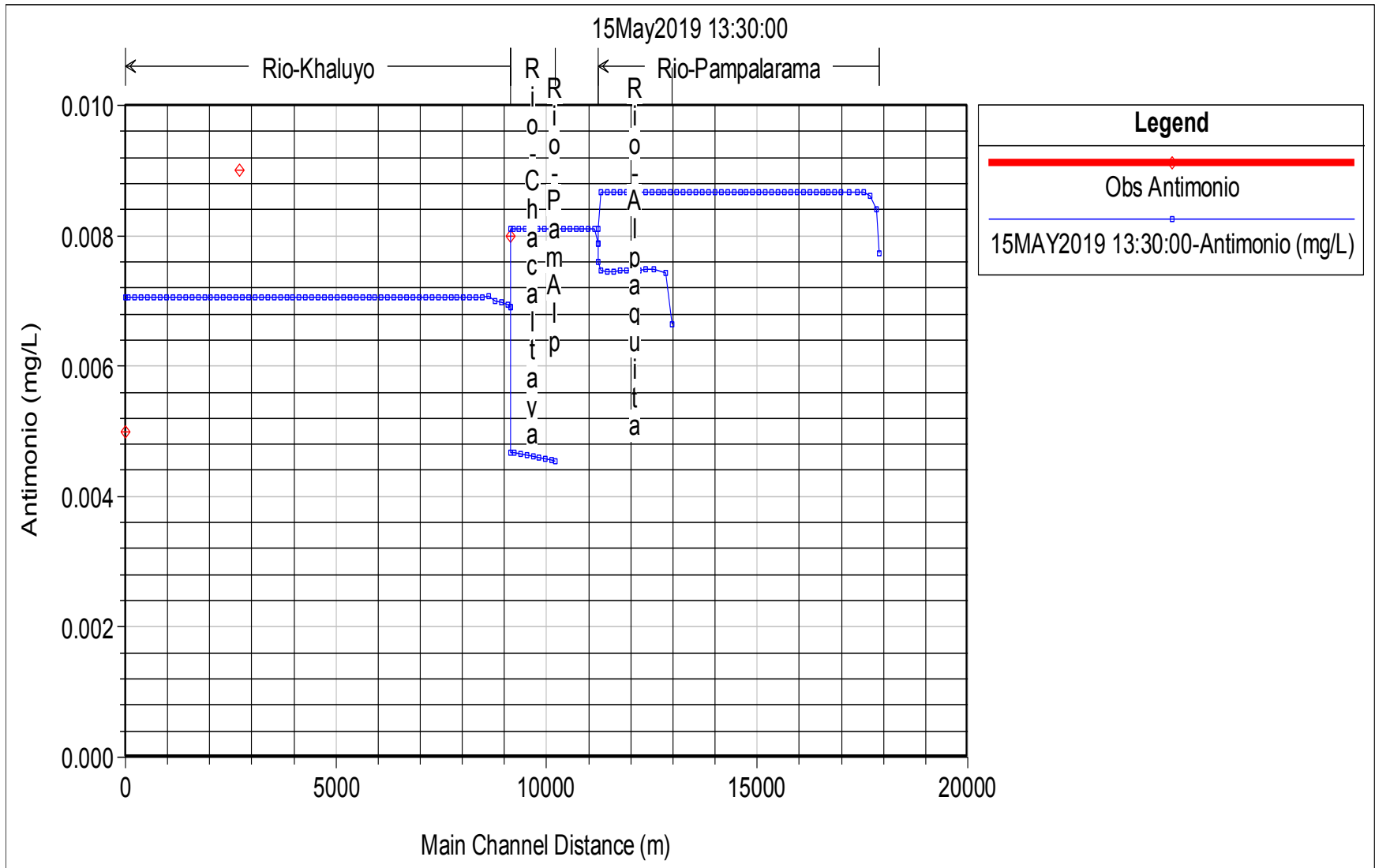




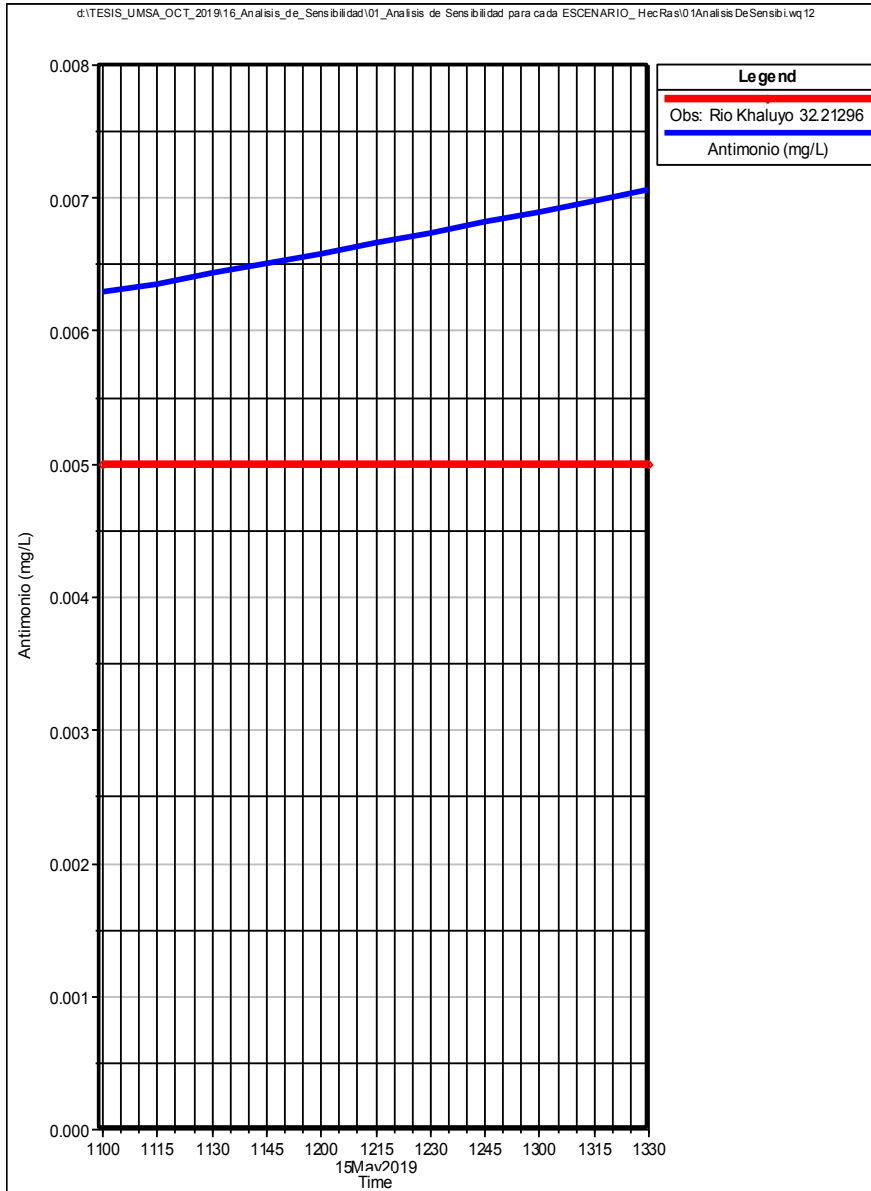


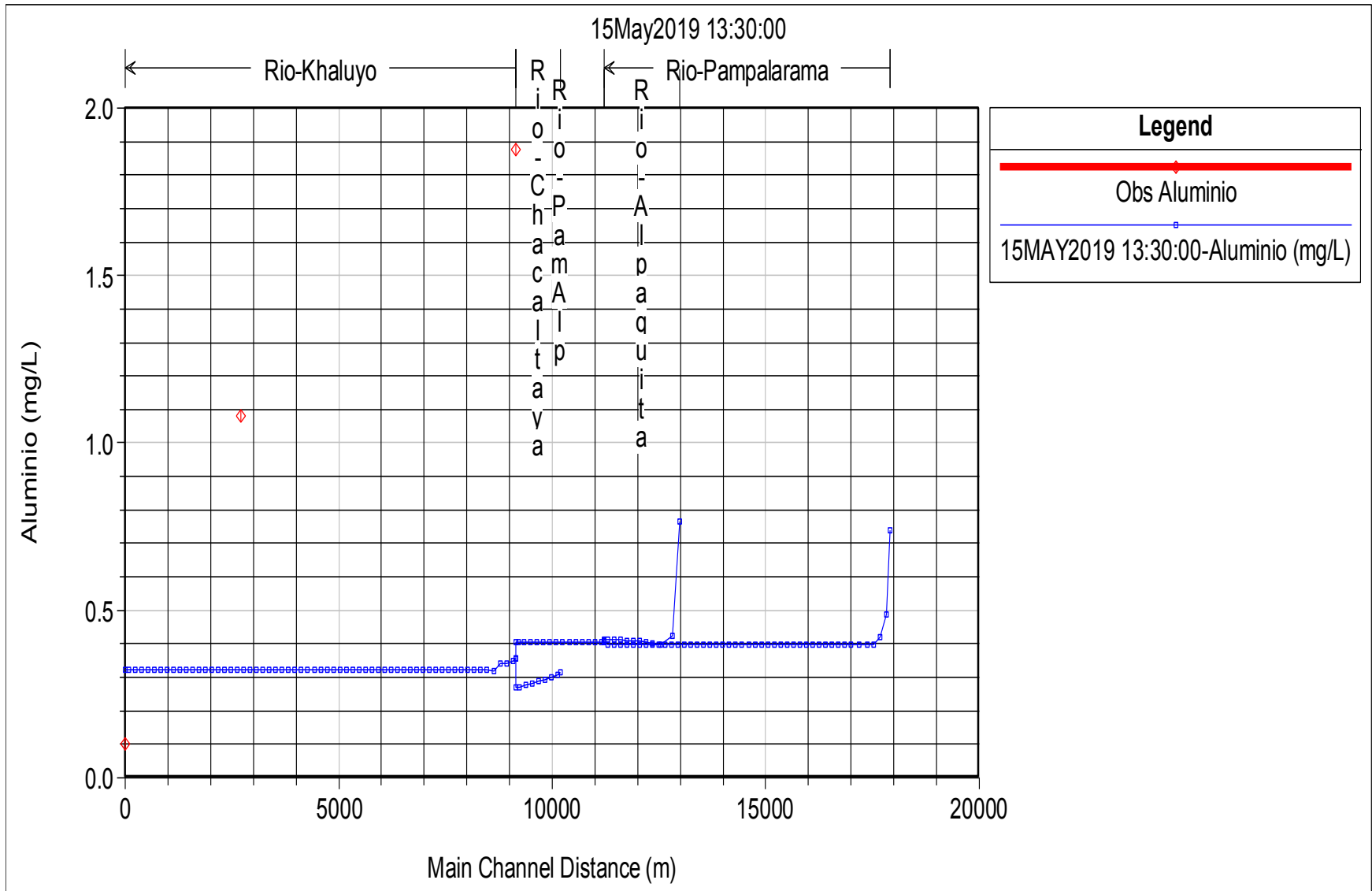


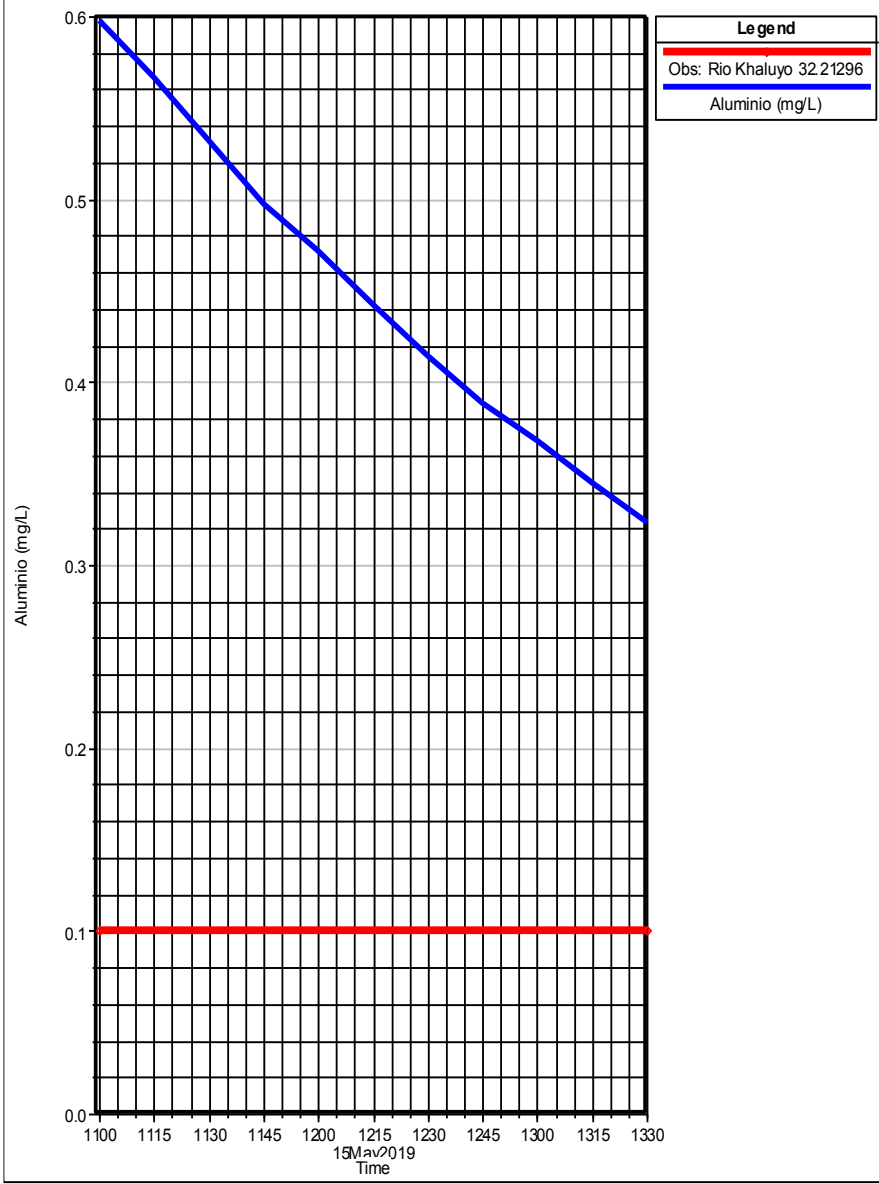






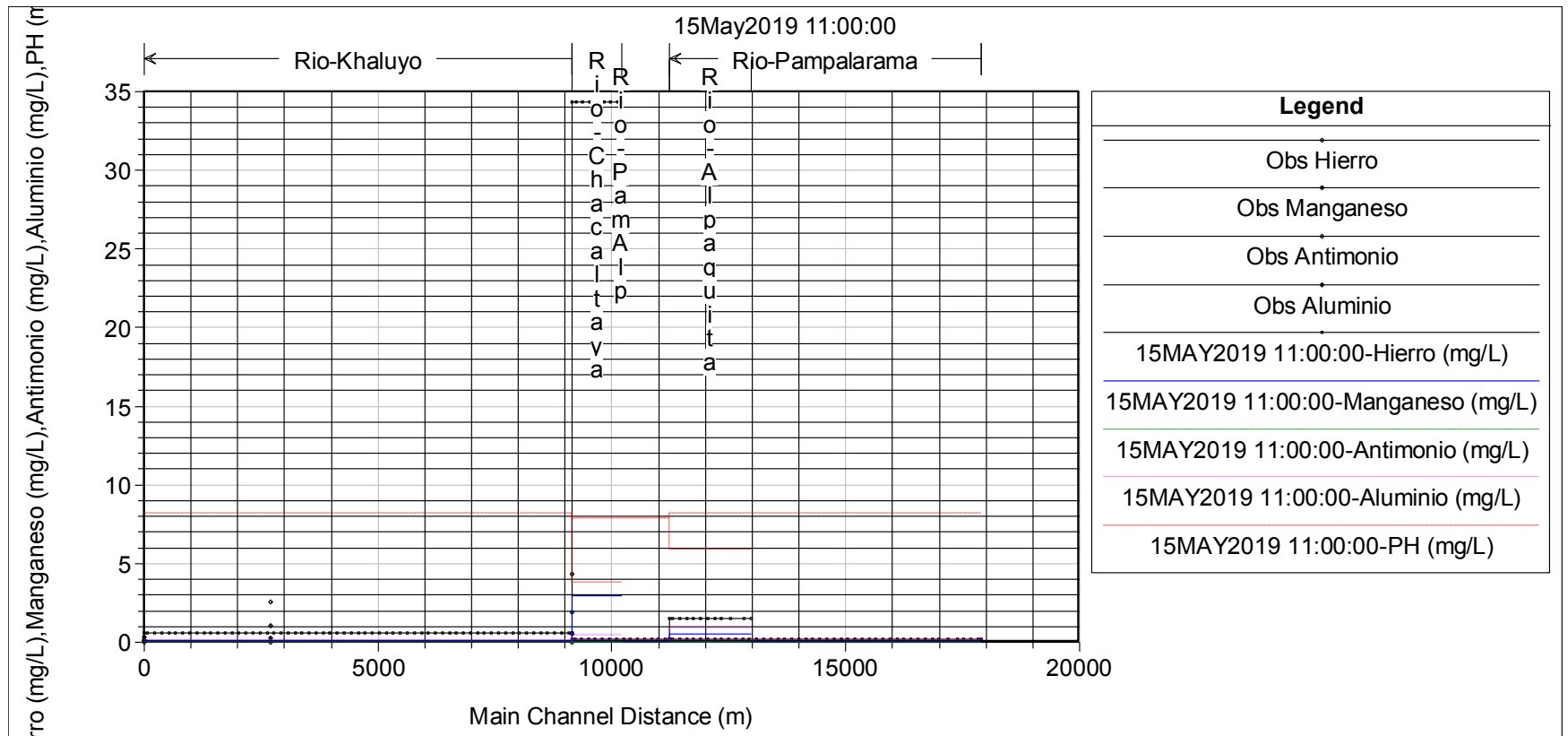


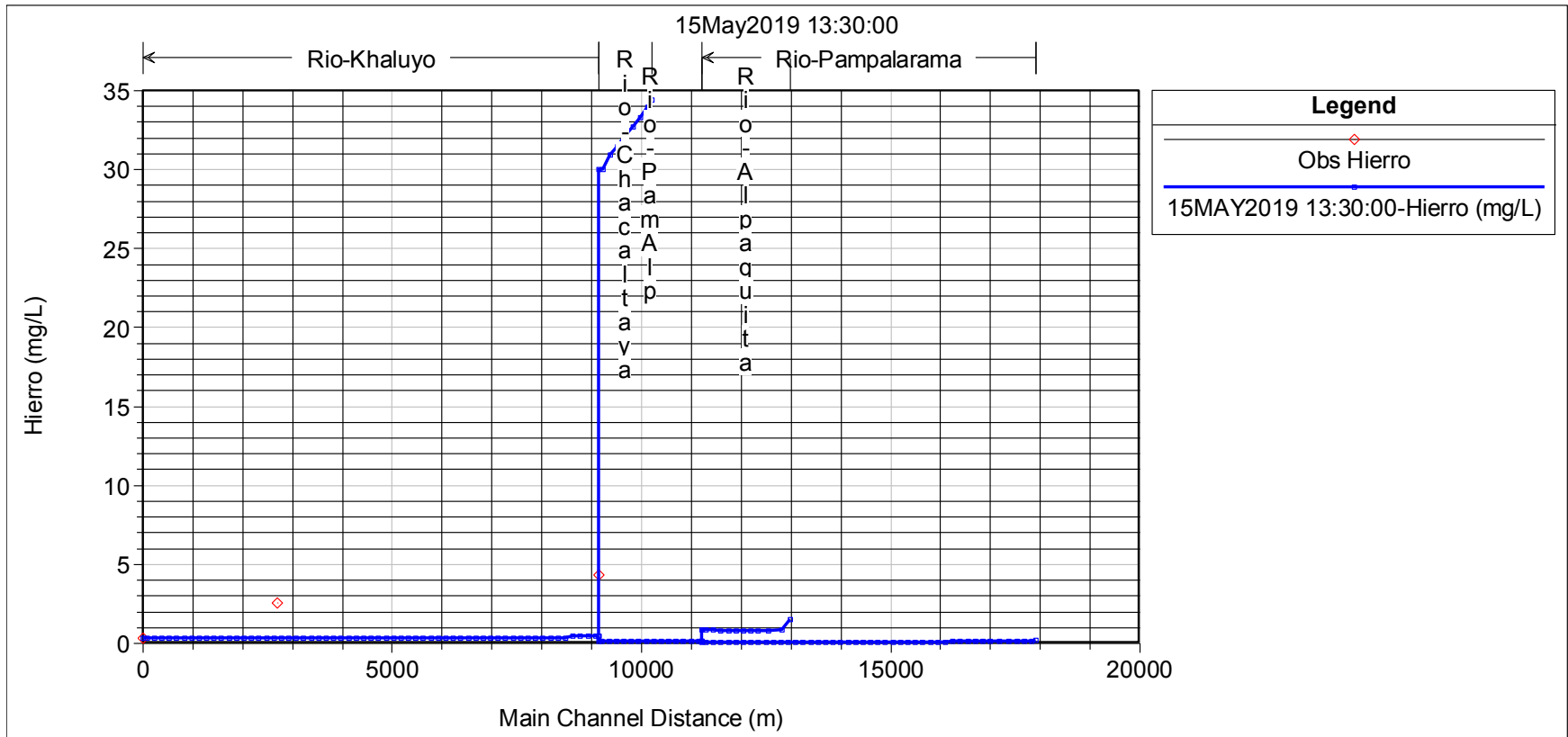


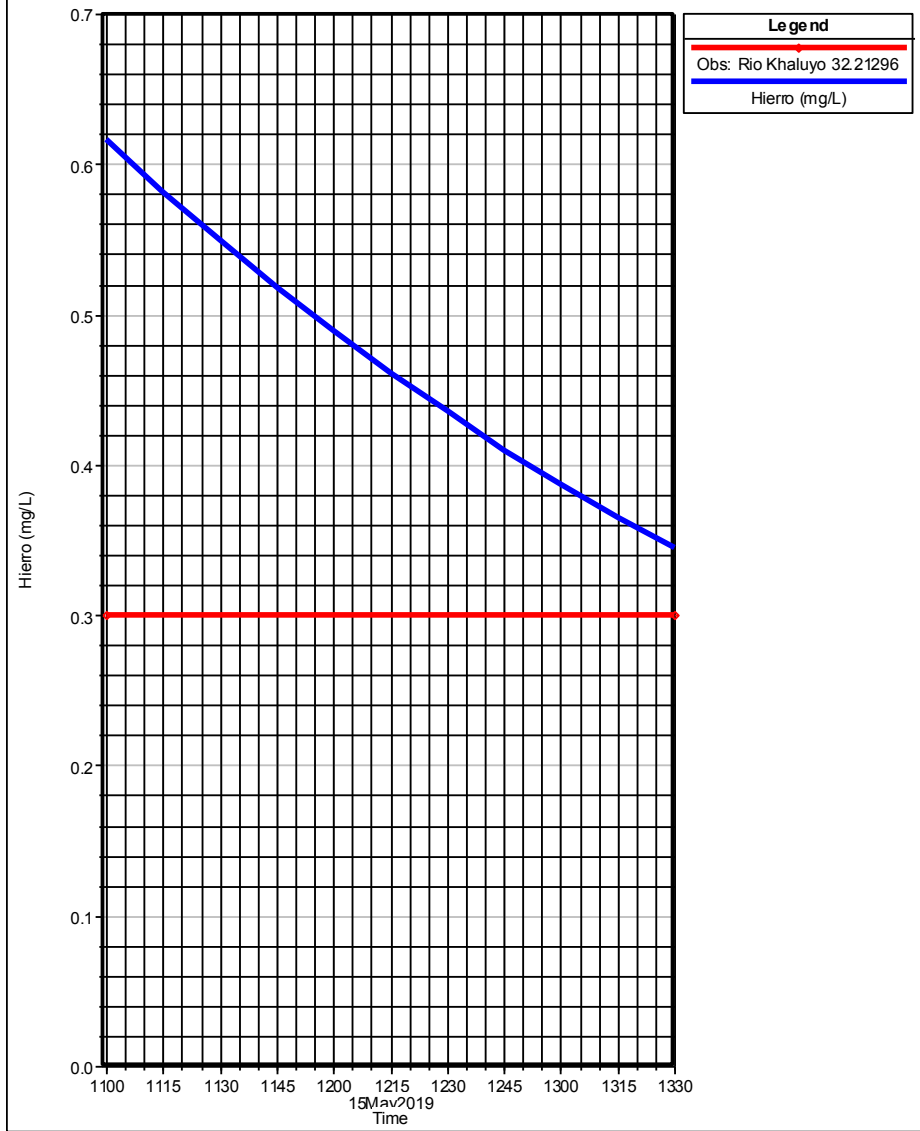


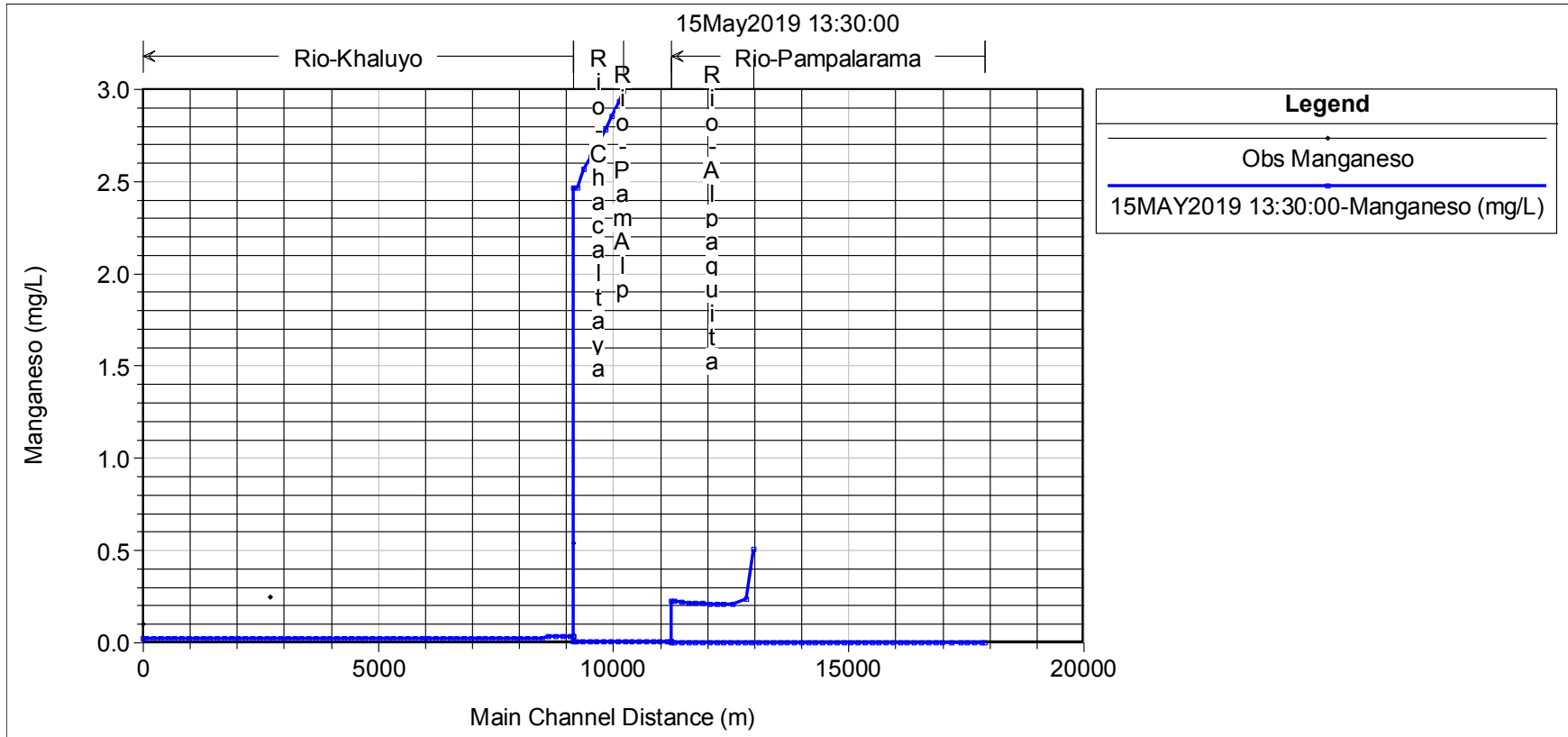
## ESCENARIO 2

### CONCENTRACIONES EN PERFIL LONGITUDINAL Y EN SECCION FINAL DEL TRAMO

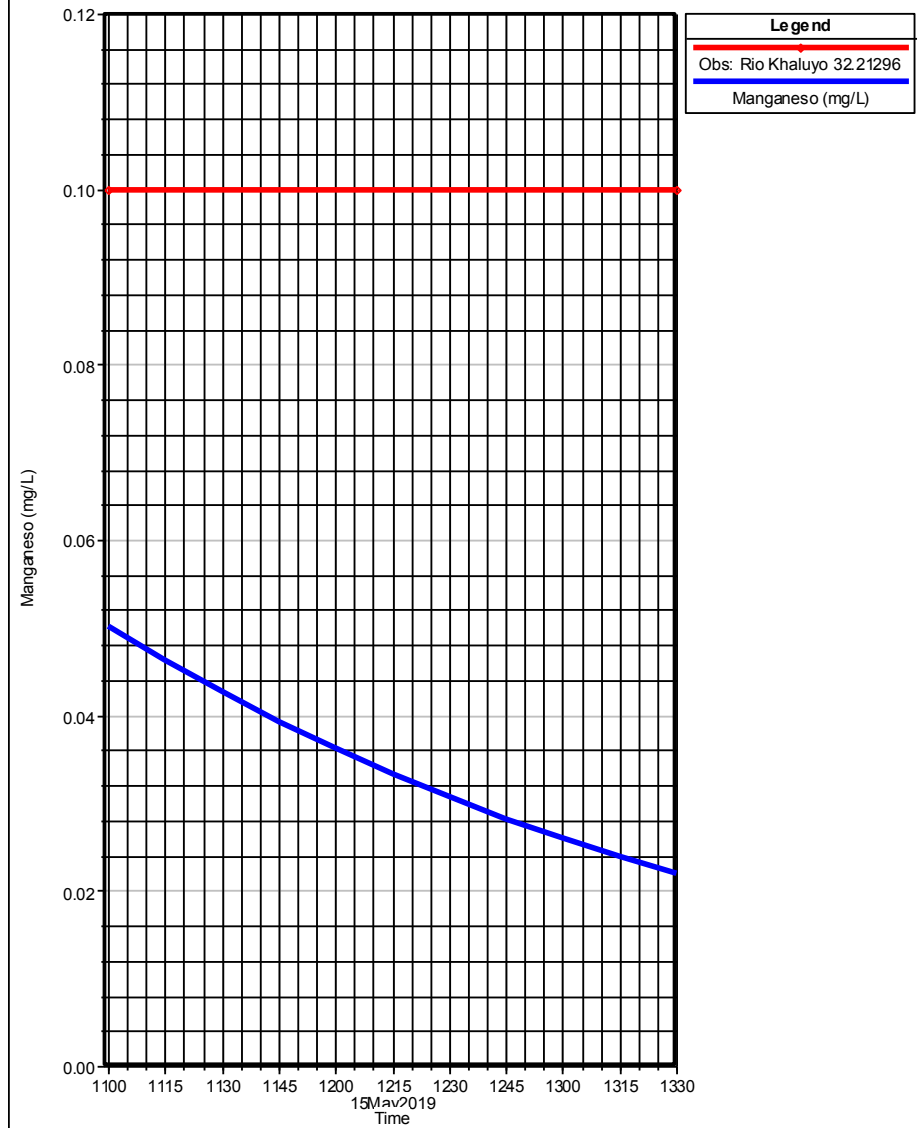


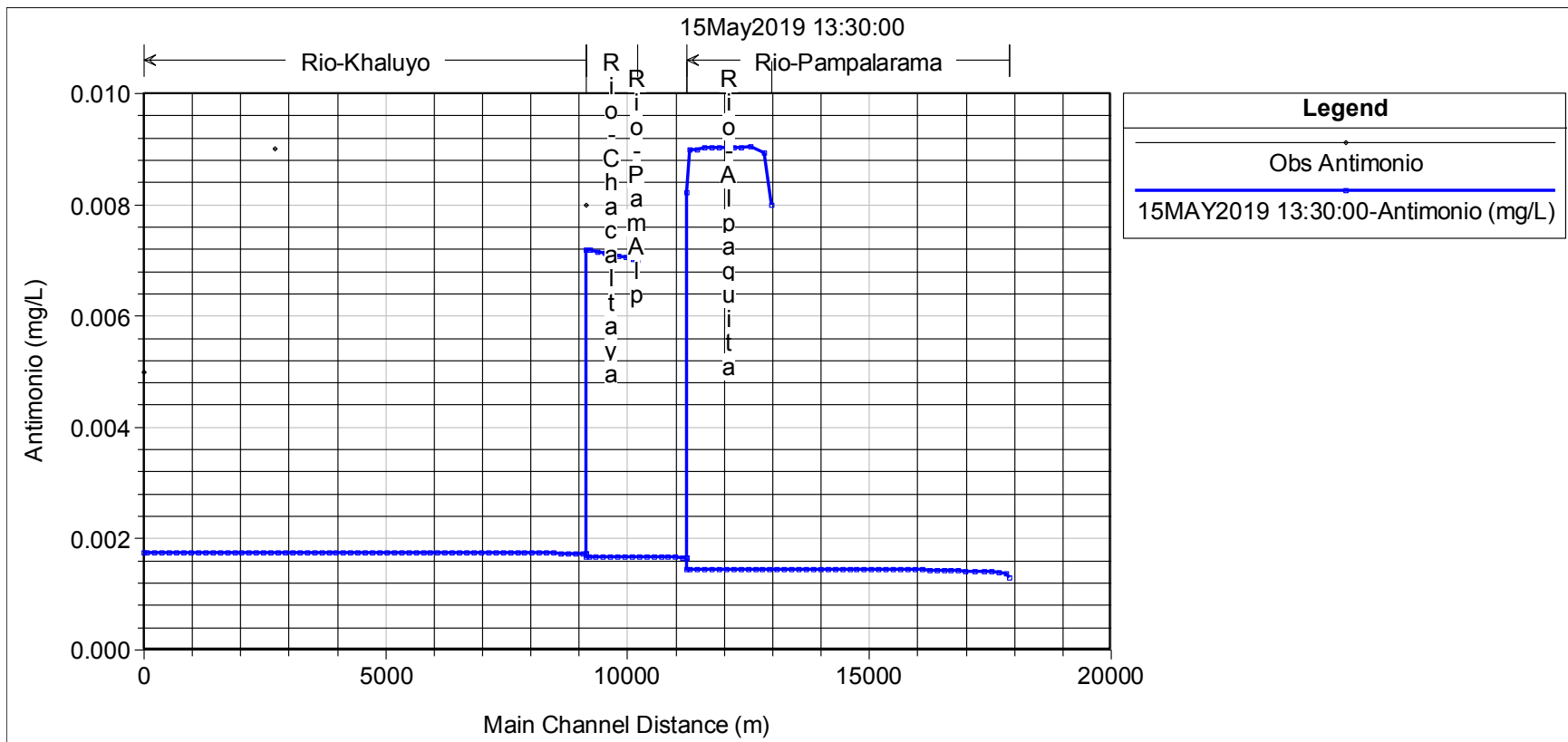


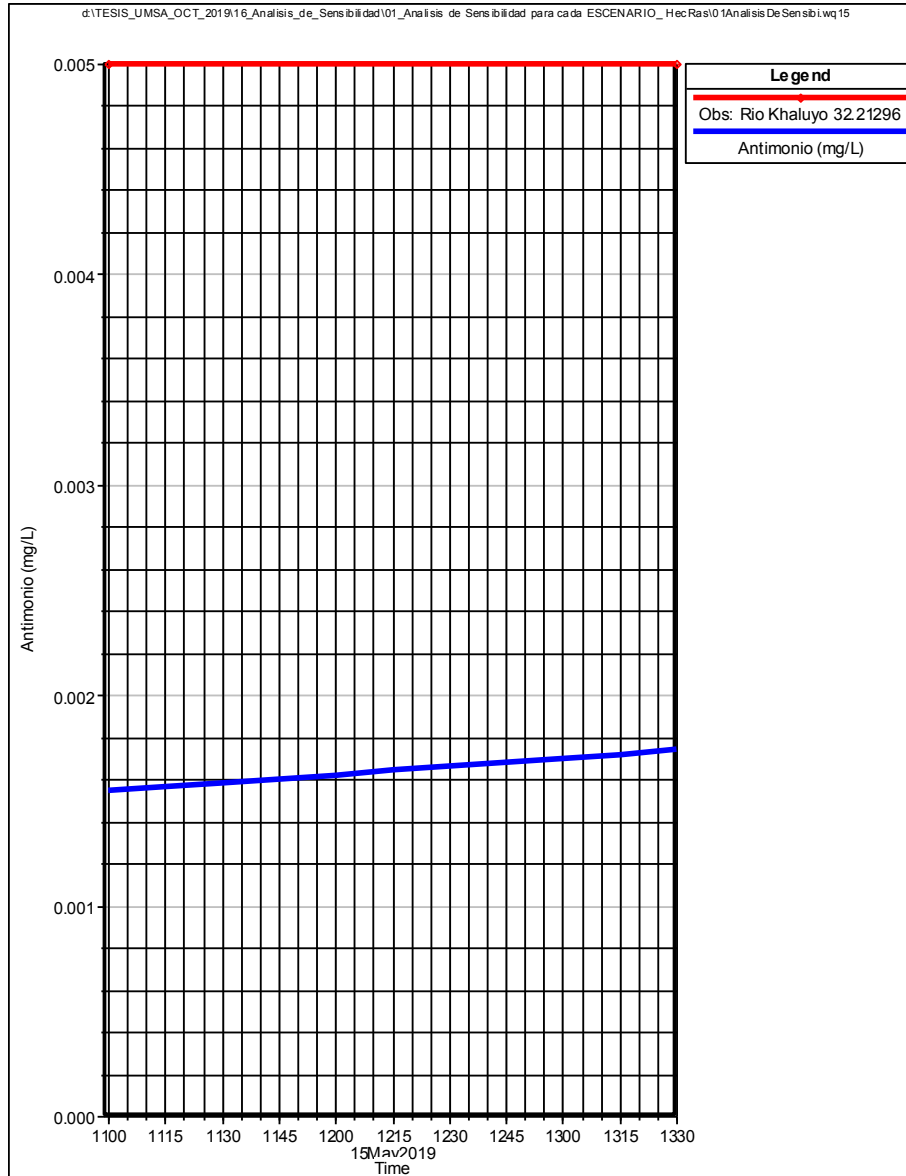


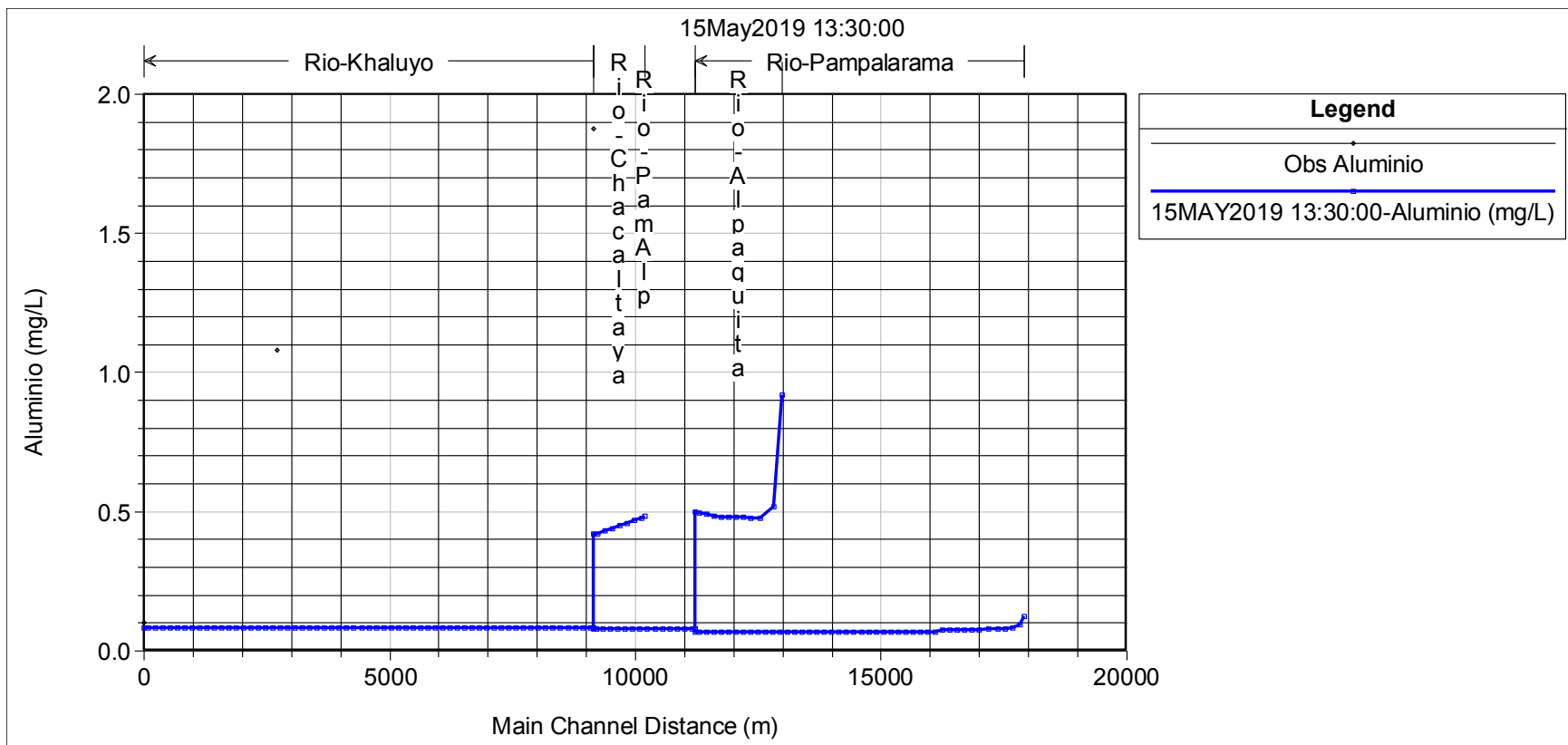


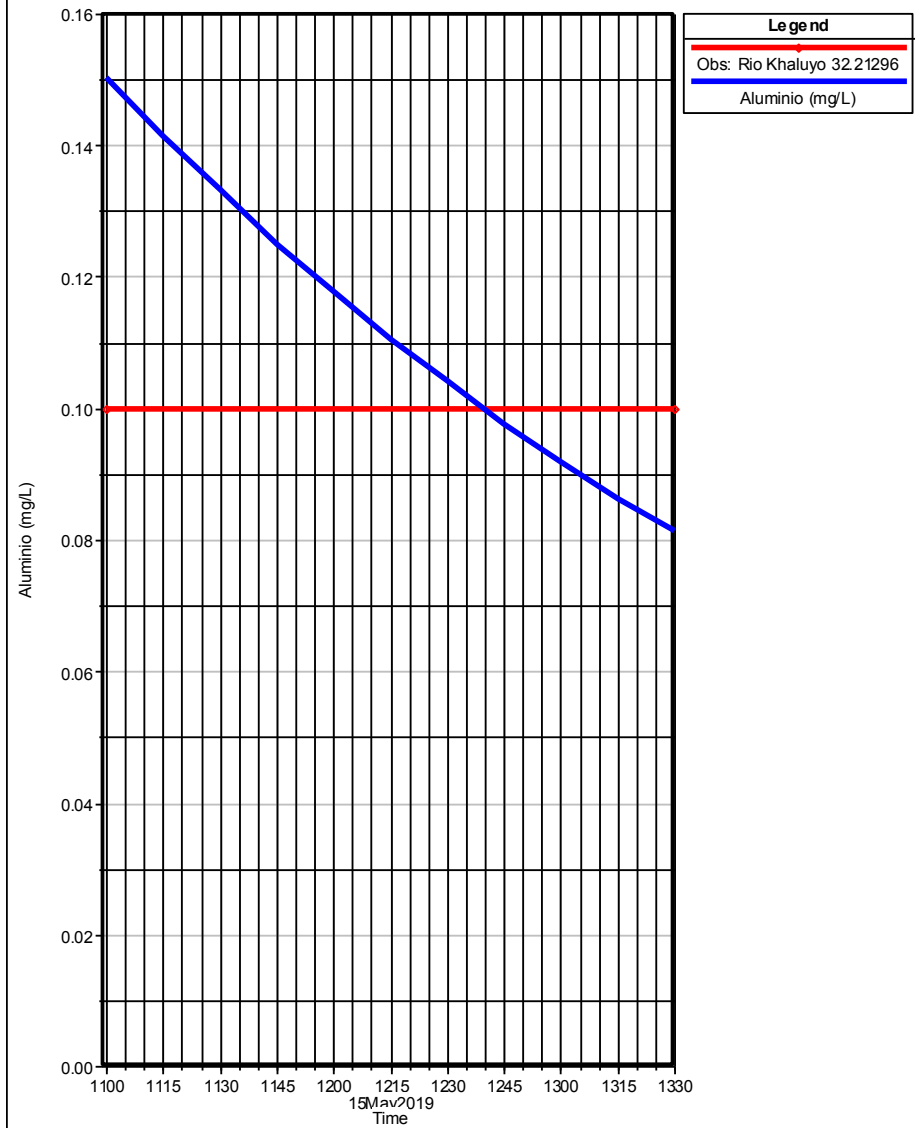






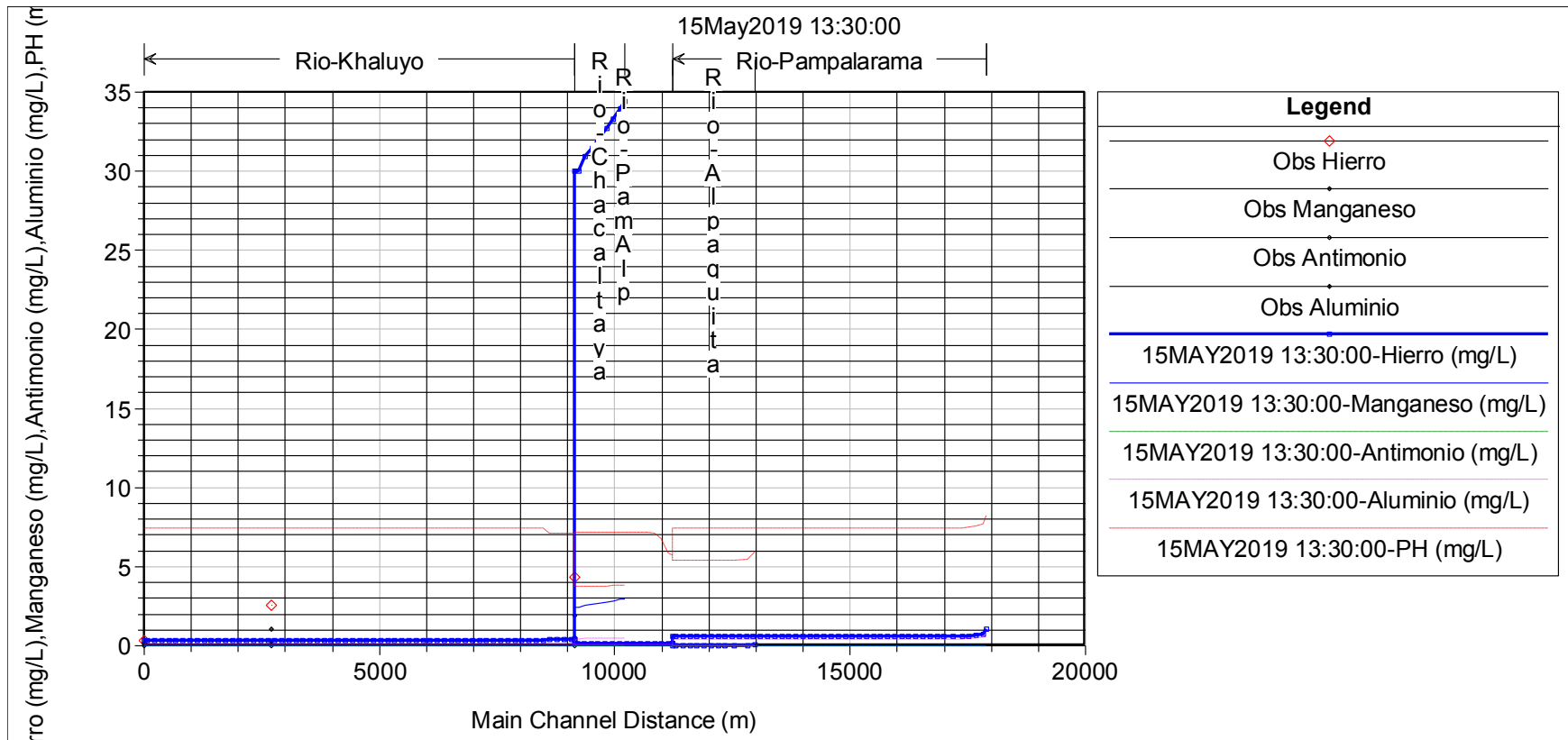


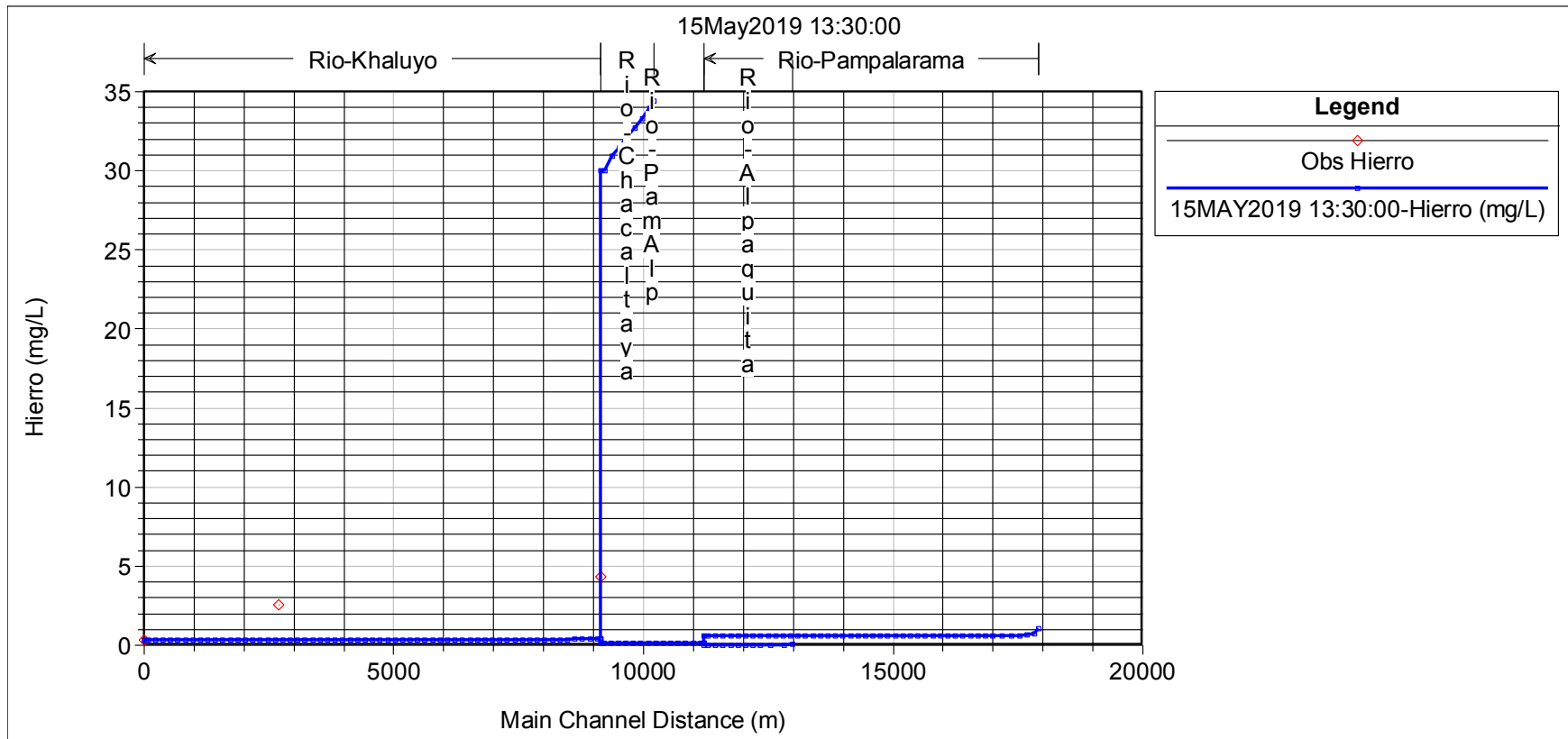




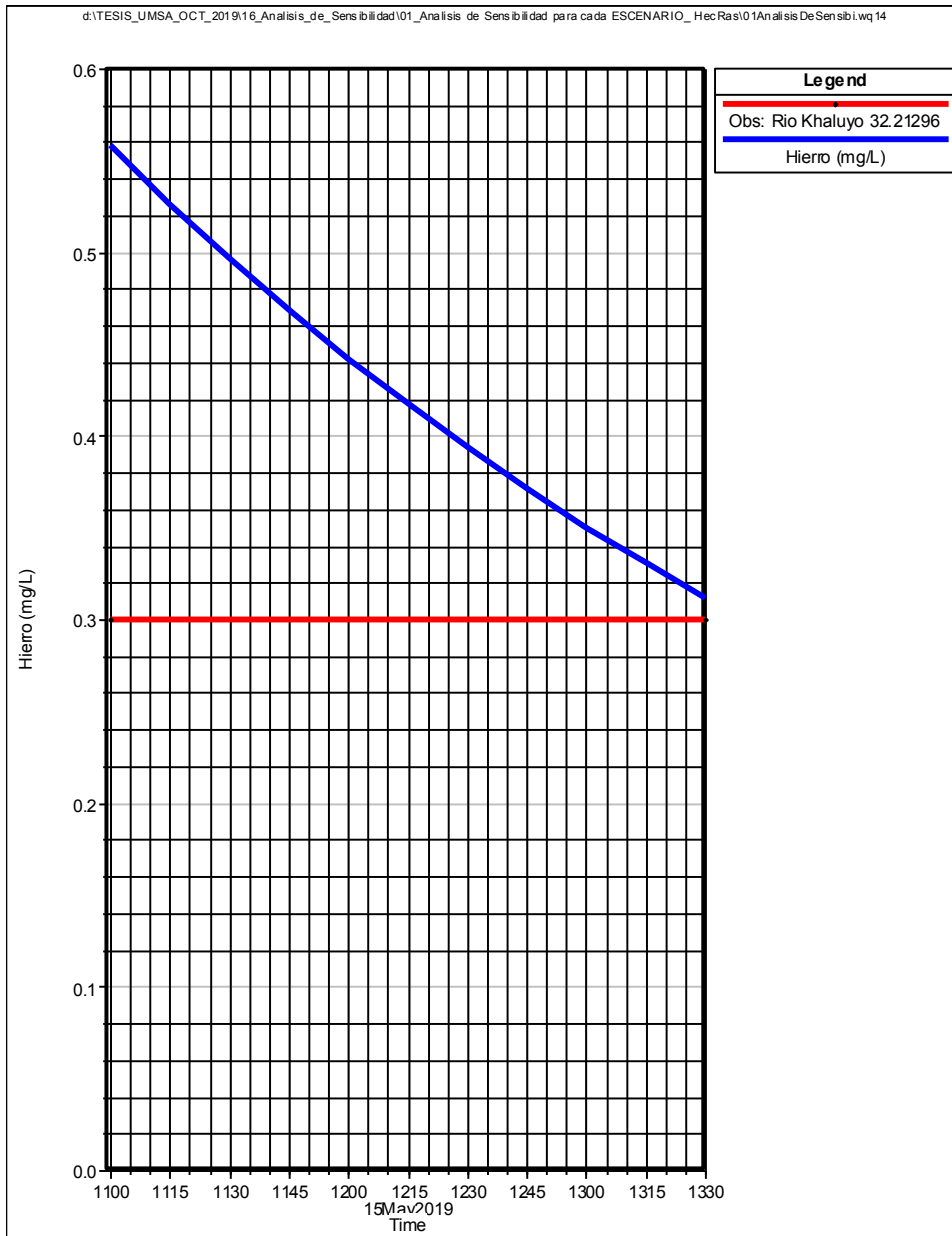
### ESCENARIO 3

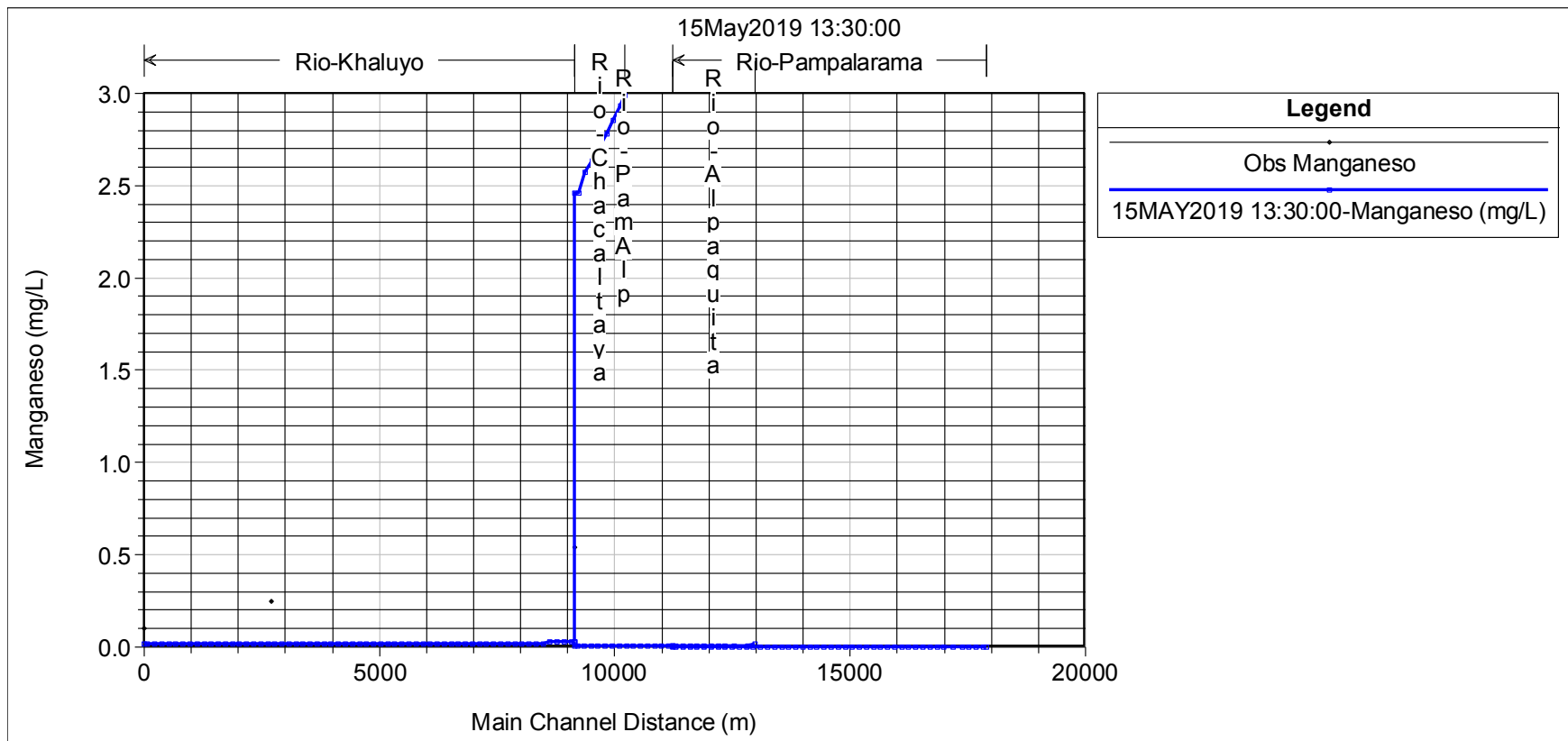
### CONCENTRACIONES EN PERFIL LONGITUDINAL Y EN SECCION FINAL DEL TRAMO

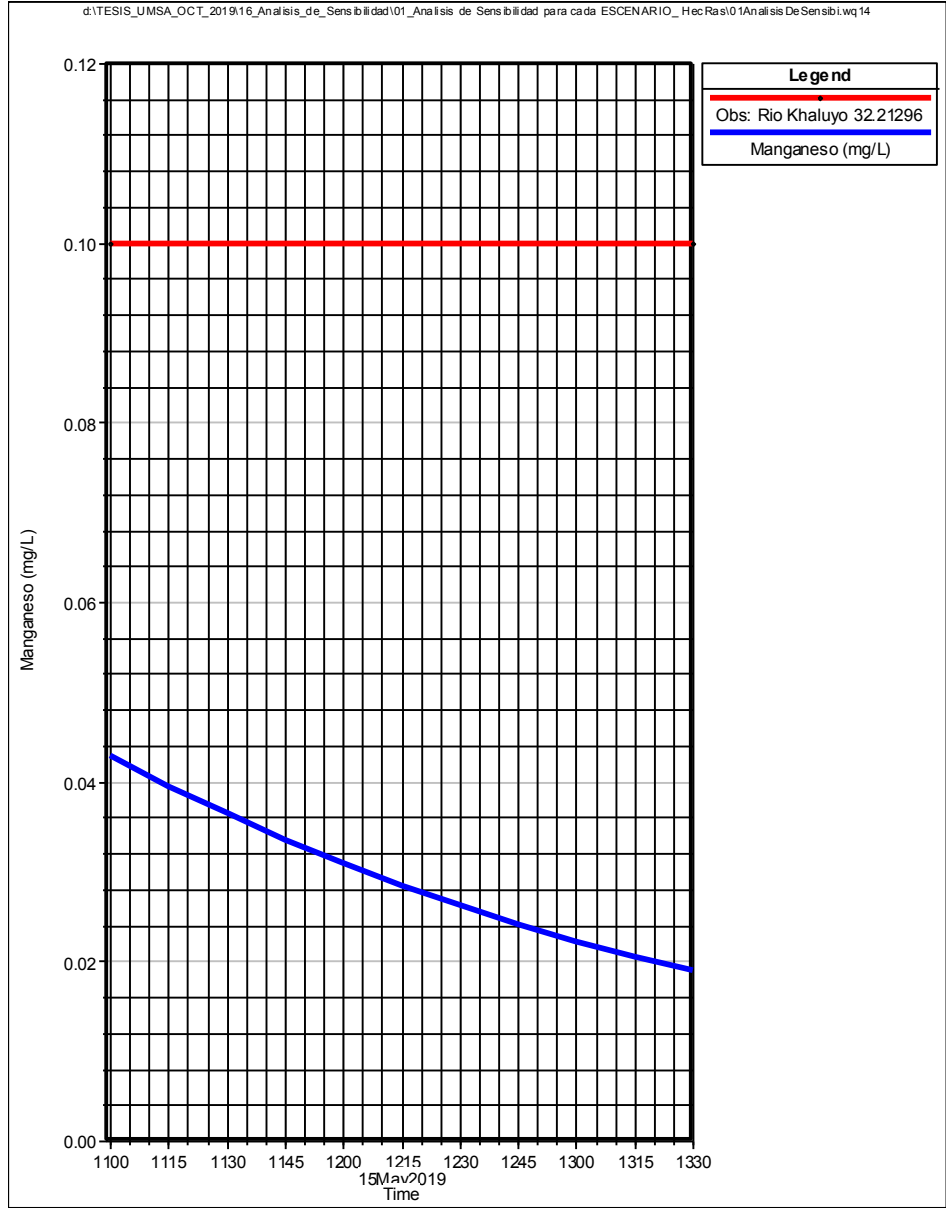


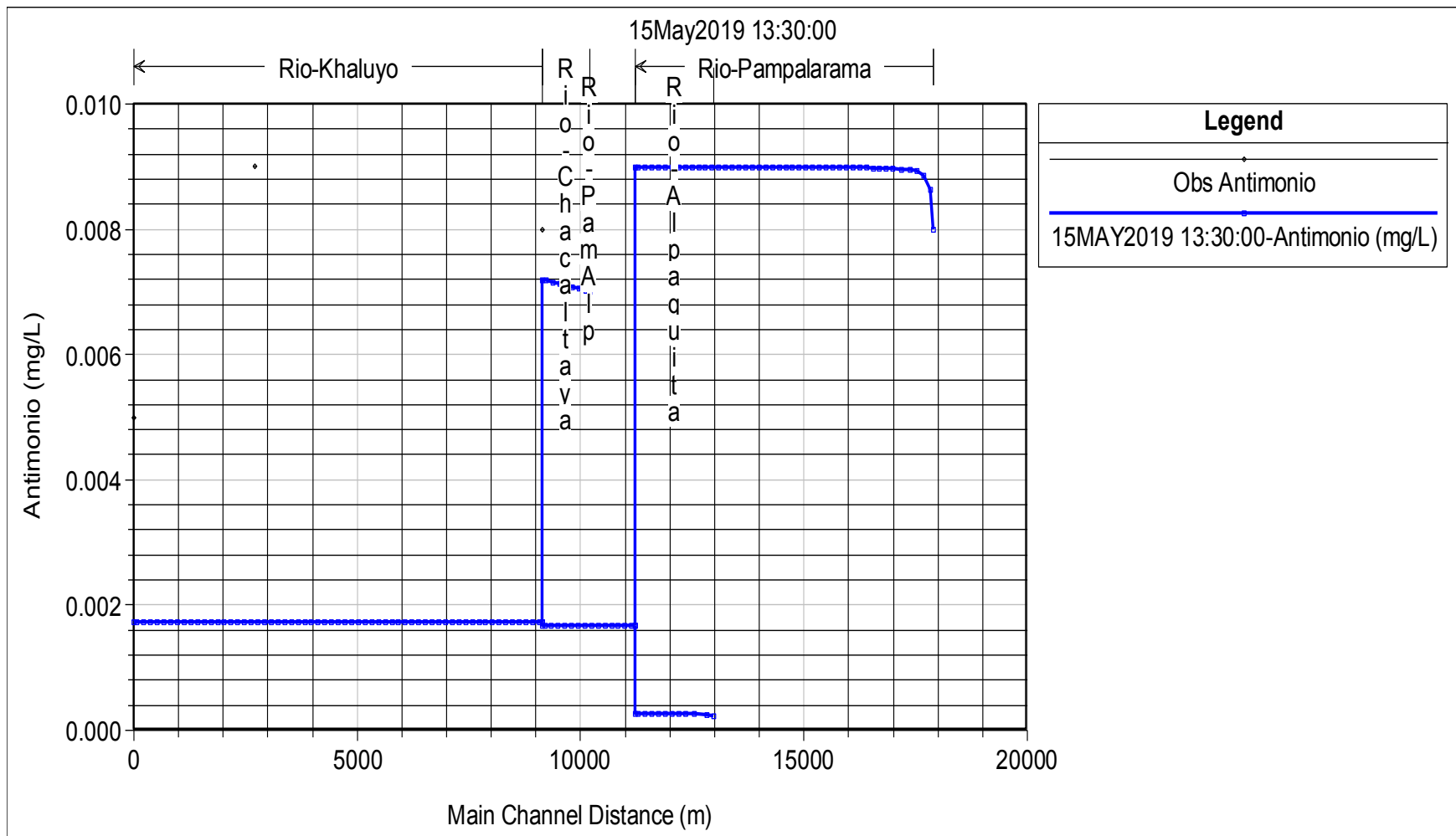


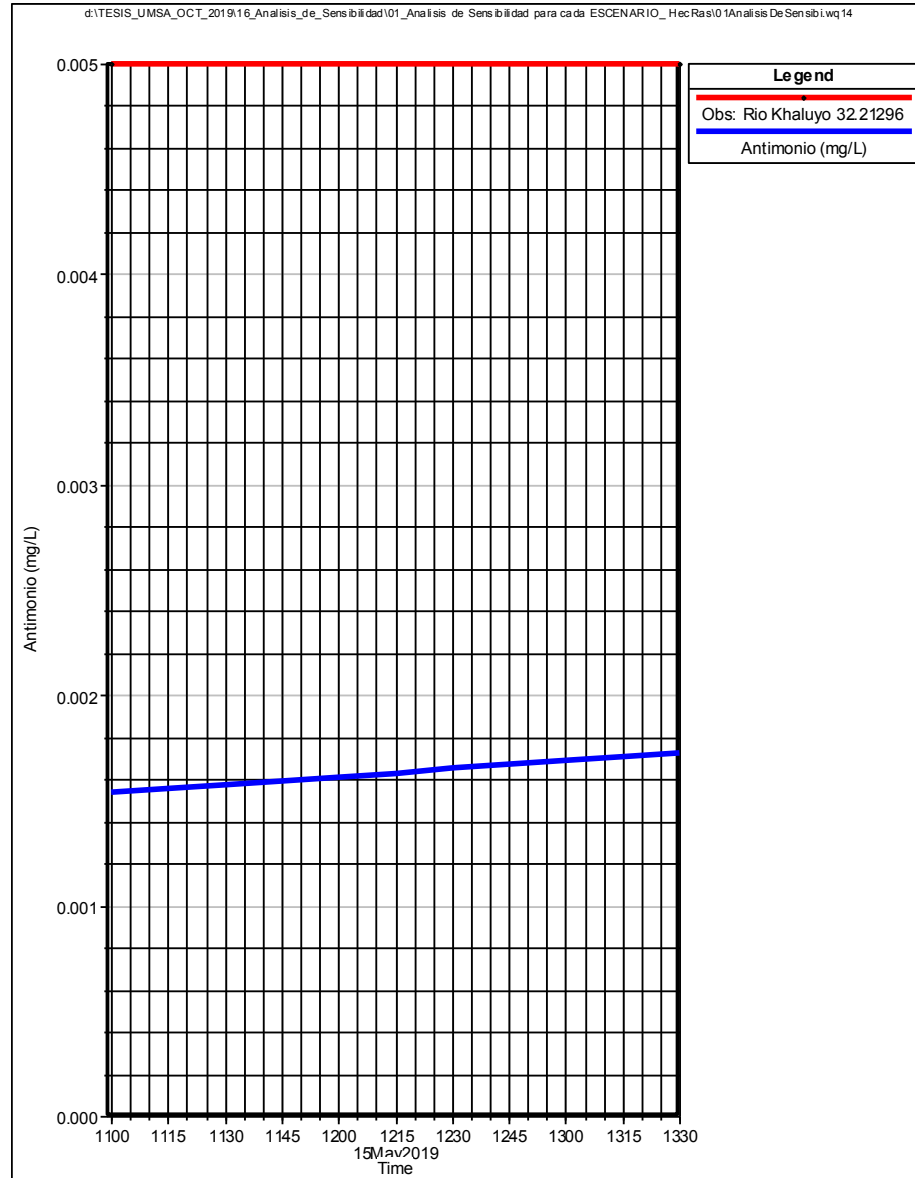


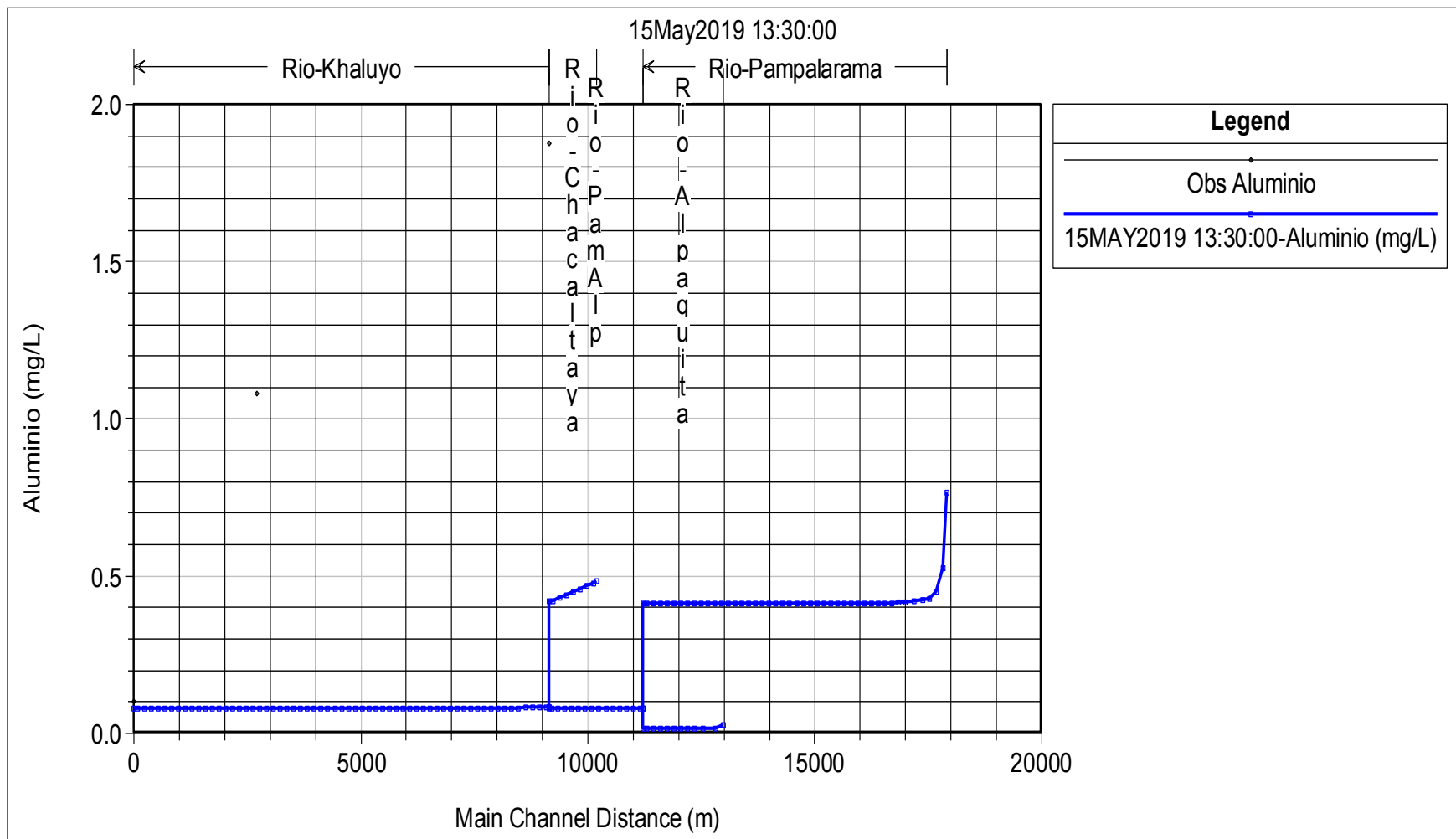


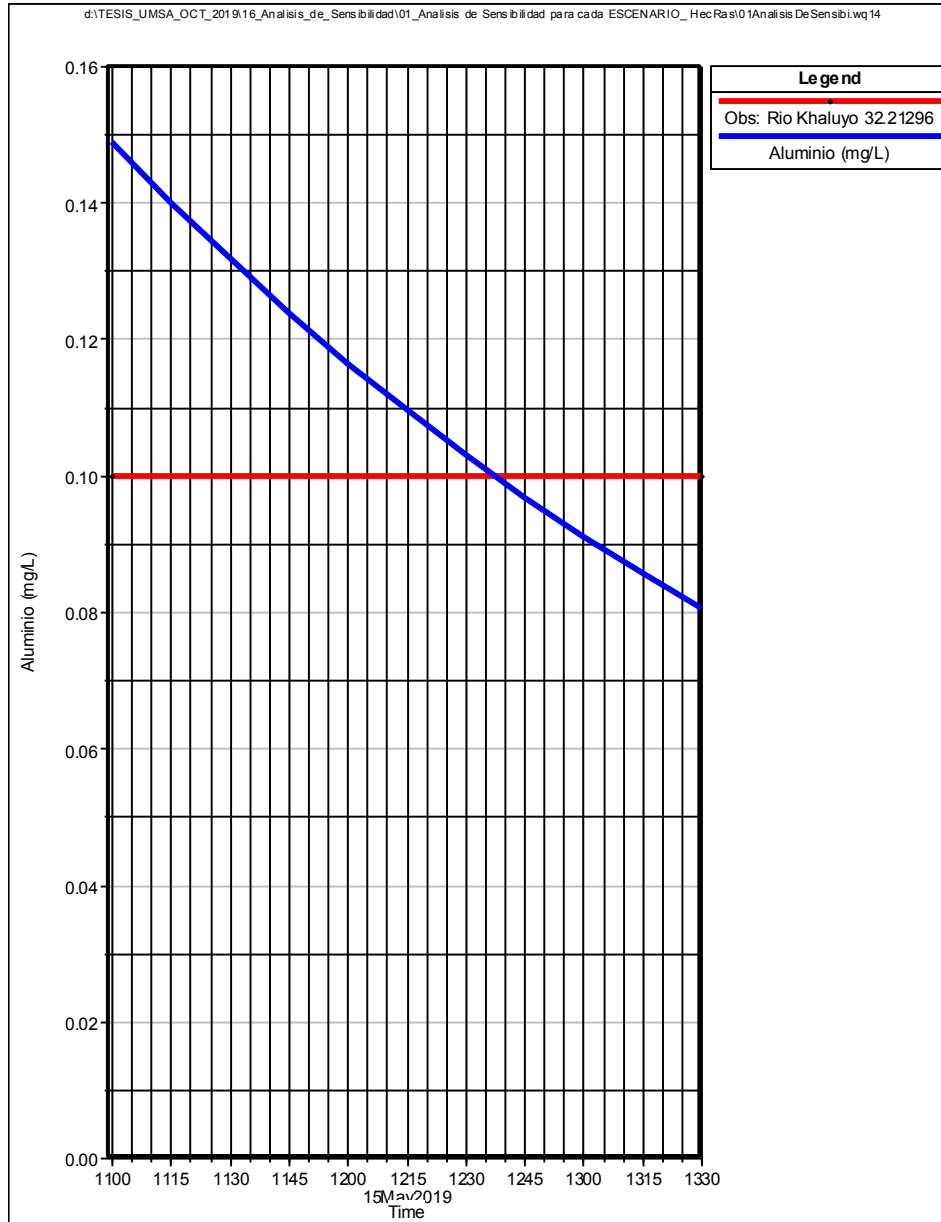








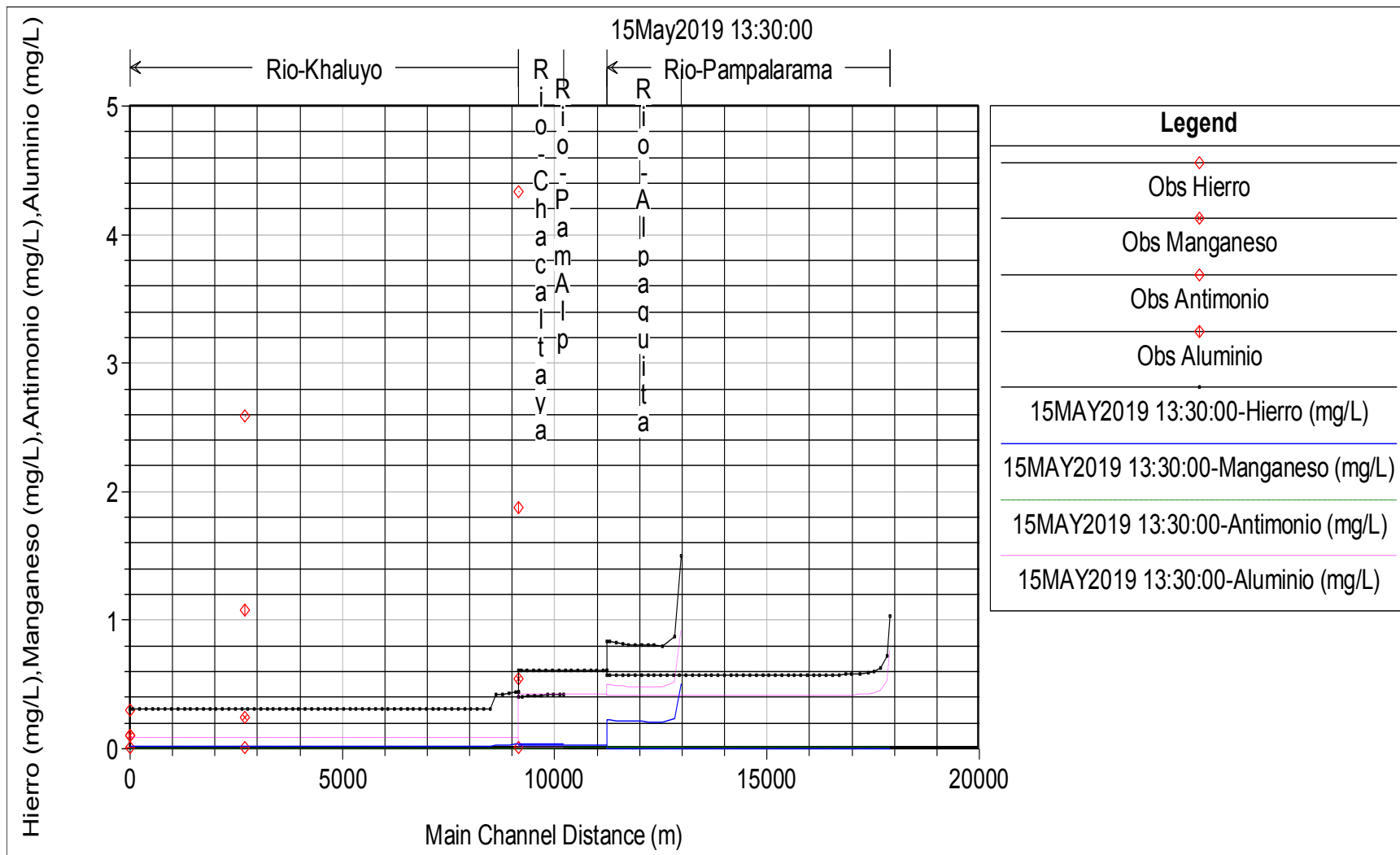


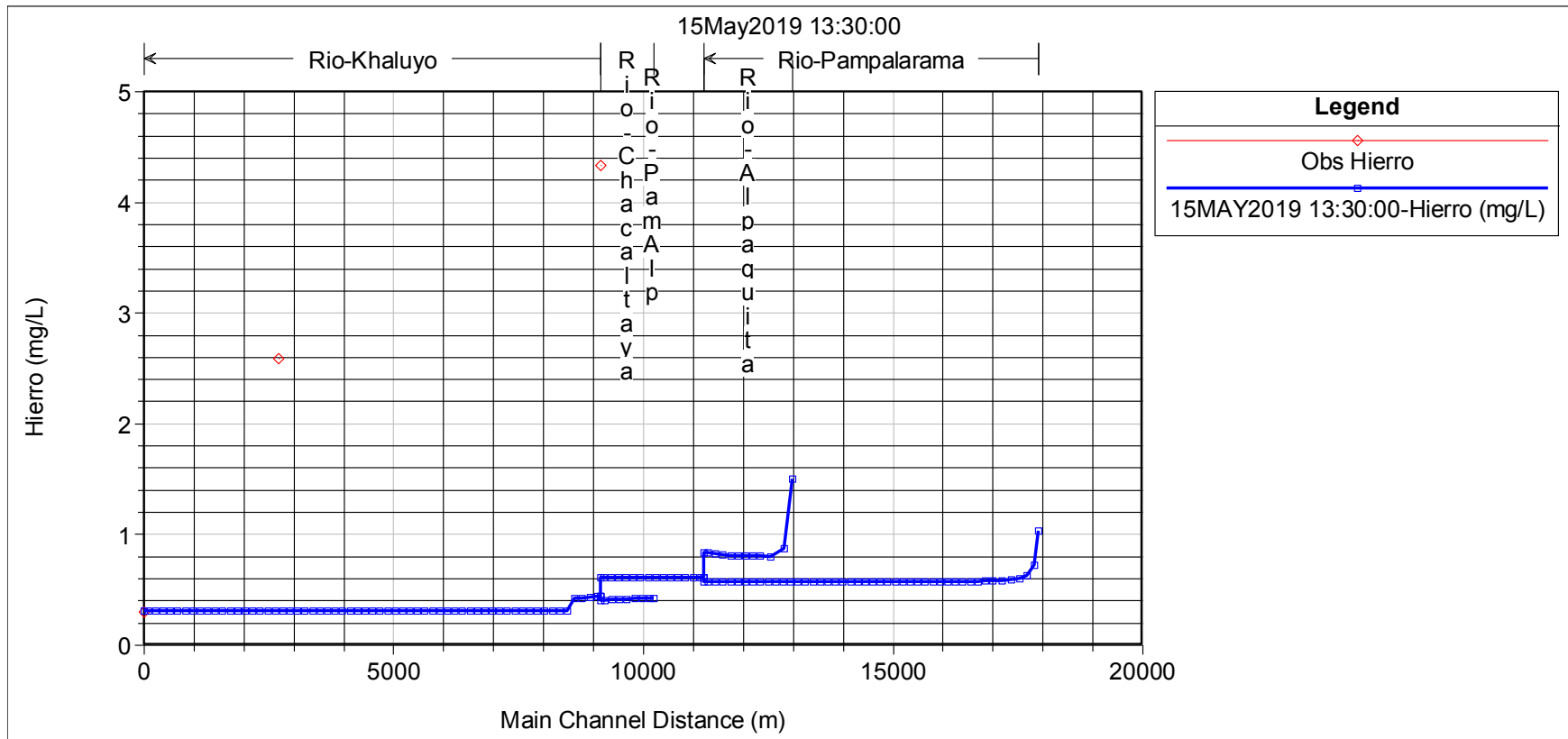


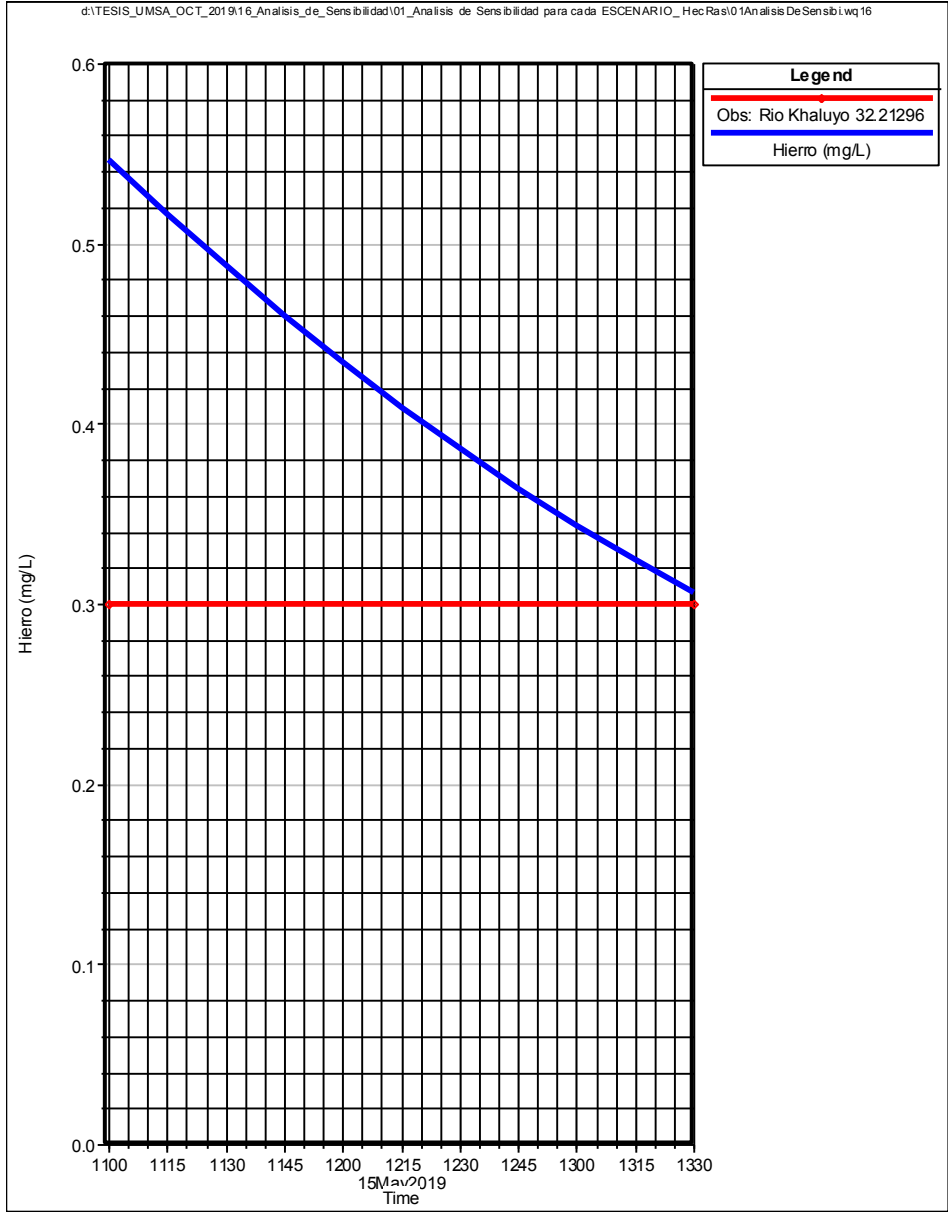


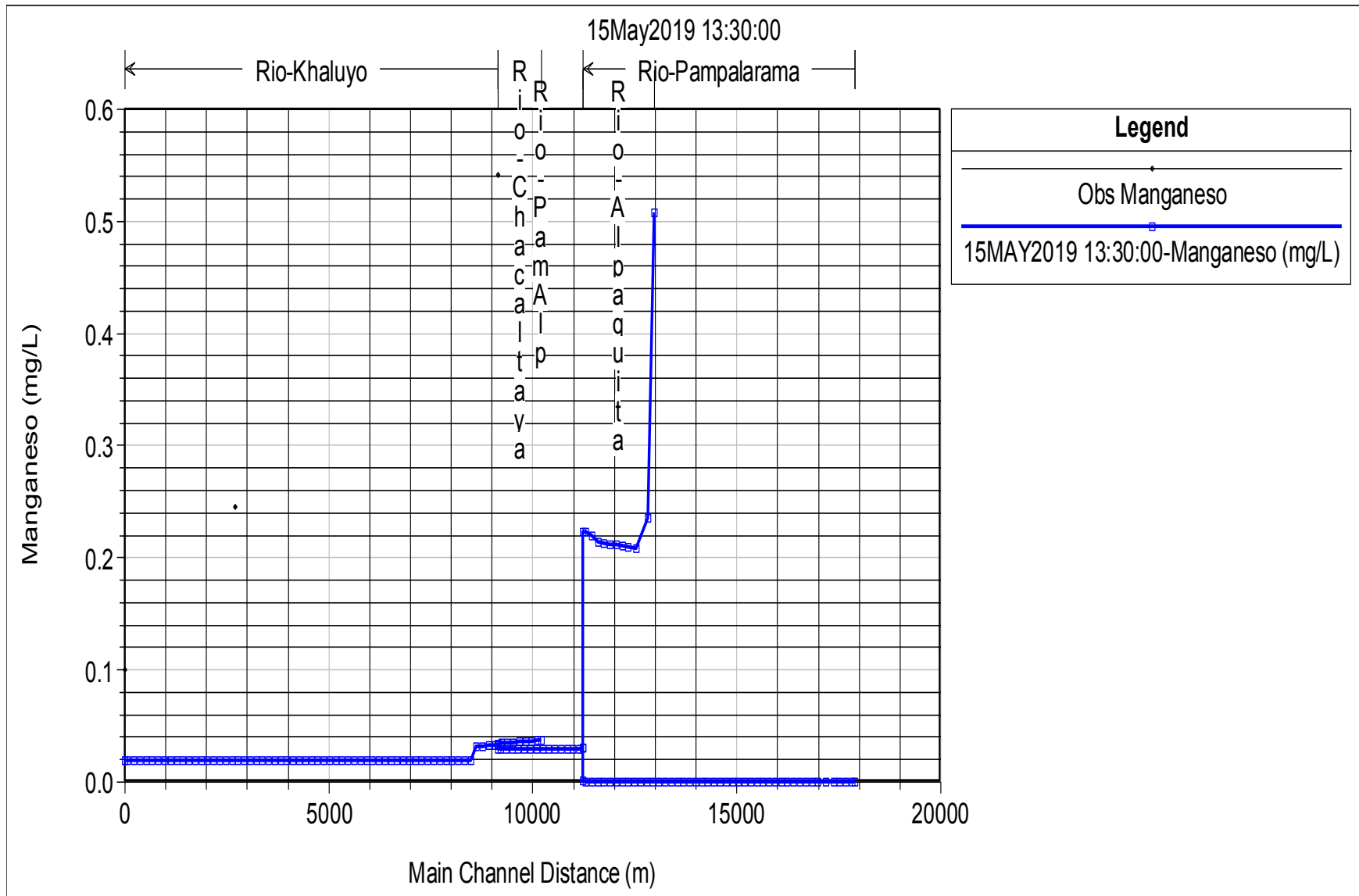
### ESCENARIO 4

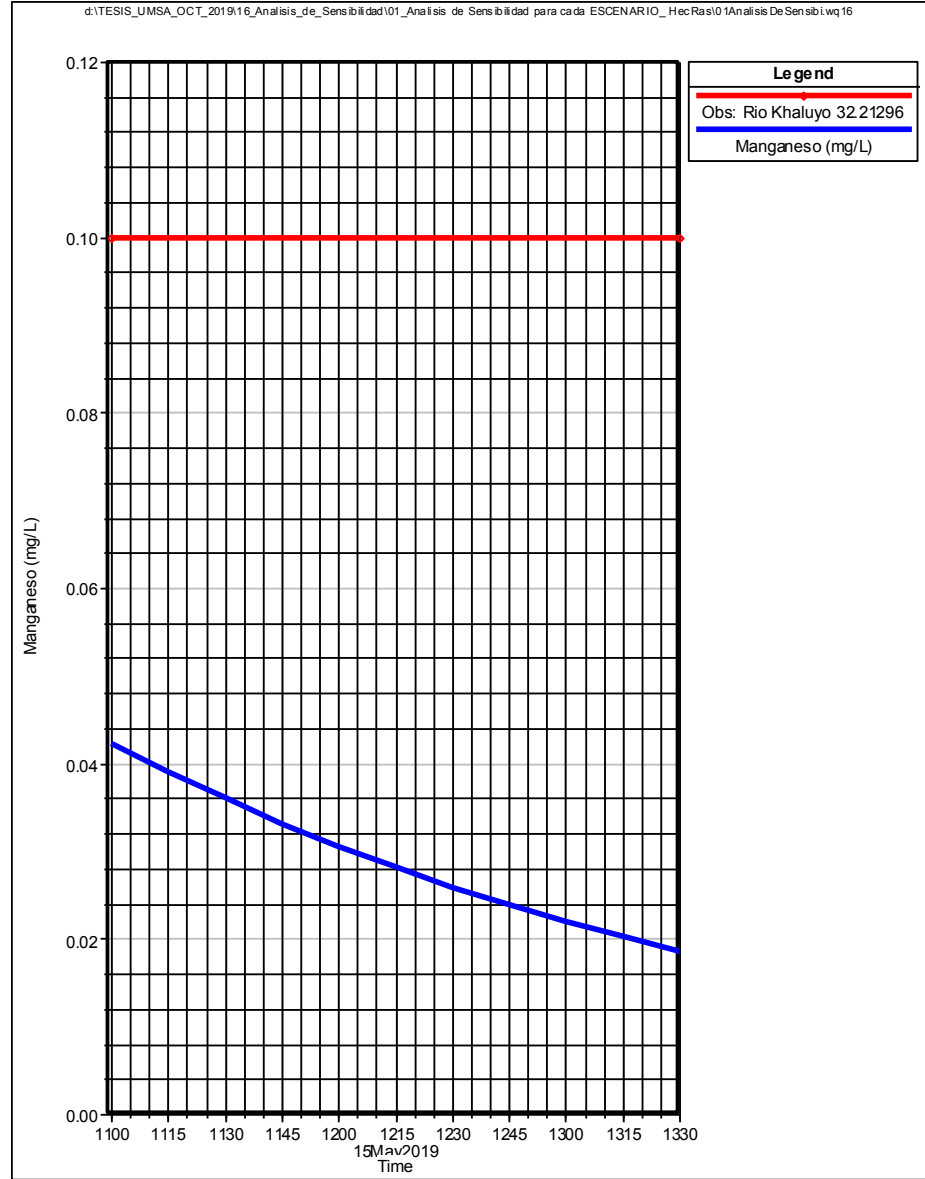
### CONCENTRACIONES EN PERFIL LONGITUDINAL Y EN SECCION FINAL DEL TRAMO

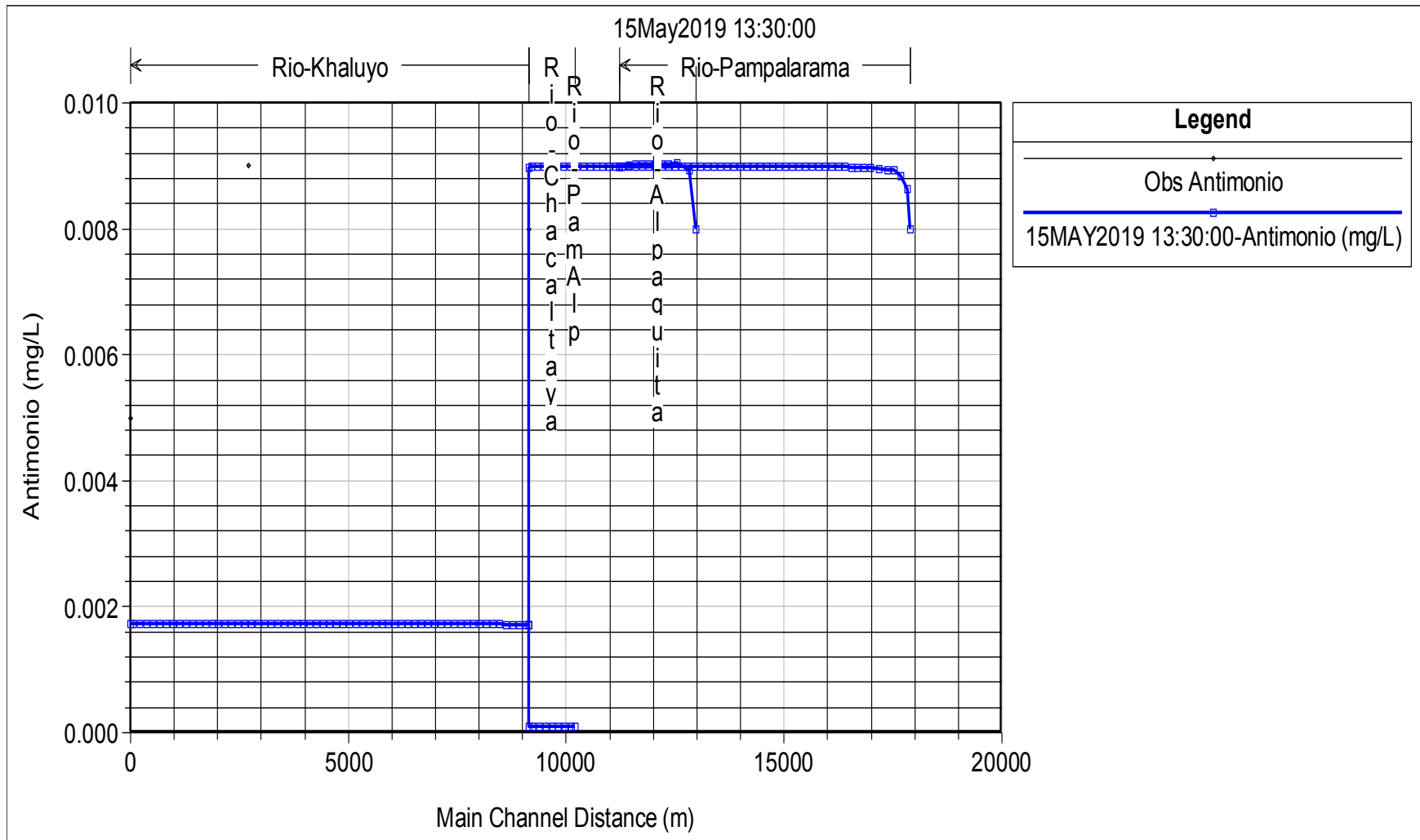


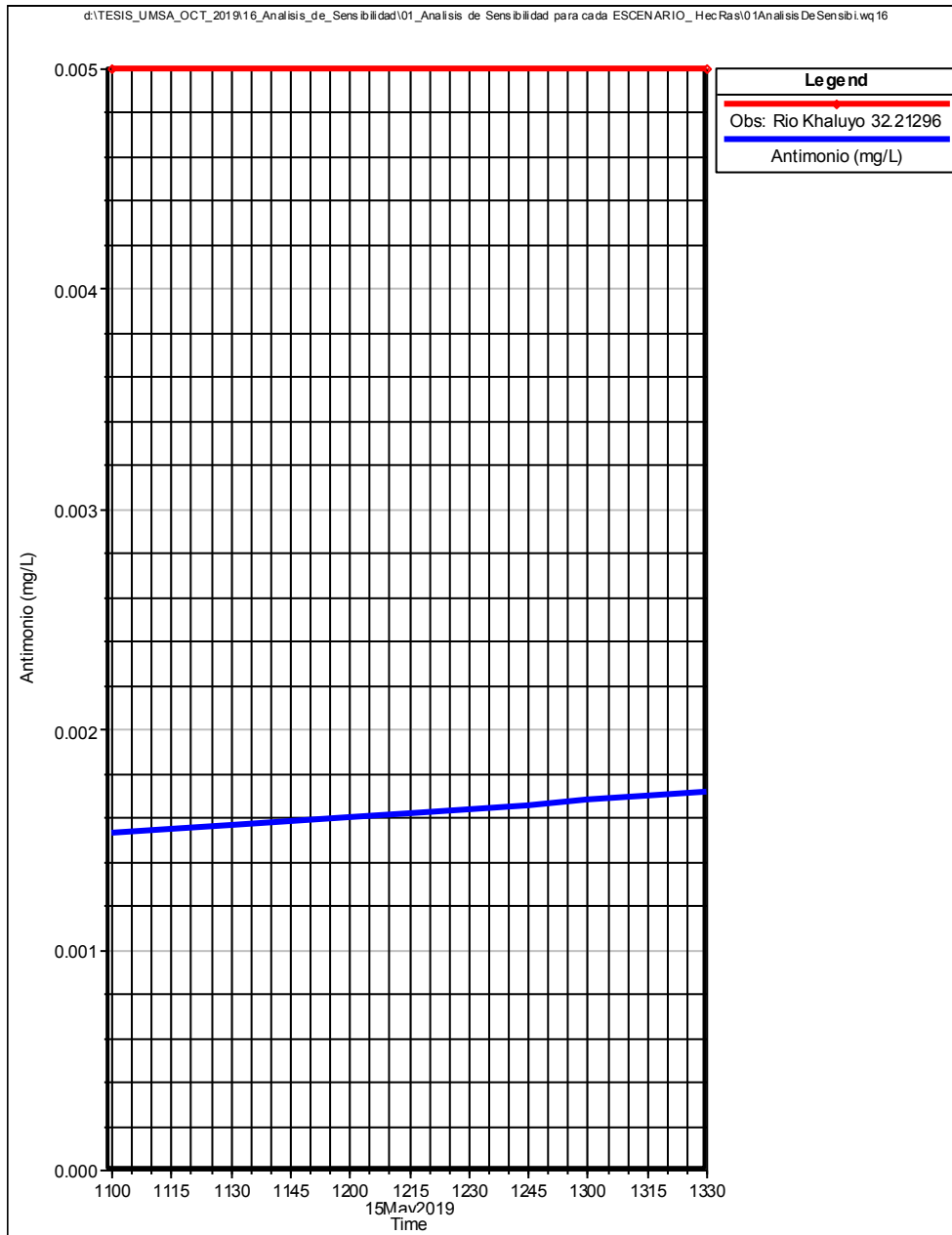




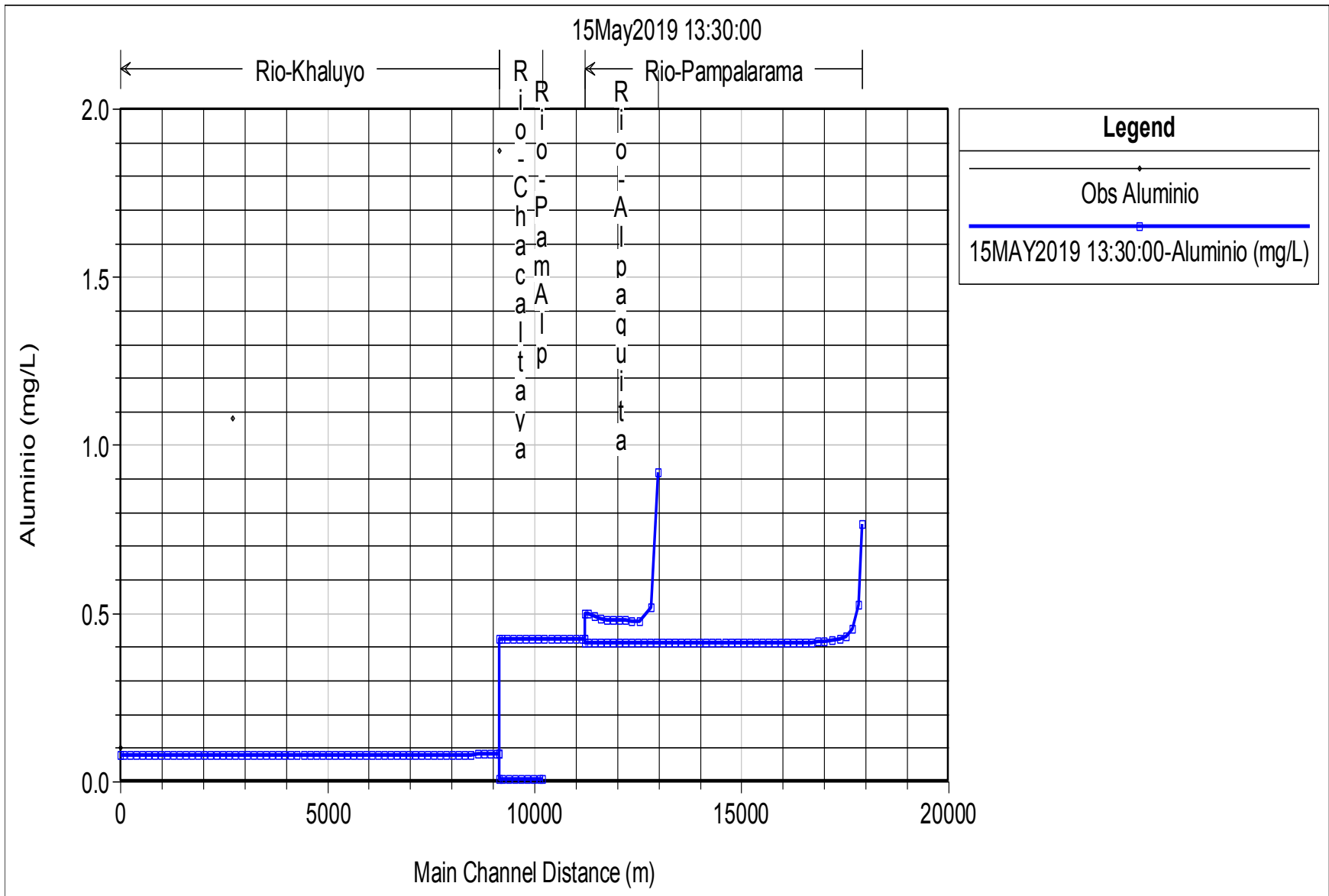


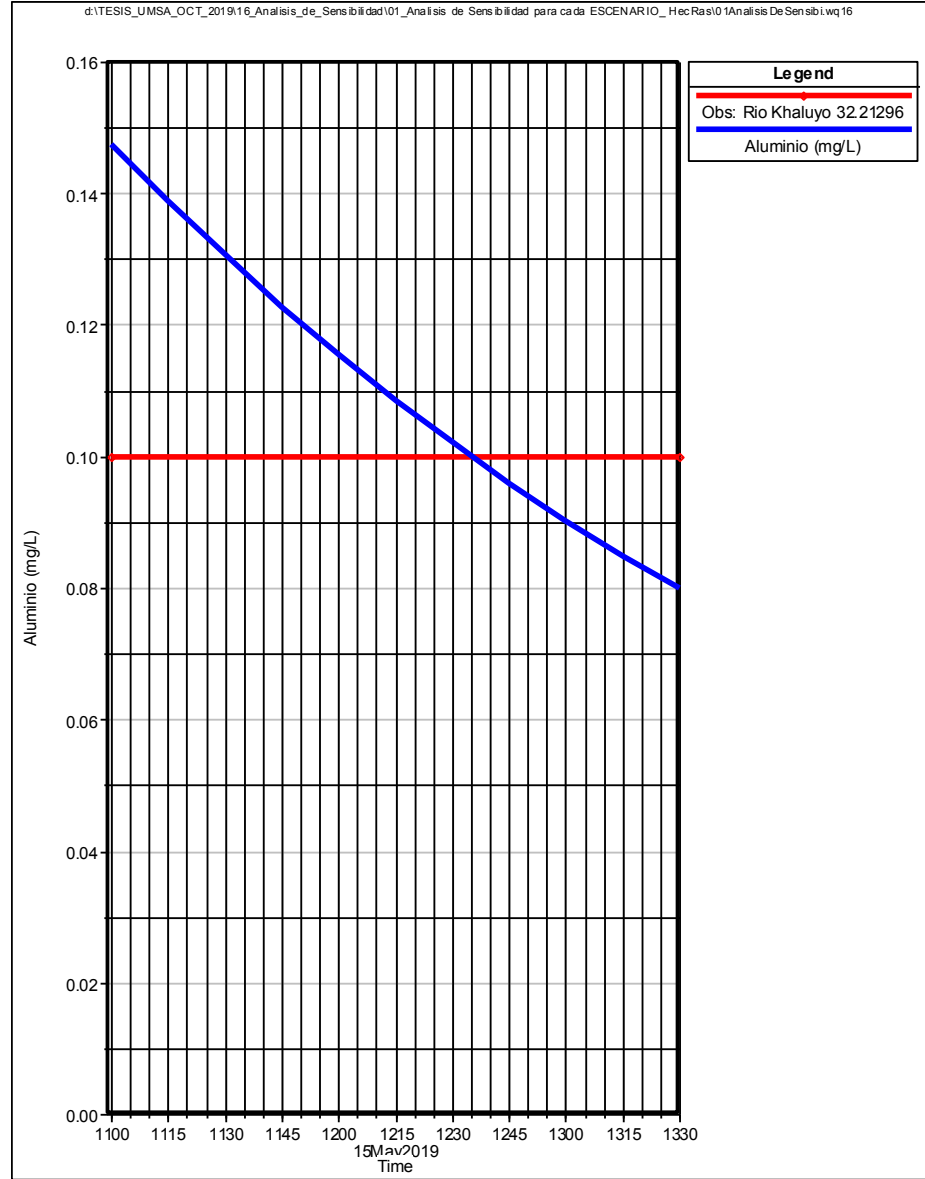




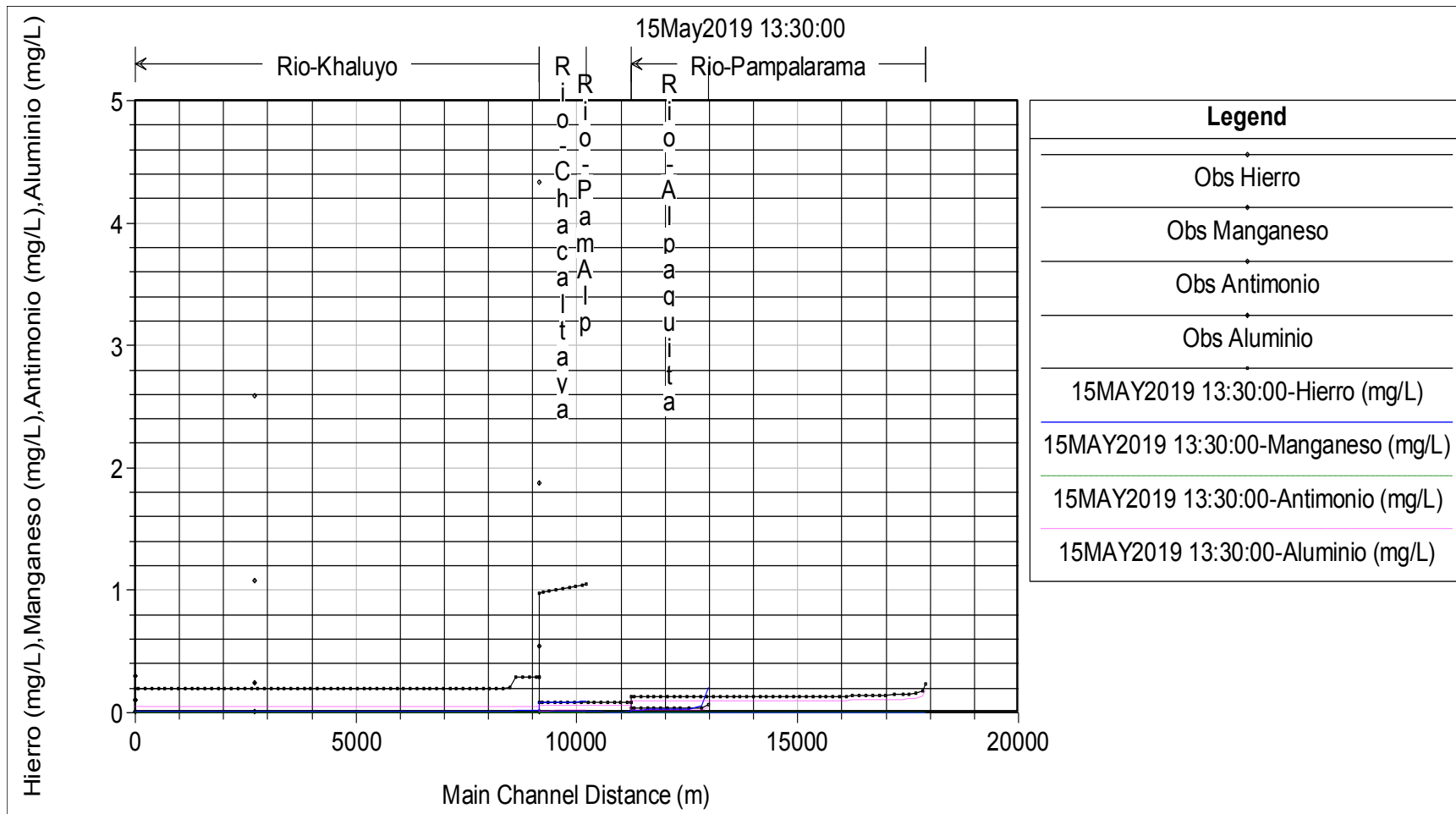


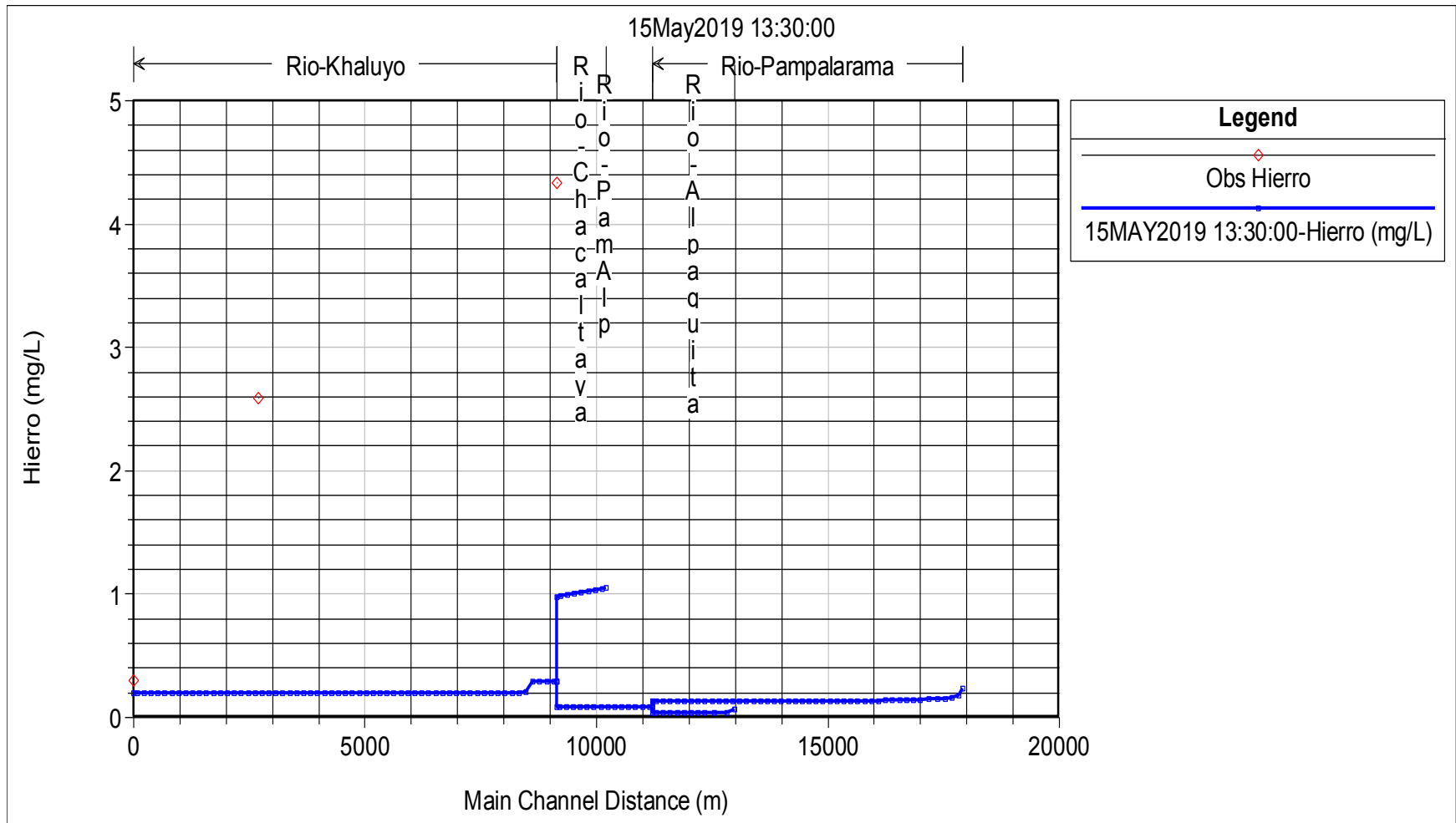


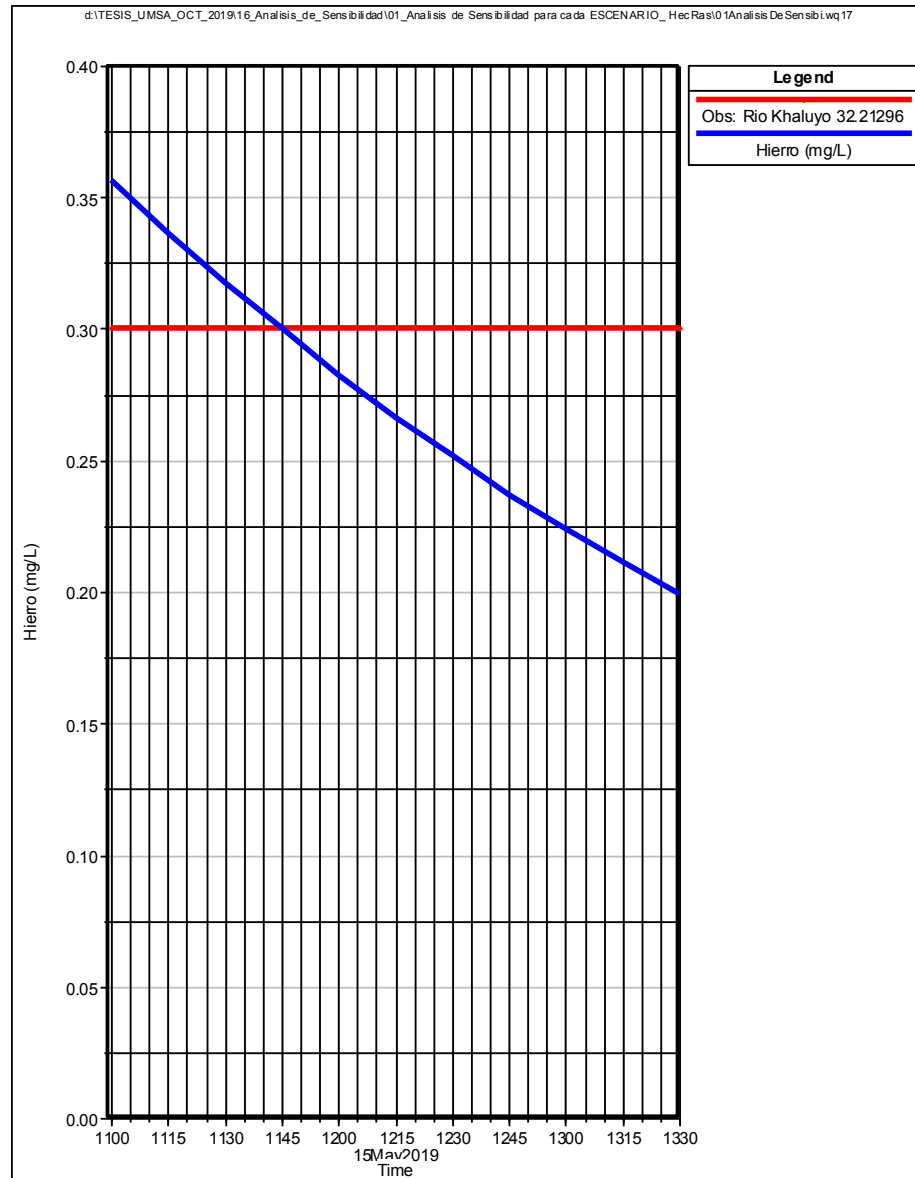


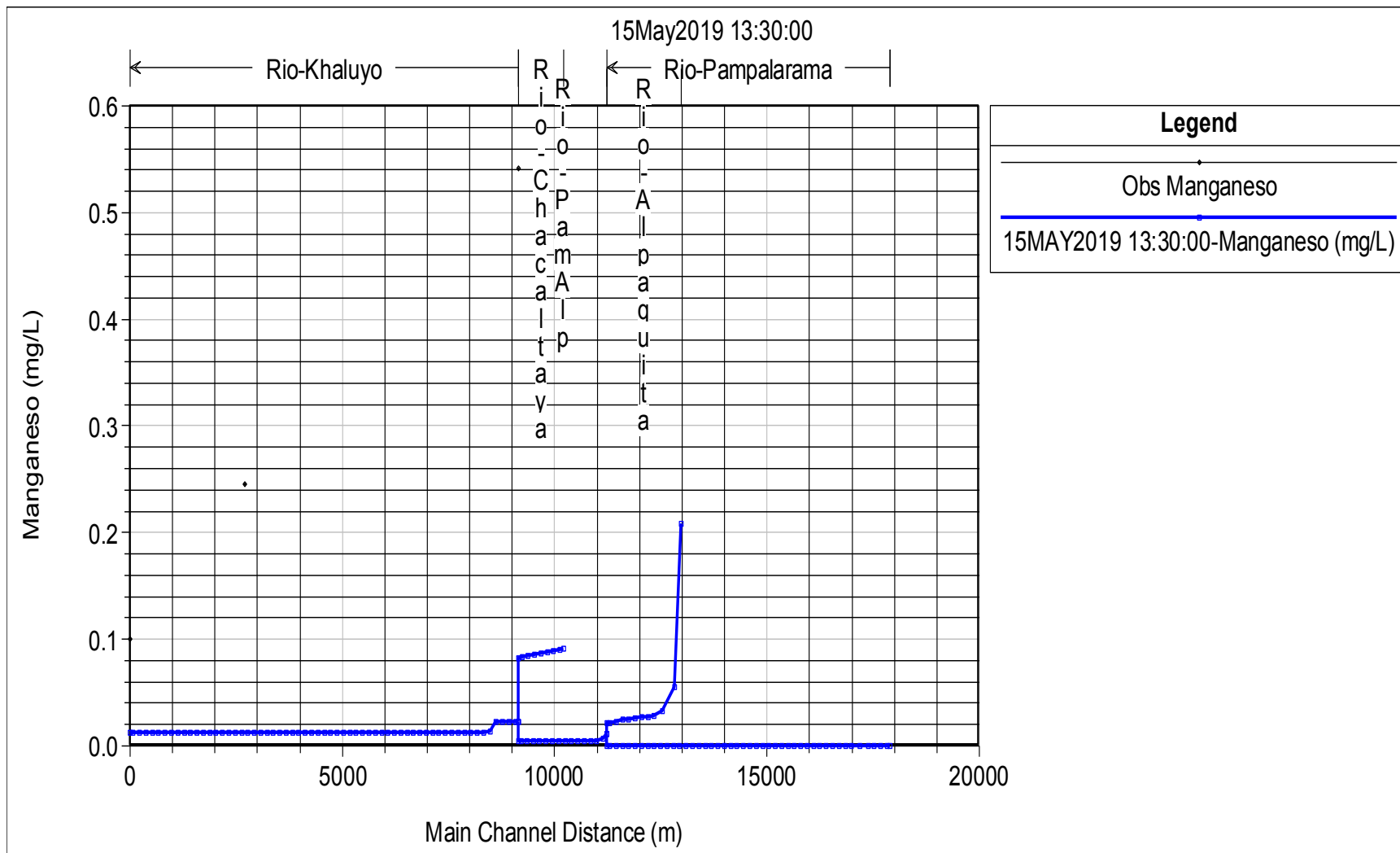


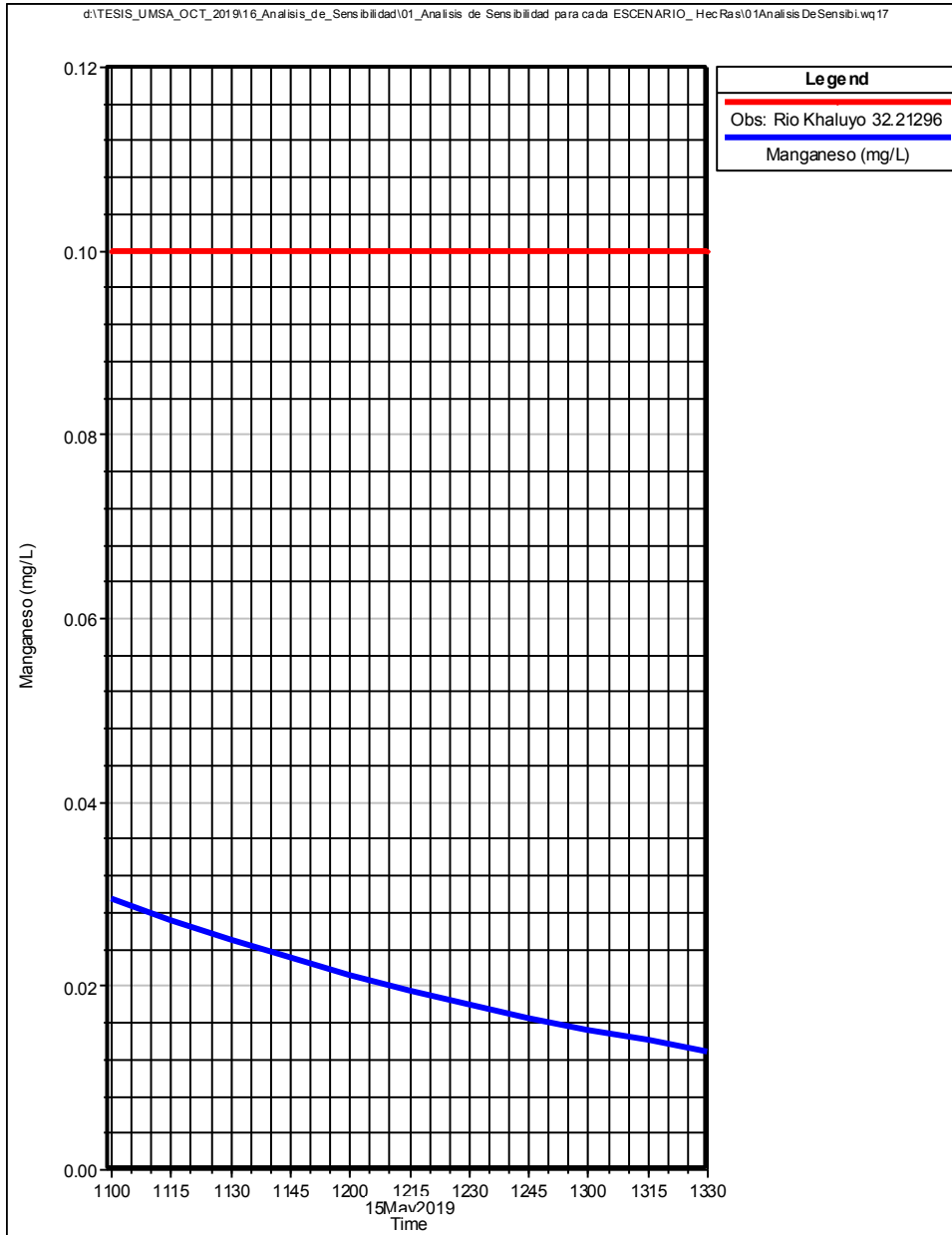
**ESCENARIO 5**  
**CONCENTRACIONES EN PERFIL LONGITUDINAL Y EN SECCION FINAL DEL TRAMO**



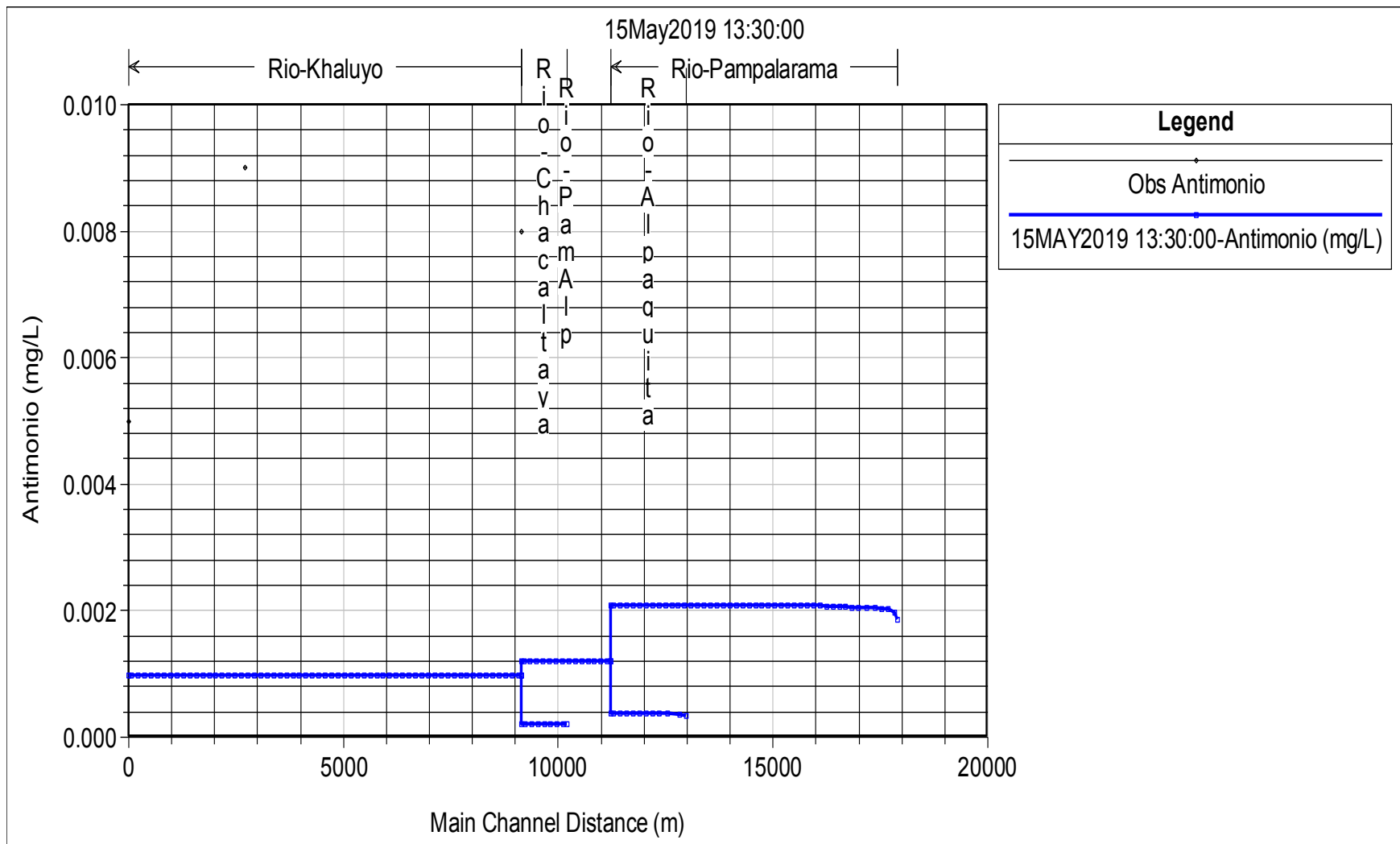


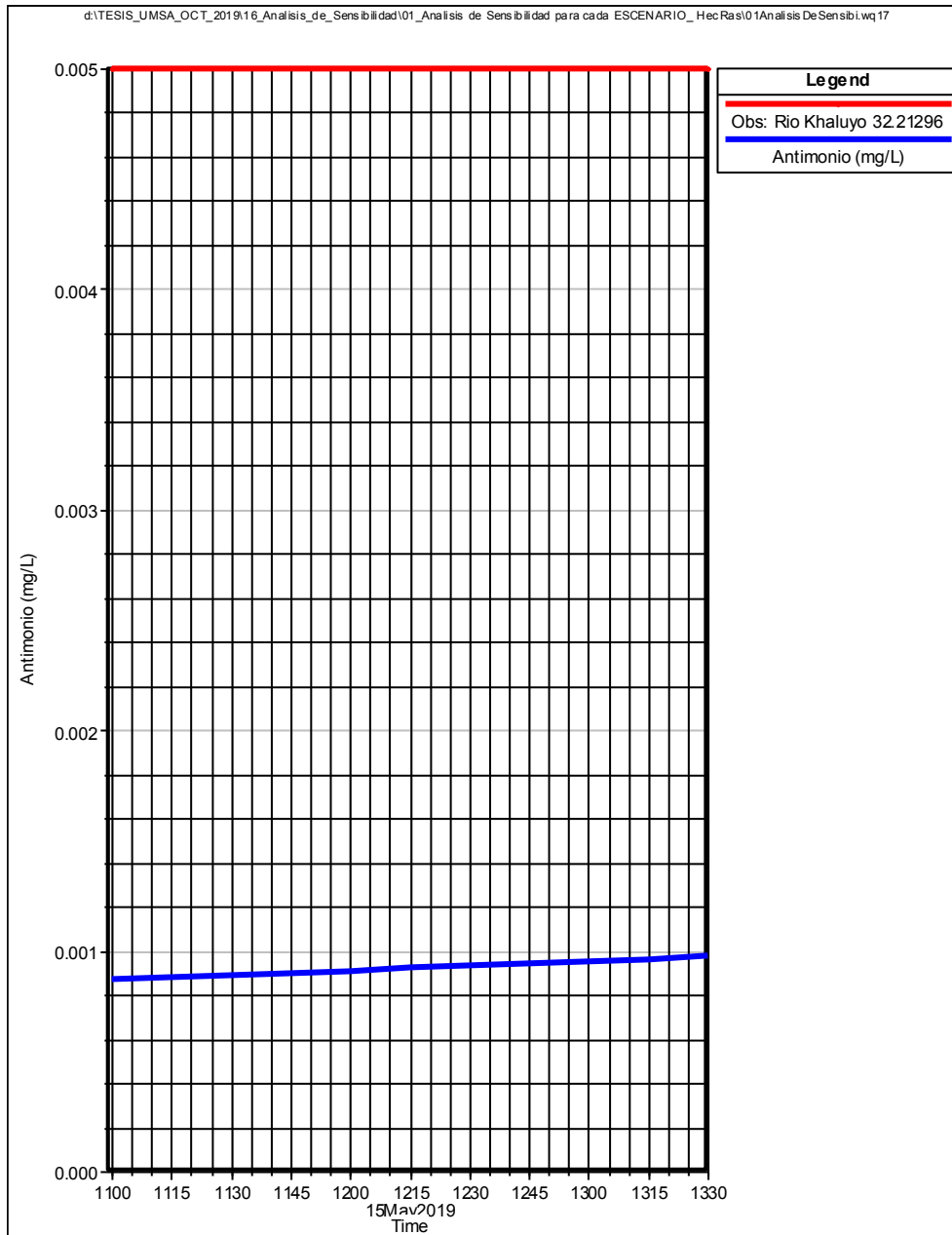


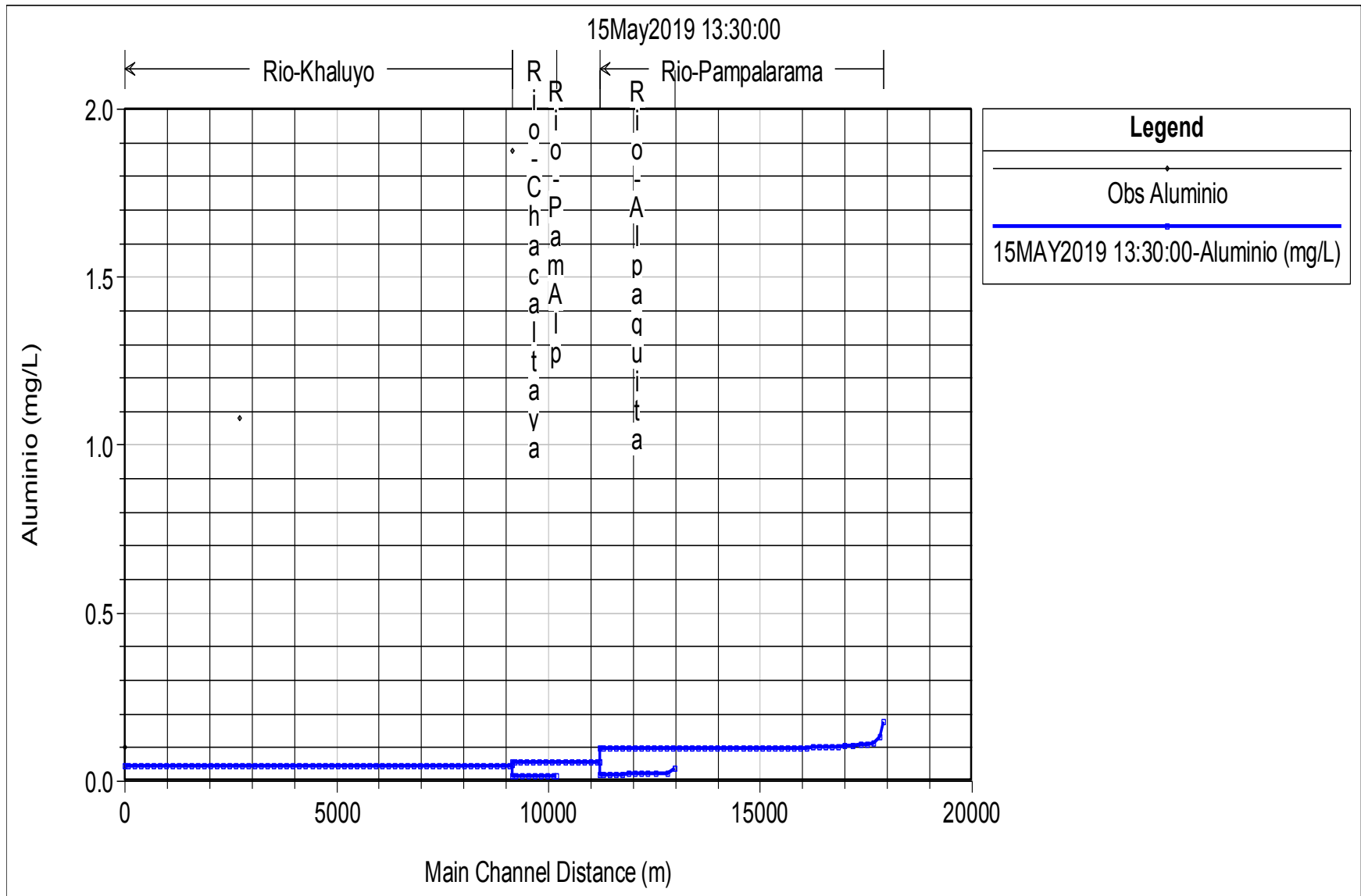


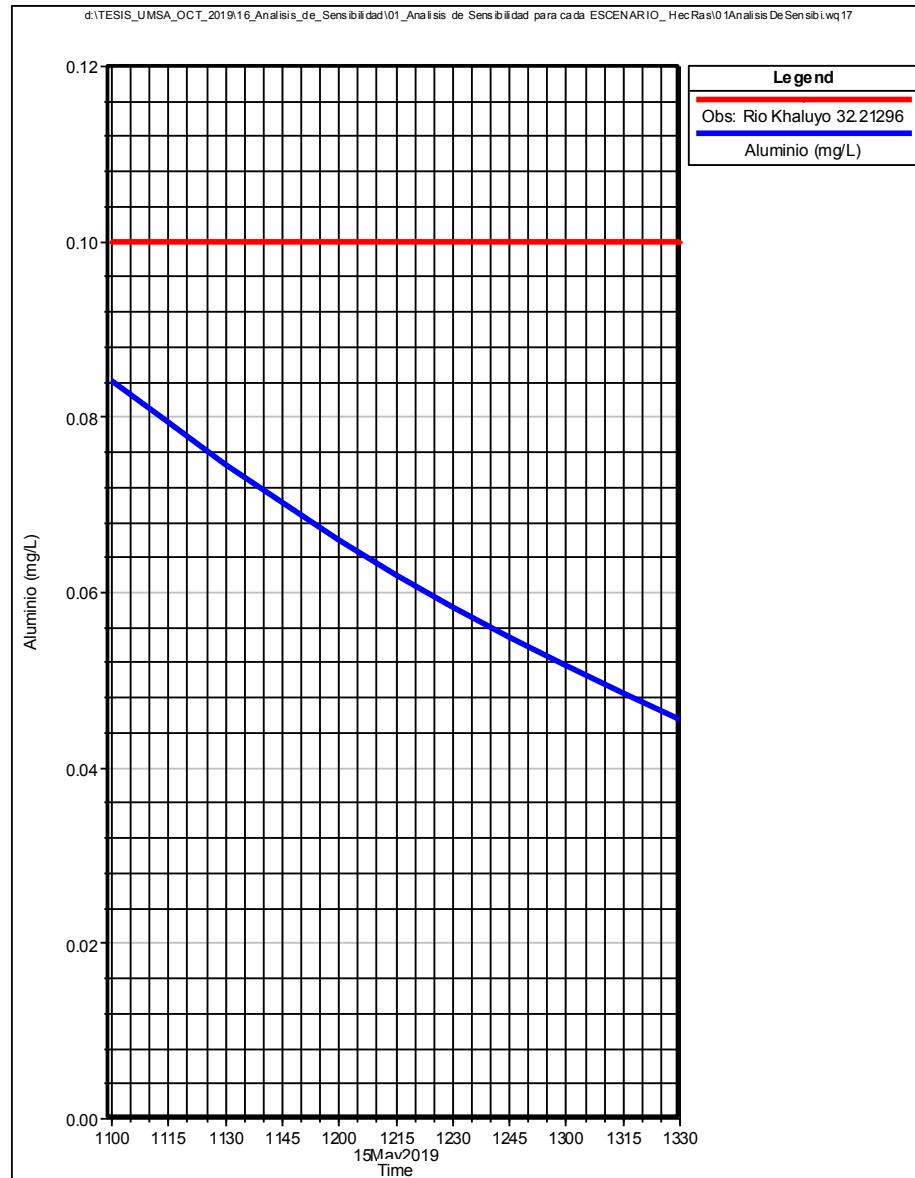






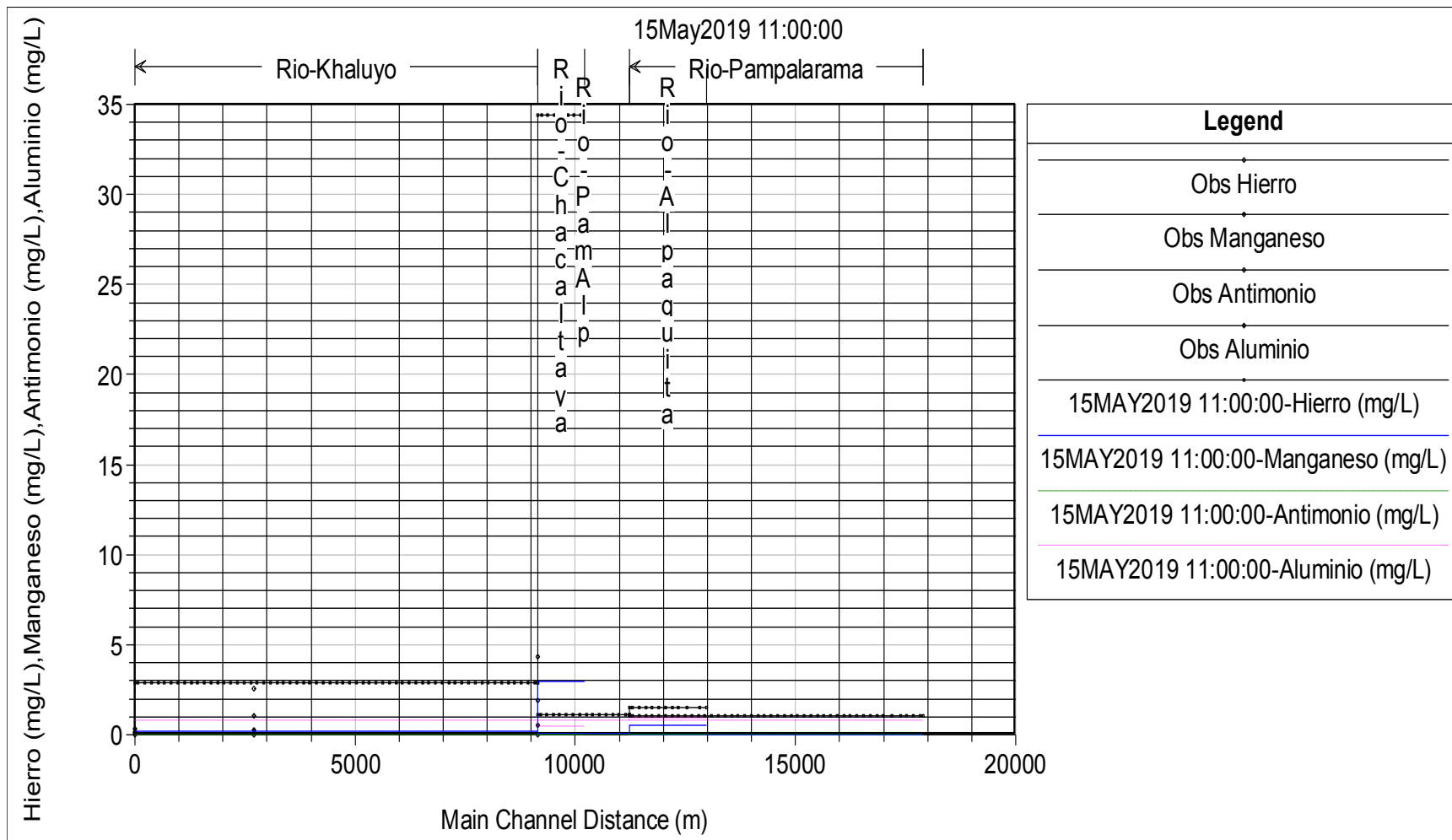


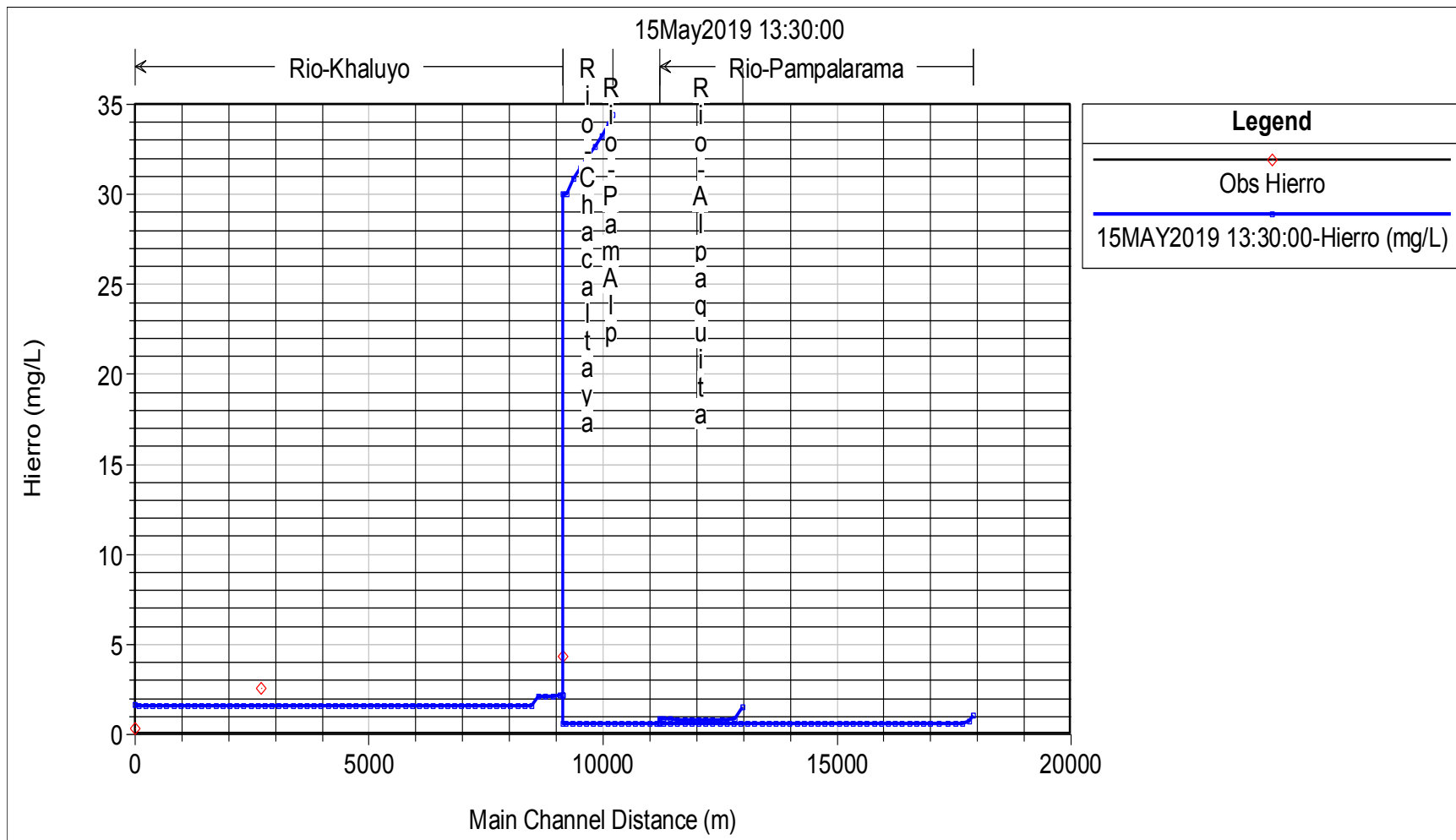


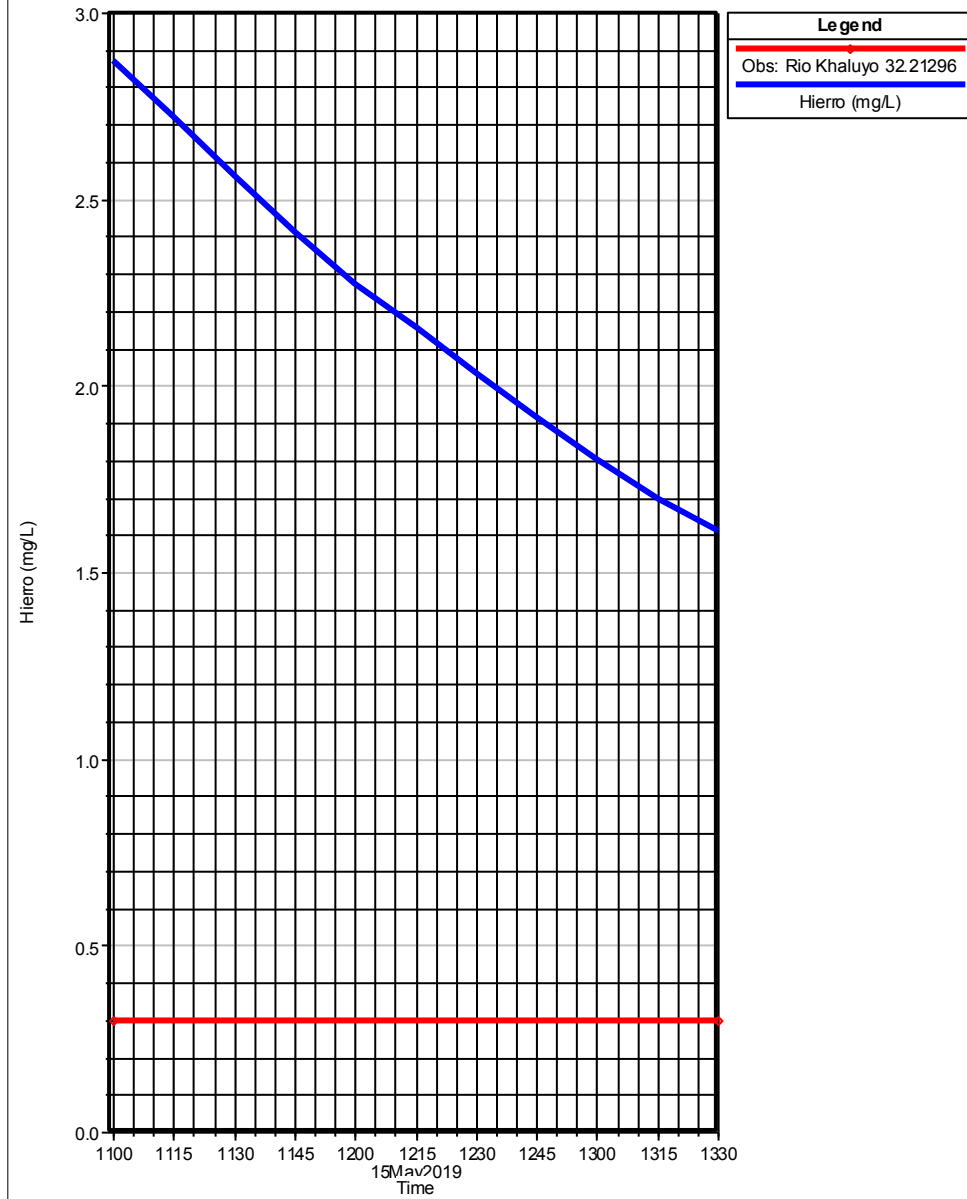


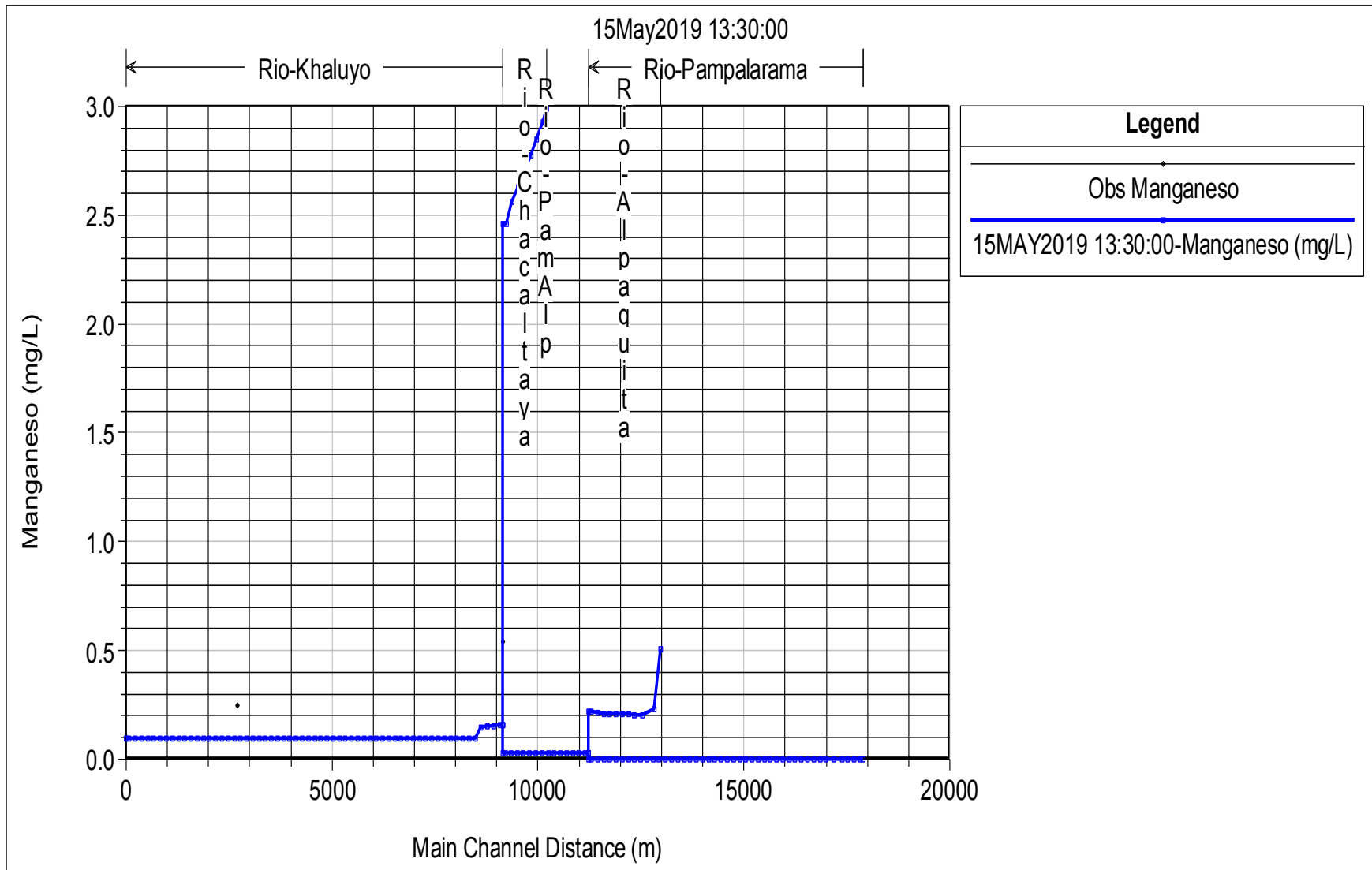
### ESCENARIO 6

### CONCENTRACIONES EN PERFIL LONGITUDINAL Y EN SECCION FINAL DEL TRAMO

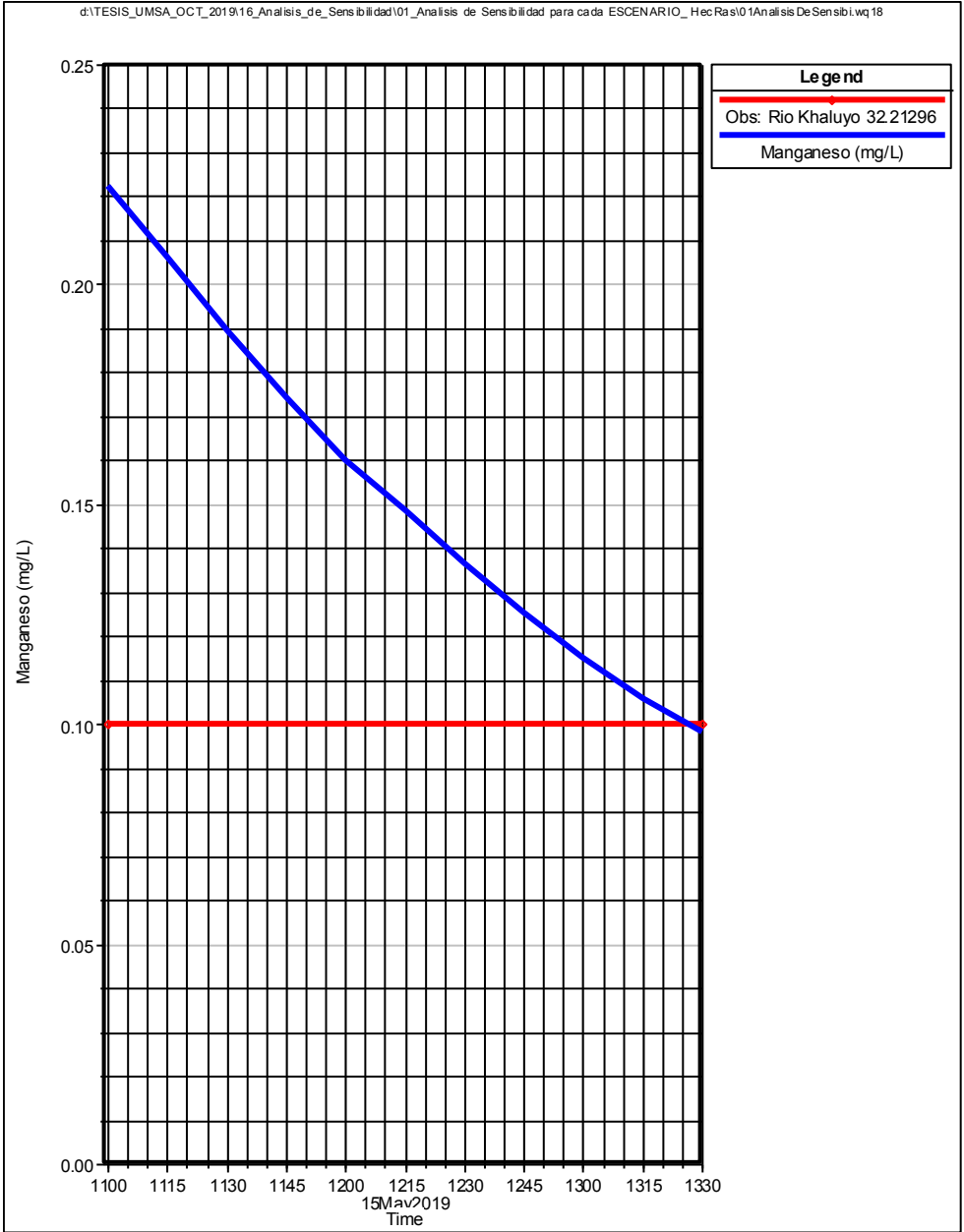


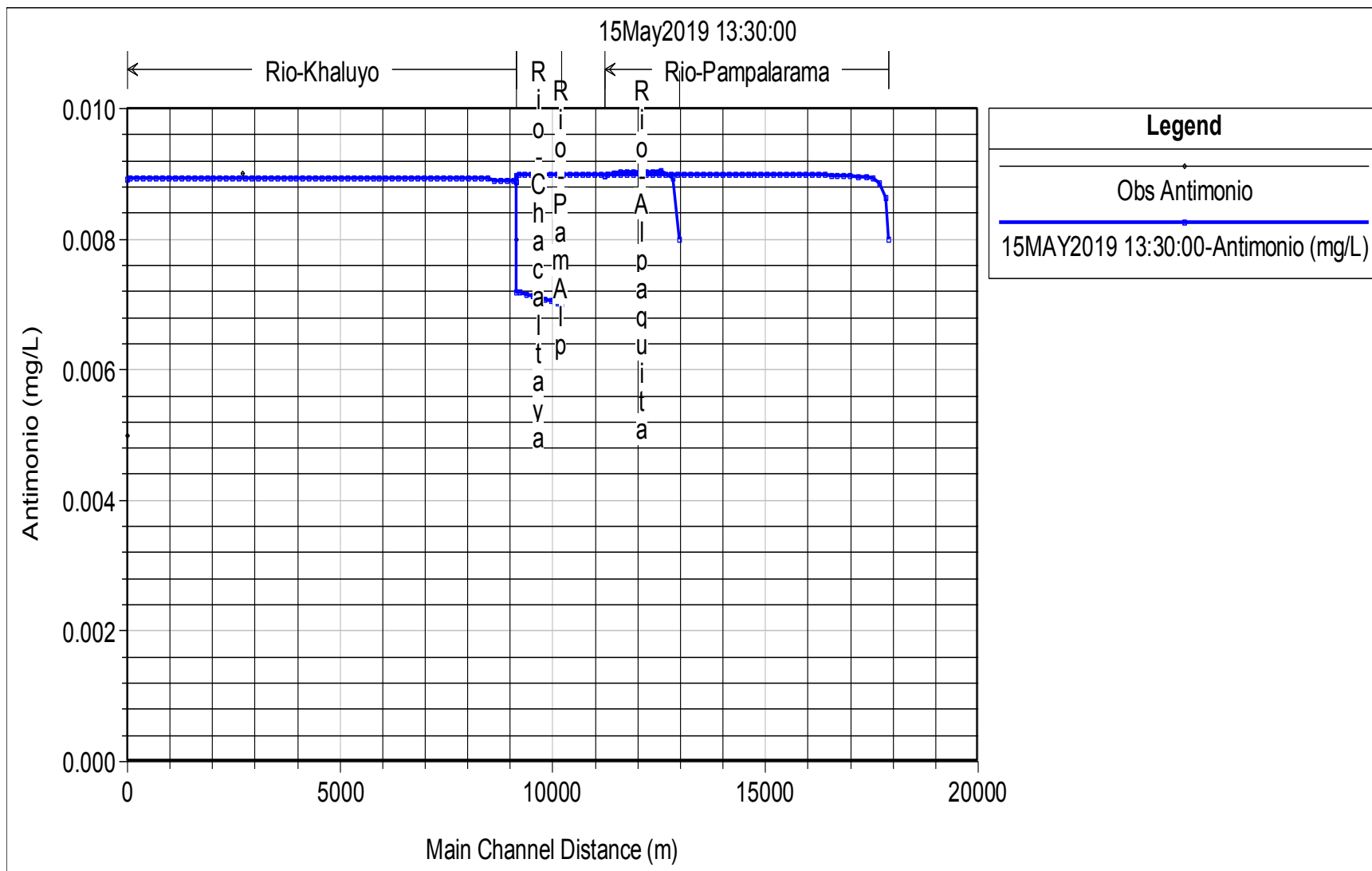


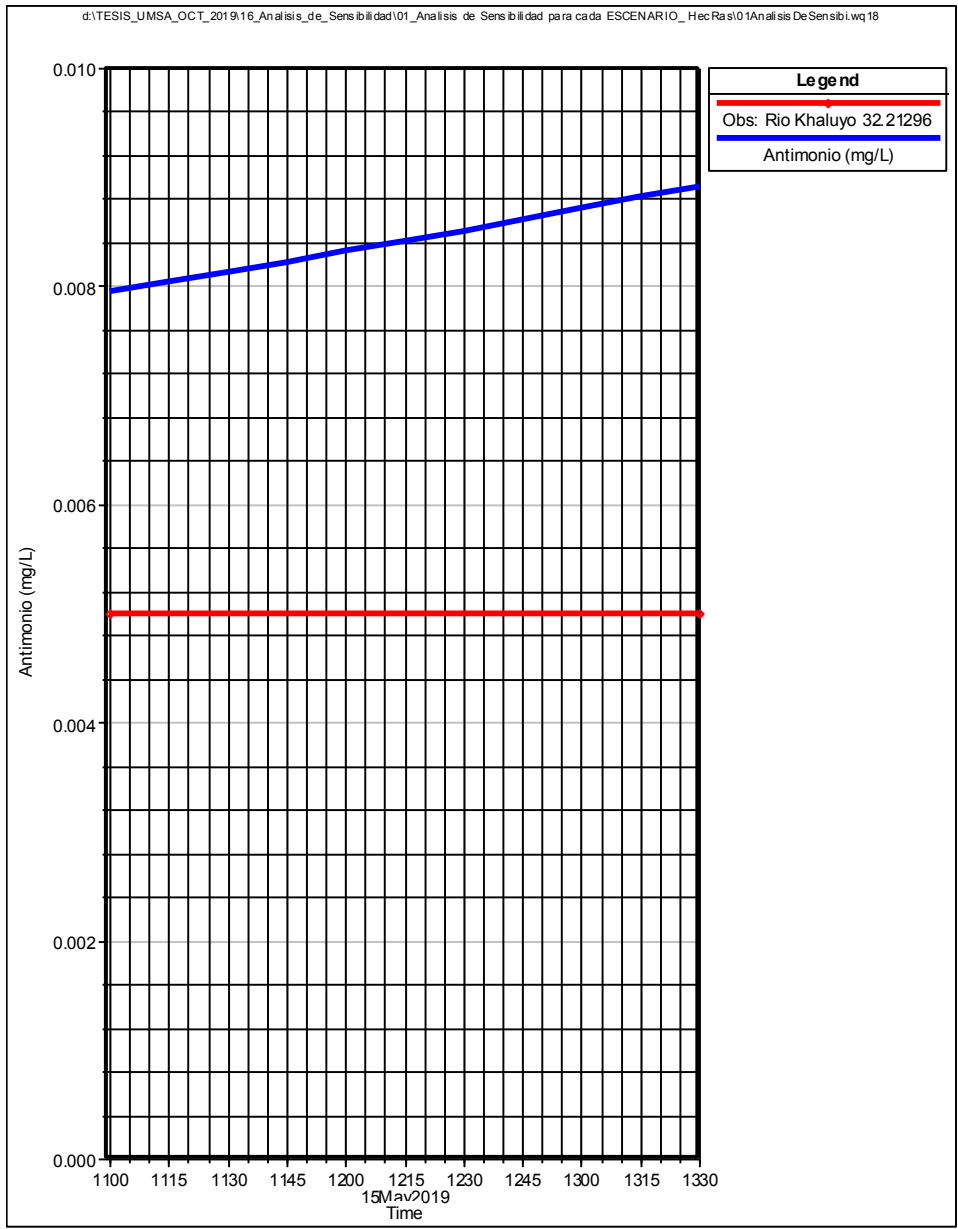


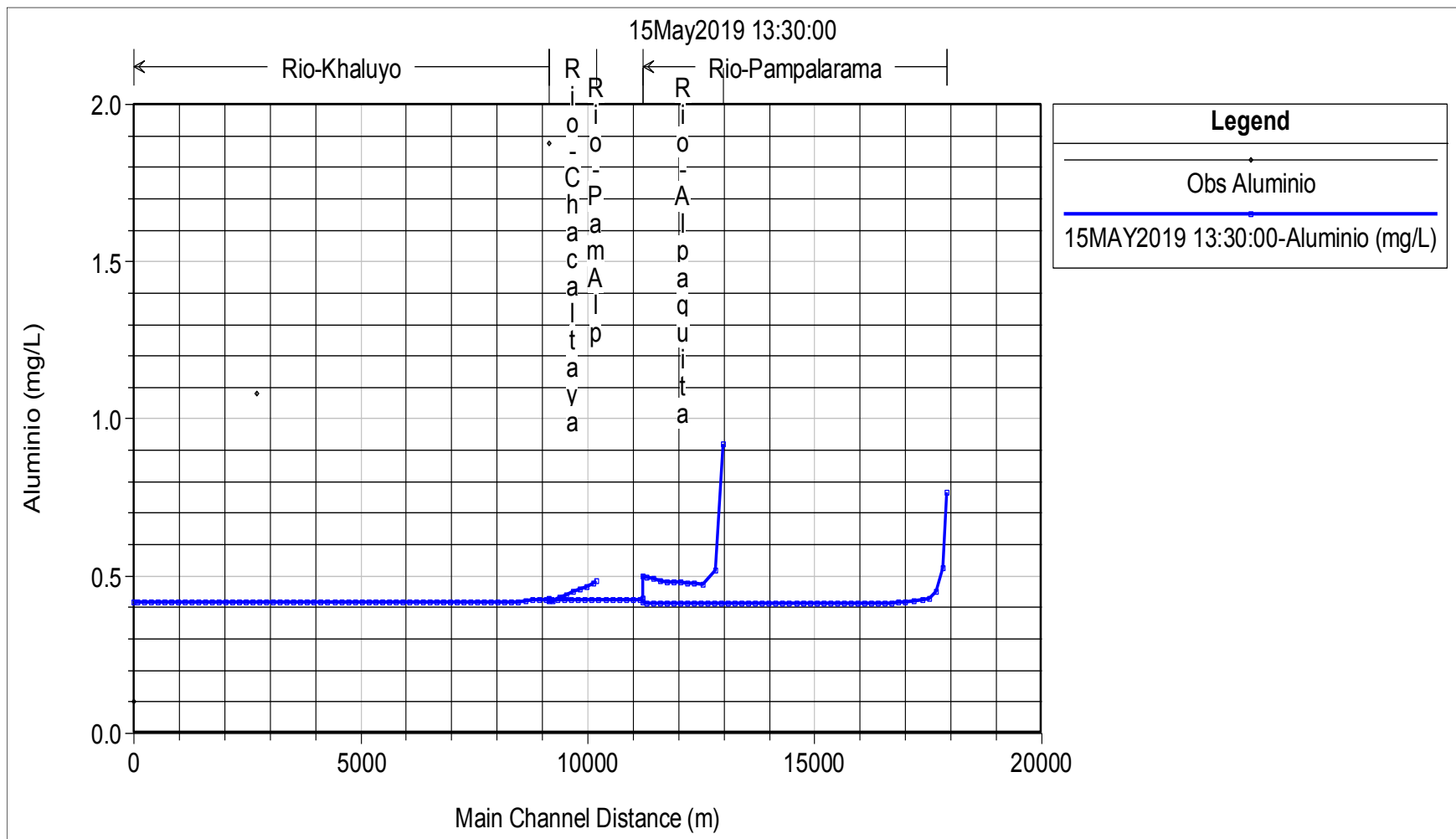


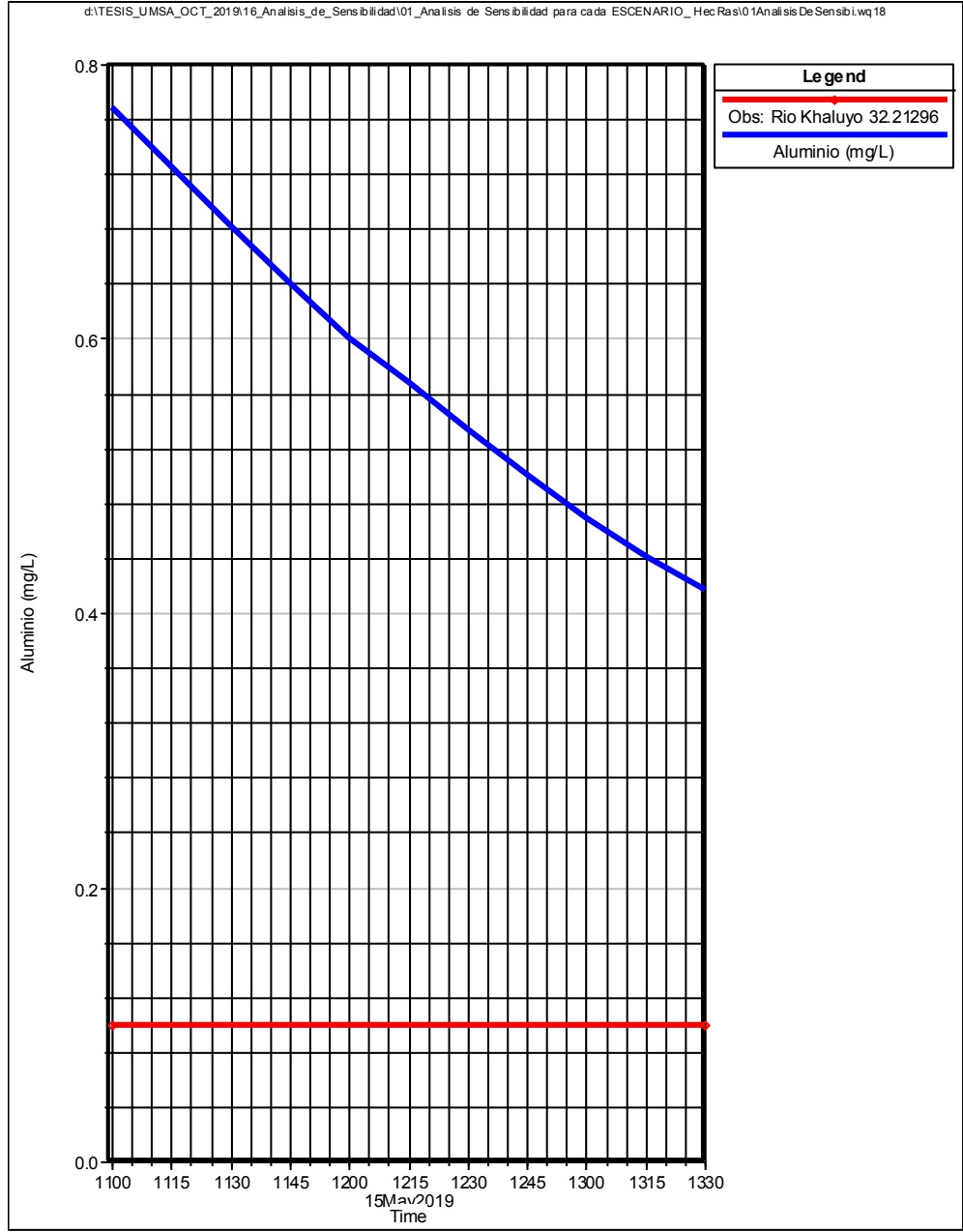












### ESCENARIO 7

### CONCENTRACIONES EN PERFIL LONGITUDINAL Y EN SECCION FINAL DEL TRAMO

