

Índice

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Resumen..... | 1 |
| Summary | 3 |
| Resum..... | 5 |
| 1. Introducción | 7 |
| 1.1. Recursos hídricos en los Andes de Bolivia | 7 |
| 1.2. Contaminación de aguas superficiales con metales pesados y su efecto en la salud..... | 9 |
| 1.3. Problemática del arsénico..... | 13 |
| 1.4. Tecnologías para remoción de metales pesados | 14 |
| 1.5. Procesos de filtración por membrana | 18 |
| 2. Objetivos e Hipótesis | 25 |
| 2.1. Objetivo General..... | 25 |
| 2.2. Objetivos Específicos | 25 |
| 2.3. Hipótesis | 25 |
| 3. Materiales y Métodos | 26 |
| 3.1. Área de estudio | 26 |
| 3.1.1. Geomorfología | 27 |
| 3.1.2. Cuerpos de agua superficiales de Milluni | 27 |
| 3.1.3. Tratamiento de agua Milluni | 29 |
| 3.1.4. Monitoreo de los recursos hídricos en Milluni. | 31 |
| 3.2. Metodología..... | 32 |
| 3.2.1. Caracterización de los cuerpos de agua superficial de Milluni | 33 |
| 3.2.1.1. Análisis de datos históricos de Milluni | 33 |
| 3.2.1.2. Análisis climatológico de Milluni | 33 |
| 3.2.1.3. Diseño del programa de monitoreo de calidad de agua..... | 34 |
| 3.2.1.4. Implementación del programa de monitoreo..... | 34 |
| 3.2.1.5. Análisis estadístico del año piloto del programa de monitoreo..... | 35 |
| 3.2.2. Fortalecimiento de la gestión del agua en Milluni | 36 |
| 3.2.2.1. Teledetección como complemento al programa de monitoreo..... | 36 |
| 3.2.2.2. Identificación de Partes Interesadas en la gestión del agua en la cuenca de Milluni | 37 |
| 3.2.3. Montaje del piloto experimental y diseño de experimentos..... | 40 |
| 3.2.3.1. Diseño y puesta en marcha de la planta piloto de ósmosis inversa..... | 40 |
| 3.2.3.2. Diseño de experimentos | 41 |
| 3.2.4. Remoción del metal pesado problema | 42 |
| 3.2.4.1. Preparación de aguas sintéticas | 42 |
| 3.2.4.2. Análisis estadístico de los resultados del experimento..... | 44 |
| 3.2.4.3. Desarrollo del modelo matemático..... | 44 |
| 4. Resultados | 50 |
| 4.1. Caracterización de los cuerpos de agua superficiales de Milluni | 50 |
| 4.1.1. Resultado del análisis de los datos históricos de Milluni..... | 50 |
| 4.1.1.1. Discriminación básica | 50 |

| | | |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.1.2. | Análisis de datos aproximados de las series homogéneas..... | 51 |
| 4.1.2. | Análisis climatológico de Milluni..... | 53 |
| 4.1.3. | Propuesta de programa de monitoreo de calidad de agua..... | 54 |
| 4.1.3.1. | Análisis de estándares internacionales..... | 54 |
| 4.1.3.2. | Componentes del programa de monitoreo de la parte alta de la Microcuenca Milluni | 56 |
| 4.1.4. | Resultados de la implementación de año piloto del programa..... | 57 |
| 4.1.5. | Evaluación estadística de resultados del año 1 del programa de monitoreo..... | 60 |
| 4.1.5.1. | Análisis MANOVA y ANOVA para la frecuencia de muestreo..... | 60 |
| 4.1.5.2. | Búsqueda de indicadores de alta concentración de metales..... | 62 |
| 4.2. | Propuestas para el fortalecimiento de la gestión del agua de Milluni..... | 64 |
| 4.2.1. | Implementación de teledetección como complemento al programa de monitoreo..... | 65 |
| 4.2.1.1. | Análisis de los resultados en las lagunas de estudio..... | 67 |
| 4.2.2. | Partes Interesadas dentro de la gestión hídrica en Milluni..... | 68 |
| 4.2.2.1. | Identificación partes interesadas en Milluni..... | 69 |
| 4.2.2.2. | Clasificación y análisis de las partes interesadas..... | 70 |
| 4.2.2.3. | Relacionamiento e interrelación de las partes interesadas con el proyecto..... | 72 |
| 4.3. | Piloto experimental..... | 72 |
| 4.3.1. | Diseño final y operación con una planta piloto de OI..... | 73 |
| 4.3.2. | Número de ensayos y configuración de las variables..... | 74 |
| 4.4. | Remoción del metal pesado problema..... | 75 |
| 4.4.1. | Resultados de la experimentación con aguas sintéticas..... | 75 |
| 4.4.1.1. | Efecto del flujo de alimentación (Q_f) con respecto al Flux (J_v)..... | 76 |
| 4.4.1.2. | Efecto de la presión (Δp) sobre el índice de remoción de arsénico (R_1)..... | 77 |
| 4.4.1.3. | Efecto de la concentración de soluto (C_f) con respecto al Flux (J_v) y al índice de remoción de arsénico (R_1)..... | 78 |
| 4.4.2. | Valoración estadística de los resultados experimentales..... | 79 |
| 4.4.2.1. | Índice de remoción de arsénico (R_1)..... | 80 |
| 4.4.2.2. | Índice de remoción de conductividad (R_2)..... | 81 |
| 4.4.2.3. | Flux (J_v)..... | 82 |
| 4.4.3. | Validación del modelo matemático..... | 84 |
| 5. | Impacto científico-técnico, económico y social..... | 87 |
| 6. | Discusión..... | 89 |
| 7. | Conclusiones..... | 91 |
| | Referencias..... | 95 |
| | Anexos..... | 118 |
| | Anexo 1. Especificaciones técnicas de los equipos instalados en la planta de OI..... | 118 |
| | Anexo 2. Ensayos preliminares..... | 121 |
| | Anexo 3. Datos históricos del monitoreo de Milluni..... | 125 |
| | Anexo 4. Datos de precipitación y evapotranspiración 1999 -2018..... | 127 |
| | Anexo 5. Detalle extendido de los componentes del programa de monitoreo de Milluni..... | 129 |
| | Anexo 6. Analíticas del monitoreo de metales pesados en Milluni..... | 131 |
| | Anexo 7. Informe de la determinación de la frecuencia de muestreo..... | 132 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Anexo 8. Informe de la identificación de indicadores de alta concentración de metales..... | 139 |
| Anexo 9. Análisis de Partes Interesadas | 145 |
| Anexo 10. Vistas 2D y 3D de la planta piloto de OI..... | 147 |
| Anexo 11. Protocolo de limpieza del módulo de membrana..... | 150 |
| Anexo 12. Datos de la parte experimental con la planta piloto de OI..... | 151 |
| Anexo 13. Análisis estadístico completo de los resultados experimentales..... | 152 |
| Anexo 14. Scripts Matlab | 157 |
| Anexo 15. Experiencia docente - estudiantil: trabajo en una planta piloto de OI..... | 163 |