

# Tabla de Contenido

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Motivación . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	3
1.2.1	General . . . . .	3
1.2.2	Específicos . . . . .	3
1.3	Organización de la tesis . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Revisión Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1	Arsénico . . . . .	5
2.1.1	Caracterización química y ocurrencia en ambientes acuáticos . . . . .	5
2.1.2	Toxicidad, formas de ingreso e impacto del arsénico en la salud humana a nivel internacional y nacional . . . . .	9
2.1.3	Normativas y recomendaciones . . . . .	12
2.2	Caso de estudio: Río Azufre, norte de Chile . . . . .	13
2.3	Procesos de tratamiento convencional para la remoción de As . . . . .	15
2.3.1	Coagulación y floculación . . . . .	15
2.3.2	Adsorción e intercambio iónico . . . . .	15
2.3.3	Mecanismos de membrana . . . . .	16
2.3.4	Plantas de tratamiento de arsénico en Chile . . . . .	17
2.4	Humedales construidos como sistema de tratamiento natural . . . . .	19
2.4.1	Clasificación de humedales . . . . .	20
2.4.2	Componentes de humedales . . . . .	21
2.4.3	Evapotranspiración en humedales . . . . .	22
2.4.4	Procesos de remoción de arsénico en humedales construidos . . . . .	23
2.4.5	Fraccionamiento del arsénico en la fase sólida . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Metodología</b>	<b>26</b>
3.1	Fase de construcción: materiales y montaje experimental . . . . .	26
3.1.1	Medio de soporte: Piedra Caliza Guarello . . . . .	26
3.1.2	Medio de soporte: Zeolita Clinoptilolita-Mordenita . . . . .	26
3.1.3	Vegetación: <i>Phragmites australis</i> . . . . .	27
3.1.4	Descripción de la instalación experimental . . . . .	27
3.2	Fase de operación: muestreo y análisis de agua . . . . .	30
3.2.1	Preparación de agua ácida representativa del Río Azufre . . . . .	30
3.2.2	Trabajo en instalación experimental: operación y mantenimiento . . . . .	32
3.2.3	Muestreo y análisis de agua . . . . .	33
3.2.4	Medición y estimación de la evapotranspiración . . . . .	36
3.3	Fase de secado y desmantelamiento de humedales: muestreo y análisis de sólidos . . . . .	37

3.3.1	Muestras de suelo utilizadas . . . . .	38
3.3.2	Preparación previa muestras de suelos . . . . .	38
3.3.3	Digestión total de suelos . . . . .	38
3.3.4	Procedimiento de extracción secuencial . . . . .	39
3.3.5	Corrección de concentraciones medidas de As debido a interferencia con $\text{Cl}^-$ . . . . .	46
3.3.6	Muestras y análisis de plantas . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Resultados y Discusión</b>	<b>48</b>
4.1	Funcionamiento del sistema de humedales . . . . .	48
4.1.1	Volumen de agua tratada . . . . .	50
4.1.2	Análisis de la evapotranspiración . . . . .	51
4.1.3	Remoción de As . . . . .	53
4.1.4	Remoción de Fe . . . . .	55
4.1.5	Remoción de B . . . . .	57
4.1.6	Remoción de Al . . . . .	59
4.1.7	Remoción de Mn . . . . .	60
4.1.8	Remoción de Zn . . . . .	61
4.1.9	Remoción de Pb . . . . .	62
4.1.10	Remoción de $\text{SO}_4^{-2}$ . . . . .	63
4.1.11	Remoción de otros contaminantes durante el primer período . . . . .	64
	4.1.11.1 Cationes: $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{Ca}^{+2}$ y $\text{Mg}^{+2}$ . . . . .	64
	4.1.11.2 $\text{Cl}^-$ . . . . .	66
4.1.12	Cambios de parámetros <i>in situ</i> . . . . .	67
	4.1.12.1 pH . . . . .	67
	4.1.12.2 Potencial redox . . . . .	69
	4.1.12.3 Conductividad eléctrica . . . . .	71
	4.1.12.4 Turbiedad . . . . .	72
	4.1.12.5 Alcalinidad . . . . .	74
	4.1.12.6 Dureza . . . . .	75
4.1.13	Cambios y correlaciones observadas durante la etapa de operación . . . . .	77
	4.1.13.1 Cambio temporal de oxihidróxidos de hierro . . . . .	77
	4.1.13.2 Correlación de concentraciones de Fe y Al con el pH . . . . .	78
4.2	Distribución y fraccionamiento del As en la fase sólida . . . . .	80
4.2.1	Digestión total de medios de soporte . . . . .	80
4.2.2	Estimación de remoción de metales en términos de masa . . . . .	82
4.2.3	Análisis SEP de Keon . . . . .	85
	4.2.3.1 Comparación entre concentración total de As de SEP de Keon y digestión total . . . . .	86
	4.2.3.2 Fraccionamiento de As según tipo de tratamiento . . . . .	88
4.2.4	Identificación de principales mecanismos de remoción de As . . . . .	99
4.3	Comparación de resultados con trabajos afines . . . . .	102

<b>5 Conclusiones</b>	<b>105</b>
5.1 Efecto del tipo de medio . . . . .	106
5.1.0.1 Rendimiento del sistema . . . . .	106
5.1.0.2 Fraccionamiento y distribución de As/Fe . . . . .	107
5.2 Efecto de la vegetación . . . . .	108
5.3 Principales mecanismos de remoción del sistema . . . . .	109
<b>6 Recomendaciones</b>	<b>110</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>111</b>
<b>Anexo</b>	<b>119</b>
<b>A Datos de concentraciones de elementos, compuestos y parámetros medidos del agua afluente y efluente al sistema</b>	<b>120</b>
<b>B Concentraciones de arsénico en muestras de sustrato según celda y zona en cada uno de los pasos de extracción secuencial</b>	<b>145</b>
<b>C Estimación <math>ET_o</math> - Método FAO Penman-Monteith</b>	<b>150</b>