

# Tabla de Contenido

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Motivación . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	2
1.2.1	General . . . . .	2
1.2.2	Específicos . . . . .	2
1.3	Contenidos del informe . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Revisión bibliográfica</b>	<b>4</b>
2.1	El arsénico y su ocurrencia en el ambiente . . . . .	4
2.1.1	Interacción del arsénico en ambientes acuáticos . . . . .	5
2.1.2	Toxicidad del arsénico y su impacto en la salud humana . . . . .	7
2.1.3	Procesos de remoción de arsénico del agua . . . . .	8
2.2	Humedales construidos . . . . .	9
2.2.1	Medios de soporte y vegetación . . . . .	11
2.2.2	Evapotranspiración en humedales construidos . . . . .	12
2.2.2.1	Efecto de la evapotranspiración en el tiempo de retención hidráulico . . . . .	12
2.2.2.2	Estimación de la evapotranspiración . . . . .	14
2.3	Humedales construidos para la remoción de arsénico . . . . .	15
2.4	Caso de estudio: Río Azufre, Chile . . . . .	17
2.4.1	Normativas nacionales e internacionales . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Materiales y montaje experimental</b>	<b>20</b>
3.1	Medios de soporte y vegetación . . . . .	20
3.1.1	Zeolita clinoptilolita-mordenita . . . . .	20
3.1.1.1	Granulometría . . . . .	21
3.1.2	Piedra caliza guarelo . . . . .	22
3.1.2.1	Granulometría . . . . .	22
3.1.3	<i>Phragmites australis</i> . . . . .	23
3.2	Descripción del sistema de humedales construidos y su operación . . . . .	24
3.3	Agua sintética contaminada . . . . .	27
3.4	Muestreo y análisis . . . . .	28
3.4.1	Instrumentos y equipos . . . . .	29
3.5	Medición directa y estimada de la evapotranspiración . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Resultados y Discusión</b>	<b>32</b>
4.1	Rendimiento general del sistema de humedales construidos . . . . .	32
4.2	Remoción de metales y metaloides . . . . .	33

4.2.1	Hierro . . . . .	33
4.2.2	Plomo . . . . .	34
4.2.3	Aluminio . . . . .	35
4.2.4	Cinc . . . . .	36
4.2.5	Manganeso . . . . .	37
4.2.6	Boro . . . . .	38
4.3	Remoción de otros contaminantes . . . . .	39
4.3.1	Sulfato . . . . .	39
4.3.2	Cloruro . . . . .	40
4.3.3	Sodio y Potasio . . . . .	41
4.3.4	Calcio y Magnesio . . . . .	42
4.4	Cambios en parámetros ambientales de calidad de agua . . . . .	44
4.4.1	pH . . . . .	44
4.4.2	Potencial redox . . . . .	46
4.4.3	Turbiedad . . . . .	47
4.4.4	Conductividad eléctrica . . . . .	48
4.4.5	Dureza . . . . .	49
4.4.6	Alcalinidad . . . . .	50
4.5	Otros cambios observados . . . . .	51
4.6	Correlación entre la concentración de aluminio y pH . . . . .	53
4.7	Comparación con trabajos similares . . . . .	54
4.8	Medición directa y estimada de la evapotranspiración . . . . .	54
4.8.1	Análisis de la evapotranspiración . . . . .	57
<b>5</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>59</b>
5.1	Efecto del medio de soporte en la remoción de contaminantes . . . . .	59
5.2	Contribución de la vegetación en la remoción de contaminantes . . . . .	60
5.3	Efecto del tiempo de operación del sistema de humedales construidos . . . . .	61
5.4	Evapotranspiración en los humedales construidos . . . . .	62
5.5	Recomendaciones . . . . .	62
	<b>Bibliografía</b>	<b>63</b>
	<b>Anexo</b>	<b>69</b>
<b>A</b>	<b>Descripción de contaminantes presentes con el As en el río Azufre</b>	<b>70</b>
<b>B</b>	<b>Datos en bruto sin corregir por evapotranspiración</b>	<b>74</b>
<b>C</b>	<b>Estimación ET<sub>o</sub> - Método FAO Penman-Monteith</b>	<b>88</b>

# Índice de Figuras

2.1	Distribución mundial de las regiones contaminadas con arsénico, incluyendo la fuente de arsénico y el número de personas en riesgo de una exposición crónica (Garelick & Jones, 2008). . . . .	5
2.2	Especiación del arsenito (a) y arseniato (b) en función del pH. . . . .	6
2.3	Diagrama Eh-pH para especies acuosas de As en el sistema $As-O_2-H_2O$ a $25^\circ C$ y 1 <i>bar</i> de presión total (a) (Smedley & Kinniburgh, 2002) y en el sistema $As-S-O_2-H_2O$ a $25^\circ C$ y 1 <i>atm</i> de presión total con arsénico total $10^{-5}$ M y azufre total $10^{-3}$ M (b) (Wang & Mulligan, 2006). . . . .	6
2.4	Esquema de humedal de tipo SF (Kadlec & Wallace, 2008). . . . .	10
2.5	Esquemas de humedales de tipo HSSF (a) y de tipo VSSF (b) (Kadlec & Wallace, 2008). . . . .	10
2.6	Aumento del tiempo de retención hidráulico en un humedal construido considerando pérdidas de agua por ET. . . . .	13
2.7	Rutas de remoción del arsénico en humedales construidos (Lizama <i>et al.</i> , 2011b). . . . .	15
2.8	Río Azufre localizado en la cuenca del Río Lluta que se origina a los pies del volcán Tacora. . . . .	18
3.1	Curva granulométrica de la zeolita utilizada. . . . .	21
3.2	Curva granulométrica de la piedra caliza utilizada. . . . .	23
3.3	Esquema referencial de un humedal construido. . . . .	24
3.4	Desarrollo del sistema radicular de las plantas en un humedal construido con zeolita como medio de soporte. En los humedales con caliza el crecimiento radicular fue similar. . . . .	25
3.5	Vista de frente (a) y de lado (b) de un humedal construido utilizado. . . . .	26
3.6	Vista general de la instalación experimental. . . . .	26
4.1	Perfil de concentraciones promedio de Fe total afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD Fe = 0,0041 <i>mg/L</i> . . . . .	33
4.2	Perfil de concentraciones promedio de Pb total afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD Pb = 0,018 <i>mg/L</i> . . . . .	34
4.3	Perfil de concentraciones promedio de Al total afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD Al = 0,054 <i>mg/L</i> . . . . .	35

4.4	Perfil de concentraciones promedio de Zn total afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD Zn = 0,0042 mg/L. . . . .	36
4.5	Perfil de concentraciones promedio de Mn total afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD Mn = 0,009 mg/L. . . . .	37
4.6	Perfil de concentraciones promedio de B total afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD B = 0,0046 mg/L. . . . .	38
4.7	Perfil de concentraciones promedio de SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> = 0,03 mg/L. . . . .	39
4.8	Perfil de concentraciones promedio de Cl <sup>-</sup> afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD Cl <sup>-</sup> = 0,03 mg/L. . . . .	40
4.9	Perfil de concentraciones promedio de Na <sup>+</sup> afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD Na <sup>+</sup> = 0,094 mg/L. . . . .	41
4.10	Perfil de concentraciones promedio de K <sup>+</sup> afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD K <sup>+</sup> = 0,044 mg/L. . . . .	41
4.11	Perfil de concentraciones promedio de Ca <sup>+2</sup> afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD Ca <sup>+2</sup> = 0,014 mg/L. . . . .	42
4.12	Perfil de concentraciones promedio de Mg <sup>+2</sup> afluente y efluentes (a) y perfil de remociones (b) según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor de la concentración/remoción máxima y mínima según réplicas. LOD Mg <sup>+2</sup> = 0,0012 mg/L. . . . .	43
4.13	Perfil de pH promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor máximo y mínimo según réplicas. . . . .	44
4.14	Perfil de Eh promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor máximo y mínimo según réplicas. . . . .	46
4.15	Perfil de la turbiedad promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor máximo y mínimo según réplicas. . . . .	47

4.16	Perfil de la conductividad promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor máximo y mínimo según réplicas. . . . .	48
4.17	Perfil de la dureza promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor máximo y mínimo según réplicas. . . . .	49
4.18	Perfil de la alcalinidad promedio del afluente y efluentes según tipo de tratamiento. Las barras de error indican el valor máximo y mínimo según réplicas. . . . .	50
4.19	Coloración que avanza en dirección del flujo en el tiempo. La imagen de la izquierda (a) muestra el avance de la coloración luego de 46 días de operación del sistema, mientras que la imagen de la derecha (b) muestra la coloración luego de 150 días de operación del sistema. . . . .	51
4.20	Hidróxidos de Fe formados en la zeolita. La imagen de la izquierda (a) muestra los sólidos formados en una celda de control, mientras que la imagen de la derecha (b) corresponde a un humedal. . . . .	52
4.21	Sólidos formados en la superficie de una celda de control con caliza (a) y en un humedal con zeolita (b). . . . .	52
4.22	Relación entre el pH y la concentración de Al según tipo de tratamiento. . . . .	53
4.23	ET medida en humedales y celdas de control antes del periodo de operación del sistema (a) y ET medida en humedales y celdas de control durante la operación del sistema (b). . . . .	55
4.24	Mediciones de ET en el sistema de humedales construidos durante todo el periodo de estudio. . . . .	56
4.25	ET medida y $ET_o$ estimada con el método FAO Penman-Monteith. . . . .	57

# Índice de Tablas

2.1	Estados de oxidación del As . . . . .	4
2.2	Concentraciones promedio de las especies químicas más importantes que se encuentran presente en el río Azufre. Adaptado de Guerra <i>et al.</i> (2016) . . . . .	17
2.3	Cuadro comparativo de criterios de calidad de agua potable . . . . .	19
2.4	Cuadro comparativo de criterios de calidad de agua para riego . . . . .	19
3.1	Composición química de la zeolita utilizada. Fuente: Ficha Técnica Zeolita Clinoptilolita-Mordenita, Zeolita del Maule . . . . .	21
3.2	Composición química de la caliza utilizada. Fuente: Ficha Técnica Piedra Caliza Guarello, Empresa CAP de acero. . . . .	22
3.3	Concentraciones objetivo, del agua potable y resultantes. . . . .	27
3.4	Límites de detección (LOD) según equipo: Espectrometría de Emisión Óptica (ICP-OES) y Cromatógrafo Iónico (CI) . . . . .	30
4.1	Matriz de correlación entre el pH y concentración de Al . . . . .	53
4.2	Tabla comparativa de experiencias previas que utilizaron humedales construidos para la remoción de As desde agua ácida. . . . .	54
B.1	Datos en bruto de primera réplica de humedal con caliza como medio de soporte	75
B.2	Datos en bruto de segunda réplica de humedal con caliza como medio de soporte	76
B.3	Datos en bruto de tercera réplica de humedal con caliza como medio de soporte	77
B.4	Datos en bruto de primera réplica de humedal con zeolita como medio de soporte	78
B.5	Datos en bruto de segunda réplica de humedal con zeolita como medio de soporte . . . . .	79
B.6	Datos en bruto de tercera réplica de humedal con zeolita como medio de soporte	80
B.7	Datos en bruto de primera réplica de celda de control con caliza como medio de soporte . . . . .	81
B.8	Datos en bruto de segunda réplica de celda de control con caliza como medio de soporte . . . . .	82
B.9	Datos en bruto de tercera réplica de celda de control con caliza como medio de soporte . . . . .	83
B.10	Datos en bruto de primera réplica de celda de control con zeolita como medio de soporte . . . . .	84
B.11	Datos en bruto de segunda réplica de celda de control con zeolita como medio de soporte . . . . .	85
B.12	Datos en bruto de tercera réplica de celda de control con zeolita como medio de soporte . . . . .	86
B.13	Datos en bruto del agua ácida afluente al sistema . . . . .	87

# Lista de abreviaciones

Al: Aluminio.

As: Arsénico.

ASTM: Sociedad americana para pruebas y materiales. Sigla por su nombre en inglés: *American Society for Testing and Materials*.

B: Boro.

Ca: Calcio.

CEGA: Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes.

CI: Cromatógrafo Iónico.

Cl: Cloruro.

Eh: Potencial Redox.

ET: Evapotranspiración.

ET<sub>o</sub>: Evapotranspiración de referencia.

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Sigla por su nombre en inglés: *Food and Agriculture Organization*.

Fe: Hierro.

FiNA: Muestra filtrada y no acidificada.

FiAc: Muestra filtrada y acidificada.

HSSF: de flujo subsuperficial horizontal. Sigla por su nombre en inglés: *Horizontal subsurface flow*.

IBC: Contenedor de granel intermedio. Sigla por su nombre en inglés: *Intermediate bulk container*.

ICP-OES: Espectrometría de Emisión Óptica.

K: Potasio.

$K_c$ : Coeficiente de cultivo.

LOD: Límite de detección. Sigla por su nombre en inglés: *Limit of detection*.

MCE: Ésteres mixtos de celulosa. Sigla por su nombre en inglés: *Mixed Cellulose Esters*.

Mg: Magnesio.

Mn: Manganeseo.

Na: Sodio.

NFAc: Muestra no filtrada y acidificada.

Pb: Plomo.

SF: de flujo superficial. Sigla por su nombre en inglés: *Surface flow*.

SSF: de flujo subsuperficial. Sigla por su nombre en inglés: *Subsurface flow*.

SO<sub>4</sub>: Sulfato.

UNT: Unidad nefelométrica de turbidez.

USEPA: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Sigla por su nombre en inglés: *United States Environmental Protection Agency*.

VSSF: de flujo subsuperficial vertical. Sigla por su nombre en inglés: *Vertical subsurface flow*.

WHO: Organización Mundial de la Salud. Sigla por su nombre en inglés: *World Health Organization*.

Zn: Zinc.

$\eta$ : Porosidad.

$\tau$ : Tiempo de retención hidráulico.