

Tabla de contenido

Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 General	2
1.2.2 Específicos	2
1.3 Estructura.....	2
Capítulo 2 . Revisión Bibliográfica	3
2.1 Boro en el agua y su toxicidad	3
2.2 Ocurrencia en Chile	5
2.2.1 Caso de estudio: río Azufre	5
2.3 Tecnologías de remoción de boro.....	7
2.3.1 Tecnologías convencionales.....	7
2.3.2 Tecnologías naturales: Humedales Construidos	8
2.4 Humedales Construidos para la remoción de boro.....	10
2.4.1 Tipo de flujo.....	11
2.4.2 Mecanismos de remoción de boro en humedales.....	11
2.4.3 Sustrato.....	11
2.4.4 Vegetación.....	13
2.4.5 Operación	13
2.5 Relación entre experimentos <i>Batch</i> y Remoción en humedales.....	16
2.6 Suelos con deficiencia de Boro	16
2.7 Conclusiones.....	17
Capítulo 3 Materiales y métodos	18
3.1 Caracterización de los sustratos a utilizar.....	18
3.1.1 Cáscara de arroz	18
3.1.2 Turba	19
3.2 Formulación y preparación del agua sintética	20
3.2.1 Fórmula	20
3.2.2 Preparación.....	21
3.3 Experimentos tipo <i>Batch</i>	22
3.3.1 Cinética.....	23
3.3.2 Isotermas de Adsorción.....	24
3.4 Experimento de porosidad	25
3.5 Construcción y operación de humedales	26

3.5.1	Vegetación.....	26
3.5.2	Construcción de humedales.....	29
3.5.3	Instalación experimental	30
3.5.4	Agua Sintética	31
3.5.5	Operación	34
3.6	Muestreo y análisis	35
3.6.1	Experimentos <i>Batch</i>	35
3.6.2	Humedales.....	36
Capítulo 4	Resultados y discusión.....	37
4.1	Experimentos <i>Batch</i>	37
4.1.1	Cinética.....	37
4.1.2	Isoterma de Adsorción	40
4.2	Humedales	43
4.2.1	Experimentos de porosidad	43
4.2.2	Evapotranspiración.....	43
4.2.3	Remoción de boro	47
4.2.4	Remoción de Sulfato	53
4.2.5	Cambios de parámetros in-situ.....	58
4.2.6	Condiciones finales y observaciones.....	61
Capítulo 5	Conclusiones y Proyecciones.....	64
5.1	Conclusiones.....	64
5.2	Proyecciones.....	66
Bibliografía	.....	68
Anexo A.	.....	73
Anexo B.	.....	74
Anexo C.	.....	76
Anexo D.	.....	79
Anexo E.	.....	82
Anexo F.	.....	84
Anexo G.	.....	85

Índice de Tablas

Tabla 1. Concentraciones límite de boro en el agua potable en distintos países.....	4
Tabla 2. Concentraciones límite de boro en el agua para el riego.....	5
Tabla 3. Concentraciones de boro en el agua de riego, valle del Lluta (Torres & Acevedo, 2008).	5
Tabla 4. Concentraciones promedio de los elementos presentes en el agua del río Azufre.....	6
Tabla 5. Tecnologías convencionales para la remoción de Boro Adaptado de (Xu & Jiang, 2008; Wolska & Bryjak, 2012; Wang, et al., 2014).....	7
Tabla 6. Capacidad de adsorción de distintos sustratos analizados en ensayos Batch.....	12
Tabla 7. Factores de translocación y bioconcentración en experimentos conducidos con distintas especies.....	13
Tabla 8. Resumen de humedales construidos para la remoción de boro, su diseño, dosis de boro y porcentaje de remoción.....	15
Tabla 9. Concentraciones de elementos inorgánicos en el exudado de la cáscara de arroz. (Chockalingam & Subramanian, 2006).....	18
Tabla 10. Concentraciones teóricas del exudado de arroz en el A. sintética de este experimento.	19
Tabla 11. Componentes inorgánicos de la turba (Sonneveld & Voogt, 2009).....	19
Tabla 12. Concentraciones de contaminantes en el agua sintética a utilizar.....	20
Tabla 13. Reactivos utilizados para preparar 1 [L] de agua sintética.....	21
Tabla 14. Configuraciones experimento de cinética. θ = tiempo de retención.....	23
Tabla 15. Condiciones iniciales de los humedales.....	27
Tabla 16. Concentraciones de elementos en el agua potable relevantes a este estudio.....	32
Tabla 17. Concentraciones de elementos a agregar para alcanzar las concentraciones objetivo de la Tabla 12.....	33
Tabla 18. Reactivos y soluciones utilizadas para preparar el agua sintética.....	33
Tabla 19. Resumen volúmenes para cada celda entre muestreos.....	44
Tabla 20. Fechas de muestreos.....	45
Tabla 21. Masas de entrada y salida totales de boro y remoción por celda.....	48
Tabla 22. Concentraciones naturales de boro en el tejido seco de las plantas.....	50
Tabla 23. Masa de boro absorbida por las plantas en cada humedal al término de este estudio...	51
Tabla 24. Concentraciones de Oxígeno Disuelto promedio de los últimos 2 muestreos. Datos fueron tomados luego de la re-oxigenación del efluente.....	56

Tabla 25. Porcentajes de remoción de boro según cada mecanismo.....	65
Tabla 26. Porcentaje de remoción de sulfato según mecanismo.	65
Tabla 27. Series de caudales para cada humedal.....	74
Tabla 28. Evapotranspiración potencial para cada periodo de muestreo	81
Tabla 29. Mediciones para cada celda en cada muestreo	82
Tabla 30. Promedios de remoción en cada celda y desviación estándar.	84
Tabla 31. Masa de boro absorbida por las plantas en distintas secciones, separados en las raíces y hojas.....	85

Índice de Figuras

Figura 1. Especiación del ácido bórico entre pH 7 y 11	3
Figura 2. Ubicación geográfica del Río Azufre. Fuente: Google Earth.	6
Figura 3. Humedal construido de flujo superficial (Kadlec & Wallace, 2009).....	9
Figura 4. Humedal construido de flujo vertical (Kadlec & Wallace, 2009).....	9
Figura 5. Humedal construido de flujo horizontal sub-superficial (Kadlec & Wallace, 2009).....	10
Figura 6. Mecanismos de remoción de boro en humedales.....	11
Figura 7. Derecha: Envase sedimentador. Izquierda: Receptáculo para la fase líquida.	22
Figura 8. Set conformado por 7 envases. 3 con turba, 3 con cáscara de arroz y 1 blanco	24
Figura 9. Diseño de un invernadero para resguardar <i>P. frigida</i> del frío.	27
Figura 10. De izquierda a derecha la condición inicial del humedal <i>Puccinellia</i> 1 (P1), <i>Puccinellia</i> 2 (P2) y <i>Puccinellia</i> 3 (P3). Dentro de los círculos hay plantas que por la escala no se aprecian.	28
Figura 11. De izquierda a derecha la condición inicial de los humedales <i>Typha</i> 1 (T1), <i>Typha</i> 2 (T2), <i>Typha</i> 3 (T3).....	28
Figura 12. Caja del humedal construido.....	29
Figura 13. Distribuidor de caudal. Cuenta con 2 entradas y 9 salidas, 1 para cada humedal.....	30
Figura 14. Instalación experimental. 1.- Bomba. 2.- Estanque acumulador. 3.- Distribuidor. 4.- Estanque sedimentador	31
Figura 15. Concentración de boro final para distintos tiempos de contacto en reactores Batch (concentración inicial de boro = 30 [mg/L]). Cada punto representa un reactor independiente con una concentración de medio de 5 g/L, T= 30° C.....	37
Figura 16. Concentración de sulfato para distintos tiempos de contacto Cada punto representa un reactor independiente con una concentración de medio de 5 g/L, T= 30° C.....	38
Figura 17. pH para distintos tiempos de contacto. Se mantienen condiciones anteriores.....	39
Figura 18. CE promedio para distintos tiempos de contacto. Se mantienen condiciones anteriores.	40
Figura 19. Remoción de boro por gramo de cáscara de arroz en el tiempo. [B] = 30 [mg/L]	41
Figura 20. Isotherma de adsorción. Los puntos representan a cada reactor, mientras que la recta es el ajuste de la Isotherma ($R^2=0,755$). Experimentos realizados con 5 [g/L] de medio, a 30 [°C] y 200 [rpm].	42
Figura 21. Evapotranspiración promedio y desviación diaria medida en el sistema de humedales.	45

Figura 22. Evapotranspiración observada promedio (humedales) y evaporación teórica (FAO) .	46
Figura 23. Remoción de boro promedio y desviación por celda para todas las mediciones n=7. Datos detallados en Anexo 6.	48
Figura 24. Masa de entrada de boro y remoción para cada set de humedales en cada periodo. ...	49
Figura 25. Efecto de la concentración de boro en la remoción	50
Figura 26. Relación entre la remoción de boro y sulfato para cada celda en cada muestreo. Se presentan los valores de R ² de la regresión lineal de los datos.....	51
Figura 27. Concentración equivalente de sulfato para cada humedal en cada muestreo y para el agua de entrada.	53
Figura 28. Remoción mínima, máxima y promedio de sulfato para cada tipo de celda y para todos los muestreos.	54
Figura 29. Concentración de calcio necesaria para la precipitación de sulfato en los humedales. Cada punto corresponde a una medición en una celda y en un muestreo particular. La línea roja representa el calcio afluente (138 [mg/L])	54
Figura 30. Potencial Redox promedio a la entrada y a la salida de las celdas. Valores tomados luego de la re-oxigenación del efluente, por lo que es solo un indicador.	55
Figura 31. Líneas de flujo a la salida de un humedal (en azul) y zona que se sugiere tiene un flujo casi nulo.....	57
Figura 32. CE equivalente de las celdas	59
Figura 33. pH del efluente de los humedales plantados y del control. Parte a) celdas con <i>P. frigida</i> , b) celdas de control y c) humedales plantados con <i>T. angustifolia</i>	60
Figura 34. Celdas plantadas con <i>Puccinellia frigida</i> al término del experimento.	61
Figura 35. Celdas plantadas con <i>Typha angustifolia</i> al término del experimento.....	62
Figura 36. Grava y cáscara de arroz con precipitado blanco. La figura de la izquierda se presenta en todos los humedales, mientras que la segunda pertenece a una celda de control.	63
Figura 37. Precipitado negro adherido a la cáscara de arroz. Esto se observó en todas las celdas.	63
Figura 38. Análisis agua de toma experimento realizado por ANAM el 17.12.2014	73
Figura 39. Volúmenes de entrada y salida celdas plantadas con <i>Puccinellia frigida</i> y caudales correspondientes.	76
Figura 40. Volúmenes de entrada y salida celdas de control y caudales correspondientes.....	77

Figura 41. Volúmenes de entrada y salida celdas con <i>Typha angustifolia</i> y caudales correspondientes.	78
Figura 42. Evapotranspiración para cada tipo de celda en cada muestreo más evapotranspiración calculada. (a) <i>Puccinellia frigida</i> ; b) Control; c) <i>Typha angustifolia</i>).....	80
Figura 43. Concentraciones de boro equivalente para cada celda y cada muestreo.	84