

Índice de Figuras

	Página
Figura 1.- Estructura química del ácido etilendiaminotetraacético (EDTA)	54
Figura 2.- Esquema del procedimiento de obtención del material vegetal, <i>Azolla filiculoides</i>	65
Figura 3.- Esquema de la instalación del sistema de cultivo testigo de <i>Azolla filiculoides</i>	70
Figura 4.- Esquema de digestión ácida de muestras vegetales para la determinación de cadmio	76
Figura 5.- Esquema de la calcinación de muestras vegetales para la determinación de cobre	77
Figura 6.- Curva de calibración de cadmio en espectroscopia de absorción atómica	79
Figura 7.- Curva de calibración de cobre en espectroscopia de absorción atómica	79
Figura 8.- Curva de calibración del método nephelométrico	82
Figura 9.- Comparación de las acumulaciones (%) de cadmio por <i>Azolla filiculoides</i>	93
Figura 10.- Comparación del índice Fv/Fm medido en <i>A. filiculoides</i> expuesto a concentraciones conocidas de cadmio y complejo Cd-EDTA.	96
Figura 11.- Comparación de las acumulaciones (%) de cobre por <i>Azolla filiculoides</i>	105
Figura 12.- Comparación del índice Fv/Fm medido en <i>A. filiculoides</i> expuesto a concentraciones conocidas de cobre y complejo Cu-EDTA	107

Índice de Tablas

	Página
Tabla 1.- Ubicación taxonómica de <i>Azolla filiculoides</i> Lam.	46
Tabla 2.-Concentraciones de Cd y Cu, según la NCh 1333 y NCh 409	47
Tabla 3.- Norma secundaria para Calidad de aguas superficiales según CONAMA para Cd y Cu	49
Tabla 4.- Concentraciones máximas permitidas de cadmio y cobre en alimentos, según el Decreto 475 de Chile y la norma de México NOM-130SSA1.	50
Tabla 5.- Composición de la solución nutritiva IRRI	66
Tabla 6.- Sistemas de cultivos hidropónicos de <i>Azolla filiculoides</i> Lam. preparados en distintas concentraciones de cadmio	71
Tabla 7.- Sistemas de cultivos hidropónicos de <i>Azolla filiculoides</i> Lam. preparados en distintas concentraciones de cobre	72
Tabla 8. Sistemas de cultivos hidropónicos de <i>Azolla filiculoides</i> Lam. preparados en distintas concentraciones de Cd-EDTA	73
Tabla 9.- Sistemas de cultivos hidropónicos de <i>Azolla filiculoides</i> Lam. preparados en distintas concentraciones de Cu-EDTA	74
Tabla 10.- Condiciones experimentales de las determinaciones de cadmio y cobre por espectroscopia de absorción atómica con llama	78
Tabla 11.- Determinación de la turbidez en solución IRRI ante adición de volúmenes crecientes de Cd-EDTA (0,12 mM), n = 3.	83
Tabla 12.- Determinación de la turbidez en solución IRRI ante adición de volúmenes crecientes de Cu-EDTA (0,082 mM), n = 3.	84
Tabla 13.- Determinación de la turbidez (NTU) (n = 3) en solución IRRI en presencia de los complejos Cd-EDTA y Cu-EDTA a diferentes pH	85

Tabla 14.- Resultado de recuperación en material de referencia certificado SRM-1570 (espinaca)	86
Tabla 15. Determinación del contenido de cadmio (mg kg^{-1}) base seca, en material vegetal de <i>Azolla filiculoides</i> natural (n = 5)	87
Tabla 16.- Concentraciones máximas y mínimas de cadmio (mg kg^{-1}) absorbidos por <i>Azolla filiculoides</i> (peso seco) expuestas a diferentes concentraciones de cadmio	89
Tabla 17.- Cantidad de cadmio absorbida por <i>Azolla filiculoides</i> en sistema clásico preparado a distintas concentraciones del elemento	90
Tabla 18.- Fitoremediación inducida por el complejo Cd-EDTA por <i>Azolla filiculoides</i> en solución IRRI	91
Tabla 19.- Cantidad de cadmio absorbida por <i>Azolla filiculoides</i> en sistema inducido preparado a distintas concentraciones de Cd-EDTA	92
Tabla 20.- Índices Fv/Fm de <i>Azolla filiculoides</i> , obtenidos en los sistemas de fitoremediación de cadmio clásica e inducida con EDTA en solución nutritiva IRRI.	97
Tabla 21.- Determinación del contenido de cobre en material vegetal de <i>Azolla filiculoides</i> colectado en terreno	98
Tabla 22.- Concentraciones máximas y mínimas de cobre (mg kg^{-1}) en <i>Azolla filiculoides</i> (peso seco) frente a diferentes concentraciones de cobre	100
Tabla 23.- Cantidad de cobre porcentual absorbido por <i>Azolla filiculoides</i> en sistema clásico preparado a distintas concentraciones del elemento	101
Tabla 24.- Fitoremediación inducida por el complejo Cu-EDTA en <i>Azolla filiculoides</i> en solución IRRI	103
Tabla 25.- Cantidad de cobre absorbido por <i>Azolla filiculoides</i> en sistema inducido preparado a distintas concentraciones de Cu-EDTA	104

Tabla 26.- Índices Fv/Fm de <i>Azolla filiculoides</i> , obtenidos en fitoremediación de cobre clásica e inducida con EDTA en solución nutritiva IRRI	108
Tabla 27.- Determinaciones de cadmio y cobre en aguas provenientes de los puntos de colecta del material vegetal	109

ÍNDICE GENERAL

	Página
Resumen	ii
Abstract	iv
Agradecimientos	vi
Financiamiento	vii
Areviaturas	viii
Índice de figuras	x
Índice de tablas	xi
I.- Introducción	1
II.- Antecedentes bibliográficos	
II.1.- Fitoremediación clásica: Teoría y fundamentos	
II.1.1.- Antecedentes generales	10
II.1.2.- Fitoremediación clásica en suelo	11
II.1.3.- Fitoremediación clásica en plantas acuáticas	13
II.2.- Fitoremediación inducida: Teoría y fundamentos	
II.2.1.- Antecedentes generales	16
II.2.2.- Fitoremediación inducida en suelo	17
II.2.3.- Fitoremediación inducida en sistemas hidropónicos	20
II.3.- <i>Azolla filiculoides</i> Lam.	
II.3.1.- Ubicación taxonómica de la especie	22
II.3.2.- Descripción botánica de la especie	23
II.3.3.- Características generales y usos de <i>A. filiculoides</i>	24
II.3.4.- Absorción y acumulación de metales pesados registrados por <i>A. filiculoides</i> Lam.	26

	Página
II.4.- Metales pesados	28
II.4.1.- Propiedades físico-químicas	
II.4.1.a.- Cadmio	29
II.4.1.b.- Cobre	30
II.4.2.- Esencialidad y toxicidad de cadmio y cobre en humanos	
II.4.2.a.- Cadmio	31
II.4.2.b.- Cobre	32
II.4.3.- Esencialidad y toxicidad de cadmio y cobre en vegetales	
II.4.3.a.- Cadmio	34
II.4.3.b.- Cobre	38
II.4.4.- Fuentes de contaminación de cadmio y cobre	
II.4.4.a.- Cadmio	42
II.4.4.b.- Cobre	44
II.4.5.- Límites ambientales de cadmio y cobre en diferentes matrices	
II.4.5.a.- Normativas nacionales en aguas	45
II.4.5.b.- Normativas nacionales e internacionales en alimentos	48
II.5.- Complejos Metal-EDTA	
II.5.1.- Antecedentes generales	50
II.5.2.- Estabilidad de iones complejos	52
II.5.3.- Características del EDTA	53
III.- Hipótesis de trabajo	56
IV.- Objetivos	
IV.1.- Objetivo general	56
IV.2.- Objetivos específicos	56

	Página
V.- Equipos, instrumentos, materiales y métodos	
V.1.- Equipos e instrumentos	57
V.2.- Materiales, preparación y limpieza	57
V.3.- Reactivos y soluciones para preparar la solución IRRI	58
V.3.1.- Reactivos	58
V.3.2.- Soluciones	60
V.3.2.a.- Preparación solución concentrada de cadmio	60
V.3.2.b.- Preparación solución concentrada de cobre	60
V.3.2.c.- Preparación solución concentrada de EDTA	60
V.3.2.d.- Preparación solución concentrada de Cd-EDTA	60
V.3.2.e.- Preparación solución concentrada de Cu-EDTA	61
V.3.3.- Preparación de la solución nutritiva IRRI	61
V.3.3.a.- Preparación de la solución de macronutrientes	61
V.3.3.b.- Preparación de la solución de micronutrientes	62
V.3.3.c.- Preparación de la solución Fe-EDTA	63
VI.- Procedimientos	
VI.1.- Obtención de muestras de <i>A. filiculoides</i> Lam.	64
VI.2.- Solución nutritiva IRRI	65
VI.2.a.- Preparación de solución nutritiva IRRI	66
VI.3.- Estabilidad de la solución nutritiva IRRI	67
VI.4 Determinación de la eficiencia fotosintética en <i>A. filiculoides</i>	67
VI.5.- Preparación de sistemas de cultivos	69
VI.5.1.- Condiciones de cultivo de <i>A. filiculoides</i> (sistema testigo)	69
VI.5.2.- Condiciones de cultivo de <i>A. filiculoides</i> de fitoremediación clásica de cadmio y cobre	70
VI.5.2.a.- Preparación de sistema de cultivo de <i>A. filiculoides</i> cultivada a concentraciones conocidas de cadmio	71

	Página
VI.5.2.b.- Preparación de sistema de cultivo de <i>A. filiculoides</i> cultivada a concentraciones conocidas de cobre	72
VI.5.3.- Condiciones de cultivo de <i>A. filiculoides</i> de fitoremediación inducida	73
VI.5.3.a.- Preparación sistema de cultivo de <i>A. filiculoides</i> expuesta a concentraciones conocidas de Cd-EDTA	73
VI.5.3.b.- Preparación sistema de cultivo de <i>A. filiculoides</i> expuesta a concentraciones conocidas de Cu-EDTA	74
VI.6.- Extracción de muestras de <i>A. filiculoides</i> desde diferentes medios de cultivo	75
VI.7.- Tratamiento químico de muestras de <i>A. filiculoides</i>	
VI.7.1.- Cadmio	75
VI.7.2.- Cobre	76
VI.8.- Determinación de cadmio y cobre en <i>A. filiculoides</i> Lam por Espectroscopia de Absorción Atómica	78
VI.10.- Obtención de muestras de agua en el punto de colecta del material vegetal	80
VI.11.- Determinación de cadmio y cobre por Espectroscopia de Absorción Atómica en aguas del punto de colecta de material vegetal	80
VI.12.- Diseño estadístico	81
 VII.- Resultados y discusión	
VII.1.- Estabilidad de la solución nutritiva IRR1	82
VII.2.- Validación de la metodología analítica	86
VII.3.- Determinación de cadmio en <i>A. filiculoides</i> proveniente del punto de colecta	87
VII.4.- Fitoremediación clásica de cadmio utilizando <i>A. filiculoides</i>	88
VII.5.- Fitoremediación inducida de Cd-EDTA utilizando <i>A. filiculoides</i>	91
VII.6.- Eficiencia fotosintética de <i>A. filiculoides</i> expuestas a cadmio y Cd-EDTA	94

	Página
VII.7.- Concentración de cobre en <i>A. filiculoides</i> proveniente del punto de colecta	98
VII.8.- Fitoremediación clásica de cobre utilizando <i>A. filiculoides</i>	99
VII.9.- Fitoremediación inducida Cu-EDTA utilizando <i>A. filiculoides</i>	102
VII.10.- Eficiencia fotosintética de <i>A. filiculoides</i> expuestas a cobre y Cu-EDTA	106
VII.11.- Concentración de cadmio y cobre en aguas del punto de colecta de <i>A. filiculoides</i>	109
VIII- Conclusiones	110
IX.- Referencias	113
X.- Anexos	
X.1.- Anexo 1	i
Modelo de ordenamiento territorial enfocado a la determinación de puntos de control críticos de la calidad de agua en la Cuenca del Río Maule	
X.2.- Anexo 2	xxxvi
Datos experimentales	