

## Tabla de contenido

Agradecimientos .....	iii
Índice de Tablas.....	vi
Índice de Figuras .....	viii
1. Introducción .....	1
1.1. Objetivos .....	2
1.1.1. Objetivo General .....	2
1.1.2. Objetivos Específicos .....	2
1.2. Organización del informe .....	2
2. Marco Teórico.....	3
2.1. Especiación y reactividad del arsénico.....	3
2.2. Normativa nacional e internacional.....	5
2.3. Tecnologías de tratamiento más comunes en la remoción de arsénico .....	5
2.3.1. Oxidación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración .....	5
2.3.2. Adsorción .....	5
2.3.3. Intercambio iónico.....	6
2.3.4. Filtración a través de membranas .....	6
2.4. Principio de fotocatalisis heterogénea.....	6
2.5. Propiedades de los materiales .....	8
2.5.1. Energía de separación de banda .....	8
2.5.2. Fases cristalinas.....	9
2.5.3. Tamaño de las partículas .....	10
2.6. Influencia de parámetros físicos en la cinética de la reacción.....	10
2.6.1. Masa del catalizador.....	11
2.6.2. Longitud de onda.....	11
2.6.3. Concentración inicial.....	11
2.6.4. Temperatura .....	11
2.6.5. Flujo radiante.....	11
2.6.6. Rendimiento cuántico.....	11
2.7. Colectores solares.....	12
3. Metodología .....	13
3.1. Caracterización del material bi-funcional, para foto-oxidación y adsorción de arsénico.....	13
3.1.1. Síntesis del dióxido de titanio .....	13
3.1.2. Propiedades del dióxido de titanio .....	14

3.1.3.	Síntesis del carbón activado .....	14
3.1.4.	Propiedad del carbón activado .....	16
3.2.	Pruebas de foto-oxidación de arsénico III.....	16
3.2.1.	Metodología para foto-oxidación de As(III) .....	16
3.2.2.	Metodología para determinación de As(V) por Colorimetría .....	20
3.3.	Diseño y construcción de instalación para tratamiento de aguas .....	23
3.3.1.	Descripción del sistema.....	24
3.3.2.	Pérdida de carga.....	25
3.3.3.	Determinación de la bomba.....	27
3.3.4.	Determinación del caudal según la frecuencia .....	28
3.3.5.	Colector solar .....	29
4.	Caracterización de los Nanomateriales .....	31
4.1.	Caracterización del dióxido de titanio.....	31
4.1.1.	Energía de separación de banda de TiO <sub>2</sub> (4) .....	31
4.1.2.	Fases cristalinas de TiO <sub>2</sub> (4).....	32
4.1.3.	Tamaño de las partículas de TiO <sub>2</sub> (4).....	32
4.2.	Caracterización del carbón activado.....	33
4.2.1.	pH superficial de CAP-CO <sub>2</sub> -Fe .....	33
4.3.	Proporción del mix TiO <sub>2</sub> /CAP-CO <sub>2</sub> -Fe .....	34
5.	Pruebas de foto-oxidación de As(III) .....	35
5.1.	Efecto del pH y de la modificación de TiO <sub>2</sub> (4) con CAP-CO <sub>2</sub> -Fe en la cinética de reacción.....	35
5.2.	Efecto de la potencia en la cinética de reacción.....	38
6.	Diseño y construcción de SolArsenic.....	44
6.1.	Diseño del sistema de iluminación.....	44
6.2.	Colector solar .....	45
7.	Conclusiones .....	47
8.	Bibliografía .....	49
9.	Anexos.....	51
9.1.	Anexo 1 .....	51
9.2.	Anexo 2 .....	63

## Índice de Tablas

Tabla 2.1.- Comparación de regulación de arsénico en normativas. Fuente: Nch 409, Nch1333, EPA y FAO, 2016.....	5
Tabla 3.1.-Características en proceso de síntesis de las 6 muestras de TiO <sub>2</sub> . .....	14
Tabla 3.2.- Caracterización de los precursores del carbón activado.....	15
Tabla 3.3.- Análisis de cenizas en los precursores de carbón activado.....	15
Tabla 3.4.- Rendimiento de los distintos procesos de síntesis. ....	15
Tabla 3.5.- Pruebas de foto-oxidación de arsénico en simulador solar. ....	19
Tabla 3.6.- Valores de curva de calibración de As(V). ....	21
Tabla 3.7.- Valores de curva de calibración de As(III). ....	22
Tabla 3.8.- Dimensiones del estanque. ....	24
Tabla 3.9.- Dimensiones del sistema.....	25
Tabla 3.10.- Coeficientes de pérdida singular. Fuente: M. Vernal, 2016.....	27
Tabla 3.11.- Pérdida de carga en el sistema, según el número de Reynolds.....	27
Tabla 3.12.- Características de la bomba. Fuente: ProMInent Chile, 2016.....	28
Tabla 3.13.- Número de Reynolds a partir de la frecuencia.....	28
Tabla 5.1.- Adsorción de arsénico de TiO <sub>2</sub> (4) versus el mix, a un pH 4.....	37
Tabla 5.2.- Adsorción de arsénico de TiO <sub>2</sub> (4) versus el mix, a un pH 7.....	38
Tabla 5.3.- Distribución de luz y potencia, para cada combinación de lámparas. ....	39
Tabla 5.4.- Potencia, foto-oxidación y adsorción de arsénico, según combinaciones de lámparas. ....	42
Tabla 6.1.- Dimensiones del caparazón para las lámparas. ....	44
Tabla 9.1.- Concentración de As(V) en función del tiempo, para TiO <sub>2</sub> (4), a pH 4.....	51
Tabla 9.2.- Concentración de arsénico total en función del tiempo, para TiO <sub>2</sub> (4), a pH 4.....	52
Tabla 9.3.- Concentración de As(III) en función del tiempo, para TiO <sub>2</sub> (4), a pH 4.....	53
Tabla 9.4.- Concentración de As(V), en función del tiempo para el mix, a pH 4.....	54
Tabla 9.5.- Concentración de arsénico total, en función del tiempo para el mix, a pH 4.....	55
Tabla 9.6.- Concentración de As(III), en función del tiempo para el mix, a pH 4.....	56
Tabla 9.7.- Concentración de As(V) en función del tiempo, para TiO <sub>2</sub> (4), a pH 7.....	57
Tabla 9.8.- Concentración de arsénico total en función del tiempo, para TiO <sub>2</sub> (4), a pH 7.....	58
Tabla 9.9.- Concentración de As(III) en función del tiempo, para TiO <sub>2</sub> (4), a pH 7.....	59
Tabla 9.10.- Concentración de As(V) en función del tiempo, para el mix, a pH 7.....	60
Tabla 9.11.- Concentración de arsénico total en función del tiempo, para el mix, a pH 7.....	61
Tabla 9.12.- Concentración de As(III) en función del tiempo, para el mix, a pH 7.....	62
Tabla 9.13.- Concentración de As(V) en función del tiempo, para 86 [%] de lámparas visibles y 14 [%] de UV-A.....	63
Tabla 9.14.- Concentración de arsénico total en función del tiempo, para 86 [%] de lámparas visibles y 14 [%] de UV-A.....	64
Tabla 9.15.- Concentración de As(III) en función del tiempo, para 86 [%] de lámparas visibles y 14 [%] de UV-A.....	65
Tabla 9.16.- Concentración de As(V) en función del tiempo, para 86 [%] de lámparas visibles y 14 [%] de UV-C.....	66
Tabla 9.17.- Concentración de arsénico total en función del tiempo, para 86 [%] de lámparas visibles y 14 [%] de UV-C.....	67
Tabla 9.18.- Concentración de As(III) en función del tiempo, para 86 [%] de lámparas visibles y 14 [%] de UV-C.....	68

Tabla 9.19.- Concentración de As(V) en función del tiempo, para 100 [%] de lámparas visibles. ....	69
Tabla 9.20.- Concentración de arsénico total en función del tiempo, para 100 [%] de lámparas visibles. ....	70
Tabla 9.21.- Concentración de As(III) en función del tiempo, para 100 [%] de lámparas visibles. ....	71
Tabla 9.22.- Concentración de As(V) en función del tiempo, para 100 [%] de lámparas UV-C. ....	72
Tabla 9.23.- Concentración de arsénico total en función del tiempo, para 100 [%] de lámparas UV-C. ....	73
Tabla 9.24.- Concentración de As(III) en función del tiempo, para 100 [%] de lámparas UV-C. ....	74
Tabla 9.25.- Concentración de As(V) en función del tiempo, para 100 [%] de lámparas UV-A. ....	75
Tabla 9.26.- Concentración de arsénico total en función del tiempo, para 100 [%] de lámparas UV-A. ....	76
Tabla 9.27.- Concentración de As(III) en función del tiempo, para 100 [%] de lámparas UV-A. ....	77

## Índice de Figuras

Figura 2.1.- Especiación del arsénico. Fuente: Kowalski, 2014 .....	4
Figura 2.2.- Reactividad del arsénico. Fuente: Kowalski, 2014.....	4
Figura 2.3.- Mecanismo del proceso de fotocatalisis heterogénea. Fuente: Spasiano, 2014.....	7
Figura 2.4.- Región UV de fotoactividad de TiO <sub>2</sub> . Fuente: Daghrir et al, 2013. ....	8
Figura 2.5.- Esquema de foto-oxidación con TiO <sub>2</sub> de As(III). Fuente: Guan et al, 2012. ....	9
Figura 2.6.- Esquema de anatasa (a), rutilo (b) y brookita (c) TiO <sub>2</sub> . Fuente: Zhang et al, 2014. ....	9
Figura 2.7.- Influencia de parámetros en la cinética de la reacción. Fuente: Herrmann, 2005. ....	10
Figura 2.8.- Reflexión sobre un reactor CPC. Fuente: Gálvez, 2005.....	12
Figura 3.1.- Fotoreactor para proceso de foto-oxidación de As(III).....	17
Figura 3.2.- Centrífuga.....	17
Figura 3.3.- Filtros para separar material sólido de la solución. ....	18
Figura 3.4.- Muestras de solución para ser analizadas. ....	18
Figura 3.5.- Espectro solar. Fuente: Biernat et al., 2013.....	19
Figura 3.6.- Curva de calibración de As(V). ....	21
Figura 3.7.- Curva de calibración de As(III).....	22
Figura 3.8.- Esquema de sistema de remoción de arsénico en el agua. Fuente: A. García, 2016. ....	24
Figura 3.9.- Gráfico del caudal medido y el caudal promedio en función de la frecuencia.....	29
Figura 3.10.- Obtención de la curva de un captador CPC. Fuente: Gálvez, 2005.....	29
Figura 4.1.- Espectros de reflectancia difusa para TiO <sub>2</sub> (4). ....	31
Figura 4.2.- Gráfico intensidad en función del ángulo para TiO <sub>2</sub> (4). ....	32
Figura 4.3.- Imágenes de microscopia de transmisión para TiO <sub>2</sub> (4).....	33
Figura 4.4.- pH superficial de CAP-CO <sub>2</sub> -Fe. ....	33
Figura 5.1.- Concentración de arsénico en función del tiempo, utilizando TiO <sub>2</sub> (4), a pH 4.....	35
Figura 5.2.- Concentración de arsénico en función del tiempo, utilizando el mix, a pH 4. ....	36
Figura 5.3.- Concentración de arsénico en función del tiempo, utilizando TiO <sub>2</sub> (4), a pH 7. ....	36
Figura 5.4.- Concentración de arsénico en función del tiempo, utilizando el mix, a pH 7. ....	37
Figura 5.5.- Intensidad de la radiación en función de la disposición de lámparas en el fotoreactor. ....	39
Figura 5.6.- Concentración de arsénico en función del tiempo, para 86 [%] lámparas visibles y 14 [%] UV-A a pH=4, con TiO <sub>2</sub> (4).....	40
Figura 5.7.- Concentración de arsénico en función del tiempo, para 86 [%] lámparas visibles y 14 [%] UV-C, a pH=4, con TiO <sub>2</sub> (4).....	40
Figura 5.8.- Concentración de arsénico en función del tiempo, para 100 [%] lámparas visibles, a pH=4, con TiO <sub>2</sub> (4).....	41
Figura 5.9.- Concentración de arsénico en función del tiempo, para 100 [%] lámparas UV-C, a pH=4, con TiO <sub>2</sub> (4). ....	41
Figura 5.10.- Concentración de arsénico en función del tiempo, para 100 [%] lámparas UV-A, a pH=4, con TiO <sub>2</sub> (4).....	42
Figura 6.1.- Diseño de lámparas en SolArsenic. ....	44
Figura 6.2.- Capuchón de lámparas en SolArsenic.....	45
Figura 6.3.- Diseño colector solar.....	45
Figura 6.4.- Colector solar instalado en SolArsenic.....	46
Figura 6.5.- SolArsenic.....	46