



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Química

**Sistema de eliminación de arsénico del
agua mediante coprecipitación con
polímeros de alta afinidad y otras
alternativas.**

Autor:

San Martín Jiménez, Noelia

Tutor(es):

**Alonso Rodrigo, Matilde
Departamento Química Analítica**

Valladolid, marzo 2021

A mi familia por su apoyo incondicional y la infinita paciencia. Por enseñarme a afrontar la vida y hacerme más fácil el camino para llegar hasta donde estoy.

A Mario por la ayuda, los ánimos y por poner el rayito de luz a los malos momentos.

A mis amigos por la comprensión, las risas y los ánimos a lo largo de los años.

A mi tutora por haberme dado la oportunidad de formarme y aprender con ella.

Resumen

El arsénico es un elemento químico que puede generar importantes amenazas para la salud pública debido a su alta toxicidad, en su forma inorgánica, tanto para el medio ambiente como para el ser humano. La presencia del arsénico en el agua es una de las principales problemáticas a las que se trata de poner fin a nivel mundial. El arsénico disuelto en agua es captado por las plantas, animales y humanos, generando graves problemas de salud.

En este trabajo se exponen diferentes alternativas existentes para la eliminación de arsénico del agua (coagulación-filtración, membranas, intercambio iónico, etc) y se plantea un posible método por medio de la coprecipitación del arsénico con biopolímeros. Estos biopolímeros presentan una propiedad característica, poseen una transición inversa con la temperatura, esto significa que las temperaturas bajas favorecen la disolución del polímero, mientras que un aumento de temperatura provoca la precipitación del mismo. De esta manera, si se produce una interacción lo suficientemente intensa entre el biopolímero y el arsénico, el arsénico coprecipitará junto al polímero al aumentar la temperatura de la disolución. Cuanto mayor sea esta interacción, mayor cantidad de arsénico se elimina de la disolución. Para los ensayos se utilizan los biopolímeros: VOKx72 y HRGD6, ya que se había demostrado que eran eficaces para la eliminación de otros metales pesados como hierro, cobre, etc. En este caso no es así, presentan una capacidad de eliminación de $9,97 \cdot 10^{-4} \text{ mg}_{\text{As}}/\text{mg}_{\text{VOKx72}}$ y $1,099 \cdot 10^{-3} \text{ mg}_{\text{As}}/\text{mg}_{\text{HRGD6}}$, lo cual supone la necesidad de utilizar una cantidad muy grande de polímero para cumplir los límites legales de concentración de arsénico en agua. Por este motivo, se plantea un polímero de nueva creación. Este polímero es tipo ELR (Elastin Like Recombinamers). Al polímero se le añaden compuestos a base de hierro, anexionados a la cadena principal por medio de enlaces amino primarios. Se estima, teniendo en cuenta datos de la bibliografía, que la capacidad de eliminación de este nuevo polímero sea de $4 \cdot 10^{-2} \text{ mg}_{\text{As}}/\text{mg}_{\text{polímero}}$. Para asegurar la validez de estos datos sería necesario realizar los experimentos oportunos, que para este trabajo concreto no se puede hacer debido a la pandemia por COVID-19.

El trabajo contiene, además, un pequeño estudio sobre la viabilidad del proyecto así como de la seguridad y prevención de riesgos en la realización de los experimentos oportunos a nivel de laboratorio y para la aplicación industrial considerada.

Palabras clave: arsénico, biopolímero, coprecipitación, agua, eliminación de arsénico.

Abstract

Arsenic is a chemical element that can pose significant threats to public health due to its high toxicity, in its inorganic form, both to the environment and to humans. The presence of arsenic in water is one of the main problems that scientists all around the world are striving to solve. Arsenic dissolved in water is taken up by plants, animals and humans, causing serious health problems.

This project presents different alternatives for arsenic removal from water (coagulation-filtration, membranes, ion Exchange, etc) and it proposes a possible method by arsenic co-precipitation with biopolymers. These biopolymers have a characteristic property, they have an inverse transition with temperature, this means that low temperatures favor the dissolution of the polymer, while an increase in temperature causes its precipitation. In consequence, if there is a sufficiently strong interaction between the biopolymer and the arsenic, the arsenic will co-precipitate with the polymer as the temperature of the solution increases. The stronger this interaction, the more arsenic is removed from the dissolution. The biopolymers VOKx72 and HRGD6 are used for the tests, as they have been shown to be effective for the removal of other heavy metals such as iron, copper, etc. In this case this is not the case, they present a removal capacity of $9.97 \cdot 10^{-4} \text{ mg}_{\text{As}}/\text{mg}_{\text{VOKx72}}$ and $1.099 \cdot 10^{-3} \text{ mg}_{\text{As}}/\text{mg}_{\text{HRGD6}}$, which implies the need to use a very large amount of polymer to meet the legal limits of arsenic concentration in water. For this reason, a newly developed polymer is proposed. This polymer is of the ELR (Elastin Like Recombinamers) type. Iron-based compounds are added to the polymer, attached to the main chain by means of primary amino bonds. It is estimated, taking into account data from the literature, that the elimination capacity of this new polymer is $4 \cdot 10^{-2} \text{ mg}_{\text{As}}/\text{mg}_{\text{polymer}}$. To ensure the validity of these data it would be necessary to perform the appropriate experiments, which for this particular project cannot be done due to the COVID-19 pandemic.

The project also contains a small study on the feasibility of the project as well as on the safety and risk prevention in carrying out the appropriate experiments at laboratory level and for the industrial application considered.

Key words: arsenic, biopolymer, coprecipitation, water, arsenic removal.

Contenidos generales

1. Objetivos.....	1
2. Introducción.....	3
2.1 El arsénico.....	3
2.1.1 El arsénico como elemento químico.....	3
2.1.2 Presencia del arsénico en la naturaleza y problemas medioambientales.....	4
2.1.3 Toxicidad del arsénico para el ser humano.	6
2.1.4 Marco legislativo.....	7
2.2 Métodos empleados para la eliminación de arsénico del agua.....	8
2.2.1 Físico-químicos.....	8
2.2.2 Físicos.....	9
2.2.3 Químicos.....	10
2.3 Polímeros.....	18
2.3.1 Polímeros empleados para la eliminación de arsénico y polímeros que presentan enlaces con hierro.	18
2.3.2 Polímeros tipo elastina ELR.....	20
3. Procedimiento experimental y métodos.....	23
3.1 Materiales.....	23
3.2 Métodos.....	24
3.2.1 Coprecipitación y microprecipitación.....	24
3.2.2 Polímero VOKx72.....	26
3.2.3 Polímero HRGD6.....	26
3.2.4 Modelo de Langmuir.....	27
3.2.5 Rendimiento de eliminación.....	30
3.2.6 Capacidad de eliminación o retención.....	30
3.2.7 Espectroscopia de absorción atómica ICP-MS.....	30
3.3 Procedimiento experimental.....	31
3.3.1 Preparación de muestras patrón y disolución madre.....	31
3.3.2 Preparación de la disolución madre de polímeros.....	32
3.3.3 Preparación de las disoluciones problema.....	33
3.3.4 Análisis de las disoluciones.....	33

4.	Cálculos, resultados y discusión.....	35
4.1	Resultados obtenidos.....	35
4.2	Cálculos y discusión.....	36
5.	Propuestas de futuro.....	43
5.1	Justificación de métodos alternativos para la eliminación de arsénico del agua.....	43
5.2	Aplicación práctica de los métodos alternativos.....	44
6.	Presupuesto.....	47
6.1	Costes de inversión.....	47
6.2	Costes de mantenimiento y operación.....	48
6.3	Presupuesto total.....	48
7.	Estudio de beneficios.....	49
7.1	Ingresos.....	49
7.2	Beneficios.....	49
8.	Seguridad y prevención de riesgos.....	51
9.	Conclusiones.....	53
10.	Bibliografía.....	57
	Anexos.....	61
	Anexo I. Nomenclatura.....	61
	a. Variables.....	61
	b. Compuestos químicos.....	63
	c. Unidades de medida.....	64
	d. Aminoácidos.....	66
	Anexo II. Cálculos de aplicación práctica de métodos alternativos.....	67
	Anexo III. Elementos y coste para presupuesto y estudio de beneficios.....	71
	Anexo IV. Hojas de seguridad.....	75

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades físicas del arsénico.....	4
Tabla 2. Contenido máximo de arsénico en ciertos alimentos [9]	8
Tabla 3. Concentración de arsénico eliminado en cada experimento [14].	12
Tabla 4. Eliminación de arsénico. Cobertura de superficie de los adsorbentes individuales para los sistemas As(III) y As(V) ($C_i=100$ ppm) [19].	17
Tabla 5. Resultados de la eliminación de arsénico con quitosana [22].	19
Tabla 6. Propiedades físicas del polímero VOKx72.....	26
Tabla 7. Propiedades físicas del polímero HRGD6.....	26
Tabla 8. Resultados del análisis de arsénico.....	35
Tabla 9. Cálculos para los experimentos con el polímero HRGD6 a partir del modelo de Langmuir.....	36
Tabla 10. Valores de las constantes del modelo de Langmuir para ensayos con el polímero HRGD6.	37
Tabla 11. Rendimiento de eliminación para el polímero HRGD6.....	38
Tabla 12. Capacidad de eliminación para el polímero HRDG6	38
Tabla 13. Cálculos para los experimentos con el polímero VOKx72 a partir del modelo de Langmuir.....	39
Tabla 14. Valores de las constantes del modelo de Langmuir para los experimentos con el polímero VOKx72.	40
Tabla 15. Rendimiento de eliminación para el polímero VOKx72.....	40
Tabla 16. Capacidad de eliminación para el polímero VOKx72	41
Tabla 17. Capacidad de eliminación supuesta en función de la bibliografía [1]	45
Tabla 18. Masa estimada de polímero diseñado necesaria para tratar agua contaminada.	45
Tabla 19. Masa de polímero ensayado necesaria para tratar agua contaminada.....	45
Tabla 20. Costes de inversión.....	47

Tabla 21. Costes de mantenimiento y operación en un año.	48
Tabla 22. Costes de mantenimiento y operación en 20 años.	48
Tabla 23. Costes totales.	48
Tabla 24. Ingresos totales.	49
Tabla 25. Beneficios totales.	49
Tabla 26. Recopilación de compuestos. Nomenclatura.	63
Tabla 27. Recopilación de unidades.	64
Tabla 28. Nomenclatura de aminoácidos.	66
Tabla 29. Concentraciones y capacidad de eliminación de los polímeros HRGD6 y VOKx72 con diferentes metales.	68
Tabla 30. Caudales y concentraciones de la corriente a tratar.	68
Tabla 31. Capacidad de adsorción del polímero diseñado.	69
Tabla 32. Capacidad de adsorción de los polímeros ensayados.	69
Tabla 33. Resultados de los cálculos. Masa de polímero necesaria.	69

Índice de figuras

Figura 1. Variación de la concentración de arsénico restante en función del tiempo de cristalización. Precipitación a pH=2 [14].	11
Figura 2. Variación de la concentración de arsénico restante en función del tiempo de cristalización. Primera etapa de precipitación a pH=2 y segunda etapa a pH=3 [14].	11
Figura 3. Variación de la concentración de arsénico restante en función del tiempo de cristalización. Primera etapa de precipitación a pH=2 y segunda etapa a pH=4 [14].	12
Figura 4. A) estructura de una capa de hidróxido de Fe(II)-Fe(III) de GR; B) estructura de una lámina única de óxido de hierro derivada de la GR (los octaedros verdes contienen Fe(II) y los octaedros marrones Fe(III) [15], [16].	13
Figura 5. Dibujo esquemático de las interfaces de agua de la SSI mostrando dos complejos hipotéticos diferentes de la superficie de la esfera interior As(V) [15].	14

Figura 6. Cantidad de As(V) adsorbida para dos concentraciones distintas y a diferentes pH simulados por la simulación de 1-pK BSM (concentración inicial de As(V) 270 $\mu\text{mol/L}$ y 1,33 $\mu\text{mol/L}$, respectivamente, dosis SSI 0,2 g/L, electrolito de fondo 0,01 mol/L) [15]....	15
Figura 7. Representación esquemática de las estructuras complejas de la superficie de la esfera interior en los adsorbentes [19].....	17
Figura 8. Formación de varios complejos de superficie de arsénico (adsorción interna, externa, simple) sobre nano adsorbentes de óxido de metal ternario [(Ni / Co / Mn / Cu) -Al-Fe]. [19]	18
Figura 9. Cambio conformacional en función de la temperatura (Temperatura de transición inversa).	22
Figura 10. ICP-MS con Sistema de Reacción Octopolar HP 7500c de Agilent [43], [44].	31
Figura 11. Modelo de Langmuir para los experimentos con el polímero HRGD6.	37
Figura 12. Modelo de Langmuir para los experimentos con el polímero VOKx72.	39

Índice de ecuaciones

(I)	27
(II)	28
(III)	28
(IV)	28
(V)	29
(VI)	29
(VII)	30
(VIII)	30
(IX)	32
(X)	67
(XI)	68

1. Objetivos

El objetivo principal de este TFG (Trabajo de Fin de Grado) es la propuesta de un método eficaz, rápido y sencillo mediante coprecipitación, para la potabilización de aguas contaminadas por arsénico. Para ello se propone la utilización de Biopolímeros proteicos sensibles a la temperatura. Para la consecución de dicho objetivo se plantean distintos objetivos parciales.

- Realización experimental de los ensayos de eliminación de arsénico y optimización del procedimiento, mediante la utilización de los polímeros VOKx72 y HRGD6. Dichos polímeros se demostraron ya eficaces en la eliminación de una serie de metales pesados del agua [1] (plomo, hierro, zinc, cobre...).
- Diseño de biopolímeros alternativos con una eficacia y especificidad adicional, mediante el estudio bibliográfico de las posibles alternativas existentes de compuestos de captación de arsénico, a través de publicaciones innovadoras.
- Estudio económico en relación al empleo del polímero propuesto para una aplicación real.

2. Introducción.

2.1 El arsénico.

2.1.1 El arsénico como elemento químico.

El arsénico es un elemento que se encuentra en diversas formas químicas y estados de oxidación en el medio ambiente. Su origen es principalmente geológico, procedente directamente de minerales, siendo el vigésimo elemento más abundante en la corteza terrestre. Se le encuentra en la naturaleza como mineral de cobalto, aunque también se encuentra en la superficie de las rocas combinado con azufre o metales como manganeso, hierro, cobalto, níquel, plata o estaño. El principal mineral del arsénico es el FeAsS (arsenopirita, pilo) [2]. Otros arseniuros metálicos son los minerales FeAs_2 (löllingita), NiAs (nicolita), CoAsS (cobalto brillante), NiAsS (gersdorfitita) y CoAs_2 (esmaltita). Los arseniatos y tioarseniato naturales son comunes y la mayor parte de los minerales de sulfuro contienen arsénico. La As_4S_4 (realgarita) y As_4S_6 (oropimente) son los minerales más importantes que contienen azufre. El óxido, arsenolita, As_4O_6 , aparece como producto de la alteración de otros minerales que contienen arsénico debido a la acción de agentes atmosféricos, además de encontrarse en los polvos eliminados durante la extracción de níquel, cobre y estaño y en los residuos de combustión de arseniuros de hierro, cobalto y níquel.

El arsénico es un elemento químico de la tabla periódica cuyo símbolo es As. Raramente se presenta de forma sólida aunque pertenece al grupo de los semimetales, ya que muestra propiedades metálicas y no metálicas. El arsénico pertenece al grupo 15 en la tabla periódica junto con el nitrógeno, fósforo, antimonio y bismuto. La masa atómica del arsénico es 74,92 unidades de masa atómica (uma) y su número atómico (Z) es 33 [3].

Puede existir en cuatro estados de valencia: -3 (arseniuros), 0 (elemental), +3 (trivalente, arsenitos) y +5 (pentavalente, arseniatos). La forma elemental de arsénico no es muy común de encontrar. En la mayoría de los casos los estados de oxidación más relevantes del arsénico son +3 y +5.

Las propiedades físicas del arsénico se presentan en la siguiente tabla [3], [4], [5]:

Tabla 1. Propiedades físicas del arsénico.

Nombre	Arsénico
Fórmula química	As
Número atómico	33
Masa atómica (Uma)	74,922
Masa atómica (g/mol)	74,99
Densidad (g/mol)	5,72
Potencial primero de ionización (e.v)	10,08
Electronegatividad	2,1
Punto de ebullición (°C)	613
Punto de fusión (°C)	817
Valencias	3, -3, +5
Radio atómico (Å)	1,39

Es uno de los 22 elementos conocidos que se componen de un solo nucleído estable. Se conocen otros 17 nucleídos radiactivos de As [4].

El arsénico es un elemento común contaminante ambiental que se encuentra naturalmente en el agua y los alimentos. Aunque es conocido por su uso en la industria.

2.1.2 Presencia del arsénico en la naturaleza y problemas medioambientales.

Hasta el siglo XX, el arsénico era muy empleado en los baños de ganado, suplementos alimenticios, semiconductores, conservantes de madera y en los medicamentos.

A finales de este mismo siglo XX, científicos descubrieron la problemática generada por la alta toxicidad del arsénico en lugares como Bangladesh y Bengala occidental (India), y con un menor impacto en Ghana, Argentina, Chile, China y los Estados Unidos [2], donde los niveles de arsénico en el agua potable (principalmente en las aguas subterráneas) son excesivamente altos (superiores a 100 µg/L) [2].

El arsénico proviene principalmente de pozos de agua. Estas aguas subterráneas están contaminadas con el arsénico que se encuentra naturalmente formando parte de las rocas o bien pueden tener una procedencia artificial, debido a la actividad industrial.

- La procedencia natural del arsénico en el medio se debe a que las formaciones rocosas pueden liberar arsénico en las aguas

subterráneas y superficiales, principalmente. Otra importante fuente de arsénico en las aguas subterráneas es la disolución reductora de hierro y otros óxidos que contienen arsénico en suelos, sedimentos y rocas anaeróbicos. En condiciones de oxidación en las aguas superficiales y en las aguas subterráneas próximas a la superficie, el arsénico es eliminado de la solución mediante la absorción o coprecipitación con el hierro y otros hidrocarburos óxidos [2].

- La procedencia artificial de arsénico en el medio no siempre es resultado de derrames industriales. La eliminación inadecuada de desechos con arsénico, o la aplicación excesiva de plaguicidas arsenicales también causan la acumulación del arsénico en aguas subterráneas. Este arsénico del medio proviene de diferentes industrias, destacando principalmente la industria minera, a través de drenajes y lixiviados. Otras industrias que emiten arsénico al medio son las productoras de cobre, aunque también cabe destacar las que producen plomo, zinc y la agricultura debido al uso de pesticidas. El arsénico se utiliza industrialmente como agente de aleación, y para el procesamiento de vidrio, pigmentos, textiles, papel, adhesivos metálicos, protectores de la madera y municiones. También se emplea en los procesos de curtido de pieles y, en un grado más limitado, en la fabricación de plaguicidas, aditivos para piensos y productos farmacéuticos [6]. Por otro lado, el arsénico es un subproducto de la fundición de minerales no ferrosos y de la combustión del carbón [2].

Tal y como ya se ha mencionado, el arsénico puede encontrarse de forma natural en la tierra en pequeñas concentraciones, además puede entrar en contacto con el aire (los niveles de arsénico en el aire en las zonas rurales y urbanas oscilan entre $<1-3 \text{ ng/m}^3$ y $20-30 \text{ ng/m}^3$ [2]) y el agua a través de las tormentas de polvo y las aguas de escorrentía. No se encuentran grandes concentraciones del mismo en un lugar concreto. A pesar de las ventajas obvias que esto representa, también es un inconveniente ya que la contaminación por arsénico puede llegar a un mayor número de zonas.

La presencia del arsénico ha sido fuertemente extendida debido a la presencia del ser humano, por lo que grandes cantidades de arsénico terminan en el medio y en organismos vivos. Esto es debido a que el arsénico no puede ser destruido una vez que ha entrado en el medio ambiente. Las plantas absorben el arsénico con gran facilidad [4] por lo que puede llegar a formar parte de los alimentos y del tabaco natural. El arsénico inorgánico es la forma predominante de arsénico en alimentos como el arroz (74 ng/g), la harina (11 ng/g) y las espinacas (6 ng/g) [2]. Por otro lado, el arsénico presente en las aguas superficiales puede alterar el material genético de los

peces y otros organismos acuáticos [4]. Las aves que se alimentan de peces pueden ser envenenadas por la acumulación del arsénico presente en dichos peces. Algunos alimentos de origen marino, como el pescado y los mariscos, tienden a tener los niveles más altos de arsénico. El atún suele tener niveles de arsénico comprendidos entre 0,6 y 1,5 $\mu\text{g/g}$, mientras que el camarón presente niveles de arsénico incluidos en el rango de 0,3 y 2,7 $\mu\text{g/g}$ [2]. Para la mayoría de las personas, la dieta es la principal fuente de arsénico (aproximadamente 50 $\mu\text{g/día}$) [2].

Un claro ejemplo de la problemática ocasionada por la presencia del arsénico en la naturaleza en una región de China (Guizhou), donde se utiliza el carbón en los hogares para la calefacción, la cocina diaria y el secado de los cultivos. El carbón de esta zona contiene altos niveles de arsénico (entre 100 y 9000 $\mu\text{g/g}$ [2]). Las personas de esta región están expuestas al arsénico del aire y de sus alimentos (por el arsénico del aire cayendo y cubriéndolo). Por este motivo, aunque los niveles de arsénico en el agua potable se consideran en la normalidad, la población de esta zona presenta graves consecuencias debidos a la toxicidad del arsénico [2].

2.1.3 Toxicidad del arsénico para el ser humano.

Los humanos toman arsénico de fuentes naturales y antropogénicas, a través de la inhalación de aire, ingesta de alimentos, el agua o incluso el contacto con la piel. Las personas están expuestas al arsénico por su uso actual así como por todos los años de uso previos.

El arsénico es un elemento extremadamente tóxico y cancerígeno para el ser humano. En concentraciones altas puede llegar a ser letal mientras que en pequeñas concentraciones durante un periodo de tiempo prolongado puede causar efectos crónicos para la salud.

Los síntomas inmediatos de intoxicación aguda por arsénico incluyen vómitos, dolor abdominal y diarrea. Seguidamente, aparecen otros efectos, como entumecimiento u hormigueo en las manos y los pies o calambres musculares y, en casos extremos, la muerte [6].

Los efectos nocivos no cancerígenos más importantes son debidos a la ingesta de arsénico, de los cuales destacan [2], [6], [7]:

- Afecciones en la piel: hiperpigmentación, hipopigmentación e hiperqueratosis (lesiones cutáneas, durezas y callosidades en las palmas de las manos y las plantas de los pies).

- Afecciones en el sistema cardiovascular: alteraciones renales y hepáticas, desarrollo de neuropatías periféricas y encefalopatías y desarrollo de diabetes.
- Afecciones al embarazo: infertilidad, abortos, mal desarrollo del embrión y mortalidad infantil. Repercute en la salud de los niños, y puede tener una influencia negativa en el desarrollo cognitivo.
- Disminución en la producción de glóbulos rojos y blancos [4].

Los efectos nocivos cancerígenos más importantes son debidos a la presencia de arsénico en agua, de los cuales destacan [2], [6], [7]:

- Cáncer de vejiga
- Cáncer de pulmón
- Cáncer de riñón
- Cáncer hepático
- Cáncer broncogénico
- Cáncer de piel

Todos estos efectos nocivos graves para la salud llevan a organismos tales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Unión Europea (UE) y muchos otros a establecer unos límites de contenido de arsénico en agua de consumo humano.

2.1.4 Marco legislativo.

Tal y como ya se ha tratado en los apartados anteriores, el arsénico constituye un riesgo para la salud y el medio ambiente. Debido a este motivo se establecen unos ciertos criterios y límites legales para la emisión de arsénico al medio y consumo del mismo por el ser humano.

En España, la concentración de arsénico en aguas aptas para el consumo humano viene regulado según el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano [8]. En el cual se establece que la concentración de arsénico en agua no debe superar los 10 µg/l (10 ppb).

Así mismo, la ingesta de arsénico en ciertos alimentos viene regulada por Reglamento (UE) 2015/1006 de la comisión de 25 de junio de 2015 por el que se modifica el Reglamento (CE) no 1881/2006 en cuanto al contenido máximo de arsénico inorgánico en los productos alimenticios [9], estableciendo los siguientes límites:

Tabla 2. Contenido máximo de arsénico en ciertos alimentos [9].

Arsénico (inorgánico)	mg/kg
Arroz elaborado (arroz pulido o blanco), no sancochado	0,2
Arroz sancochado y arroz descascarado	0,25
Tortitas, obleas, galletitas y pasteles de arroz	0,3
Arroz destinado a la producción de alimentos para lactantes y niños de corta edad	0,1

2.2 Métodos empleados para la eliminación de arsénico del agua.

Como ya se ha mencionado, el arsénico constituye un grave problema en el agua potable, es decir agua de consumo humano. Por ello, uno de los temas principales de investigación en la actualidad se centra en eliminar dicho elemento junto a otros metales pesados que, al igual que el arsénico, generan alta toxicidad.

Los métodos más comúnmente empleados para ello son los siguientes:

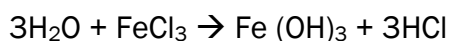
2.2.1 Físico-químicos.

- **Coagulación-filtración:** se alteran las propiedades de las partículas suspendidas o coloidales, mediante productos químicos añadidos como son el sulfato de hierro o el cloruro de hierro, de tal manera que formen agregados de mayor tamaño. Este tamaño superior es más óptimo para la posterior filtración. Los productos químicos añadidos, además de los agregados de partículas formados, hace que los elementos solubles precipiten, generalmente como hidróxidos, adsorbiendo otros elementos disueltos, entre ellos el arsénico. Para que este proceso sea óptimo, el arsénico (III) debe ser previamente oxidado a arsénico (V) mediante una oxidación producida por oxígeno añadido [10], [11].
- **Oxidación-filtración:** se trata de un proceso similar al anterior. La diferencia radica en que este tratamiento generalmente se utiliza en aguas provenientes de pozos con concentraciones bajas de sólidos y coloides en suspensión. En aguas con altos niveles de hierro y manganeso, es eficiente ya que el arsénico se elimina por adsorción

en la superficie de hidróxidos de hierro y manganeso formados en la etapa de oxidación. Debido a la ausencia de oxígeno en las aguas subterráneas, el contenido en arsénico (III) es muy superior a la del agua superficial. Normalmente se agregan coagulantes (coagulante férrico) para mejorar la posterior filtración a través de una membrana de polímero de baja presión (ultrafiltración) [10].

2.2.2 Físicos.

- **Adsorción con medios específicos:** se emplea como medio el hidróxido de hierro debido a la alta afinidad entre el hierro y el arsénico. La reacción básica es agua y cloruro férrico que reacciona para producir hidróxido férrico y ácido clorhídrico:



El hidróxido férrico es un fuerte adsorbente del arsénico (V) [10], [11].

- **Bioadsorción:** se trata de un proceso de adsorción donde el medio específico tendrá una precedencia biológica llamado bioadsorbente. El bioadsorbente presenta propiedades tanto adsorbentes como de intercambio de iones y posee una serie de propiedades que le confieren una alta capacidad de retención de metales, siendo capaces de disminuir su concentración en la disolución a niveles de partes por billón (ppb). Se trata de una técnica que puede utilizarse para el tratamiento de grandes volúmenes de agua con concentraciones bajas de metales [12].
- **Membranas:** la separación se basa en la velocidad a la que los solutos se transfieren a través de una membrana semipermeable. Se alcanza una gran eliminación de arsénico pero presenta varios inconvenientes, principalmente que el concentrado producido tiene un cierto contenido en arsénico y por tanto deberá ser tratado posteriormente. Por otro lado, el rechazo de arsénico (V) es mayor debido a su mayor carga iónica, y el arsénico (III) debe ser oxidado para maximizar el rechazo total, requiriéndose una reducción del valor del pH para mejorar la eficacia de la eliminación [10], [13].

2.2.3 Químicos.

- **Intercambio de iones:** operación unitaria en la que los iones contenidos en una resina sólida se intercambian por iones en la solución de alimentación. Se trata de uno de los métodos menos utilizados debido a que la selectividad entre las resinas y el arsénico es baja. Los aniones que compiten con otros contaminantes (sulfatos o nitratos) reducen la capacidad de eliminar el arsénico. Presenta además otro inconveniente y es la necesidad del empleo de químicos para la regeneración de las resinas que arrastrarán una alta concentración de arsénico [10], [13].
- **Formación de complejos con el arsénico:** a partir de diferentes estudios realizados, se toman como referencia los siguientes:

1. **Eliminación de arsénico formando un precipitado que contiene scorodita y ferrihidrita** [14]. Se trata de un proceso de precipitación de arsénico en dos etapas que consiste en la formación de scorodita ($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la posterior precipitación de ferrihidrita arsenical: $\text{AsO}_4^{3-} \cdot \text{Fe}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_{1+x}$. El arseniato férrico cristalino se forma a 90°C mediante la oxidación controlada de una solución de sulfato ferroso que contiene arseniato. La solución inicial de arsénico (V) se prepara oxidando 5 g/L de solución de arsénico (III) por ozono a pH 2 durante 3 horas. Ésta se vierte en el recipiente y luego se añade, bajo agitación, el sulfato de hierro (II) heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) necesario.

Los experimentos se realizan a distintos pH y ratios de concentración, la medición se efectúa por ICP-masas. En las siguientes gráficas se representa el arsénico no eliminado que permanece en disolución.

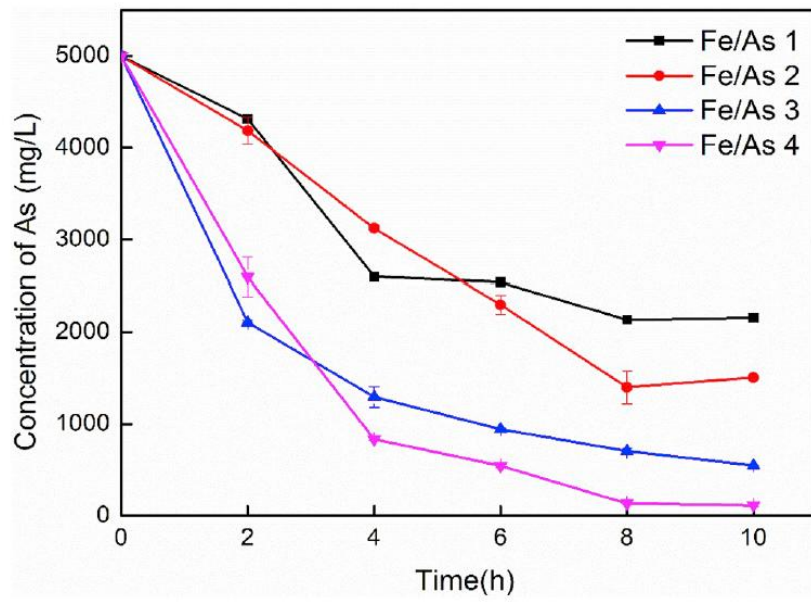


Figura 1. Variación de la concentración de arsénico restante en función del tiempo de cristalización. Precipitación a pH=2 [14].

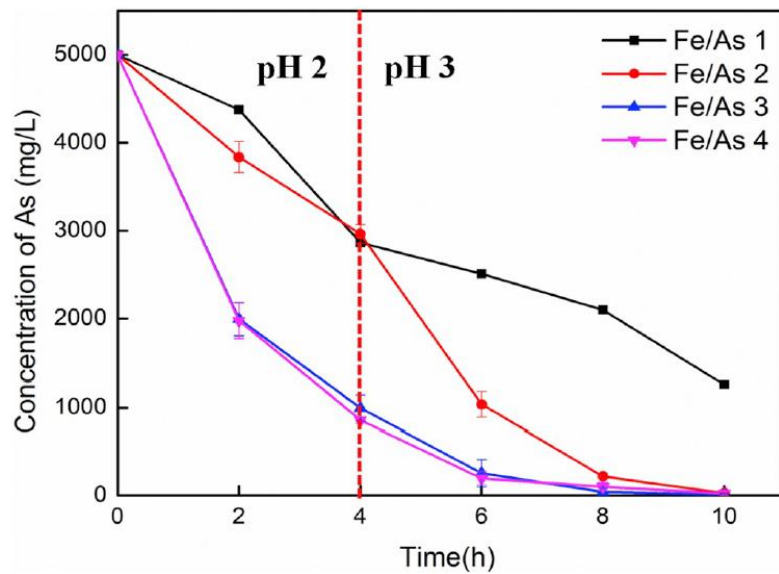


Figura 2. Variación de la concentración de arsénico restante en función del tiempo de cristalización. Primera etapa de precipitación a pH=2 y segunda etapa a pH=3 [14].

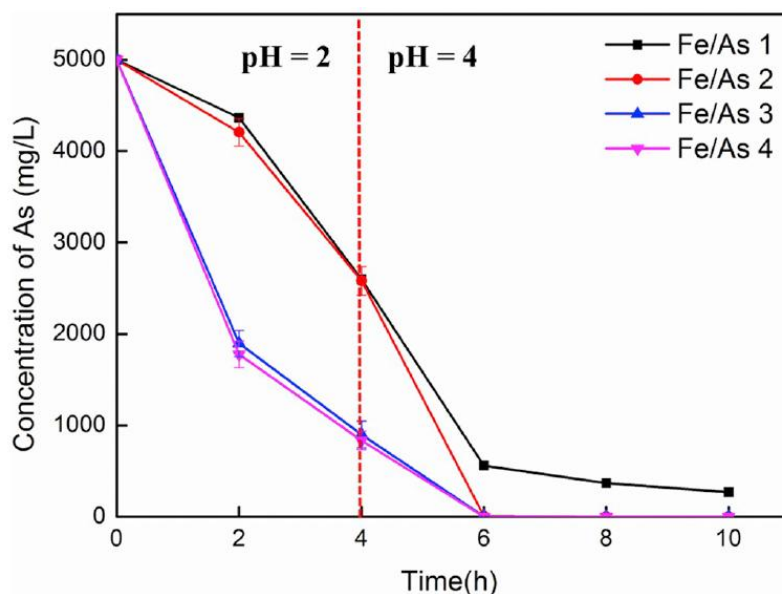


Figura 3. Variación de la concentración de arsénico restante en función del tiempo de cristalización. Primera etapa de precipitación a pH=2 y segunda etapa a pH=4 [14].

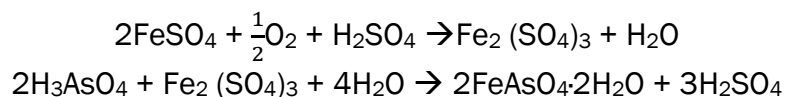
En resumen, los resultados de los experimentos son:

Tabla 3. Concentración de arsénico eliminado en cada experimento [14].

pH	Ratio molar Fe/As	Rendimiento de eliminación de As (%)
2	1	56,80
	2	69,90
	3	89,00
	4	97,70
1° precipitación pH=2 2ª precipitación pH=3	1	75,00
	2	99,50
	3	99,80
	4	99,60
1° precipitación pH=2 2ª precipitación pH=4	1	94,60
	2	99,97
	3	100,00
	4	99,99

A la vista de los resultados obtenidos, el pH de la solución se ajusta a 2 en la primera etapa de precipitación. En una segunda etapa, cuando el valor de pH se mejora a 3 o 4, casi todo el arsénico es eliminado de la solución a relaciones molares de Fe/As de 2, 3 y 4. Por otro lado, la relación molar

Fe/As óptima es a un valor de 4. Una mayor proporción molar de Fe/As da lugar a una disminución del tamaño de los granos de escorodita precipitada, pero aumenta la eliminación de arsénico. Las reacciones que suceden son las siguientes:



2. **Adsorción de arsénico (V) en una sola lámina de óxido de hierro** [15]. Las propiedades de unión del arsénico con hidróxidos de hierro (III) están fuertemente determinadas por la estructura de la superficie de las partículas y el tipo de complejos superficiales que se forman. Se han aplicado varios modelos de complejación de la superficie que difieren en complejidad para describir el mecanismo de captación de arsénico (V) en los hidróxidos de hierro (III), entre ellos el Modelo de Capacitancia Constante (MCC), el Modelo de Capa Difusa (MDC), el Modelo Básico de Popa (MEB) y el Modelo de Tres Planos (MPT) que incluye las opciones de Difusión de la Carga y Complejidad de Múltiples Sitios (CD-MUSIC). Un nuevo tipo de hidróxidos de hierro (III) 2D denominado óxido de hierro de una sola lámina (SSI) se ha preparado mediante la oxidación de LDHs (hidróxidos de doble capa) Fe(II)-Fe(III) (hierro(II)-hierro(III): Óxido Verde, GR). Las SSI con un espesor de 1nm y dimensiones laterales que varían de 20 a 100 nm, tienen la mayor relación superficie/volumen posible, idealmente con todos los grupos de Fe-OH expuestos a la solución.

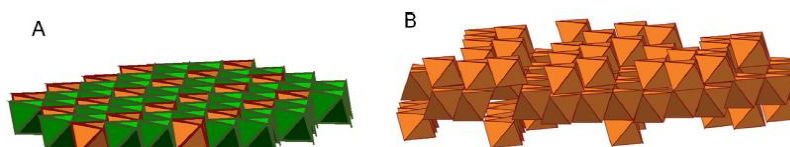


Figura 4. A) estructura de una capa de hidróxido de Fe(II)-Fe(III) de GR; B) estructura de una lámina única de óxido de hierro derivada de la GR (los octaedros verdes contienen Fe(II) y los octaedros marrones Fe(III) [15], [16].

En la SSI, la capa de hidróxido de hierro (III) de tipo GR (óxido verde) se altera mediante el desplazamiento vertical de los átomos de hierro de la capa original de hidróxido para formar

una estructura tricapa con poliedros de Fe unidos tanto por las esquinas como por los bordes [16]. Por lo tanto, la SSI tiene una mayor densidad de grupos hidroxilos coordinados simple o doblemente en comparación con las capas de hidróxido del metal original en la GR. En cuanto a la síntesis de la SSI [16] se realiza mediante el intercambio de aniones de cloruro GR intercalado (GRCI) con dodecanoato, seguido de oxidación en estado sólido y deslaminación en 0,1 M de NaOH. La síntesis de GRCI consiste en la coprecipitación de hierro (II) y hierro (III) en presencia de glicina a un pH constante de 8,0 ($\pm 0,1$).

A partir de otros estudios realizados anterior al mismo, se deduce, por medio de un análisis de Fourier y de análisis EXAFS se predice que el primer pico en la transformación de Fe K-edge EXAFS Fourier se debe exclusivamente a las correlaciones Fe-O [17], [18]. Por tanto, el arsénico (V) se une principalmente como bidentado de la esfera interior complejos con grupos OH de superficie coordinados individualmente.

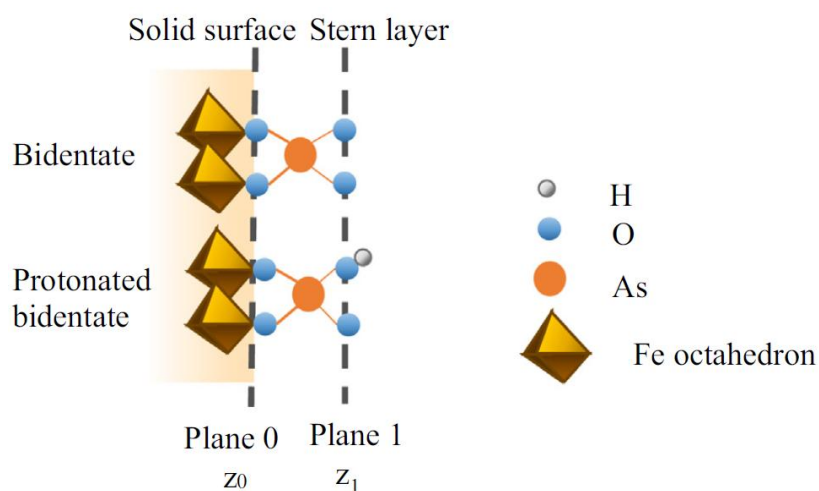


Figura 5. Dibujo esquemático de las interfaces de agua de la SSI mostrando dos complejos hipotéticos diferentes de la superficie de la esfera interior As(V) [15].

Se realizaron diferentes ensayos a distintas concentraciones iniciales de arsénico (V) ($270 \mu\text{mol/L}$ y $1,33 \mu\text{mol/L}$) y distinto pH. Los resultados obtenidos indicaron que se tenía una rápida la adsorción de arsénico (V). La adsorción de arsénico (V) depende del pH, observándose una disminución gradual al aumentar el pH. Dichos experimentos se muestran en el siguiente gráfico realizado:

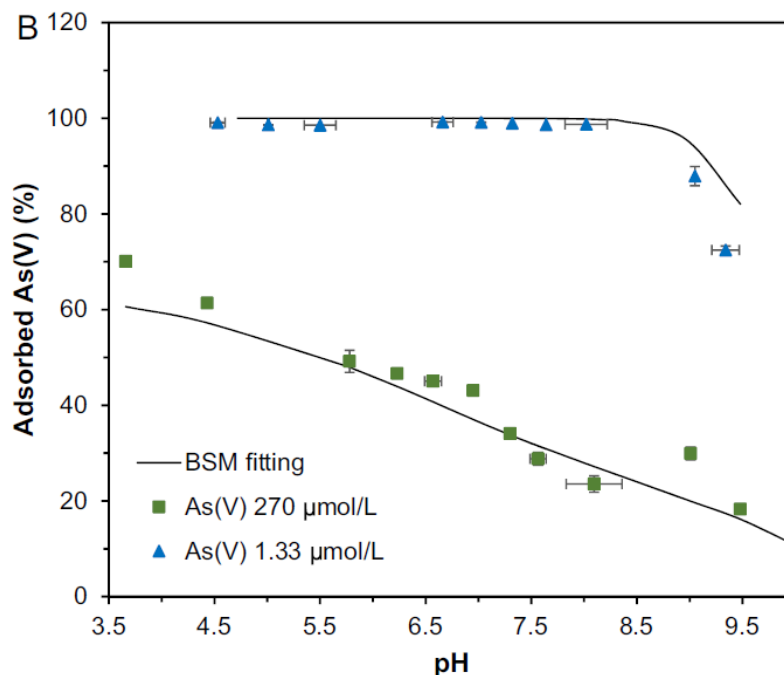


Figura 6. Cantidad de As(V) adsorbida para dos concentraciones distintas y a diferentes pH simulados por la simulación de 1-pK BSM (concentración inicial de As(V) 270 µmol/L y 1,33 µmol/L, respectivamente, dosis SSI 0,2 g/L, electrolito de fondo 0,01 mol/L) [15].

Finalmente, se dedujo que la adsorción de arsénico (V) disminuyó gradual con el aumento del pH. Así, más del 99% del arsénico (V) se adsorbió a pH 4 a una concentración inicial de arsénico (V) de 1,33 µmol/L, mientras que el 60% del arsénico (V) se adsorbió a pH 4 a una concentración inicial de arsénico (V) de 270 µmol/L en suspensiones SSI de 0,2 g/L.

- 3. Complejación de la superficie de arsénico en sistemas acuosos sobre nano adsorbentes de ferrita basados en Ni, Co, Mn y Cu sustituidos con Al [19].** Este estudio trata sobre el comportamiento de complejación de la superficie de las especies de arsénico adsorbidas en adsorbentes ternarios de óxido de metal (Ni-Al-Fe, Co-Al-Fe, Mn-Al-Fe y Cu-Al-Fe). Todos los procesos y experimentos se realizarán en condiciones de presión y temperatura ambiente, utilizando como medio agua ultra pura. El arsénico se adsorbe sobre estos adsorbentes formando diversas estructuras complejas de la superficie de la esfera interna relacionadas con la fijación bidentada. Además es posible la formación de accesos de la esfera externa. Los espectros XANES (Absorción de rayos-X cerca de la estructura del borde) se observan con una naturaleza de oxidación mixta del arsénico adsorbido sobre el adsorbente (es decir, el comportamiento redox del adsorbente).

A partir de diferentes experimentos se observa que la adsorción del arsénico depende de diferentes parámetros como la carga superficial [18].

Los óxidos de aluminio participan en la retención de arsénico sobre la interfase suelo/acuosos, en función del pH y la fuerza iónica, debido a sus grupos funcionales de aluminio, que pueden funcionar como posibles sumideros oxianiónicos. La adsorción de arsénico (III) aumenta con el aumento del pH en el rango (3 - 4,5), mientras que la adsorción disminuye con el aumento de pH en el rango (4,5 - 9) y la adsorción de arsénico (V) disminuye con el aumento del pH en el rango (3,5 - 9) [20].

También se indica que la incorporación de aluminio en los adsorbentes a base de hierro (III) para la eliminación de arsénico mejoró la estabilidad ante la desorción del mismo.

Además, los óxidos-hidróxidos de aluminio contribuyen a la fijación del arsénico ya que el arsénico puede ser liberado eventualmente al medio ambiente debido a la disolución reductora de los óxidos-hidróxidos de hierro (III), mientras que la solubilidad de los óxidos-hidróxidos de aluminio (III) no se ve tan fuertemente afectada por los procesos redox [21].

A continuación se muestra la figura 7 en la que se puede observar una representación esquemática de varias geometrías de complejos de superficie de esferas interiores. En ella, se representan las distancias de enlace interatómico como As-M, donde As son los átomos de arsénico y M se corresponde con el átomo del complejo estudiado (Ni-Al-Fe, Co-Al-Fe, Mn-Al-Fe o Cu-Al-Fe).

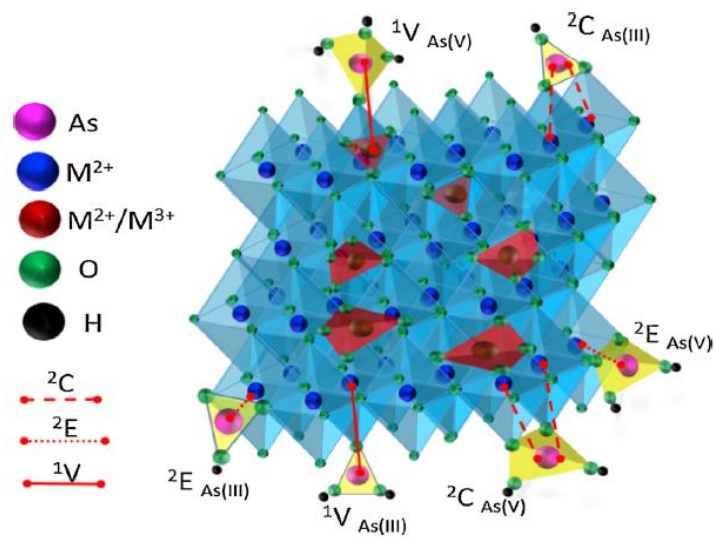


Figura 7. Representación esquemática de las estructuras complejas de la superficie de la esfera interior en los adsorbentes [19].

Tras los análisis realizados, se comprueba cómo la eliminación de arsénico del medio es de alta eficiencia. En dichos experimentos se parte de una concentración inicial de 100 ppm. A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos:

Tabla 4. Eliminación de arsénico. Cobertura de superficie de los adsorbentes individuales para los sistemas As(III) y As(V) (Ci=100 ppm) [19].

Adsorbente	Área superficial selectivo (SSA)	Carga de arsénico (q) (mg/g)	
		As(III)	As(V)
Ni-Al-Fe	111,00	80,00	98,70
Co-Al-Fe	79,84	112,00	76,00
Mn-Al-Fe	41,20	59,50	48,10
Cu-Al-Fe	82,61	58,20	47,80

Observando el mecanismo de adsorción, se tiene la siguiente figura (figura 8). A partir de los análisis realizados, los adsorbentes muestran una mejor complejación de la superficie de la esfera interna al formar geometrías bidentarias.

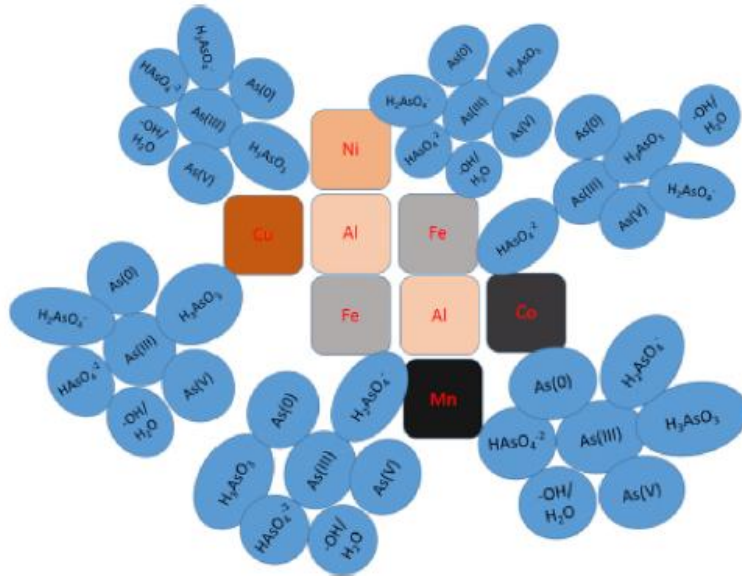


Figura 8. Formación de varios complejos de superficie de arsénico (adsorción interna, externa, simple) sobre nano adsorbentes de óxido de metal ternario [(Ni / Co / Mn / Cu) -Al-Fe]. [19].

Estos métodos presentan como inconveniente que son métodos muy específicos para la eliminación del arsénico, siendo alguno de ellos muy costoso de llevar a cabo. En este trabajo lo que se quiere conseguir es que un polímero que ya es capaz de eliminar otros metales pesados como hierro, zinc, etc; además pueda eliminar el arsénico y por ello ser un polímero con una mayor funcionalidad (o con un mayor espectro de posibilidades de eliminación).

2.3 Polímeros.

2.3.1 Polímeros empleados para la eliminación de arsénico y polímeros que presentan enlaces con hierro.

Existen una serie de polímeros que presentan grandes cualidades para la eliminación de arsénico del agua, ya sea por la presencia de enlaces con complejos de hierro o bien por otra serie de características que favorecen el atrapamiento del arsénico. Estos polímeros estudiados por medio de publicaciones son los siguientes:

- **Utilización de quitosana para la eliminación de arsénico del agua [22].** La quitosana es un biopolímero que posee unas propiedades especiales, principalmente debidas a la presencia de grupos amino primarios, permitiendo la formación de complejos o quelación de los iones metálicos en soluciones con pH próximo al neutro o ligeramente ácido (pH entre 5 y 7).

El método para su eliminación se divide en dos partes. En primer lugar, se obtienen las perlas de gel del polímero para obtener mejores resultados y en segundo lugar, las perlas se utilizan para la remoción del arsénico del agua.

Los experimentos realizados se hacen a diferentes pH's con el fin de averiguar a cuál de ellos es más óptimo el proceso, para una misma concentración de quitosana y de arsénico iniciales. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5. Resultados de la eliminación de arsénico con quitosana [22].

Muestra	pH	C _{quitosana} (g/L)	C _{i,As} (mg/L)	C _{f,As} (mg/L)	As eliminado
0	7	0,0000	0,128	0,12800	0,00000
1	7	0,2354	0,128	0,01585	0,11215
2	5	0,2350	0,128	0,01660	0,11140
3	3	0,2370	0,128	0,04040	0,08760

Donde C_{quitosana} es la concentración empleada de quitosana, C_{i,As} es la concentración inicial de arsénico y C_{f,As} es la concentración final medida de arsénico.

Como se puede comprobar, los mejores resultados se obtienen a pH's 5 y 7, siendo muy diferente el valor obtenido a pH más ácidos.

- **Síntesis de nanopartículas magnéticas y termosensibles a base de óxido de hierro para aplicaciones biomédicas [23].** En el estudio se explica la creación de nanopartículas de óxido de hierro injertadas con PDMAEMA (2-(dimetilamino)etil metacrilato) [24], polipéptido de un solo bloque (VPGIG)₂₀ o diblock ELPs (polipéptido de dos bloques). Para ello se modifica el PEG (polietilenglicol) en uno de sus extremos añadiendo un grupo de anclaje de ácido fosfórico que se utiliza posteriormente para anclar las cadenas de óxidos de hierro, realizando este proceso a un pH ácido, aproximadamente 2,5.

- **Efecto de la estabilidad de la conformación de los quelantes poliméricos de hierro [25].** Utilizando los quelantes de hierro se comprueba cómo la simple conjugación de pequeños ligandos de catecoles de moléculas a una cadena de polilaminas resulta un aumento de más de 8-9 órdenes de magnitud de la afinidad de los ligantes de hierro. El quelante de hierro más fuerte que se haya conocido. Los quelantes de polímeros flexibles pueden lograr las mayores afinidades metálicas posibles de los ligandos conjugados debido a su capacidad de lograr una conformación óptima a través de la reorganización de las conformaciones.
- **Membranas poliméricas PE-g-MA-Al/AIPO₄ impregnadas con Fe, Al - Uso en recuperación del efluente de la galvanoplastia [26].** En este ensayo se han desarrollado membranas filtrantes de materiales híbridos de polietileno de alta densidad modificado con anhídrido maleico e ionizado con hidróxido de aluminio (PE- g -MA- Al) (matriz orgánica) y fosfato de aluminio amorfo puro (AIPO₄) o impregnado con hierro y/o aluminio (fase dispersa inorgánica).
Estas membranas se obtienen a partir de las composiciones de PE-g-MA-Al (M₁), PE-g-MA-Al/AIPO₄ (M₂) PE-g- MA-Al/AIPO₄-Al (M₃), PE-g-MA-Al/AIPO₄-Fe (M₄) y PE-g-MA-Al/AIPO₄-Fe,Al (M₅), en una proporción de 97/3% en masa, utilizando fundición con xileno caliente como solvente y bajo reflujo. Se utilizan diferentes métodos como microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia infrarroja (FTIR) para demostrar la influencia de los materiales de los materiales y de la metodología utilizada, en las propiedades de los materiales híbridos finales obtenidos. Los experimentos realizados indican que hierro y/o el aluminio afectan en la morfología de la membrana y, por tanto, en la aplicación de las mismas en ultrafiltración. Los mejores resultados se obtuvieron para las membranas formadas con aluminio (M₁ y M₃) para la recuperación de metales pesados.

2.3.2 Polímeros tipo elastina ELR.

Los polímeros ELR (Elastin Like Recombinamers) son un tipo de biopolímeros recombinantes con una estructura basada en la elastina, la proteína elástica extracelular que se encuentra en los animales superiores. Como estos polímeros se diseñan a nivel genético, la alta precisión de la construcción de los genes se transfiere al polipéptido final, por lo tanto, sus propiedades físicas y bioactivas pueden ajustarse con precisión según se desee utilizando

la composición de aminoácidos más apropiada para las diferentes aplicaciones biomédicas y nanotecnológicas [27].

La proteína elastina es uno de los constituyentes más importantes de la matriz extracelular. Su papel principal es aportar elasticidad a los tejidos y además juega un papel importante en la regulación del comportamiento celular y en promover la reparación tisular [28]. Está compuesta por secuencias de aminoácidos, que se repiten a lo largo de su cadena, siendo estos aminoácidos: prolina (P), alanina (A), valina (V), leucina (L), isoleucina (I) y glicina (G) [29]. La secuencia de aminoácidos en la cual se producen repeticiones con algunas como VPGG, VPGVG, APGVG y VGVAPG. La secuencia más común es GVGVP repetida 11 veces [30]. Gracias a la estructura formada por estas secuencias repetidas, le aportan a la elastina la propiedad de poder recuperarse completamente después de miles de deformaciones elásticas sin perder sus propiedades mecánicas [28].

Los polímeros tipo elastina ELR más comúnmente utilizados poseen la repetición de aminoácidos $(VPGXG)_n$, donde "X" puede ser cualquier aminoácido excepto prolina (P), y donde "n" representa el número de repeticiones del pentapéptido [28].

Los ELR se producen a partir del denominado "ligación" y "subclonaje" por el cual se modifica el ADN que replicará la célula. En el proceso de "ligación" o inserción en el plásmido de una cadena de ADN recombinante complementario al que se quiere obtener, gracias a la acción de las enzimas ligasas. El plásmido se introduce en la bacteria (*Escherichia Coli*) mediante choque térmico. A continuación se realiza el "subclonaje", es decir, se recrean las condiciones óptimas para que la bacteria, en la cual se ha insertado el ADN modificado, se replique y produzca el polímero deseado. Para obtener gran cantidad del polímero se introducirá la bacteria en fermentadores, y, una vez alcanzado el máximo de la curva de crecimiento biológico (inicio de la fase estacionaria), se extrae el polímero por medio de la ruptura de las células por alta presión, ya que se trata de un producto intracelular. Finalmente se procede a la purificación del polímero.

Las propiedades que presentan los ELR son debidas a su diseño particular, además de las propiedades que posee la elastina. Las propiedades más reseñables de los mismos son las propiedades mecánicas, la capacidad de autoensamblaje y la "temperatura de transición inversa". Debido a esta "temperatura de transición inversa", el ELR en un medio acuoso, por debajo de la temperatura de transición, las cadenas de polímeros libres adoptan conformaciones de bobinas aleatorias, mientras que por encima de ella se pliegan en una estructura organizada. Es decir, la estructura se vuelve más ordenada a medida que aumenta la temperatura. Este fenómeno de

transición se produce principalmente por la temperatura, aunque también responde a los efectos de otros estímulos, como el pH, la fuerza iónica y la concentración [27].

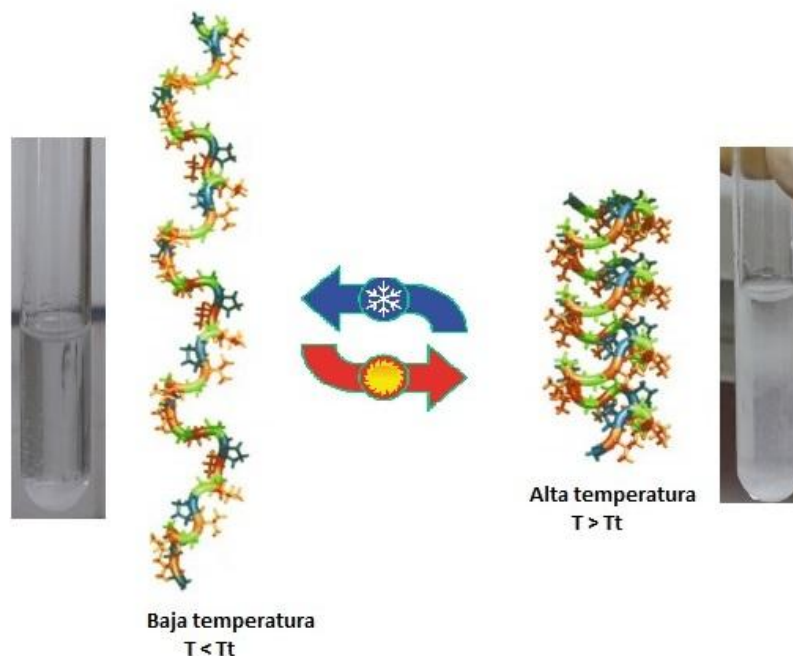


Figura 9. Cambio conformacional en función de la temperatura (Temperatura de transición inversa).

Gracias a los estudios realizados, el grado de conocimiento alcanzado en relación a la estructura y función de estos materiales, su biocompatibilidad, sus propiedades mecánicas y su naturaleza inteligente ha aumentado significativamente, lo que ha convertido a los ELR en unos compuestos muy interesantes para la investigación biomédica y biotecnológica. En primer lugar se ha aplicado a la ingeniería de tejidos. Además se está investigando en nuevas posibles aplicaciones como la purificación proteica [28].

3. Procedimiento experimental y métodos.

3.1 Materiales.

- **Material:**
 - Vasos de precipitados de 100 y 250 ml
 - Matraces aforados de 5, 10, 25, 50 y 1 L
 - Micropipetas de 2-20 μ l y 100-1000 μ l
 - Pipeta de 1-10 ml
 - Falcon modado de 50 ml
 - Eppendorf de 5 ml
 - Varilla
 - Papel de filtro de 0,2 μ m
 - Embudo Buchner
 - Papel de filtro de 0,45 μ m.
 - Pinzas
 - Cuentagotas
 - Mascarilla
 - Guantes protectores
 - Parafilm

- **Reactivos:**
 - Agua miliQ (ultra pura)
 - Biopolímeros: VOKx72 y HRDG6
 - Arsenito de sodio: NaAsO₂

- **Equipos:**
 - Microbalanza METTLER TOLEDO
 - Centrifugadora Thermo Scientific. SORVALL ST 16R
 - Horno J.P SELECTA
 - Analizador ICP-MS
 - Campana de gases

3.2 Métodos.

El método experimental seleccionado es la coprecipitación con biopolímeros. Por medio de este método se pretende eliminar el metal pesado en cuestión, en este caso el arsénico, por medio de la adherencia del mismo a los grupos funcionales libres del polímero empleado. Para ello se efectúan los experimentos siguiendo el trabajo de investigación previamente realizado indicado en la bibliografía [1]. Al igual que en dicho trabajo, se emplean los polímeros VOKx72 y HRGD6 para los ensayos por la afinidad que presentan con gran variedad de metales [1]. Para la realización de los cálculos de los experimentos se utiliza el modelo de Langmuir. Aunque este modelo no se corresponda exactamente con el mecanismo que tiene lugar, se tratará de estudiar si se adapta de manera adecuada al mismo.

3.2.1 Coprecipitación y microprecipitación.

Se aplica un método de coprecipitación con medios específicos, donde el medio específico tendrá una precedencia biológica ya que se trata de un biopolímero producido por el metabolismo de bacterias (*Escherichia coli*). La precipitación puede ocurrir como consecuencia de diferentes factores como son la variación de pH o la variación de temperatura, por ejemplo. En este caso, debido a la propiedad de temperatura de transición inversa que presenta el polímero, se aumenta la temperatura para favorecer la precipitación del mismo.

La **coprecipitación** es el proceso por el cual una especie que normalmente es soluble se separa de la disolución durante la formación de un precipitado. Se trata de especies solubles que precipitan sobre la superficie de un sólido que se precipitó con anterioridad [31].

Los factores que afectan a la coprecipitación son los siguientes [32]:

- Área superficial del precipitado cristalino: cuanto mayor es la superficie del precipitado, más posiciones son accesibles a los adsorbidos en las capas primarias y secundarias.
- Concentración de iones adsorbidos: cuanto mayor es la concentración de los iones en solución en contacto con los cristales, mayor es la probabilidad de contaminar el precipitado.
- Carga del ion adsorbido: cuanto mayor es la carga de un ión, mayor es su tendencia a ser adsorbido.

- Solubilidad de la sal: cuanto mayor es la solubilidad de la sal producida por adición de iones de la capa secundaria a la capa primaria de iones, mayor es la tendencia de ambos iones a ser adsorbidos sobre los cristales del precipitado principal.
- Deformabilidad de los iones: entre iones con la misma carga, el de mayor tamaño es adsorbido más fuertemente.

Existen varios tipos de coprecipitación:

- **Adsorción en la superficie** [33]: su efecto es arrastrar como contaminante de superficie a un compuesto que en otras condiciones normalmente sería soluble.
- **Formación de cristales mixtos (inclusión)** [31]: uno de los iones de la red cristalina de un sólido se reemplaza por un ion de otro elemento (contaminante).
- **Oclusión** [33]: cuando un cristal crece con rapidez durante la formación del precipitado, pueden quedarse atrapados u ocluidos iones extraños de la capa de contra-ion, dentro del cristal en crecimiento.
- **Atrapamiento mecánico** [33]: Sucede cuando los cristales permanecen muy juntos durante el crecimiento. Varios cristales crecen juntos y como consecuencia, una proporción de la solución queda atrapada en pequeños huecos.

La **microprecipitación** es la precipitación del metal junto al agente de secuestro como consecuencia de un cambio en las condiciones locales como pueden ser los cambios de pH, temperatura, etc [12].

3.2.2 Polímero VOKx72.

El polímero VOKx72 es un polímero tipo ELR que se empleará como coprecipitante en los experimentos realizados. Este polímero se ha seleccionado siguiendo el estudio realizado previamente sobre secuestro de metales [1] con el fin de comprobar su efectividad.

La secuencia de aminoácidos que presenta dicho polímero es la siguiente:

MESLLP - (VPGKG)₇₂ - V

La nomenclatura de los aminoácidos se presenta en el anexo I.

Las propiedades del VOKx72 se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6. Propiedades físicas del polímero VOKx72.

Masa atómica (Da)	32368
--------------------------	-------

3.2.3 Polímero HRGD6.

El polímero HRGD6 es un polímero tipo ELR que se empleará como coprecipitante en los experimentos realizados. Este polímero se ha seleccionado siguiendo el estudio realizado previamente sobre secuestro de metales [1] con el fin de comprobar su efectividad.

La secuencia de aminoácidos que presenta dicho polímero es la siguiente:

MGSSHHHHHSSGLVPRGSHMESLLP
[(VPGIG)₂(VPGKG)(VPGIG)₂]₂AVTGRGDSPASS[(VPGIG)₂(VPGKG)(VPGIG)₂]₂.

La nomenclatura de los aminoácidos se presenta en el anexo I.

Las propiedades del HRGD6 se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 7. Propiedades físicas del polímero HRGD6.

Masa atómica (Da)	60525			
Transición inversa	T(°C)	32	37,81	30
	pH	11	7,5	10,5
	Medio	Agua miliQ	Agua miliQ	Agua miliQ

3.2.4 Modelo de Langmuir.

Se trata de un modelo comúnmente empleado en sistemas de tipo sólido-líquido, sólido-vapor, sólido-gas, líquido-vapor y líquido-líquido en procesos de adsorción. Aunque este modelo no se corresponda con el mecanismo que tiene lugar con exactitud (coprecipitación), se estudiará si se adapta a los requerimientos del estudio. Cuando el proceso de adsorción o concentración se produce sobre una superficie sólida, la isoterma de adsorción se construye a partir del balance de material entre la fase fluida y el sólido en contacto [34]. La isoterma de Langmuir es aplicable cuando hay una fuerte interacción específica entre el soluto y el adsorbente. El intercambio de iones y las adsorciones de tipo afinidad generalmente siguen a la isoterma de Langmuir. Esta isoterma predice la saturación de los sitios de adsorción por moléculas de solutos, indicando la formación de monocapas [35]. El modelo tiene en cuenta una serie de suposiciones iniciales [36]:

- 1) La superficie proporciona un cierto número de posiciones para la adsorción y todas son equivalentes.
- 2) Sólo se adsorbe una molécula sobre cada posición.
- 3) Su adsorción es independiente de la ocupación de las posiciones vecinas (las moléculas adsorbidas no interaccionan entre sí).

Se trata de un modelo ideal pero sería posible modificarlo para tener en cuenta las posibles interacciones generadas por otras especies presentes en la adsorción. Para ello se emplea el modelo de Langmuir multicomponente.

La ecuación que sigue el modelo de Langmuir es la siguiente [13], [12]:

$$q_A = \frac{q_{A,max} \cdot K_{A,C} \cdot C_{A,f}}{1 + K_{A,C} \cdot C_{A,f}} \quad (I)$$

Donde:

- q_A es la cantidad de especie A adsorbida o capacidad de adsorción en mg/g.
- $q_{A,max}$ es la cantidad máxima de especies A que pueden adsorber por unidad de masa de adsorbente en mg/g.
- $K_{A,C}$ es la constante de equilibrio de adsorción o constante de Langmuir en dm^3/mg .
- $C_{A,f}$ es la concentración final de especie A en mg/dm^3 .

La cantidad de especie A adsorbida en un proceso en el cuál el aumento del consumo de metal por el adsorbente alcanza un equilibrio, se calcula como [12], [37]:

$$q_A = \frac{C_{A,i} - C_{A,f}}{X} = (C_{A,i} - C_{A,f}) \cdot \frac{V_d}{m_b} \quad (II)$$

Donde:

- $C_{A,i}$ es la concentración inicial de la especie A en mg/dm³.
- $C_{A,f}$ es la concentración de la especie A en disolución final en mg/dm³.
- X es la concentración de biomasa (masa de adsorbente por unidad de volumen).
- V_d es el volumen de disolución en dm³.
- m_b es la cantidad de adsorbente en g.

La determinación de la cantidad de soluto retenido por el adsorbente se realiza a temperatura constante, por tanto, la relación entre la cantidad de especie A adsorbida por unidad de masa de adsorbente y la concentración de especie A en el equilibrio se conoce con el nombre de isoterma de adsorción [12].

Los parámetros experimentales se pueden obtener a partir de la linealización de la ecuación (I) del modelo de Langmuir [37], [38]:

$$\frac{C_{A,f}}{q_A} = \frac{k_d}{q_{A,max}} + \frac{1}{q_{A,max}} \cdot C_{A,f} \quad (III)$$

Siendo

$$k_d = \frac{k_1}{k_2} \quad (IV)$$

Donde:

- k_d es la constante de inestabilidad o disociación del complejo.
- k_1 es la constante de velocidad de adsorción.
- k_2 es la constante de velocidad de desorción.

Los parámetros de equilibrio k_d y $q_{A,max}$ para la isoterma de Langmuir se determinan a partir de los valores obtenidos de pendiente y ordenada en el origen de la regresión lineal de $C_{A,f}/q_A$ Vs $C_{A,f}$. En dicha representación se

obtiene $1/q_{A,\max}$ a partir de la pendiente de la recta y $K_d/q_{A,\max}$ de la ordenada en el origen.

El proceso de adsorción se puede plantear como el siguiente equilibrio entre la especie A que se desea adsorber y el adsorbente del siguiente modo [36]:



Donde:

- A: especie adsorbida.
- M: adsorbente.
- AM: complejo especie-adsorbente.

La inversa de la constante de disociación de un complejo o la constante de inestabilidad (k_d) es la constante de estabilidad o constante de formación, k_f . A partir de esta constante de formación se puede evaluar la estabilidad de los complejos de modo que un complejo será más estable cuanto mayor sea su constante de formación [39], [40].

$$k_f = \frac{1}{k_d} = \frac{[AM]}{[A][M]} = \frac{k_2}{k_1} \quad (VI)$$

Las suposiciones que se tienen en cuenta en el modelo de Langmuir no son completamente ciertas debido a que [36]:

- Las posiciones de adsorción no son totalmente homogéneas ya que en la superficie aparecen bordes, esquinas, etc. En función de la posición ocupada habrá diferencias de estabilidad entre los enlaces, por tanto, se ocuparán primero aquellas posiciones que den lugar a la formación de un enlace más estable.
- Las interacciones que se dan entre las moléculas adsorbidas pueden tener gran repercusión. El grado de ocupación está altamente ligado a la afinidad entre adsorbato y adsorbente.

Para aplicar este modelo se considerará el coprecipitante empleado (biopolímero) como adsorbente, con ello se comprueba el ajuste del modelo de Langmuir al mecanismo objeto de estudio.

3.2.5 Rendimiento de eliminación.

El rendimiento de eliminación (η_{elim}) expresado en tanto por ciento (%) se calculará a partir de la siguiente ecuación que relaciona la concentración inicial de la especie A en la disolución con la concentración final de la misma:

$$\eta_{elim}(\%) = \frac{C_{A,i} - C_{A,f}}{C_{A,i}} \cdot 100 \quad (VII)$$

3.2.6 Capacidad de eliminación o retención.

La capacidad de eliminación (C_{elim}) o capacidad de retención indica la relación entre la cantidad de especie A que precipita junto al polímero y la cantidad de coprecipitante (polímero) necesario para retenerlo. Por tanto, sería un indicativo de la viabilidad del proceso ya que muestra la cantidad de polímero que es necesario emplear para llegar al objetivo deseado.

Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$C_{elim} = \frac{C_{A,i} - C_{A,f}}{C_{pol}} \quad (VIII)$$

Donde:

- C_{elim} es la capacidad de retención o eliminación en microgramos (μg) de especie A por gramos (g) de polímero.
- C_{pol} es la concentración del polímero en g/L.

3.2.7 Espectroscopia de absorción atómica ICP-MS.

La espectroscopia masas por plasma acoplado inductivamente ICP-MS es altamente sensible y capaz de determinar, de forma cuantitativa, muchos de los elementos de la tabla periódica que tengan un potencial de ionización menor que el potencial de ionización del argón a concentraciones muy bajas, como pueden ser nanogramos por litro (ng/L) o partes por trillón (ppt) [41].

El plasma de acoplamiento inductivo (ICP) es una fuente de ionización a presión atmosférica que, junto a un espectrómetro de masas (MS) a vacío para separar y detectar iones, constituye el equipo de ICP-MS [42].

La muestra líquida es vaporizada en el sistema nebulizador gracias a un plasma de argón. A continuación se ioniza por la acción de un campo

magnético oscilante inducido por una corriente de alta frecuencia. Los iones una vez formados pasan al espectrómetro de masas donde son separados según su relación carga/masa en el filtro cuadrupolar, a través de una interfase de vacío creciente. Finalmente, llega a un detector donde se evalúa la abundancia de cada una de las masas en la muestra.

El equipo empleado para dicho análisis será el presente en el Laboratorio de Técnicas Instrumentales (LTI) de la Universidad de Valladolid. Este equipo es un espectrómetro de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo: ICP-MS con Sistema de Reacción Octopolar HP 7500c de Agilent [42].

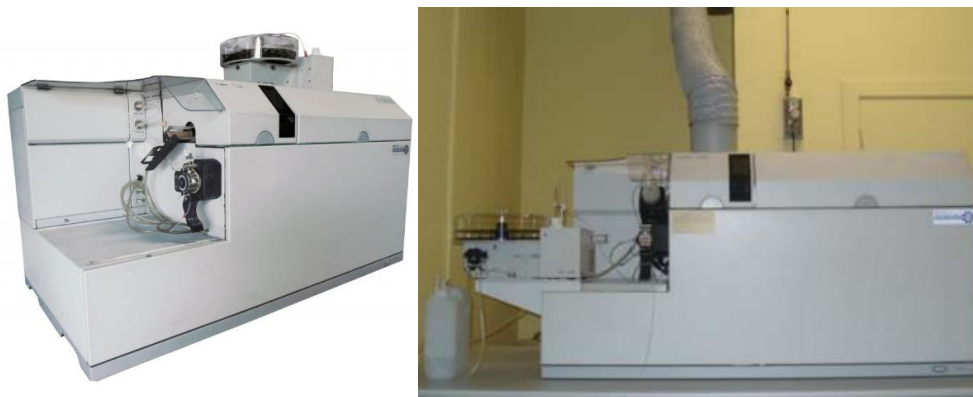


Figura 10. ICP-MS con Sistema de Reacción Octopolar HP 7500c de Agilent [43], [44].

3.3 Procedimiento experimental.

Se realizan diferentes experimentos previos con resultados ya conocidos para comprobar que el proceso era correcto. Posteriormente se procede a efectuar los experimentos en cuestión.

3.3.1 Preparación de muestras patrón y disolución madre.

- **Disolución madre:** se desea preparar una disolución con una concentración de 10 ppm. Para ello se disuelve la sal de arsénico, en este caso arsenito de sodio (NaAsO_2), en agua miliQ. En esta etapa de proceso se han pesado 17,34 mg de compuesto y se disuelven en 1 L de agua miliQ. Esta disolución se prepara en campana con mascarilla y guantes para evitar el contacto con el compuesto ya que es altamente tóxico.

- **Muestras patrón:** se toman alícuotas a diferentes concentraciones. La concentración de partida será de $C_0=50 \mu\text{g/L}$, las siguientes serán de $C_1=35 \mu\text{g/L}$, $C_2= 20 \mu\text{g/L}$ y $C_3= 15 \mu\text{g/L}$. Para ello se toma con la micropipeta la cantidad necesaria obtenida a partir del cálculo realizado por la siguiente ecuación:

$$C_a \cdot v_a = C_b \cdot v_b \quad (\text{IX})$$

Donde:

- C_a es la concentración inicial de la disolución en mg/L.
- V_a es el volumen inicial de la disolución en L.
- C_b es la concentración final de la disolución en mg/L.
- V_b es el volumen final de la disolución en L.

Una vez tomada la cantidad necesaria con la micropipeta se vierte en un matraz aforado de 5 ml y se enrasa con agua miliQ. Se agita y se vierte en el eppendorf de 5 ml, marcando este eppendorf con la nomenclatura correspondiente.

Se repite este proceso para cada una de las muestras patrón.

Este paso, al igual que el anterior, se realiza en campana con las medidas de seguridad necesarias.

- **Dilución de la disolución madre:** en un matraz de 50 ml se toma la cantidad necesaria de la muestra madre tal y como se indica en la ecuación (IX), de tal modo que la concentración de esta nueva disolución sea de $50 \mu\text{g/L}$. La concentración de partida se tomó como referencia de un valor medio anual de aguas urbanas contaminadas [45], [46] con el objetivo de poder determinar si el método era factible para poder eliminar el contaminante y hacer que el agua fuese apta para el consumo humano.

3.3.2 Preparación de la disolución madre de polímeros.

Los ensayos se realizan con dos tipos de polímero por separado: HRGD6 y VOKx72.

Se realiza una disolución madre del polímero en estado sólido en agua miliQ en las proporciones necesarias para obtener la concentración final deseada, en este caso $C_{\text{pol}}=20 \text{ g/L}$. Para ello se pesan 500 mg de cada uno de los polímeros y se disuelven enrasando en 25 ml de agua.

Esta disolución se hace a baja temperatura, introduciendo el matraz donde se realiza la disolución en hielo, ya que el polímero tiene temperatura de transición inversa; es decir al aumentar la temperatura por encima del valor correspondiente solidifica mientras que al disminuirla por debajo de un valor dado se disuelve.

3.3.3 Preparación de las disoluciones problema.

- **Mezcla de disoluciones:** Se mezclan ambas disoluciones, la del polímero y la del arsénico, en proporciones 1:1. Para ello se toma 5 ml de la muestra madre de polímero que se vaya a ensayar con una pipeta y se deposita en un matraz de 10 ml. De la muestra de arsénico, ya diluida en el matraz de 50 ml, se toman otros 5 ml de igual modo y se vierten en el mismo matraz de 10 ml en que se ha añadido la disolución de polímero. Se mezcla adecuadamente. Por último, se trasvasa la disolución a un falcon morado de 50 ml.
- **Precipitación:** Se sella la apertura del falcon con parafilm y se introduce en la estufa durante 2 horas a una temperatura de 70°C para asegurar la precipitación del polímero. En esta etapa se obtiene una mezcla de líquido con cierta turbidez debida a la precipitación del polímero.
- **Separación de fases:** una vez transcurrido el tiempo en la estufa, se centrifuga la muestra a 5000 rpm y 40°C durante 20 min para separar claramente la parte sólida de la muestra de la líquida y acto seguido se filtra colocando un filtro de papel, de tamaño de poro 0,45 µm, en un embudo Buchner, quedando el polímero retenido en el precipitado. La fase líquida obtenida se introduce en eppendorf de 5 ml.

Todos los experimentos se realizaron a pH neutro ya que por pruebas realizadas anteriormente se comprueba que se obtienen los mejores resultados [1].

3.3.4 Análisis de las disoluciones.

Los eppendorf de 5 ml con las muestras patrón y las muestras problemas obtenidas en el proceso se llevan a analizar al LTI (Laboratorio de Técnicas Instrumentales) de la Universidad de Valladolid, donde se analiza por espectroscopia de absorción atómica ICP-MS y se obtiene por este

procedimiento la concentración final del arsénico en la disolución en partes por millón (ppm).

El valor de la concentración final obtenida del arsénico es menor que la inicial ya que parte del mismo ha sido eliminado por el biopolímero al presentar una cierta afinidad por el arsénico.

4. Cálculos, resultados y discusión.

4.1 Resultados obtenidos.

Los resultados finales se obtienen por medio un análisis realizado en el LTI (Laboratorio de Técnicas Instrumentales) de la Universidad de Valladolid, a partir de la técnica de Espectrometría Atómica IPC-Masas debido a su mayor límite de detección, ya que la concentración de las muestras es muy pequeña.

Tal y como ya se ha mencionado en el apartado de marco legislativo (apartado 2.1.4), según la normativa vigente, el valor máximo permitido de concentración de arsénico en aguas de consumo humano es de 10 µg/L (Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.).

La concentración de partida de las muestras analizadas, tal y como se menciona en el procedimiento experimental es de 50 µg/L, tomando este valor de como referencia de un valor medio anual de aguas urbanas contaminadas [45], [46] con el objetivo de poder determinar si el método es factible para lograr eliminar el contaminante y hacer que el agua sea apta para el consumo humano.

Realizando el análisis se obtienen los siguientes valores:

Tabla 8. Resultados del análisis de arsénico.

Tipo	Referencia	C _{As} (µg/L)
Muestras patrón de arsénico	C ₀	53,88
	C ₁	35,16
	C ₂	18,59
	C ₃	15,41
Muestras problema polímero HRGD6	P ₁	33,44
	P ₂	29,74
	P ₃	35,53
Muestras problema polímero VOKx72	P ₁	35,18
	P ₂	34,43
	P ₃	32,24

Donde C_{As} es la concentración de arsénico en la muestra, C₀, C₁, C₂ y C₃ son las concentraciones, en orden decreciente, de las muestras patrón y P₁, P₂ y P₃ son las concentraciones de las muestras problema una vez analizadas.

A la vista de los resultados obtenidos, se eliminan aproximadamente 20 µg/L de arsénico en cada experimento.

Además, cabría resaltar que la depuración del agua para eliminar el arsénico presente no es suficiente con ninguno de los dos polímeros ensayados, ya que en todos los casos, y para cada uno de los dos polímeros, el valor obtenido es muy superior al valor establecido por la legislación (10 µg/L). Por tanto, sería necesario mejorar el proceso para lograr los objetivos establecidos.

4.2 Cálculos y discusión.

A partir de los valores obtenidos, mostrados en el punto anterior, se realizan los cálculos oportunos, tal y como se indica en la metodología seguida, a partir del modelo de Langmuir.

A continuación se muestran los valores obtenidos a partir de dichos cálculos y se representa gráficamente el cociente entre la concentración final obtenida y la capacidad de adsorción (eliminación) del polímero ($C_{A,f}/q_A$) frente a la concentración final obtenida ($C_{A,f}$). A partir de la regresión lineal realizada para los puntos obtenidos, se pueden calcular las constantes de disociación del complejo (K_d) y las constantes de formación del complejo (K_f), comentados en el apartado 3.2.4

- **Biopolímero HRGD6:**

Se calcula la capacidad de adsorción, q_A , a partir de la ecuación (II), conociendo las concentraciones finales e iniciales, el volumen de disolución y la masa de coprecipitante de manera experimental. El valor de $C_{A,f}/q_A$ se calcula dividiendo el valor de la concentración final obtenido para cada muestra problema analizada por el valor calculado de q_A .

Tabla 9. Cálculos para los experimentos con el polímero HRGD6 a partir del modelo de Langmuir.

Modelo Langmuir HRGD6 Parámetros	Muestras		
	P ₁	P ₂	P ₃
q_A (mg/g)	2,044	2,414	1,835
V_d (dm ³)	0,010	0,010	0,010
m_b (g)	0,100	0,100	0,100
$C_{A,f}/q_A$	16,360	12,320	19,362

Donde P₁, P₂ y P₃ son las muestras problema analizadas.

A partir del ajuste lineal realizado se representa $C_{A,f}/q_A$ Vs $C_{A,f}$, obteniéndose la siguiente representación gráfica:

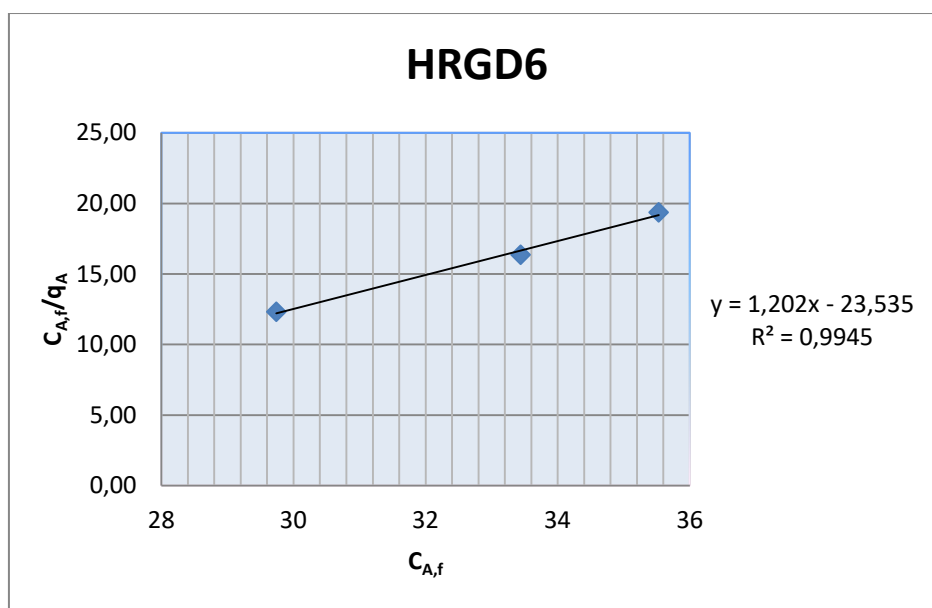


Figura 11. Modelo de Langmuir para los experimentos con el polímero HRGD6.

A la vista de la representación gráfica, se puede asumir que los cálculos realizados aplicando el modelo de Langmuir son correctos ya que el ajuste obtenido presenta un coeficiente de regresión muy próximo a 1. Por tanto, el mecanismo de coprecipitación se ajusta al modelo de Langmuir.

A partir de la ecuación de la recta obtenida por el ajuste lineal, y siguiendo la ecuación (III), se obtienen los valores de las constantes del modelo de Langmuir: cantidad máxima de especies A que pueden adsorber por unidad de masa de adsorbente ($q_{A,max}$) y constante de disociación o inestabilidad del complejo (k_d). Siendo $k_d/q_{A,max}$ la ordenada en el origen y $1/q_{A,max}$ la pendiente de la recta.

El valor de la constante de formación k_f , se obtendrá tal y como se indica en la ecuación (VI), a partir de la constante de disociación.

Los valores de las constantes y parámetros obtenidos son:

Tabla 10. Valores de las constantes del modelo de Langmuir para ensayos con el polímero HRGD6.

$q_{A,max}$ (mg/g)	0,832
k_d	19,580
k_f	0,051

El valor de la constante de disociación es varios órdenes de magnitud superior a la constante de formación, lo cuál podría ser indicativo de que el proceso aplicado no es óptimo y que el complejo formado no sería estable.

El rendimiento de eliminación calculado a partir de la ecuación (VII):

Tabla 11. Rendimiento de eliminación para el polímero HRGD6.

Muestra HRGD6	η_{elim} (%)
P ₁	37,94
P ₂	44,80
P ₃	34,06

Donde P1, P2 y P3 son las muestras problema analizadas.

Los rendimientos obtenidos son valores bajos aunque tratándose de un proceso experimental son aceptables.

Realizando una media aritmética a los valores obtenidos se tiene como valor de rendimiento medio:

$$\overline{\eta_{elim}} = 38,93\%$$

La capacidad de retención del polímero o capacidad de eliminación aporta información significativa sobre la eficacia del proceso, viene dada a partir de la ecuación (VIII):

Tabla 12. Capacidad de eliminación para el polímero HRDG6.

Muestra HRGD6	C _{elim} ($\mu\text{g As/g polímero}$)
P ₁	1,022
P ₂	1,207
P ₃	0,918

Donde P1, P2 y P3 son las muestras problema analizadas.

Realizando una media aritmética a los valores obtenidos se tiene como valor de capacidad de eliminación medio:

$$\overline{C_{elim}} = 1,049 \frac{\mu\text{g As}}{\text{g HRGD6}}$$

La capacidad de retención del polímero es muy pequeña, ya que se necesita una alta cantidad de polímero para eliminar una parte pequeña de arsénico. Sería preciso emplear una cantidad muy grande de polímero para retener todo el arsénico necesario para cumplir la normativa.

- **Bioploímero VOKx72:**

Se calcula la capacidad de adsorción, q_A , a partir de la ecuación (II), conociendo las concentraciones finales e iniciales, el volumen de disolución y la masa de coprecipitante de manera experimental. El valor de $C_{A,f}/q_A$ se calcula dividiendo el valor de la concentración final obtenido para cada muestra problema analizada por el valor calculado de q_A .

Tabla 13. Cálculos para los experimentos con el polímero VOKx72 a partir del modelo de Langmuir.

Modelo Langmuir VOKx72 Parámetros	Muestras		
	P ₁	P ₂	P ₃
q_A (mg/g)	1,870	1,945	2,164
V_d (dm ³)	0,010	0,010	0,010
m_b (g)	0,100	0,100	0,100
$C_{A,f}/q_A$	18,813	17,702	14,898

Donde P₁, P₂ y P₃ son las muestras problema analizadas.

A partir del ajuste lineal realizado se representa $C_{A,f}/q_A$ Vs $C_{A,f}$, obteniéndose la siguiente representación gráfica:

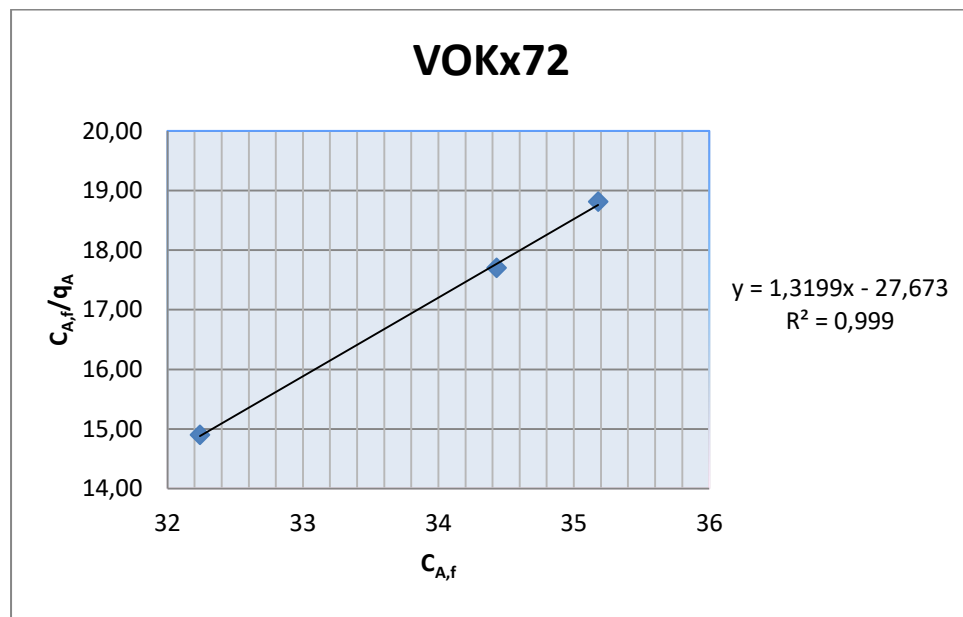


Figura 12. Modelo de Langmuir para los experimentos con el polímero VOKx72.

En función de la representación gráfica, se puede afirmar que el modelo de Langmuir es correctamente aplicable en este caso ya que el ajuste obtenido presenta un coeficiente de regresión muy próximo a 1. Por tanto, el mecanismo de coprecipitación se ajusta al modelo de Langmuir.

A partir de la ecuación de la recta obtenida por el ajuste lineal, y siguiendo la ecuación (III), se obtienen los valores de las constantes del modelo de Langmuir: cantidad máxima de especies A que pueden adsorber por unidad de masa de adsorbente ($q_{A,max}$) y constante de disociación o inestabilidad del complejo (k_d). Siendo $k_d/q_{A,max}$ la ordenada en el origen y $1/q_{A,max}$ la pendiente de la recta.

El valor de la constante de formación k_f , se obtendrá tal y como se indica en la ecuación (VI), a partir de la constante de disociación.

Los valores de las constantes y parámetros obtenidos son:

Tabla 14. Valores de las constantes del modelo de Langmuir para los experimentos con el polímero VOKx72.

$q_{A,max}$ (mg/g)	0,758
k_d	20,966
k_f	0,048

El valor de la constante de disociación, al igual que en el caso anterior, es varios órdenes de magnitud superior a la constante de formación, lo cuál podría ser indicativo de que el proceso aplicado no es válido ya que el complejo formado no sería estable.

El rendimiento de eliminación calculado a partir de la ecuación (VII):

Tabla 15. Rendimiento de eliminación para el polímero VOKx72.

Muestra VOKx72	η_{elim} (%)
P ₁	34,71
P ₂	36,10
P ₃	40,16

Donde P1, P2 y P3 son las muestras problema analizadas.

Los rendimientos obtenidos son valores bajos aunque tratándose de un proceso experimental son aceptables.

Realizando una media aritmética a los valores obtenidos se tiene como valor de rendimiento medio:

$$\overline{\eta_{elim}} = 36,99\%$$

La capacidad de retención del polímero o capacidad de eliminación aporta información significativa sobre la eficacia del proceso, viene dada a partir de la ecuación (VIII):

Tabla 16. Capacidad de eliminación para el polímero VOKx72.

Muestra VOKx72	C _{elim} (μg As/g polímero)
P ₁	0,935
P ₂	0,973
P ₃	1,082

Donde P1, P2 y P3 son las muestras problema analizadas.

Realizando una media aritmética a los valores obtenidos se tiene como valor de capacidad de eliminación medio:

$$\overline{C_{elim}} = 0,997 \frac{\mu g As}{g Vokx72}$$

La capacidad de retención del polímero es muy pequeña, al igual que en el caso anterior. Se necesitaría una cantidad muy grande de polímero para retener todo el arsénico necesario para cumplir la normativa.

5. Propuestas de futuro.

5.1 Justificación de métodos alternativos para la eliminación de arsénico del agua.

La eliminación de arsénico del agua por coprecipitación es un posible método comúnmente empleado.

El objetivo futuro será lograr encontrar un polímero que elimine el arsénico del agua cumpliendo los límites establecidos por la normativa, optimizando, de este modo, el procedimiento experimental realizado en el apartado 3, ya que la capacidad de eliminación de los biopolímeros con los que se ha trabajado no es suficiente.

En primer lugar se trata de encontrar un compuesto químico óptimo para la formación de complejos con el arsénico y, de este modo, favorecer la eliminación del mismo.

Una vez determinado el compuesto óptimo para la formación de complejos con el arsénico, se busca el mejor método para producir un polímero tipo elastina que posea grupos funcionales capaces de reaccionar con los compuestos acomplejantes de dicho elemento.

Basándose en estudios previamente realizados de los cuales se han obtenido buenos resultados, se determinan los compuestos con los que se produce una mejor complejación con el arsénico y, por tanto, mayor eliminación del mismo. Se trata de compuestos a base de hierro, tanto hierro (III) como hierro (II) [14], [15], [19].

Se pretende realizar una modificación de los biopolímeros utilizados de modo que contenga en su composición el acomplejante capaz de eliminar todo el arsénico necesario en las circunstancias solicitadas, reduciendo, de este modo, los costes y la cantidad de polímero empleado con respecto a los polímeros ensayados.

Se selecciona un polímero tipo elastina ELR debido a la facilidad que presentan de ser modificado o diseñado para cumplir los requisitos necesarios, tal y como se menciona en el apartado 2.3.2. Por otro lado, el grupo de investigación Bioforge dispone de la tecnología necesaria para ello, además de tener un amplio conocimiento sobre dichos polímeros debido a los numerosos estudios realizados al respecto.

A partir de un estudio comparativo de alternativas sobre polímeros con los que podría eliminarse el arsénico del agua en función de las características

del polímero empleado ya realizado en el apartado 2.3.1, se concluye que el enlace con el hierro se realiza a partir de grupos amino primarios, realizando los experimentos a pH ácidos, entre 5 y 2,5. A partir de estos enlaces amino, también podría eliminarse el arsénico del agua sin necesidad de hierro.

También se debe valorar otro de los estudios indicados en el apartado 2.3.1 sobre la síntesis de nanopartículas a base de óxido de hierro [23], donde las nanopartículas de óxido de hierro se injertan con PDMAEMA (2-(dimetilamino)etil metacrilato), un polipéptido de un solo bloque (VPGIG)₂₀ o diblock ELPs, realizando las modificaciones a un pH de 2,5.

Se prevé que a partir del polímero tipo ELR modificado con insertos de óxido de hierro elimine una mayor cantidad de arsénico del agua que los polímeros anteriores ya ensayados, debido a la mayor afinidad que se producirá entre el arsénico y el nuevo polímero.

5.2 Aplicación práctica de los métodos alternativos.

El interés por eliminar el arsénico del agua es cada vez mayor debido a su alta toxicidad y al gran riesgo que supone para el ser humano. En este apartado se trata de simular el polímero propuesto en el apartado anterior (5.1) para la eliminación de arsénico de un agua urbana contaminada para un municipio de 1400 habitantes con una concentración de arsénico de 50 µg/L.

En el municipio de Fresno el Viejo (Valladolid) se diseña una EDAR (estación depuradora de aguas residuales) para cubrir, como situación más desfavorable, el tratamiento del agua residual producida por una población de 1400 habitantes. Para ello se trata un caudal de 11,7 m³/h [47]. Se selecciona este valor debido a la falta de datos sobre el volumen de agua potable consumido por una población de pequeño tamaño, ya que el volumen de agua consumido y producido tendrán un valor próximo. Como concentración de arsénico en aguas urbanas contaminadas en la provincia de Valladolid, se elige como dato un valor de 50 µg/L. Este valor es un promedio obtenido a partir del estudio realizado para contaminación por arsénico en aguas subterráneas en la provincia de Valladolid [48], dentro del cual se excluyen los municipios que presentan valores de concentración de arsénico por debajo del límite legal establecido por la normativa (10 µg/L) para calcular dicho promedio.

Para comprobar la efectividad del método se toma como valor de referencia la eliminación del arsénico de un biopolímero que presenta buena afinidad por el arsénico, para ello se selecciona el valor de mayor capacidad de eliminación de los mismos polímeros ensayados con diferentes metales

pesados [1], es decir, la capacidad de eliminación del metal por el cual cada polímero presenta mayor afinidad. Los valores se seleccionan para pH neutro, ya que los experimentos muestran que los mejores valores de eliminación se obtienen en dicha situación. Los valores seleccionados son:

Tabla 17. Capacidad de eliminación supuesta en función de la bibliografía [1].

Polímero	C_{elim} ($mg_{metal}/g_{polímero}$)	Metal del que se toma el valor
VOKx72 ($mg_{metal}/g_{polímero}$)	0,03972	Zinc
HRGD6 ($mg_{metal}/g_{polímero}$)	0,03955	Plomo

Por tanto, se estima que el polímero diseñado con gran afinidad por el arsénico presenta una capacidad de eliminación de 0,04 miligramos de arsénico por gramos de polímero ($0,04 mg_{As}/g_{polímero}$).

A partir de los datos conocidos se calcula la cantidad de polímero necesaria para tratar el volumen de agua estimada y eliminar el arsénico por completo. Dichos resultados se muestran a continuación tomando como referencia de tiempo un día (24 horas). Los cálculos realizados se muestran en el anexo II.

Tabla 18. Masa estimada de polímero diseñado necesaria para tratar agua contaminada.

Polímero diseñado	
kg de polímero/día	351

Se estima que la masa necesaria sea de 351 kg/d de polímero para eliminar por completo el arsénico del agua.

Para esta misma situación expuesta se realizan los mismos cálculos con los polímeros ensayados, para la eliminación de arsénico, en los experimentos: VOKx72 y HRGD6; obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 19. Masa de polímero ensayado necesaria para tratar agua contaminada.

Polímeros ensayados	
VOKx72 (kg de polímero/d)	14089,31
HRGD6 (kg de polímero/d)	13386,30

Tal y como se puede observar, la cantidad necesaria de polímeros ensayados es cincuenta veces superior a la cantidad que se necesitaría si se emplease el polímero diseñado.

6. Presupuesto.

Se realiza el presupuesto para el tratamiento de aguas indicado en la aplicación práctica (apartado 5.2). En él se trata agua para la localidad de Fresno el Viejo (Valladolid), un municipio de 1400 habitantes con un caudal de agua a tratar de 11,7 m³/h. Para la cantidad de polímero requerido se va a suponer la cantidad de polímero calculado, es decir, la necesidad de utilizar 351 kg/d, con reutilización del mismo durante 24 meses. Se considera una vida útil de la instalación de 20 años [49].

El presupuesto se calculará sobre un proyecto de EDAR ya existente al cuál se le añadirá una etapa de eliminación de arsénico, debido a la falta de datos sobre potabilizadoras, como se menciona en el apartado 5.2. El presupuesto únicamente hace referencia a los costes e ingresos de la etapa de eliminación de arsénico.

El desglose de costes y precios de cada uno de los elementos que se tendrán en cuenta a la hora de evaluar el presupuesto, se incluyen en el anexo III.

6.1 Costes de inversión.

Los costes de inversión son un tipo de costes fijos que se pueden diferenciar entre costes directos e indirectos.

En los costes directos se engloba el coste total de todos los equipos del proceso y el coste de instrumentación. El coste de parcela debería incluirse en este apartado pero, puesto que se añade una nueva etapa a un proyecto ya existente, la parcela ya estaría incluida en un presupuesto anterior.

En los costes indirectos se engloba el número de horas de colocación de los equipos y la puesta a punto.

Tabla 20. Costes de inversión.

Directos	Equipos (€)	158.400,00
	Instrumentación (€)	2.400,00
Indirectos	Colocación de equipo (€)	1.200,00
	Personal responsable (€)	1.500,00
Total (€)		163.500,00

6.2 Costes de mantenimiento y operación.

Los costes de mantenimiento y operación se calculan, en primer lugar, a lo largo de un año. Este valor sirve como referencia para valorar la aplicación de dicho proceso.

Tabla 21. Costes de mantenimiento y operación en un año.

Materias primas (€)	175.500,00
Mano de obra directa (€)	9.750,00
Servicios auxiliares (€)	312,50
Mantenimiento (€)	1.950,34
Laboratorio (€)	250,00
Total (€)	187.762,84

Se indican también los costes de mantenimiento y operación para el tiempo de vida del equipo de 20 años.

Tabla 22. Costes de mantenimiento y operación en 20 años.

Materias primas (€)	3.510.000,00
Mano de obra directa (€)	195.000,00
Servicios auxiliares (€)	6.250,00
Mantenimiento (€)	39.006,74
Laboratorio (€)	5.000,00
Total (€)	3.755.256,74

6.3 Presupuesto total.

Se trata del presupuesto total para una vida útil de 20 años, teniendo en cuenta todos los gastos ocasionados.

Tabla 23. Costes totales.

Costes de inversión (€)	163.500,00
Costes de mantenimiento y operación (€)	3.755.256,74
Total (€)	3.918.756,74

La instalación de esta nueva etapa de depuración implicará un coste extra de 3.918.756,74 €, es decir, tres millones novecientos dieciocho mil setecientos cincuenta y seis euros con setenta y cuatro céntimos, a lo largo de los 20 años de vida que tendrá la instalación.

7. Estudio de beneficios.

Por el estudio de beneficios se comprueba la viabilidad del proceso desde un punto de vista económico. Para ello es necesario tener en cuenta tanto los gastos como los ingresos generados en el periodo de tiempo establecido.

7.1 Ingresos.

Los únicos ingresos con los que se contará serán los relativos al consumo para uso urbano durante la vida útil de 20 años.

En el anexo III se indican los datos a considerar (subvenciones y venta al público).

Tabla 24. Ingresos totales.

Uso urbano (€)	594.453,60
Subvenciones (€)	1.200.000,00
Total (€)	1.794.453,60

7.2 Beneficios.

La diferencia entre los costes ocasionados y los ingresos generados serán los beneficios obtenidos por el proceso.

Se debe tener en cuenta que este tipo de instalaciones se tienen que llevar a cabo como métodos necesarios para alcanzar el cumplimiento de la legislación vigente y no como una instalación que vaya a redundar en el retorno de beneficios para la empresa.

Los cálculos se realizan a lo largo de la vida útil de la etapa (20 años).

Tabla 25. Beneficios totales.

Costes totales (€)	3.918.756,74
Ingresos totales (€)	1.794.453,60
Beneficios (€)	-2.124.303,14

Se obtienen beneficios negativos, es decir, aplicando el proceso se tendrían pérdidas. A lo largo de la vida útil se tendrían de 2.124.303,14 (dos millones ciento veinticuatro mil trescientos tres euros con catorce céntimos) de pérdidas.

Las pérdidas generadas son debidas al alto coste de funcionamiento de la instalación de purificación de aguas. Por este motivo se podría concluir que el

sistema diseñado sea más adecuado para la purificación de cantidades menores de agua como, por ejemplo, la purificación de pozos contaminados, en los que no es fácil la instalación de un sistema complejo de purificación.

Otra posible solución sería un estudio en el que el biopolímero se reutilizara de manera indefinida en la planta de purificación de agua. Además, el proceso de producción de biopolímeros está en desarrollo y si se realizase un proceso de producción en serie los costes del polímero serían menores.

8. Seguridad y prevención de riesgos

En cualquier tipo de proceso, tanto si es industrial como a nivel de laboratorio, es muy importante conocer todos y cada uno de los potenciales riesgos y actuar en consideración, siempre respetando las medidas de seguridad oportunas. En el tema tratado en este estudio en cuestión, es altamente necesario evaluar los riesgos por tratarse de un proceso en el cual intervienen compuestos químicos de alta peligrosidad y toxicidad. Es muy importante tener en cuenta la seguridad del proceso y la prevención de posibles daños que se puedan ocasionar.

Puesto que se trata de un agua destinada al consumo humano o al contacto con el medio natural, se deberá prestar especial interés a la concentración final de arsénico en el agua, para ello deberá asegurarse el correcto funcionamiento de los instrumentos de medida y se tomarán muestras periódicas para analizar en laboratorios, asegurándose del cumplimiento de la legislación.

Por otro lado, por tratarse de agua destinada al consumo humano, se deberán extremar las condiciones de higiene de equipo y entorno, realizando lavados periódicos.

En el laboratorio químico se deben tomar medidas de seguridad en cuanto al manejo de reactivos. Se ensaya con arsenito de sodio, por lo que se debe utilizar, bata, mascarilla, doble par de guantes, gafas con cubiertas laterales y trabajar en campana, siempre teniendo en cuenta las especificaciones de las hojas de seguridad del compuesto. Los residuos de los experimentos, tanto sólidos como líquidos deberán ser tratados como residuos peligrosos. En caso de incendio se deberá usar agua pulverizada, espuma resistente al alcohol, polvo seco o dióxido de carbono.

En la toma de muestras de control del proceso de tratamiento de aguas, deberán tomarse las mismas consideraciones que en el laboratorio químico.

En la planta de tratamiento de aguas se debe revestir todo el material por el que pase el arsénico (depósitos, tuberías...) con materiales inertes al arsénico. También se deberán realizar análisis periódicos del material para tener certeza de que la corrosión ocasionada no supondrá daños para el correcto funcionamiento del equipo, ni supondrá ningún tipo de fuga, ni deterioros similares.

Se deberá tratar correctamente el depósito de residuos en el que se almacene el polímero con el arsénico eliminado del agua, evitando el contacto con la atmósfera y asegurando que el tratamiento posterior que reciba sea

inocuo para la salud y el medio, ya sea tratado en planta o enviado a otra empresa para su tratamiento.

El riesgo de explosiones e incendios en el proceso es muy pequeño pero no se debe descuidar ningún indicador de los mismos.

Tanto la planta como el laboratorio deben contar con un plan de actuación en caso de accidente, detallado de manera clara, en el que se cubra cualquier desastre posible.

9. Conclusiones

A partir de los análisis realizados cabría resaltar que la depuración del agua para eliminar el arsénico presente no es suficiente con ninguno de los dos polímeros ensayados (VOKx72 y HRGD6), ya que en ambos casos el valor obtenido es superior al valor establecido por la legislación en el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, en el cual se establece como límite 10 $\mu\text{g/L}$. Dado que en los ensayos realizados no se cumplen las especificaciones establecidas, se diseña un polímero tipo ELR con compuestos de hierro para la eliminación del arsénico debido a la afinidad que tiene por el arsénico y a la simplicidad de modificación estructural que presenta. Este tipo de polímero únicamente se puede diseñar de manera teórica debido a la pandemia provocada por el COVID-19, por tanto, los resultados de los cálculos son posibles suposiciones acerca de los resultados esperados en los experimentos.

Por otro lado, se concluye:

- En función de los cálculos realizados se podría tomar el método del modelo de Langmuir como válido ya que el ajuste obtenido presenta un coeficiente de regresión muy próximo a 1. Aunque si bien es cierto, que el valor de la constante de disociación obtenida es de varios órdenes de magnitud superior al que cabría esperar. Esto puede deberse a que el proceso no es óptimo.
- Analizando las constantes de adsorción obtenidas se puede observar como en la situación en la que el proceso es más eficaz, es decir, cuando el proceso tiene un mayor rendimiento de eliminación, la constante de disociación es más pequeña mientras que la de formación es mayor. Es un resultado lógico ya que cuanto menor sea la constante de disociación mayor será la estabilidad del complejo en agua. El polímero HRGD6 tiene una menor constante de disociación, por tanto sería un proceso ligeramente más eficaz aunque no se trata de un resultado concluyente ya que la diferencia es mínima entre ambos.
- Los rendimientos obtenidos en la eliminación del arsénico no son suficientes pero tratándose de un procedimiento experimental son válidos. Se eliminan aproximadamente 20 $\mu\text{g/L}$ con respecto a la concentración inicial dada (50 $\mu\text{g/L}$), por lo que sería necesario emplear una cantidad muy alta de polímero para eliminar todo el

arsénico esperado, prácticamente sería necesario utilizar una concentración dos veces superior a la utilizada en los experimentos.

- Como conclusión global a los cálculos, cabría resaltar que el modelo aplicado sería correcto en función de la coherencia de los resultados numéricos obtenidos, pero el proceso no sería viable ya que se necesitaría mucho polímero para eliminar una mínima cantidad de arsénico y poder cumplir la normativa de consumo humano sin ser peligroso para la salud.
- El nuevo polímero diseñado presentará una mayor afinidad con el arsénico debido a la presencia de hierro en el mismo, ya que se ha comprobado, en una serie de estudios, la fuerte capacidad de retención de arsénico que el hierro presenta.
- La selección un polímero tipo elastina ELR se fundamenta en la facilidad de modificación del mismo, y por tanto, simplifica la adición de hierro al polímero. Por otro lado, la simplicidad que presenta a la hora de producirlo, ayuda a la creación de un polímero más afín al arsénico.
- En cuanto a la aplicación real del nuevo polímero, claramente se puede comprobar cómo el nuevo polímero diseñado genera un proceso mucho más eficaz, reduciendo la utilización de polímero hasta cincuenta veces. Por este motivo, será un proceso más óptimo y menos costoso económicamente, independientemente del coste de cada uno de los polímeros.
- Sería necesario realizar experimentos para comprobar que el polímero cumple las expectativas de diseño. Esta parte del trabajo no ha sido posible debido a la pandemia por COVID-19.
- Desde un punto de vista económico, resulta un proceso costoso de implantar debido a que se genera un coste anual de ciento ochenta y siete mil setecientos sesenta y dos euros con ochenta y cuatro céntimos (187.762,84 €). Se debe tener en cuenta que en este tipo de procesos se han de llevar a cabo con el objetivo principal de cumplir la legislación vigente y no con ánimo de lucro.

- El coste de inversión presenta un valor aceptable y amortizable, mientras que este valor se ve fuertemente incrementado por los costes de mantenimiento y operación. Este incremento se debe principalmente al coste de las materias primas empleadas.
- Debido a que los costes son superiores a los beneficios, no sería un proceso rentable económicamente. Por este motivo se propone que el proceso podría resultar más adecuado para la purificación de cantidades menores de agua como, por ejemplo, la purificación de pozos contaminados, en los que no es fácil la instalación de un sistema complejo de purificación. Otra posible solución sería realizar un estudio en el que el polímero pudiese reutilizarse a lo largo de toda la vida útil de la planta, de manera indefinida. Por otro lado, los costes del polímero disminuirán cuando se realice una producción en serie con mayor capacidad de producción.

10. Bibliografía

- [1] M. Sanz Villalón, "Sistema de secuestro selectivo de metales en aguas mediante biopolímeros," 2019.
- [2] K. R. Henke, *Arsenic: Environmental Chemistry*, [1] K. R. Henke, *Arsenic: Environmental Chemistry, Health Threats and Waste Treatment*. 2009. Health Threats and Waste Treatment. 2009. USA. Wiley A John Wiley and Sons, Ltd, Publication.
- [3] "Tabla Periódica Interactiva de los Elementos." [Online]. Available: <https://www.fishersci.es/es/es/periodic-table.html>. [Accessed: 23-Feb-2021].
- [4] "Arsenico (As) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente." [Online]. Available: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/as.htm>. [Accessed: 04-Apr-2020].
- [5] "Ar (Arsénico y compuestos) | PRTR España." [Online]. Available: <http://www.prtr-es.es/Ar-Arsenico-y-compuestos,15604,11,2007.html>. [Accessed: 13-Apr-2020].
- [6] "Arsénico." [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>. [Accessed: 13-Apr-2020].
- [7] M. Alarcón, L. Leal, I. Martín, S. Miranda, and A. Benavides, *Arsénico en Agua: presencia, cuantificación analítica y mitigación*, vol. 2. 2014. Mexico. Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados, S.C. (607-8272)
- [8] Gobierno de España, "Real Decreto 140/2003 - Texto consolidado 1-agosto-2008," *Boletín Of. Del Estado Legis. Consolidada Texto*, pp. 1–41, 2008.
- [9] Comision Europea, "1881/2006 En Cuanto Al Contenido Máximo De Arsénico Inorgánico En Los Productos Alimenticios," *D. Of. la Unión Eur.*, vol. 2015, no. 5, pp. 1993–1995, 2015.
- [10] "Remoción de Arsénico del Agua | Fluence." [Online]. Available: <https://www.fluencecorp.com/es/remocion-de-arsenico-del-agua/>. [Accessed: 14-Apr-2020].
- [11] "Removing Arsenic From," vol. 44, no. 871954, 1926. United Kingdom. Practical action. Technology challenging poverty.
- [12] M. Izquierdo Sanchis, *Eliminacion de metales pesados en aguas mediante bioadsorcion, evaluacion de materiales y modelacion del proceso*. 2010. Universidad de Valencia. España. Servei de Publicacions.
- [13] P. C. Wankat, *Separation Process Engineering*, vol. 49, no. 11. 2004. Third Edition. USA. Prentice Hall.
- [14] N. Otgon, G. Zhang, K. Zhang, and C. Yang, "Removal and fixation of arsenic by forming a complex precipitate containing scorodite and ferrihydrite," *Hydrometallurgy*, vol. 186, no. March, pp. 58–65, 2019.
- [15] Z. Yin, J. Lützenkirchen, N. Finck, N. Celaries, K. Dardenne, and H. C. B. Hansen, "Adsorption of arsenic(V) onto single sheet iron oxide: X-ray absorption fine structure and surface complexation," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 554, pp. 433–443, 2019.
- [16] Z. Yin *et al.*, "Structure of single sheet iron oxides produced from surfactant interlayered green rusts," *Appl. Clay Sci.*, vol. 170, no. January, pp. 86–96, 2019.
- [17] G. A. Waychunas, B. A. Rea, C. C. Fuller, and J. A. Davis, "Surface chemistry of ferrihydrite: Part 1. EXAFS studies of the geometry of coprecipitated and adsorbed arsenate," *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 57, no. 10, pp. 2251–2269, 1993.

- [18] D. M. Sherman and S. R. Randall, "Surface complexation of arsenic(V) to iron(III) (hydr)oxides: Structural mechanism from ab initio molecular geometries and EXAFS spectroscopy," *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 67, no. 22, pp. 4223–4230, 2003.
- [19] Y. K. Penke, N. Tiwari, S. Jha, D. Bhattacharyya, J. Ramkumar, and K. K. Kar, "Arsenic surface complexation behavior in aqueous systems onto Al substituted Ni, Co, Mn, and Cu based ferrite nano adsorbents," *J. Hazard. Mater.*, vol. 361, no. July 2018, pp. 383–393, 2019.
- [20] Y. Arai, E. J. Elzinga, and D. L. Sparks, "X-ray absorption spectroscopic investigation of arsenite and arsenate adsorption at the aluminum oxide-water interface," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 235, no. 1, pp. 80–88, 2001.
- [21] G. Duarte *et al.*, "As(III) immobilization on gibbsite: Investigation of the complexation mechanism by combining EXAFS analyses and DFT calculations," *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 83, pp. 205–216, 2012.
- [22] S. Claudio and S. Manuel, "Utilización de quitosana para la remoción de arsénico (As) del agua," *Superf. y vacío*, vol. 23, pp. 136–139, 2010.
- [23] G. Hemery, "Synthesis of magnetic and thermosensitive iron oxide based nanoparticles for biomedical applications Gauvin Hemery To cite this version: HAL Id: tel-01661602 DOCTEUR DE L ' UNIVERSITÉ DE BORDEAUX Synthesis of magnetic and thermosensitive iron oxide base," 2017.
- [24] P. Van De Wetering, J. Y. Cherg, H. Talsma, D. J. A. Crommelin, and W. E. Hennink, "2-(dimethylamino)ethyl methacrylate based (co)polymers as gene transfer agents," in *Journal of Controlled Release*, 1998, vol. 53, no. 1–3, pp. 145–153.
- [25] J. Qian and C. Berkland, "Conformational Stability Effect of Polymeric Iron Chelators," *iScience*, vol. 21, pp. 124–134, 2019.
- [26] J. A. De Araújo, M. M. Soares, S. F. L. Da Silva, R. De Góes Casqueira, and D. A. Costa, "Membranas poliméricas de PE-g-MA-Al/AlPO₄ Impregnado com Fe, Al - Utilização na recuperação de efluentes de galvanoplastia," *Polimeros*, vol. 24, no. 1, pp. 101–109, 2014.
- [27] A. M. Testera *et al.*, "A novel lipase-catalyzed method for preparing ELR-based bioconjugates," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 121, pp. 752–759, 2019.
- [28] A. Fernandez-Colino, A. Girotti, F. J. Arias, and J. C. Rodriguez-Cabello, "Los polímeros tipo elastina y su utilización como tags para la purificación de proteínas," *Biomecánica*, vol. 19, pp. 8–16, 2011.
- [29] J. C. Rodríguez-Cabello, I. González de Torre, A. Ibañez-Fonseca, and M. Alonso, "Bioactive scaffolds based on elastin-like materials for wound healing," *Adv. Drug Deliv. Rev.*, vol. 129, pp. 118–133, 2018.
- [30] J. R. Gómez, "Estudio de la transición inversa con la temperatura en polímeros tipo elastina con creciente funcionalidad," p. 233, 2004. Valladolid. España
- [31] "Coprecipitación [Coprecipitation / Co-précipitation] (Química)." [Online]. Available: <https://glosarios.servidor-alicante.com/quimica/coprecipitacion>. [Accessed: 05-Aug-2020].
- [32] "Fundamentos de química analítica básica. Análisis cuantitativo - Néstor Riaño Cabrera - Google Libros." [Online]. Available: https://books.google.es/books?id=CfxqMXYfu7wC&pg=PA134&lpg=PA134&dq=coprecipitacion+quimica+analitica&source=bl&ots=a423G8q_Rr&sig=ACfU3U1vyiHC2cRzA1k0U7TuW2u0TyOzPQ&hl=es&sa=X&ved=2ahUKewibv46t4I3rAhU-AWMBHTVICc4Q6AEwD3oECACQAQ#v=onepage&q=coprecipitacion+quimica+analitica&f=false. [Accessed: 09-Aug-2020].
- [33] "Gravimetría2012." [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/poxirambo/gravimetria2012>. [Accessed: 05-Aug-2020].

- [34] F. D. Sandoval-Ibarra, J. L. López-Cervantes, and J. Gracia-Fadrique, "Ecuación de Langmuir en líquidos simples y tensoactivos," *Educ. Quim.*, vol. 26, no. 4, pp. 307–313, 2015.
- [35] R. Ghosh, *Principles of bioseparations engineering*. 2006. Canada. World Scientific.
- [36] Universidad de Valencia, "PARTE I 1. Introducción: Estructura y Composición de Superficies Sólidas," *Dep. Quim. y Fis.*, p. 54, 2009.
- [37] D. A. Cascaret-carmenaty and L. O. Calzado-lamela, "Determinación de la capacidad de adsorción de cromo (VI) por biomasa bacteriana," *Rev. Cuba. Química*, vol. XXVI, no. 3, pp. 215–224, 2014.
- [38] L. Vega, "Fenómenos de superficie. Adsorción," *Apuntes de Fisicoquímica*, pp. 1–10, 2010. [Online]. Available: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion_19664.pdf. [Accessed: 18-Jun-2020].
- [39] F. Te, "Ligandos Serie Espectroquímica: Metal Aumenta al pasar a la Aumenta con estado de oxidación 2ª y 3ª series de transición."
- [40] P. Fernandez, "Equilibrios De Formacion De Complejo," pp. 1–19, 2001.
- [41] "Espectrometría de Masas de Plasma (ICP-MS) | Universidad de Burgos." [Online]. Available: <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/espectrometria/espectrometria-de-masas-de-plasma-icp-ms>. [Accessed: 18-Jun-2020].
- [42] "Espectroscopía de Plasma ICP-MS." [Online]. Available: <http://laboratoriotecnicasinstrumentales.es/analisis-quimicos/espectroscopade-plasma-icp-ms>. [Accessed: 18-Jun-2020].
- [43] "Agilent 7500c ICP/MS System | Buy Used Medical | MYCO Instrumentation, Inc." [Online]. Available: <https://www.myco-instrumentation.com/equipments/agilent-7500c-icpms-system/>. [Accessed: 18-Jun-2020].
- [44] L. Qu, E. E. Elix, M. Gradient, E. Sel, and A. Inductivo, "ICP-MS con Sistema de Reacción Octopolar (modelo HP 7500c de Agilent)."
- [45] R. Marín Galvín, "Control de calidad en las aguas residuales y regeneradas: parámetros a controlar en función de las normativas aplicables y nuevas tendencias," *Qual. Control wastewater reclaimed water parameters to Control Accord. to Appl. Regul. new trends*, no. 5, pp. 50–63, 2014.
- [46] "Nivel de arsénico en abastecimientos de agua de consumo de origen subterráneo en la comunidad de Madrid." [Online]. Available: http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272001000500003. [Accessed: 26-Jun-2020].
- [47] "Avances para la construcción de la depuradora de Fresno El Viejo en Valladolid - Actualidad RETEMA," <https://www.retema.es/>. [Online]. Available: <https://www.retema.es/noticia/avances-para-la-construccion-de-la-depuradora-de-fresno-el-viejo-en-valladolid-JXWo4>. [Accessed: 26-Jun-2020].
- [48] C. Calvo Revuelta, J. Álvarez-Benedetí, M. Andrade Benítez, P. Marinero Díaz, S. Bolado Rodríguez. Z. N. Saturada and S. Vol VI, "Contaminación por arsénico en aguas subterráneas en la provincia de Valladolid: variaciones estacionales." pp. 177–180, 2003. Valladolid. España.
- [49] "Costes de conservación y mantenimiento de una EDAR - ingenio.xyz." [Online]. Available: <https://ingenio.xyz/articulos/20170614-costes-conservacion-y-mantenimiento-edar-1>. [Accessed: 26-Jun-2020].
- [50] "Cuánto gana un ingeniero químico en España 2020." [Online]. Available: <https://www.tucursogratis.net/cuanto-gana-un-ingeniero-quimico-en-espana/>. [Accessed: 26-Jun-2020].

- [51] “¿Cuál es el coste real de tener un trabajador para una empresa?” [Online]. Available: <https://www.lainformacion.com/practicopedia/cual-es-el-coste-real-de-un-trabajador-para-una-empresa/6491464/>. [Accessed: 30-Jun-2020].
- [52] “El precio del agua en España | iAgua.” [Online]. Available: <https://www.iagua.es/noticias/locken/precio-agua-espana>. [Accessed: 01-Jul-2020].
- [53] “La Junta aprueba subvenciones por importe de 148.000 euros para financiar la explotación de cuatro depuradoras | Comunicación | Junta de Castilla y León.” [Online]. Available: http://comunicacion.jcyl.es/web/jcyl/Comunicacion/es/Plantilla100Detalle/1281372051501/_/1284483904446/Comunicacion. [Accessed: 24-Feb-2021].

Anexos

Anexo I. Nomenclatura.

a. Variables.

Se presenta una lista con la nomenclatura de las distintas variables indicada a lo largo del trabajo, junto con sus correspondientes unidades.

- A: especie eliminada o retenida
- AM: complejo especie-adsorbente
- C_0 : concentración de la muestra patrón 0 ($\mu\text{g/L}$)
- C_1 : concentración de la muestra patrón 1 ($\mu\text{g/L}$)
- C_2 : concentración de la muestra patrón 2 ($\mu\text{g/L}$)
- C_3 : concentración de la muestra patrón 3 ($\mu\text{g/L}$)
- P_1 : concentración de la muestra problema 1 una vez analizada ($\mu\text{g/L}$)
- P_2 : concentración de la muestra problema 2 una vez analizada ($\mu\text{g/L}$)
- P_3 : concentración de la muestra problema 3 una vez analizada ($\mu\text{g/L}$)
- C_a : concentración inicial de la disolución (mg/L)
- C_A : concentración final de especie A (mg/dm^3)
- $C_{A,i}$: concentración inicial de la especie A (mg/dm^3).
- $C_{A,f}$: concentración de la especie A en disolución final (mg/dm^3)
- C_{As} : concentración de arsénico en la muestra ($\mu\text{g/L}$)
- C_{elim} : Capacidad de eliminación (μg especie A/g polímero)
- \overline{C}_{elim} : Capacidad de eliminación media (μg especie A/g polímero)
- C_b : concentración final de la disolución (mg/L)
- C_{pol} : Concentración del polímero (g/L)
- k_1 : constante de velocidad de adsorción
- k_2 : constante de velocidad de desorción
- $k_{A,C}$: constante de equilibrio de adsorción o constante de Langmuir (dm^3/mg)
- k_d : constante de disociación o inestabilidad del complejo
- k_f : constante de formación o estabilidad del complejo
- M: adsorbente
- m_b : la cantidad de adsorbente (g)
- q_A : cantidad de especie A adsorbida o capacidad de adsorción (mg/g)
- t: tiempo de proceso (d)
- T: temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
- T_t : temperatura de transición ($^{\circ}\text{C}$)
- $q_{A,max}$: cantidad máxima de especies A que pueden adsorber por unidad de masa de adsorbente (mg/g)
- Q_{As} : Caudal de arsénico ($\mu\text{g/d}$)
- Q_t : Caudal total (L/d)

- R^2 : Coeficiente de regresión
- V_{As} : volumen de arsénico (mg o μg)
- V_a : volumen inicial de la disolución (L)
- V_b : volumen final de la disolución (L)
- V_d : volumen de disolución (dm^3)
- X : concentración de biomasa (masa de adsorbente por unidad de volumen).
- € : Euros (unidad monetaria)
- η_{elim} : Rendimiento de eliminación (%)
- $\overline{\eta_{\text{elim}}}$: Rendimiento de eliminación medio (%)

b. Compuestos químicos.

Se muestra una tabla con la recopilación de los distintos compuestos nombrados a lo largo del trabajo y la nomenclatura de los mismos.

Tabla 26. Recopilación de compuestos. Nomenclatura.

Fórmula química	Nombre
Al	Aluminio
AlPO ₄	Fosfato de aluminio
Ar	Argón
As (III)	Arsénico (III)
As (V)	Arsénico (V)
(Fe ⁺³) ₄₋₅ (OH,O) ₁₂	Ferrihidrita arsenical
As ₄ S ₄	Realgarita
As ₄ S ₆	Oropimente
Co	Cobalto
CoAsS	Cobalto brillante
CoAs ₂	Esmaltita
Cu	Cobre
Fe	Hierro
Fe (II)	Hierro (II)
Fe (III)	Hierro (III)
Fe(OH) ₃	Hidróxido de hierro (III)
(Fe ⁺³) ₄₋₅ (OH,O) ₁₂	Ferrhidrita
FeAsS	Arsenopirita
FeAs ₂	Löllingita
FeAsO ₄ ·2H ₂ O	Escorodita
AsO ₄ ³⁻ ·Fe(OH)(H ₂ O) _{1+x}	Ferrhidrita arsenical (AsFH)
FeCl ₃	Cloruro de hierro (III)
FeSO ₄	Sulfato de hierro (II)
FeSO ₄ ·7H ₂ O	Sulfato de hierro (II) heptahidratado
Fe ₂ (SO ₄) ₃	Sulfato de hierro (III)
H ₃ AsO ₄	Arseniato de hidrógeno
HCl	Ácido clorhídrico
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
H ₂ O	Agua
Mn	Manganeso
NaAsO ₂	Arsenito de sodio
Ni	Níquel
NiAs	Nicolita
NiAsS	Gersdorffita
O ₂	Oxígeno

c. Unidades de medida.

Se muestra una tabla con la recopilación de todas las unidades utilizadas a lo largo del trabajo, con su correspondiente significado.

Tabla 27. Recopilación de unidades.

TIPO	SÍMBOLO	NOMBRE
Masa	g	Gramos
	mg	Miligramos
	µg	Microgramos
Volumen	L	Litros
	dm ³	Decímetros cúbicos
	ml	Mililitros
	µl	Microlitros
Longitud	µm	Micrómetros
	nm	Nanómetros
Tiempo	d	Días
	h	Horas
	min	Minutos
Concentración	g/L	Gramos de soluto por litro de disolución
	mg/L	Miligramos de soluto por litro de disolución
	µg/L	Microgramos de soluto por litros de disolución
	ng/L	Nanogramos de soluto por litros de disolución
	ng/m ³	Nanogramos de soluto por metro cúbico de disolución
	mg/dm ³	Miligramos de soluto por decímetro cúbico de disolución
	mg/kg	Miligramos de soluto por kilogramos de mezcla
	mg/g	Miligramos de soluto por gramos de mezcla
	µg/g	Microgramos de soluto por gramos de mezcla
	ng/g	Nanogramos de soluto por gramo de mezcla
	mol/L	Moles de soluto por litro de disolución
	µmol/L	Micromol de soluto por litro de disolución
	M	Molar (mol/L)
	ppm	Partes por millón
	ppb	Partes por billón
ppt	Partes por trillón	

TIPO	SÍMBOLO	NOMBRE
Caudal	L/d	Litros por día
	m ³ /h	Metros cúbicos por hora
	kg/d	Kilogramos por día
	µg/d	Microgramos por día
Velocidad	rpm	Revoluciones por minuto
Monetarias	€	Euros
Masa molecular	g/mol	Gramos por mol
	Da	Dalton
	uma	Unidad de masa atómica
Porcentaje	%	Tanto por ciento
Temperatura	°C	Grados Celsius
Radio atómico	Å	Angstrom
Energía	e.v	Electronvoltio
Otros	€/g	Euros por cada gramo
	€/L	Euros por cada litro

d. Aminoácidos.

Se muestra la tabla con el significado de cada una de las siglas de los distintos aminoácidos nombrados a lo largo del trabajo.

Tabla 28. Nomenclatura de aminoácidos.

Sigla	Nombre
A	Alanina
C	Cisteína
D	Aspartato
E	Glutamato
F	Fenilalanina
G	Glicina
H	Histidina
I	Isoleucina
K	Lisina
L	Leucina
M	Metionina
N	Asparagina
P	Prolina
Q	Glutamina
R	Arginina
S	Serina
T	Treonina
V	Valina
W	Triptófano
Y	Tirosina

Anexo II. Cálculos de aplicación práctica de métodos alternativos.

En el municipio de Fresno el Viejo (Valladolid) se diseña una EDAR (estación depuradora de aguas residuales) para cubrir, como situación más desfavorable, el abastecimiento de 1400 habitantes. Para ello se trata un caudal de 11,7 m³/h [47]. Se toma este valor debido a la falta de datos sobre el volumen de agua potable consumido por una población de pequeño tamaño, ya que el volumen de agua consumido y producido tendrán un valor próximo. Como concentración de arsénico en aguas urbanas contaminadas en la provincia de Valladolid, se toma como dato un valor estándar de 50 µg/L [48].

Para comprobar la efectividad del método se toma como valor de referencia la eliminación del arsénico de un biopolímero que presenta buena afinidad por el arsénico, para ello se selecciona el valor de mayor capacidad de eliminación de los mismos polímeros ensayados con diferentes metales pesados [1], es decir, la capacidad de eliminación del metal por el cual cada polímero presenta mayor afinidad. Los valores se seleccionan para pH neutro, ya que los experimentos muestran que los mejores valores de eliminación se obtienen en dicha situación.

Tomando como referencia un rango de tiempo de un día (24 horas), se realizan los cálculos.

En primer lugar, el caudal conocido de 11,7 m³/h, se convierte a 280800 L/d, cambiando de unidad de tiempo hora (h) a unidad de tiempo día (d) y la unidad de volumen metros cúbicos (m³) a unidad de volumen litros (L).

A continuación se calcula el caudal de arsénico del siguiente modo:

$$Q_{As} = Q_t \cdot C_{As} \quad (X)$$

Donde:

- Q_{As} es el caudal de arsénico a tratar en µg/d.
- Q_t es el caudal total a tratar en L/d.
- C_{As} es la concentración de arsénico total en µg/L.

Una vez conocido el caudal de arsénico en µg/d se convierte a mg/d, cambiando de unidad de masa microgramos (µg) a unidad de masa miligramos (mg).

El volumen a tratar se obtiene a partir del caudal, para lo cual se supone una unidad de tiempo de un día, de modo que:

$$V_{As} = Q_{As} \cdot t \quad (XI)$$

Donde:

- V_{As} es el volumen de arsénico a tratar en μg o mg .
- t es el tiempo de proceso (1 día).

La capacidad de eliminación de los polímeros con otros metales [1] se calcula a partir de la ecuación (VIII). Los datos tenidos en cuenta son pH neutro, concentración de polímero de 20 mg/ml y en la siguiente tabla se muestran las concentraciones iniciales y finales obtenidas:

Tabla 29. Concentraciones y capacidad de eliminación de los polímeros HRGD6 y VOKx72 con diferentes metales.

HRGD6			
	$C_{A,i}$ (mg/L)	$C_{A,f}$ (mg/L)	C_{elim} ($\text{mg}_{\text{metal}}/\text{g}_{\text{polímero}}$)
Plomo	0,824	0,033	0,03955
Cobre	0,824	0,211	0,03065
Hierro	0,824	0,12	0,0352
Zinc	0,072	0,061	0,00055
VOKx72			
	$C_{A,i}$ (mg/L)	$C_{A,f}$ (mg/L)	C_{elim} ($\text{mg}_{\text{metal}}/\text{g}_{\text{polímero}}$)
Plomo	0,824	0,315	0,02545
Cobre	0,824	0,85	-0,0013
Hierro	0,824	0,03	0,0397
Zinc	0,824	0,081	0,03715

Finalmente, la cantidad de polímero que es necesario emplear para eliminar el arsénico necesario se calculará a partir de la ecuación de la capacidad de eliminación: ecuación (VIII).

A continuación se muestran las tablas con los resultados obtenidos en cada uno de los cálculos indicados anteriormente.

Tabla 30. Caudales y concentraciones de la corriente a tratar.

Agua a tratar		Arsénico	
Q_t (m^3/h)	11,7	C_{As} ($\mu\text{g}/\text{L}$)	50
Q_t (m^3/d)	280,8	Q_{As} ($\mu\text{g}/\text{d}$)	14040000
Q_t (L/d)	280800	Q_{As} (mg/d)	14040

Tabla 31. Capacidad de adsorción del polímero diseñado.

Polímero	C_{elim} ($\text{mg}_{\text{metal}}/\text{g}_{\text{polímero}}$)	Metal del que se toma el valor
VOKx72 ($\text{mg}_{\text{metal}}/\text{g}_{\text{polímero}}$)	0,03972	Zinc
HRGD6 ($\text{mg}_{\text{metal}}/\text{g}_{\text{polímero}}$)	0,03955	Plomo
Valor seleccionado ($\text{mg}_{\text{metal}}/\text{g}_{\text{polímero}}$)	0,04	—

Tabla 32. Capacidad de adsorción de los polímeros ensayados.

Polímeros ensayados	
C_{elim} ($\mu\text{g}_{\text{As}}/\text{g}_{\text{polímero}}$) de HRGD6	1,049
C_{elim} ($\mu\text{g}_{\text{As}}/\text{g}_{\text{polímero}}$) de VOKx72	0,997

Tabla 33. Resultados de los cálculos. Masa de polímero necesaria.

Polímero diseñado		Polímeros ensayados	
kg/d	351	VOKx72 (kg/d)	14089,31
		HRGD6 (kg/d)	13386,30

Anexo III. Elementos y coste para presupuesto y estudio de beneficios.

El presupuesto se calculará sobre un proyecto de EDAR ya existente al cuál se le añadirá una etapa de eliminación de arsénico, debido a la falta de datos sobre potabilizadoras.

En este apartado se desglosan cada uno de los elementos tenidos en cuenta a la hora de elaborar el presupuesto.

1. Costes de inversión.

El coste de los equipos e instrumentos se tomará de las páginas de diferentes casas comerciales, como valor medio aproximado.

El equipo empleado será:

- Dos tanques: uno a presión con refrigeración para la disolución de polímero y otro tanque a presión con resistencias para aporte de calor para la mezcla de agua residual con polímero y tratar de realizar la formación de complejo).
- Centrifugadora de discos, óptima para limpiar líquidos de partículas finas, ya que se necesitan centrifugas potentes y resistentes.
- Filtros de lecho con batería de válvulas de mariposa, óptimos para la eliminación de la materia en suspensión y reducción de la turbidez.
- Depósito de residuos sólidos para su posterior tratamiento.
- Grupo de bombeo para mover los fluidos a lo largo del proceso.
- Tuberías para transporte de fluidos.

La instrumentación básica necesaria es:

- Un medidor de flujo de polímero con válvula abre/cierra.
- Un medidor de temperatura con efecto sobre el aporte de calor del tanque calefactado y otro medidor de temperatura con

efecto sobre la temperatura del refrigerante sobre el tanque refrigerado.

- Un medidor de concentración de arsénico sobre el efluente de proceso con alarma.
- Un medidor de concentración de sólidos aplicado en la salida de la centrifugación con efecto sobre la velocidad o tiempo de centrifugado.
- Sensores de nivel y presión en cada uno de los depósitos para evitar posibles fallos de sistema.

En la colocación de equipos se estima un valor aproximado de mano de obra, al igual que para el personal responsable, en función de las horas necesarias de montaje. Siendo el coste de 40 €/h para colocación y 50 €/h para ingeniero responsable. Se estiman 30 horas de montaje.

2. Costes de mantenimiento y operación

Como materias primas se tiene el polímero principalmente:

- La producción del polímero tiene un coste de 1 €/g de polímero. Dado que el polímero sufre un proceso de regeneración, por tanto, la vida útil del mismo será de 24 meses.

La mano de obra directa, debido al volumen de la planta, será un único ingeniero químico, cuyo sueldo será de 30.000 € anuales [50]. La cotización en la seguridad social por el trabajador será un 30% del sueldo base del trabajador [51]. Este coste se genera para la planta al completo.

Los servicios auxiliares serán:

- La electricidad, cuyo precio variará en función de la cuota de mercado. En ello se incluye la calefacción del tanque, empleando una resistencia de 10 kW.

- La refrigeración del tanque, empleando para ello un refrigerante industrial. Uno de los refrigerantes más utilizados en el mercado es el R-134a.

En el mantenimiento de equipos:

- Se realizará una prueba hidrostática y medida del espesor del equipo para medir la corrosión cada dos años.
- El filtro se cambiará cada seis meses.
- La centrifugadora no necesitará ningún mantenimiento específico pero se realizará una limpieza exhaustiva en ella.
- La limpieza de equipos se realizara una vez al día.

Se realizarán análisis periódicos para comprobar el correcto funcionamiento del proceso y se investigarán mejoras. Las muestras se enviarán a un laboratorio asociado para la realización del análisis.

3. Ingresos

Por realizar un servicio público también se obtienen una serie de ingresos:

- El agua en Castilla y León tendrá un coste en las viviendas de 1,16 €/m³ [52]. Teniendo en cuenta que el total recaudado será para la EDAR completa, esta etapa recibirá una cuarta parte del mismo.
- Se reciben subvenciones para el correcto mantenimiento y funcionamiento de la planta [53].

Anexo IV. Hojas de seguridad.

Se incluyen las hojas de seguridad del reactivo utilizado: arsenito de sodio (NaAsO_2).

Fecha de preparación 27-abr-2010

Fecha de revisión 15-feb-2019

Número de Revisión 9

SECCIÓN 1: IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA O LA MEZCLA Y DE LA SOCIEDAD O LA EMPRESA**1.1 Identificador del producto**

Nombre del producto	Sodium arsenite
Cat No. :	S/2330/48
Sinónimos	Arsenous acid, sodium salt; Sodium arsenite; Sodium metaarsenite
Nº. CAS	7784-46-5
Nº. CE.	232-070-5
Fórmula molecular	NaAsO ₂

1.2. Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Uso recomendado	Productos químicos de laboratorio.
Usos desaconsejados	No hay información disponible

1.3. Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Empresa	Entidad de la UE / nombre de la empresa Acros Organics BVBA Janssen Pharmaceuticaaan 3a 2440 Geel, Belgium
	Nombre de la entidad / negocio del Reino Unido Fisher Scientific UK Bishop Meadow Road, Loughborough, Leicestershire LE11 5RG, United Kingdom
Dirección de correo electrónico	begel.sdsdesk@thermofisher.com

1.4. Teléfono de emergencia

Tel: +44 (0)1509 231166
Chemtec US: (800) 424-9300
Chemtec EU: 001 (202) 483-7616

SECCIÓN 2: IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS**2.1. Clasificación de la sustancia o de la mezcla****CLP clasificación - Reglamento (CE) n ° 1272/2008****Peligros físicos**

A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación

Peligros para la salud

Toxicidad aguda oral	Categoría 2 (H300)
Toxicidad aguda cutánea	Categoría 2 (H310)

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Sodium arsenite

Fecha de revisión 15-feb-2019

Toxicidad aguda por inhalación - Polvos y nieblas	Categoría 3 (H331)
Carcinogenicidad	Categoría 1A (H350)
<u>Peligros para el medio ambiente</u>	
Toxicidad acuática aguda	Categoría 1 (H400)
Toxicidad acuática crónica	Categoría 1 (H410)

2.2. Elementos de la etiqueta



Palabras de advertencia

Peligro

Indicaciones de peligro

- H350 - Puede provocar cáncer
- H331 - Tóxico en caso de inhalación
- H300 - Mortal en caso de ingestión
- H310 - Mortal en contacto con la piel
- H410 - Muy tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos

Consejos de prudencia

- P201 - Solicitar instrucciones especiales antes del uso
- P313 - Consultar a un médico
- P273 - Evitar su liberación al medio ambiente
- P280 - Llevar guantes/ prendas/ gafas/ máscara de protección

Complementaria etiqueta de la UE

Restringido a usos profesionales

2.3. Otros peligros

No hay información disponible

SECCIÓN 3: COMPOSICIÓN/INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES

3.1. Sustancias

Componente	Nº. CAS	Nº. CE.	Porcentaje en peso	CLP clasificación - Reglamento (CE) n° 1272/2008
Arsenito sodico	7784-46-5	EEC No. 232-070-5	>95	Carc 1A (H350) Acute Tox. 3 (H331) Acute Tox. 2 (H300) Acute Tox. 2 (H310) Aquatic Acute 1 (H400) Aquatic Chronic 1 (H410)

FSUS2330

Página 2 / 11

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Sodium arsenite

Fecha de revisión 15-feb-2019

Texto completo de las Indicaciones de peligro: ver la sección 16

SECCIÓN 4: PRIMEROS AUXILIOS

4.1. Descripción de los primeros auxilios

Consejo general	Se necesita atención médica inmediata. Mostrar esta ficha de datos de seguridad al médico de servicio.
Contacto con los ojos	Enjuagar inmediatamente con abundante agua, también bajo los párpados, durante al menos 15 minutos. Se necesita atención médica inmediata.
Contacto con la piel	Lavar inmediatamente con abundante agua durante al menos 15 minutos. Se necesita atención médica inmediata.
Ingestión	No provocar el vómito. Llamar inmediatamente a un médico o a un centro de información toxicológica.
Inhalación	Sacar al aire libre. No utilizar el método boca a boca si la víctima ha ingerido o inhalado la sustancia; administrar la respiración artificial con ayuda de una mascarilla de bolsillo dotada de una válvula unidireccional u otro dispositivo médico para reanimación respiratoria apropiado. Se necesita atención médica inmediata. Si no respira, realizar técnicas de respiración artificial.
Equipo de protección para el personal de primeros auxilios	Asegurarse de que el personal médico sea consciente de los materiales implicados, tomando precauciones para protegerse a sí mismos y para evitar extender la contaminación.

4.2. Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

No hay información disponible.

4.3. Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente

Notas para el médico Tratar los síntomas.

SECCIÓN 5: MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS

5.1. Medios de extinción

Medios de extinción apropiados

Usar agua pulverizada, espuma resistente al alcohol, polvo seco o dióxido de carbono.

Medios de extinción que no deben utilizarse por razones de seguridad

No hay información disponible.

5.2. Peligros específicos derivados de la sustancia o de la mezcla

Muy tóxico. Su descomposición térmica puede dar lugar a la liberación de vapores y gases irritantes. Mantener el producto y el recipiente vacío alejado de fuentes de calor e ignición. No permita que las aguas de extinción entren en el alcantarillado o en los cursos de agua.

Productos de combustión peligrosos

Óxidos de sodio, Óxidos de arsénico.

5.3. Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios

FSUS2330

Página 3 / 11

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Sodium arsenite

Fecha de revisión 15-feb-2019

Como en cualquier incendio, llevar un aparato de respiración autónomo de presión a demanda MSHA/NIOSH (aprobado o equivalente) y todo el equipo de protección necesario.

SECCIÓN 6: MEDIDAS EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL

6.1. Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia

Llevar un equipo de protección respiratoria individual y un traje de protección. Evacuar al personal a zonas seguras. Asegurar una ventilación adecuada. Evitar la formación de polvo. Evitar el contacto con los ojos, la piel o la ropa.

6.2. Precauciones relativas al medio ambiente

No arrojar a las aguas superficiales ni al sistema de alcantarillado. Evite que el material contamine el agua del subsuelo. Prevenir la penetración del producto en desagües. Debe avisarse a las autoridades locales si no se pueden contener vertidos importantes. No debe liberarse en el medio ambiente.

6.3. Métodos y material de contención y de limpieza

Llevar un equipo de protección respiratoria individual y un traje de protección. Recoger o aspirar el derrame y ponerlo en un contenedor adecuado para la eliminación. Evitar la formación de polvo.

6.4. Referencia a otras secciones

Consultar las medidas de protección en las listas de las secciones 8 y 13.

SECCIÓN 7: MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

7.1. Precauciones para una manipulación segura

Usar sólo bajo un protector contra humos químicos. Llevar equipo de protección individual. Evitar la formación de polvo. Evitar el contacto con los ojos, la piel o la ropa. No respirar el polvo. No ingerir.

Medidas higiénicas

Manipular respetando las buenas prácticas de higiene industrial y seguridad. Manténgase lejos de alimentos, bebidas y piensos. No comer, beber ni fumar durante su utilización. Quitar y lavar la ropa contaminada antes de reutilizar. Lávense las manos antes de los descansos y después de terminar la jornada laboral.

7.2. Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades

Mantener los contenedores perfectamente cerrados en un lugar fresco, seco y bien ventilado. Guarde bajo una atmósfera inerte. Proteger de la humedad.

7.3. Usos específicos finales

Uso en laboratorios

SECCIÓN 8: CONTROLES DE EXPOSICIÓN/PROTECCIÓN INDIVIDUAL

8.1 Parámetros de control

Límites de exposición

Lista fuente (s) **ES** Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España. INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. Límites de Exposición Profesional Para Agentes Químicos en España. Establecidos bajo Ley 31/1995, Prevención de Riesgos Laborales y Real Decreto 39/1997, Reglamento de los Servicios de Prevención. La Implementación de esta legislación en el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) es bajo Real Decreto 374/2001 de Mayo 1, 2001. Publicado inicialmente en 1995. actualizada en el 2011.

FSUS2330

Página 4 / 11

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Sodium arsenite

Fecha de revisión 15-feb-2019

Componente	Unión Europea	Reino Unido	Francia	Bélgica	España
Arsenito sodico		STEL: 0.3 mg/m ³ 15 min TWA: 0.1 mg/m ³ 8 hr			TWA / VLA-ED: 0.01 mg/m ³ (8 horas)
Componente	Italia	Alemania	Portugal	Países Bajos	Finlandia
Arsenito sodico		Haut	TWA: 0.01 mg/m ³ 8 horas		TWA: 0.01 ppm 8 tunteina
Componente	Austria	Dinamarca	Suiza	Polonia	Noruega
Arsenito sodico					TWA: 0.01 mg/m ³ 8 timer

Valores límite biológicos

Lista fuente (s)

Componente	Unión Europea	Reino Unido	Francia	España	Alemania
Arsenito sodico			Metabolites of inorganic Arsenic: 0.05 mg/g creatinine urine end of workweek		

Métodos de seguimiento

EN 14042:2003 Título de identificación: Atmósferas en los lugares de trabajo. Directrices para la aplicación y uso de procedimientos para evaluar la exposición a agentes químicos y biológicos.

Nivel sin efecto derivado (DNEL) No hay información disponible

<u>Ruta de exposición</u>	Efecto agudo (local)	Efecto agudo (sistémica)	Los efectos crónicos (local)	Los efectos crónicos (sistémica)
Oral Cutánea Inhalación				

Concentración prevista sin efecto (PNEC) No hay información disponible.

8.2 Controles de la exposición

Medidas técnicas

Usar sólo bajo un protector contra humos químicos. Asegurarse de que haya estaciones de lavado de ojos y duchas de seguridad cerca de la ubicación de la estación de trabajo.

Siempre que sea posible, deberán adoptarse medidas técnicas de control tales como el aislamiento o confinamiento del proceso, la introducción de cambios en el proceso o los equipos para reducir al mínimo la liberación o el contacto, y el uso de sistemas de ventilación adecuadamente diseñados, dirigidas a controlar los materiales peligrosos en su fuente

Equipos de protección personal

Protección de los ojos Gafas protectoras con cubiertas laterales (Norma de la UE - EN 166)

Protección de las manos Guantes protectores

Material de los guantes	Tiempo de penetración	Espesor de los guantes	Norma de la UE	Guante de los comentarios
Caucho natural	Consulte las	-		(requisito mínimo)

FSUS2330

Página 5 / 11

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Sodium arsenite

Fecha de revisión 15-feb-2019

Goma de nitrilo Neopreno PVC	recomendaciones del fabricante	EN 374
------------------------------------	-----------------------------------	--------

Protección de la piel y el cuerpo Utilizar guantes y ropas de protección adecuados para evitar la exposición de la piel

Inspeccione los guantes antes de su uso

Por favor, observe las instrucciones en cuanto a la permeabilidad y el tiempo de adelanto que son provistos por el proveedor de los guantes. (Consulte al fabricante / proveedor para obtener información).

Asegurarse de que los guantes son adecuados para la tarea química compatibilidad, destreza, condiciones de funcionamiento

También tener en cuenta las condiciones locales específicas bajo las cuales el producto es utilizado, tal como el

Quítese los guantes con cuidado para evitar contaminación de la piel.

Protección respiratoria Cuando los trabajadores se enfrentan a concentraciones superiores al límite de exposición, deben utilizar respiradores certificados apropiados. Para proteger a quien lo lleva, el equipo de protección respiratoria debe ajustarse correctamente y estar sometido a un uso y un mantenimiento adecuados

A gran escala / uso de emergencia Utilice un NIOSH / MSHA o la norma europea EN 136 respirador aprobado si los límites de exposición son excedidos o irritación u otros síntomas son experimentados
Tipo de filtro recomendado: Filtro contra partículas conforme a la norma EN 143

Pequeña escala / uso en laboratorio Utilice un NIOSH / MSHA o la norma europea EN 149:2001 respirador aprobado si los límites de exposición son excedidos o irritación u otros síntomas son experimentados
Recomendado media máscara: - Partículas filtrar: EN149:2001

Controles de exposición medioambiental Prevenir la penetración del producto en desagües. Evite que el material contamine el agua del subsuelo. Debe avisarse a las autoridades locales si no se pueden contener vertidos importantes.

SECCIÓN 9: PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

9.1. Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

Aspecto	Blancuzco	
Estado físico	Sólido	
Olor	Inodoro	
Umbral olfativo	No hay datos disponibles	
pH	12.0	
Punto/intervalo de fusión	615 °C / 1139 °F	
Punto de reblandecimiento	No hay datos disponibles	
Punto /intervalo de ebullición	No hay información disponible	
Punto de Inflamación	No hay datos disponibles	Método - No hay información disponible
Índice de Evaporación	No es aplicable	Sólido
Inflamabilidad (sólido, gas)	No hay información disponible	
Límites de explosión	No hay datos disponibles	
Presión de vapor	No hay información disponible	
Densidad de vapor	No es aplicable	Sólido
Densidad relativa / Densidad	1.87	
Densidad aparente	No hay datos disponibles	
Solubilidad en el agua	Soluble en agua	
Solubilidad en otros disolventes	No hay información disponible	
Coefficiente de reparto (n-octanol/agua)		
Temperatura de autoignición		
Temperatura de descomposición	No hay datos disponibles	
Viscosidad	No es aplicable	Sólido
Propiedades explosivas	No hay información disponible	
Propiedades comburentes	No hay información disponible	

FSUS2330

Página 6 / 11

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Sodium arsenite

Fecha de revisión 15-feb-2019

9.2. Otros datos

Fórmula molecular NaAsO₂
Peso molecular 129.91

SECCIÓN 10: ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

10.1. Reactividad

Ninguno conocido, en base a la información facilitada

10.2. Estabilidad química

Sensible al aire, Sensible a la humedad.

10.3. Posibilidad de reacciones peligrosas

Polimerización peligrosa No se produce ninguna polimerización peligrosa.
Reacciones peligrosas Ninguno durante un proceso normal.

10.4. Condiciones que deben evitarse

Evitar la formación de polvo. Productos incompatibles. Exceso de calor. Exposición al aire. Exposición a la humedad.

10.5. Materiales incompatibles

Agentes oxidantes fuertes. Ácidos fuertes.

10.6. Productos de descomposición peligrosos

Oxidos de sodio. Oxidos de arsénico.

SECCIÓN 11: INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

11.1. Información sobre los efectos toxicológicos

Información del producto

(a) toxicidad aguda;

Oral Categoría 2
Cutánea Categoría 2
Inhalación Categoría 3

Componente	DL50 Oral	DL50 cutánea	LC50 Inhalación
Arsenito sodico	41 mg/kg (Rat)	LD50 = 150 mg/kg (Rat)	

(b) corrosión o irritación cutáneas; No hay datos disponibles

(c) lesiones o irritación ocular graves; No hay datos disponibles

(d) sensibilización respiratoria o cutánea;

Respiratorio No hay datos disponibles
Piel No hay datos disponibles

(e) mutagenicidad en células germinales; No hay datos disponibles

FSUS2330

Página 7 / 11

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Sodium arsenite

Fecha de revisión 15-feb-2019

(f) carcinogenicidad; Categoría 1A
 La tabla siguiente indica si cada agencia ha incluido alguno de los componentes en su lista de carcinógenos

Componente	UE	UK	Alemania	IARC
Arsenito sodico			Cat. 1	Group 1

(g) toxicidad para la reproducción; No hay datos disponibles

(h) toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición única; No hay datos disponibles

(i) toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición repetida; No hay datos disponibles

Órganos diana Ninguno conocido.

(j) peligro de aspiración; No es aplicable
Sólido

Síntomas / efectos, agudos y retardados No hay información disponible

SECCIÓN 12: INFORMACIÓN ECOLÓGICA

12.1. Toxicidad

Efectos de ecotoxicidad

Muy tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático. El producto contiene las sustancias siguientes que son peligrosas para el medio ambiente. Puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente. Evite que el material contamine el agua del subsuelo.

Componente	Peces de agua dulce	pulga de agua	Algas de agua dulce	Microtox
Arsenito sodico		EC50: 1.54 mg/L/48h		

12.2. Persistencia y degradabilidad El producto incluye metales pesados. Prevenga la liberación en el ambiente. Se requiere un tratamiento previo especial

Persistencia puede persistir, en base a la información facilitada.

Degradabilidad No es pertinente para sustancias inorgánicas.

La degradación en la planta de tratamiento de aguas residuales Contiene sustancias nocivas para el entorno o no degradables en las estaciones de tratamiento de aguas residuales.

12.3. Potencial de bioacumulación Este material puede tener cierto potencial de bioacumulación

12.4. Movilidad en el suelo El producto es soluble en agua y puede propagarse en sistemas acuosos. Probablemente será móvil en el medio ambiente debido a su solubilidad en agua. Altamente móvil en suelos

12.5. Resultados de la valoración PBT y mPmB No hay datos disponibles para la evaluación.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Sodium arsenite

Fecha de revisión 15-feb-2019

12.6. Otros efectos adversos

Información del alterador del sistema endocrino	Este producto no contiene ningún alterador del sistema endocrino conocido o sospechoso de serlo
Contaminantes Orgánicos Persistentes	Este producto no contiene ningún conocido o sospechado sustancia
Potencial de reducción de ozono	Este producto no contiene ningún conocido o sospechado sustancia

SECCIÓN 13: CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA ELIMINACIÓN

13.1. Métodos para el tratamiento de residuos

Desechos de residuos / producto no utilizado	No debe liberarse en el medio ambiente. Los desechos están clasificados como peligrosos. Dispóngase de acuerdo a las Directivas Europeas sobre desechos y desechos peligrosos. Eliminar de conformidad con las normativas locales.
Embalaje contaminado	Deshágase de este recipiente en un punto de recogida de residuos especiales o peligrosos.
Catálogo de Desechos Europeos	Según el Catálogo de Desechos Europeos, los Códigos de Desecho no son específico al producto, pero específicos a la aplicación.
Otra información	No eliminar el desecho en el alcantarillado. El usuario debe asignar códigos de residuos basándose en la aplicación para la que se utilizó el producto. No tirar los residuos por el desagüe. Neutralizar las soluciones con un pH elevado antes de eliminarlas. No dejar que este producto químico pase al medioambiente.

SECCIÓN 14: INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE

IMDG/IMO

14.1. Número ONU	UN2027
14.2. Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas	Sodium arsenite, solid
14.3. Clase(s) de peligro para el transporte	6.1
14.4. Grupo de embalaje	II

ADR

14.1. Número ONU	UN2027
14.2. Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas	Sodium arsenite, solid
14.3. Clase(s) de peligro para el transporte	6.1
14.4. Grupo de embalaje	II

IATA

14.1. Número ONU	UN2027
14.2. Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas	Sodium arsenite, solid
14.3. Clase(s) de peligro para el transporte	6.1
14.4. Grupo de embalaje	II

14.5. Peligros para el medio ambiente	Peligroso para el medio ambiente El producto es un contaminante marino según los criterios establecidos por IMDG/IMO
---------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

FSUS2330

Página 9 / 11

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Sodium arsenite

Fecha de revisión 15-feb-2019

14.6. Precauciones particulares para los usuarios No se requieren precauciones especiales

14.7. Transporte a granel con arreglo al anexo II del Convenio Marpol 73/78 y del Código IBC No aplicable, productos envasados

SECCIÓN 15: INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

15.1. Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla

Inventarios internacionales X = enumeran.

Componente	EINECS	ELINCS	NLP	TSCA	DSL	NDSL	PICCS	ENCS	IECSC	AICS	KECL
Arsenito sodico	232-070-5	-		X	X	-	X	X	X	X	KE-3143 5

Reglamentos nacionales

Componente	Alemania Clasificación de las Aguas (VwVwS)	Alemania - TA-Luft Class
Arsenito sodico	WGK 3	

Componente	Francia - INRS (cuadros de enfermedades profesionales)
Arsenito sodico	Tableaux des maladies professionnelles (TMP) - RG 20, RG 20bis

Directiva 76/769/CEE del Consejo, de 27 de julio de 1976, relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados Miembros que limitan la comercialización y el uso de determinadas sustancias y preparados peligrosos

15.2. Evaluación de la seguridad química

Un Seguridad Química Evaluación / Informe (CSA / CSR) no se ha llevado a cabo

SECCIÓN 16: OTRA INFORMACIÓN

Texto completo de las indicaciones H mencionadas en las secciones 2 y 3

- H300 - Mortal en caso de ingestión
- H310 - Mortal en contacto con la piel
- H331 - Tóxico en caso de inhalación
- H350 - Puede provocar cáncer
- H400 - Muy tóxico para los organismos acuáticos
- H410 - Muy tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos

Leyenda

CAS - Chemical Abstracts Service

EINECS/ELINCS : Inventario europeo de sustancias químicas comercializadas existentes/Lista europea de sustancias químicas notificadas

PICCS - Inventario de productos químicos y sustancias químicas de Filipinas

IECSC - Inventario chino de sustancias químicas existentes

KECL - Sustancias químicas existentes y evaluadas de Corea

TSCA - Ley de control de sustancias tóxicas (Toxic Substances Control Act) estadounidense, apartado 8(b), Inventario

DSL/NDSL - Lista de sustancias domésticas/no domésticas de Canadá

ENCS - Inventario japonés de sustancias químicas existentes y nuevas

AICS - Inventario australiano de sustancias químicas (Australian Inventory of Chemical Substances)

NZIoC - Inventario de productos químicos de Nueva Zelanda

FSUS2330

Página 10 / 11

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Sodium arsenite

Fecha de revisión 15-feb-2019

WEL - Límites de exposición profesionales

ACGIH - American Conference of Governmental Industrial Hygienists
(Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales)

DNEL - Nivel obtenido sin efecto

RPE - Equipos de protección respiratoria

LC50 - Concentración letal 50%

NOEC - Concentración sin efecto observado

PBT - Persistentes, bioacumulativas, tóxicas

TWA - Tiempo Promedio Ponderado

IARC - Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer

PNEC - Concentración prevista sin efecto

LD50 - Dosis Letal 50%

EC50 - Concentración efectiva 50%

POW - Coeficiente de reparto octanol: agua

vPvB - Muy persistente y muy bioacumulable

ADR - Acuerdo europeo sobre el transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera

IMO/IMDG - International Maritime Organization/International Maritime Dangerous Goods Code

OECD - Organización para la Cooperación y el Desarrollo

BCF - Factor de bioconcentración (FBC)

Bibliografía fundamental y fuentes de datos

Los proveedores de datos de seguridad,

ChemADVISOR - LOLI,

Merck Index,

RTECS

ICAO/IATA - International Civil Aviation Organization/International Air Transport Association

MARPOL - Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques

ATE - Estimación de la toxicidad aguda

VOC - Compuestos orgánicos volátiles

Consejo de formación

Formación de concienciación sobre peligros químicos, cubriendo etiquetado, fichas de datos de seguridad, equipos de protección personal e higiene.

Primeros auxilios pertinentes a la exposición a productos químicos, incluido el uso de estaciones de lavado de ojos y duchas de seguridad.

Uso de equipos de protección personal, cubriendo su correcta selección, compatibilidad, umbrales de penetración, cuidados, mantenimiento, ajuste y estándares EN.

Formación en respuesta a incidentes químicos.

Fecha de preparación 27-abr-2010

Fecha de revisión 15-feb-2019

Resumen de la revisión No es aplicable.

La hoja técnica de seguridad cumple con los requisitos del Reglamento (CE) No. 1907/2006

Descargo de responsabilidad

La información facilitada en esta Ficha de Datos de Seguridad es correcta, a nuestro leal saber y entender, en la fecha de su publicación. Dicha información está concebida únicamente como guía para la seguridad en la manipulación, el uso, el procesamiento, el almacenamiento, el transporte, la eliminación y la liberación, no debiendo tomarse como garantía o especificación de calidades. La información se refiere únicamente al material específico mencionado y puede no ser válida para tal material usado en combinación con cualesquiera otros materiales o en cualquier proceso salvo que se especifique expresamente en el texto

Fin de la ficha de datos de seguridad