



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:



## **AGRADECIMIENTOS**

Mis agradecimientos van dedicados a todas las personas que han hecho posible, de una manera u otra, la realización de este trabajo.

Quiero agradecer a mi tutora M<sup>a</sup> Isabel Iborra Clar, y a mi cotutor Jorge García Ivars, por su dedicación y constancia, por estar tan pendientes de mí durante la realización de este trabajo; y por la gran ayuda prestada en todos los momentos, dándome consejos e instrucciones para la realización de este trabajo.

A mi compañera y amiga Cristina Poblet González, por permanecer a mi lado durante este trayecto, aguantarme en todos los momentos buenos y no tan buenos, y brindarme su apoyo y sus ánimos en todo momento.

Agradecer a mis compañeros, amigos y futuros graduados en Ingeniería Química, Daniela Lo Guzzo y Santiago Vaqué, por prestarme su ayuda durante estos años, acompañarme en los momentos más críticos y confiar en mí. También al resto de amigos, que siempre que lo he necesitado, han estado ahí para animarme.

A mi pareja, por darme fuerzas todos y cada uno de los días, aguantarme en todos los momentos y aconsejarme para poder seguir hacia delante.

Y, por último, y no menos importante, a mi familia, en especial a mis padres, por creer en mis capacidades. Gracias a ellos he llegado hasta aquí, sin su apoyo nunca habría sido posible. Gracias.



## **RESUMENES**

### **TÍTULO**

Diseño de una instalación para recuperación de fármacos de una corriente de proceso mediante Ultrafiltración.

### **RESUMEN**

Numerosos estudios han demostrado la presencia de restos de fármacos en las aguas residuales. Esto es debido a que las plantas depuradoras convencionales no son capaces de eliminar este tipo de compuestos con los tratamientos realizados en las mismas.

La presencia de estos compuestos en el medio supone un grave riesgo para los organismos acuáticos y la salud humana debido al efecto acumulativo que tienen estos contaminantes en aguas superficiales y subterráneas.

Para poder solucionar este problema y conseguir eliminar estos compuestos farmacéuticos del agua residual, se propone un tratamiento de separación con membranas mediante ultrafiltración.

Para realizar este diseño, en el que se trata un efluente procedente de la salida de una Estación Depuradora de Aguas (EDAR), el cual contiene una variedad de compuestos farmacéuticos de diferentes características físico-químicas, se realizan varios ensayos con dos tipos de membranas cerámicas de diferente corte molecular (1 y 15 kDa). Para poder analizar estos ensayos y su efectividad, se estudia el grado de rechazo de cada uno de los compuestos farmacéuticos y su recuperación de corrientes de proceso. El diseño planteado se realiza a partir de los resultados que proporcionan un mayor índice de rechazo. Posteriormente, se introduce una cloración del agua para su posible reutilización.

### **PALABRAS CLAVE**

Tecnología de membranas, ultrafiltración, membrana cerámica, contaminantes emergentes, compuestos farmacéuticos, agua residual, índices de rechazo.

## **RESUM**

### **TÍTOL**

Disseny d'una instal·lació per a recuperació de fàrmacs d'un corrent de procés per mitjà d'Ultrafiltració.

### **RESUM**

Nombrosos estudis han demostrat la presència de restes de fàrmacs a les aigües residuals. Açò pot produir-se a causa de les plantes depuradores convencionals i a la seua incapacitat per a eliminar aquests tipus de compostos amb els tractaments realitzats.

La presència d'aquests compostos al mig suposa un risc enorme i molt greu per als organismes aquàtics i per a la salut del ésser humà a causa dels efectes acumulatius que tenen aquests contaminants a les aigües superficials i subterrànies.

Per a poder solucionar aquest problema i per a aconseguir eliminar aquests compostos farmacèutics de les aigües residuals, s'ha proposat un tractament de separació amb membranes mitjançant el procés d'ultrafiltració.

Per a realitzar aquest disseny, en el qual es necessita un efluent procedent de la eixida d'una Estació Depuradora d'Aigües (en espanyol: (EDAR) Estación Depuradora de Aguas) i que conté una gran varietat de compostos farmacèutics amb característiques físico-químiques diferents, hem de realitzar varies proves amb dos tipus de membranes ceràmiques i també amb diferent tall molecular (1 i 15 kDa). Per a poder analitzar estes proves i la seua efectivitat, s'ha d'estudiar el grau de rebuig de cadascun dels components farmacèutics i la seua recuperació de corrents de procés. El disseny proposat es realitza a partir dels resultats que proporcionen un major nivell de rebuig. Posteriorment, s'introduïx una cloració de l'aigua per al seu possible reutilització.

### **PARAULES CLAU**

Tecnologia de membranes, ultrafiltració, membrana ceràmica, contaminants emergents, compostos farmacèutics, aigua residual, nivell o índex de rebuig.

## **ABSTRACT**

### **TITLE**

Design of an installation for the recovery of drugs of a process stream by means of Ultrafiltration.

### **ABSTRACT**

Different researches/studies have shown the appearance of some drugs in sewage water. This is related to purification plants because these common plants are not capable of removing some compounds with the treatments made in these plants.

The appearance of this compounds or products in the environment is a risk for aquatic organisms and for the human health because of the cumulative effect these contaminants have in surface and ground water.

To solve this problem and to remove these pharmaceutical compounds we can observe in sewage water, a new separation treatment with membranes and ultrafiltration has been proposed.

To make this design, composed by different pharmaceutical products with different physicochemical characteristics and with an effluent coming from sewage treatment plant (in Spanish: (EDAR) Estación Depuradora de Aguas), some tests have to be made with two kinds of ceramic membranes with different molecular cut (1 and 15 kDa). To analyse these tests and their efficacy, the level of aversion that the pharmaceutical compounds could have and the process currents recovery have to be studied. The proposed design is made as of the results that give us a higher level of aversion. Subsequently, a chloration of water is introduced in order to a possible reuse.

### **KEY WORDS**

Membranes technology, ultrafiltration, ceramic membrane, emerging compounds, pharmaceutical compounds, sewage water, level or index of aversion.





# ÍNDICE

## MEMORIA TÉCNICA

<b>1</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>1</b>
2.1	JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA.....	2
<b>3</b>	<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>3</b>
3.1	PROBLEMÁTICA DEL AGUA .....	3
3.1.1	CAUSAS DEL PROBLEMA DEL AGUA.....	4
3.2	REGENERACIÓN DEL AGUA .....	5
3.2.1	USOS DEL AGUA REGENERADA .....	6
3.3	CONTAMINANTES EMERGENTES .....	9
3.3.1	COMPUESTOS FARMACÉUTICOS.....	9
3.4	TRATAMIENTOS TERCARIOS.....	11
3.4.1	TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS .....	11
3.4.2	APLICACIONES DE LOS PROCESOS DE MEMBRANAS AL AGUA.....	13
3.4.3	ULTRAFILTRACIÓN.....	13
3.4.4	CLASIFICACIÓN DE LAS MEMBRANAS .....	14
3.4.5	CLORACIÓN.....	15
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>17</b>
4.1	DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	17
4.2	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	19
4.2.1	PERMEABILIDAD DE LAS MEMBRANAS.....	20
4.2.2	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN .....	21
4.2.3	FACTOR DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN.....	23
4.2.4	CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL.....	23
4.2.5	EXTRACCIÓN DE LOS COMPUESTOS FARMACÉUTICOS.....	25
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>27</b>
5.1	DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	27
5.1.1	CONDUCTIVIDAD DEL PERMEADO (MEMBRANA 1 KDA).....	27
5.1.2	PH PERMEADO (MEMBRANA 1 KDA) .....	29
5.1.3	DENSIDAD DE FLUJO (MEMBRANA 1 KDA) .....	30
5.1.4	CONDUCTIVIDAD DEL PERMEADO (MEMBRANA 15 KDA).....	32
5.1.5	PH PERMEADO (MEMBRANA 15 KDA) .....	33
5.1.6	DENSIDAD DE FLUJO (MEMBRANA 15 KDA) .....	35

5.1.7	ÍNDICES DE RECHAZO DE LOS COMPUESTOS FARMACÉUTICOS.....	37
5.1.8	FACTOR DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN.....	48
5.2	PERMEABILIDAD.....	51
5.3	ENSAYO DE CARACTERIZACIÓN.....	52
5.3.1	EVOLUCIÓN PH Y CONDUCTIVIDAD.....	56
5.4	FACTOR DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN.....	63
5.5	CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL.....	66
<b>6</b>	<b>DISEÑO DE LA INSTALACIÓN.....</b>	<b>71</b>
6.1	DIMENSIONAMIENTO INSTALACIÓN.....	71
6.1.1	CÁLCULO DEL NÚMERO DE MEMBRANAS.....	71
6.1.2	CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE LAS TUBERÍAS.....	73
6.1.3	ADICIÓN DE CLORO.....	73
6.2	CIRCUITO PRINCIPAL.....	74
6.3	CIRCUITO DE LIMPIEZA.....	75
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>79</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>81</b>
<b>9</b>	<b>PRESUPUESTO.....</b>	<b>85</b>
<b>PRESUPUESTO</b>		
9.1	PRESUPUESTO PARCIAL.....	85
9.1.1	PRESUPUESTO DE LA MANO DE OBRA.....	85
9.1.2	PRESUPUESTO DE EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN.....	86
9.2	PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCIÓN MATERIAL.....	90
9.3	PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCIÓN POR CONTRATA.....	90
9.4	PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN.....	91

## **ANEXOS**

ANEXO I.....	95
ANEXO II.....	96
ANEXO III.....	98
ANEXO IV.....	99

# MEMORIA TÉCNICA

---



## **1 OBJETIVOS**

El presente Trabajo Final de Grado tiene como objetivo el diseño de una instalación cuya función es eliminar los compuestos farmacéuticos presentes en el efluente de salida de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR). Esta instalación está provista de un proceso de separación con membranas de ultrafiltración, seguida de un tratamiento de desinfección de cloración. Para el diseño de la instalación, se han llevado a cabo una serie de ensayos en los que se utilizan diferentes condiciones de operación para así poder analizar las variables de estudio del sistema. Con esto, se pretende encontrar unas condiciones de operación adecuadas y mejoradas que sean capaces de separar los compuestos farmacéuticos obteniendo el mayor rendimiento posible. Para realizar estos ensayos, se adiciona al agua residual proveniente de la EDAR una concentración conocida de diez diferentes compuestos farmacéuticos, para poder analizar su comportamiento durante los tratamientos realizados.

## **2 JUSTIFICACIÓN**

Con el avance tecnológico e industrial, la sociedad se ve en la necesidad de consumir nuevos productos, ya sean de origen farmacéutico o no. Ahora bien, las necesidades del ser humano en cuanto a comodidad y bienestar están cubiertas en cierto modo. El ser humano consume medicamentos con el objetivo de eliminar, aliviar y prevenir enfermedades, pero nuestro cuerpo no es capaz de absorber estos compuestos en su totalidad. Por ello, parte de los compuestos farmacéuticos empleados son excretados y, como consecuente, expulsados al medio a través de las aguas residuales. La presencia de estos compuestos en el medio afecta de una manera muy perjudicial a los organismos y al medio ambiente.

La principal problemática de la presencia de estos contaminantes en el agua residual está basada en el hecho de que las plantas depuradoras no están capacitadas para su eliminación mediante los tratamientos convencionales que se realizan en las mismas.

Además, el recurso natural del agua se está convirtiendo en un recurso cada vez más difícil de administrar a causa de la contaminación aportada por diferentes sectores, imponiéndose el sector industrial y el sector doméstico como los más participativos.

Como consecuencia de los problemas comentados anteriormente, la sociedad investigadora se encuentra en la necesidad de la creación de nuevos tratamientos de depuración que sean capaces de eliminar los compuestos farmacéuticos de una manera efectiva.

Existen gran variedad de métodos de separación, pero la tecnología de membranas aporta mayor selectividad, sencillez y menor gasto energético que el resto de tratamientos (Díez y García, 2014). Por ello, en este trabajo se opta por el empleo de un tratamiento de separación por ultrafiltración con el objetivo de concentrar los compuestos farmacéuticos presentes en el agua y, de este modo, poder eliminarlos. Además, para poder regenerar el agua tratada, finalmente se aplica un tratamiento de cloración.

Con la aplicación de estos tratamientos, se pretende contribuir al medio ambiente, disminuyendo el riesgo que estos contaminantes aportan a la gran diversidad de organismos

presentes en el medio. Además, con la aplicación del tratamiento de desinfección, se pretende regenerar el agua tratada con el objetivo de paliar los problemas que existen con la escasez de este recurso hídrico en el planeta.

## **2.1 JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA**

El objetivo académico que conlleva la realización de este trabajo se basa en la adquisición de una formación completa de los conocimientos, tanto teóricos como prácticos, adquiridos en las asignaturas cursadas durante el Grado en Ingeniería Química (Tecnología del Medio Ambiente, Mecánica de Fluidos, Operaciones de Separación, Diseño de Equipos e Instalaciones Industriales y Proyectos de Ingeniería, entre otros).

Además de solidificar los conocimientos adquiridos, este trabajo nos ha permitido trabajar con más profundidad sobre el diseño de los experimentos, mediante el empleo de programas estadísticos; y adquirir competencias específicas como diseñar procesos en las diferentes actividades industriales en el ámbito de la ingeniería química; diseñar equipos, instalaciones y servicios en la industria química; analizar el impacto ambiental, analizar problemas con iniciativa propia y aprender de manera autónoma a realizar la búsqueda de información de la bibliografía correspondiente.

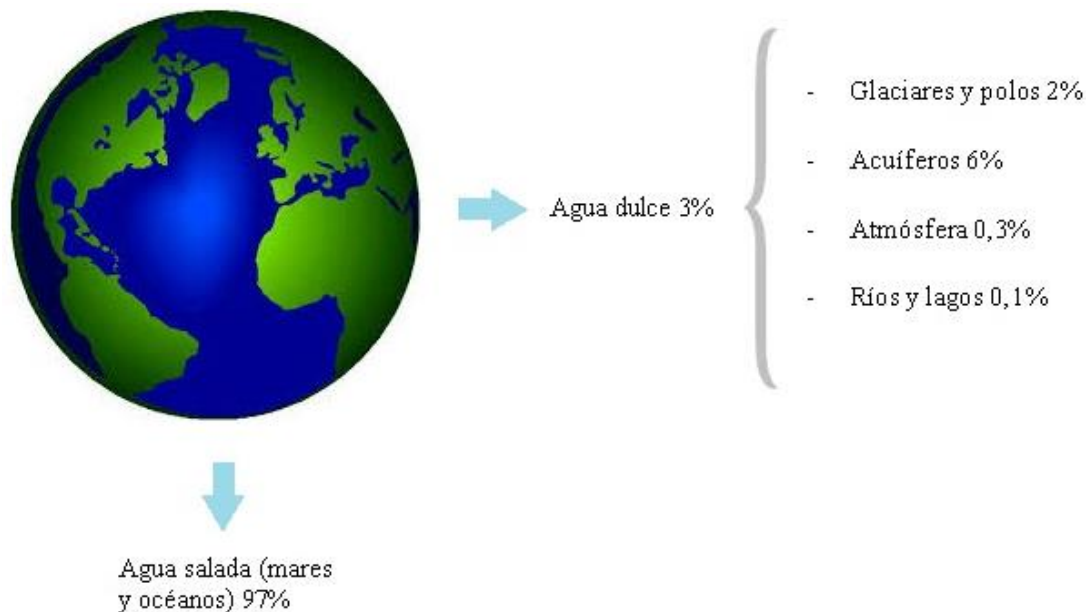
Este trabajo nos ha proporcionado la oportunidad de aprender a diseñar una instalación de determinadas características a través de los conocimientos aportados por el grado y así, poder obtener la titulación de Grado en Ingeniería Química.

### 3 ANTECEDENTES

#### 3.1 PROBLEMÁTICA DEL AGUA

Como bien es sabido, el agua es un recurso natural muy importante y complejo del cual depende el desarrollo de la vida. Se suele subestimar la importancia de este recurso, pero, tanto directamente como indirectamente, su existencia afecta a cada uno de los seres vivos presentes en el planeta. A pesar de que este imprescindible recurso ocupa aproximadamente tres cuartas partes de la superficie de nuestro planeta, el 97% del agua se trata de agua salada, contenida en mares y océanos. Este tipo de agua no puede ser utilizada directamente debido a su elevado contenido en sales minerales y, por ello, es necesario un correcto tratamiento con el fin de aprovecharla para el consumo urbano, industrial y agrícola.

El 3% del agua restante existente en el planeta es agua dulce. Esto no quiere decir que toda esta cantidad de agua esté disponible para el consumo, ya que el 66,7% del total de agua se encuentra en forma sólida en glaciares, polos y montañas elevadas. A través de esta información, la realidad se basa en que solamente el 1% del agua existente en el mundo puede ser utilizada para su consumo sin necesidad de tratamientos tan exhaustivos y costosos como los que se aplican al agua salada (García Ivars, 2015).



**FIGURA 1.** DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN EL PLANETA. INFORMACIÓN ADAPTADA DE (GARCÍA IVARS, 2015)

Todo esto indica que el agua dulce se ha convertido en un recurso amenazado y en constante peligro que merece una actuación inmediata por parte de científicos, investigadores, sistemas gubernamentales y reguladores de todo el mundo. Según recientes evaluaciones realizadas por especialistas y organizaciones internacionales, más de dos terceras partes de la humanidad sufrirán, para el año 2025, por la ausencia de este líquido (L'vovich et al, 1995). Una vez conocida esta problemática, el abastecimiento de recursos hídricos se debe convertir en una prioridad más clara. La calidad y la salubridad del agua son características fundamentales para el bienestar y el desarrollo del ser humano. Esto implica que el acceso a agua salubre es uno de

los instrumentos más eficaces para promover una mejora en la salud mundial, así como para reducir la pobreza (OMS, 2017).

Actualmente, aproximadamente el 18% de la población mundial no tiene acceso a agua potable mientras que el 39% no tiene acceso a fuentes seguras de agua potable (Cinu, 2002). Este dato crea una situación alarmante y muy preocupante ya que el agua contaminada es portadora de muchas enfermedades y puede causar graves problemas relacionados con la salud y el medio ambiente. Con el objetivo de paliar esta situación, en el año 2001, ministros y expertos concertaron la denominada Conferencia Internacional de Agua Dulce en Alemania, donde se establecieron una serie de requisitos con el fin de que, en 2015, quedara reducido un 50% el número de personas sin acceso a agua dulce. Para lograr este objetivo, se estableció un mejor y mayor acceso a agua potable y una mayor inversión en saneamiento (Agudelo, 2005).

El agua es un derecho imprescindible para la vida y que la humanidad tome la conciencia necesaria para asumir y respetar este hecho es muy importante. A través de esta problemática del agua, muchas organizaciones y asociaciones han sido formadas con la misión de abastecer con agua a las localidades necesitadas y de promover la sostenibilidad de este recurso de primera necesidad. Asociaciones como Pozos Sin Fronteras (PSF), creada el 23 de diciembre de 2003, colabora con poblaciones localizadas en países como Burkina Faso (África), creando proyectos basados en la dotación de agua potable, saneamiento básico, implementación de sistemas de riego y construcción y equipamiento de fuentes mejoradas de agua potable ([pozossinfronteras.org](http://pozossinfronteras.org)).

### **3.1.1 CAUSAS DEL PROBLEMA DEL AGUA**

La problemática del agua se puede entender más fácilmente si se estudian algunas de las principales causas de contaminación del agua ([oxfamintermon.org](http://oxfamintermon.org)):

- **Uso de pesticidas:** Varios estudios han demostrado que gran parte de la contaminación existente en los recursos hídricos proviene del constante uso de pesticidas en la agricultura para mantener unas cosechas salubres.
- **Desechos industriales:** Con el creciente desarrollo de la industria, muchos residuos contaminantes producidos por las actividades realizadas en las fábricas son vertidos al cauce público, contaminando de este modo a ríos y mares. Como un ejemplo de la cantidad de residuos vertidos, el mar Mediterráneo recibe actualmente entre 400.000 y 500.000 toneladas de petróleo y residuos oleosos (Aguilar, 2011).
- **Contaminación térmica del agua:** La contaminación térmica viene producida por los vertidos correspondientes a los procesos de refrigeración y de aprovechamiento energético que tienen lugar en industrias y centrales. Al verter al cauce aguas con temperaturas superiores a las que los organismos son capaces de sobrevivir, su metabolismo se ve alterado y necesitan consumir más oxígeno de lo habitual. Por lo tanto, las especies presentes en este tipo de agua se ve afectada frente a su empobrecimiento en oxígeno (Uruguay, 2010).
- **Deforestación:** La tala de árboles y otras especies vegetales supone otro grave problema medioambiental a nivel mundial ya que, además de provocar la desaparición de numerosas especies vegetales y animales, contribuye al cambio climático.
- **Desechos humanos:** En las áreas cercanas a zonas urbanas existe una mayor contaminación en las aguas superficiales debido al vertido de los productos de desecho.



### **3.2 REGENERACIÓN DEL AGUA**

Tras la exposición de los problemas existentes con la escasez de recursos hídricos en el planeta debido a la contaminación, el cambio climático y el elevado consumo, se plantea la búsqueda de soluciones a este grave dilema. Algunas de estas soluciones se basan en una reducción del consumo de agua y en la posible regeneración de ésta.

La regeneración de aguas residuales urbanas, además de aumentar la disponibilidad de este recurso sin la necesidad de recurrir a las fuentes de abastecimiento, posee otras grandes ventajas para la humanidad. Estas ventajas se basan en el ahorro de energía, la disminución en la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, así como de contaminantes a los cauces. Esto supone un ahorro en el consumo de fertilizantes debido a la recuperación de fósforo y nitrógeno.

El agua regenerada es sometida a los procesos de depuración correspondientes para alcanzar la calidad requerida en función de los usos a los que va a ser destinada. La realización de estos procesos mediante una tecnología adecuada y sostenible, y con la posibilidad de llevarlos a cabo de una manera económica, se convierten en unos de los factores condicionantes más importantes en este asunto.

El Real Decreto 140/2003 reúne los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, así como de las instalaciones que se encargan de su suministro. En este documento se indica que el agua reutilizada para el consumo humano será salubre y limpia cuando no contenga microorganismos o bacterias en concentraciones perjudiciales para la salud y cuando cumpla los requisitos especificados en el anexo I de este Real Decreto, algunos de los cuales se resumen en la siguiente tabla:

**TABLA 1.** VALORES PARAMÉTRICOS A CUMPLIR POR EL AGUA REGENERADA PARA CONSUMO HUMANO. (REAL DECRETO 140/2003).

PARÁMETRO	VALOR PARAMÉTRICO
<b>ESCHERICHIA COLI</b>	0 UFC/100 mL
<b>ENTEROCOCCO</b>	0 UFC/100 mL
<b>BACTERIAS COLIFORMES</b>	0 UFC/100 mL
<b>NITRATO</b>	50 mg/L
<b>AMONIO</b>	0,50 mg/L
<b>CARBONO ORGÁNICO TOTAL</b>	Sin cambios anómalos
<b>CLORO COMBINADO RESIDUAL</b>	2,0 mg/L
<b>CLORO LIBRE RESIDUAL</b>	1,0 mg/L
<b>COLOR</b>	15 mg/L Pt/Co
<b>CONDUCTIVIDAD</b>	2500 µS/cm (a 20°C)
<b>TURBIDEZ (SALIDA ETAP)</b>	1 UNF
<b>TURBIDEZ (RED DE DISTRIBUCIÓN)</b>	5 UNF
<b>PH</b>	[ 6,5 – 9,5 ] Unidades de pH
<b>SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN</b>	5 – 35 mg/L

Las aguas reutilizadas pueden ser empleadas para distintos ámbitos, pero la legislación española (Real Decreto 1620/2007), en particular, prohíbe el uso de éstas para las siguientes situaciones:

- Consumo humano (beber, cocinar, higiene personal), salvo en situaciones de catástrofe.
- La industria alimentaria (fabricación, tratamiento, conservación). Salvo para aguas de proceso y limpieza.
- Instalaciones hospitalarias (y usos similares).
- Cultivo de moluscos filtradores en acuicultura.
- Uso recreativo como agua de baño.
- Fuentes y láminas ornamentales en espacios públicos.
- Torres de refrigeración y condensadores evaporativos para uso industrial (exclusivamente en localizaciones cercanas a zonas urbanas o con actividad pública y comercial).
- Otros usos que puedan suponer riesgo para la salud humana según las autoridades sanitarias.

### **3.2.1 USOS DEL AGUA REGENERADA**

Los ámbitos de aplicación de las aguas regeneradas son (Puig, 2012):

#### **1. Urbano**

- 1.1. Residencial. Riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios.
- 1.2. Servicios. Riego de zonas verdes urbanas, baldeo de calles, sistemas contra incendios y lavado industrial de vehículos.

#### **2. Agrícola**

- 2.1. Productos de consumo humano en fresco.
- 2.2. Productos de consumo humano no fresco. Pastos y acuicultura.
- 2.3. Cultivos leñosos y ornamentales. No alimentarios, viveros y forrajes.

#### **3. Industrial**

- 3.1. Aguas de proceso y limpieza.
- 3.2. Torres de refrigeración y condensadores evaporativos (exceptuando zonas y con actividad pública).

#### **4. Recreativo**

- 4.1. Riego de campos de golf.
- 4.2. Estanques y caudales circulantes ornamentales (sin acceso al público).

#### **5. Ambiental**

- 5.1. Recarga indirecta de acuíferos.
- 5.2. Recarga directa de acuíferos.
- 5.3. Riego de bosques, zonas verdes.
- 5.4. Otros usos (mantenimiento de humedales).

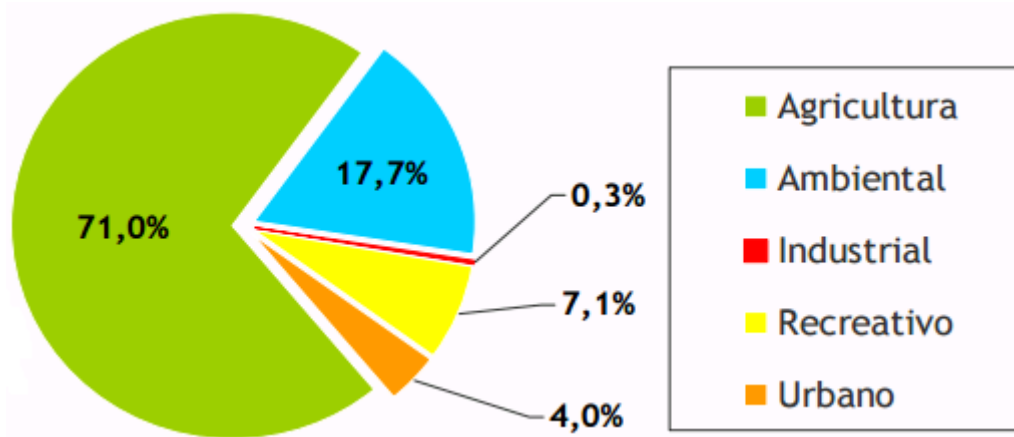


FIGURA 2. USOS DEL AGUA REGENERADA. (MAPAMA.GOB.ES)

El agua será destinada a cualquiera de los usos nombrados anteriormente dependiendo de sus criterios de calidad. La calidad requerida correspondiente a cada uso se especifica en el anexo I del Real Decreto 1620/2007, del cual se extrae la siguiente tabla:

TABLA 2. CRITERIOS DE CALIDAD PARA LA REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS SEGÚN SUS USOS. (R.D. 1620/2007)

USO DEL AGUA	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)			
	NEMATODOS INTESTINALES (huevos/10 L)	ESCHERICHIA COLI (UFC/100 mL)	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN (mg/L)	TURBIDEZ (UTN)
<b>1. URBANO</b>				
<b>1.1. Residencial.</b> - Riego de jardines privados. - Descarga de aparatos sanitarios.	1	0	10	2
<b>1.2. Servicios.</b> - Riego de zonas verdes urbanas - Baldeo de calles. - Sistemas contra incendios. - Lavado industrial de vehículos.	1	200	20	10
<b>2. AGRÍCOLA</b>				
2.1. Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco.	1	100	20	20
2.2. - Riego de productos para consumo humano con sistema de aplicación de agua que no evita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles, pero el consumo no es en fresco sino con un tratamiento industrial posterior. - Riego de pastos para consumo de animales y acuicultura.	1	1.000	35	No tiene límite

**TABLA 2 (CONTINUACIÓN).** CRITERIOS DE CALIDAD PARA LA REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS SEGÚN SUS USOS. (R.D. 1620/2007)

USO DEL AGUA	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)			
	NEMATODOS INTESTINALES (huevos/10 L)	ESCHERICHIA COLI (UFC/100 mL)	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN (mg/L)	TURBIDEZ (UTN)
2.3. - Riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana. - Riego de cultivos de flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo del agua regenerada con las producciones. - Riego de cultivos industriales no alimentarios, viveros, forrajes ensilados, cereales y semillas oleaginosas.	1	10.000	35	No tiene límite
<b>3. INDUSTRIAL</b>				
3.1. - Aguas de proceso y limpieza (excepto industria alimentaria).  - Otros usos industriales.	No tiene límite	10.000	35	15
3.2. Aguas de proceso y limpieza en la industria alimentaria.	1	1.000	35	No tiene límite.
3.3. Torres de refrigeración y condensadores evaporativos.	1	Ausencia	5	1
<b>4. RECREATIVO</b>				
4.1. Riego de campos de golf.	1	200	20	10
4.2. Estanques y caudales circulantes ornamentales (sin acceso al público).	No tiene límite	10.000	35	No tiene límite
<b>5. AMBIENTAL</b>				
5.1. Recarga indirecta de acuíferos (por percolación).	No tiene límites	1.000	35	No tiene límites
5.2. Recarga directa de acuíferos (por inyección directa).	1	0	10	2
5.3. - Riego de bosques, zonas verdes. - Silvicultura.	No tiene límites	No tiene límites	35	No tiene límites
5.4. Otros usos (mantenimiento de humedales).	La calidad mínima requerida se estudiará caso por caso			

### **3.3 CONTAMINANTES EMERGENTES**

Con el notable desarrollo de la industria, la vida se ve afectada en diferentes aspectos. Este desarrollo ha creado facilidades en cuanto a tiempo, espacio, trabajo, comodidad y bienestar. La sociedad se ve en la necesidad de innovar y, por ello, la industria pretende cubrir este tipo de necesidad mediante la creación de nuevos productos. Algunos son diseñados y creados para cubrir gran variedad de funciones, como los productos cosméticos.

Por otro lado, otros productos son creados porque son indispensables para la cura y mitigación de enfermedades, como los fármacos.

En los últimos años, estudios e investigaciones han descubierto el gran potencial que tienen los contaminantes emergentes sobre el impacto ambiental. Este potencial es debido a que poseen una capacidad muy elevada de persistir en el medio.

Como se puede observar en puntos tratados con anterioridad, en el marco legislativo de calidad de las aguas, no aparece ningún tipo de regulación relacionada con este tipo de contaminantes. Se prevé que, en un futuro, a partir de investigaciones y estudios más exhaustivos, estos compuestos estén reglamentados o regulados.

Los compuestos emergentes pasan al medio ambiente a través de las aguas residuales provenientes del uso doméstico, industrial, hospitalario, agrícola y ganadero.

Gracias al desarrollo de los métodos utilizados para su análisis, como por ejemplo mediante una microextracción en fase sólida seguida de una cromatografía de líquidos acoplado a una espectrometría de masas, los compuestos emergentes se han convertido en una de las principales preocupaciones de los científicos en los últimos años. El descubrimiento de este tipo de compuestos en las aguas superficiales del planeta, ha creado una gran alarma social ya que, debido a su elevada solubilidad en el agua y baja biodegradabilidad, pueden penetrar en cualquier organismo del medio y convertirse en un grave riesgo para la salud y el medio ambiente (Nikolaou, 2007). Por ello, se dice que estos compuestos suponen un grave riesgo para el medio, ya que no necesitan permanecer mucho tiempo en el ambiente para causar efectos nocivos, debido a que están siendo vertidos continuamente al entorno (Becerril, 2009).

#### **3.3.1 COMPUESTOS FARMACÉUTICOS**

El uso de fármacos se ha incrementado notablemente en los últimos años con el avance de la sociedad del bienestar y el desarrollo de la industria farmacéutica. Nuestro cuerpo no absorbe de manera absoluta los medicamentos. Éstos son excretados y, de esta manera, pasan a las aguas residuales (Peña Álvarez et al, 2015).

Dentro del conjunto de compuestos farmacéuticos, pueden ser considerados los más representativos o empleados los siguientes:

- **Analgésicos:** Estos medicamentos son empleados para aliviar los síntomas de dolor. Este tipo de producto farmacéutico es uno de los más empleados en España. Ejemplos de estos fármacos son la morfina (analgésicos opiáceos) y el ibuprofeno o el paracetamol (o acetaminofén). De este tipo de compuestos existen pocos o nulos antecedentes

toxicológicos. Es necesario estudiar e investigar las rutas metabólicas que siguen estos fármacos para determinar sus niveles de toxicidad (Gil et al, 2012).

- **Antihipertensivos:** Este conjunto de fármacos es empleado para reducir la presión arterial. Se han encontrado niveles superiores a los 0,017 µg/L de estos fármacos en aguas municipales (Ternes, 1998).
- **Antibióticos:** Los antibióticos son sustancias producidas por un ser vivo capaces de matar las bacterias que afectan a nuestro organismo o de impedir su crecimiento.
- **Antiepilépticos:** Sus componentes permiten el correcto funcionamiento del sistema nervioso. (Lehmann, 2007).

### **3.3.1.1 EFECTO DE LOS FÁRMACOS SOBRE EL MEDIO**

Este tipo de compuestos está diseñado para realizar una ruta concreta y provocar un efecto específico en el organismo, por ello, los fármacos en el medio pueden provocar estos efectos en los seres vivos que poseen organismos similares (Fent, et al, 2006).

A continuación, se muestran algunos de estos efectos sobre el medio ambiente, los seres vivos y sus organismos (Quesada et al, 2009):

- Los antibióticos aumentan la resistencia antibacteriana y afectan al crecimiento, la reproducción y la movilidad de los organismos.
- Los antiinflamatorios provocan efectos en el crecimiento y la movilidad de vertebrados e invertebrados.
- Se produce actividad mutagénica en las aguas de origen residual.
- Problemas en algunas especies de peces.
- Alteraciones en el metabolismo de plantas acuáticas y algas.
- Modificaciones en el metabolismo de los insectos.
- Debido a su baja o nula biodegradabilidad, pueden ocasionar daños muy perjudiciales en el medio ambiente y en los seres vivos.

En los últimos años se están realizando estudios más completos de caracterización relacionados con la aparición de estos compuestos en las aguas residuales antes y después de ser tratadas en las plantas de tratamiento. Estas investigaciones revelan que estos compuestos no sufren ninguna transformación (Bjorklund, 2008). A raíz de estos estudios, es cuando se alerta de la situación de las plantas depuradoras, las cuales no son capaces de eliminar los fármacos que contiene el agua residual (Harder et al., 2003). Por esta razón, se introducen tratamientos no convencionales terciarios habilitados para eliminar estos contaminantes y, de este modo, reducir la contaminación ambiental. A continuación, se especifican algunos tratamientos que se han desarrollado con el objetivo de mejorar la calidad del agua y poder eliminar así, los compuestos farmacéuticos.

### **3.4 TRATAMIENTOS TERCARIOS**

Actualmente, los tratamientos más empleados y considerados aplicados a las aguas residuales son la ozonización, la radiación ultravioleta, la tecnología de membranas y la cloración. Existe gran variedad de agentes que pueden ser utilizados para destruir los patógenos, pero algunos compuestos farmacéuticos presentan resistencia a éstos.

Este Trabajo Final de Grado basa su investigación sobre la eliminación de fármacos del agua residual proveniente de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) en un proceso que consta de un pretratamiento con membranas, en concreto, ultrafiltración. A este tratamiento le precede un proceso de desinfección, la cloración.

#### **3.4.1 TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS**

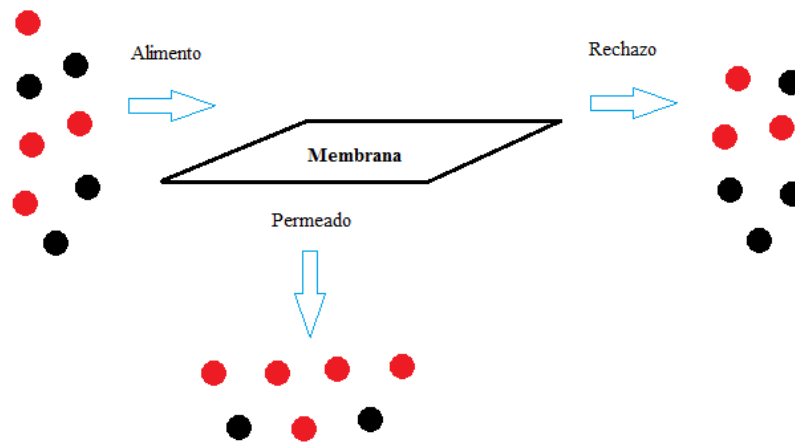
Existen una gran variedad de procesos de separación de disoluciones líquidas y gaseosas que pueden ser útiles para eliminar aquellos componentes indeseados presentes en el medio a tratar o, simplemente, separar la mezcla en dos o más componentes que pueden ser valiosos en el campo industrial. En cuanto al tipo de método a utilizar, depende siempre del tipo de mezcla y componentes que contiene, así como de sus propiedades.

La destilación, la evaporación, la centrifugación y la decantación, entre otros muchos más, son algunos de los métodos más utilizados en cuanto a la separación de mezclas.

La elección de este método de membranas se ha basado en su gran selectividad, eficiencia, sencillez en el modo de empleo y menor coste que los procesos de separación convencionales. Además, en las últimas décadas, este método ha sufrido un gran avance tecnológico debido a la evolución de los materiales en cuanto a la creación de nuevos productos que modifican la selectividad y son capaces de crear módulos a gran escala (Palacio et al, 2014). Esta tecnología es una de las opciones más empleadas debido a la elevada calidad de las corrientes tratadas (Soriano, 2001), así como puede ser utilizada en una gran variedad de procesos debido a sus numerosos beneficios. Estos beneficios se detallan a continuación (Mulder, 1997):

- La separación se produce de forma continua, al contrario de lo que ocurre en los procesos de filtración simple, en los cuales se produce la formación de torta.
- No es necesario un alto consumo de energía para ser operativa.
- Las condiciones de separación pueden ser suaves (temperatura ambiente, presiones bajas...), dependiendo del tipo del proceso del que se trate.
- Este método puede ser combinado con otros sin modificar la calidad del proceso. Estos son los denominados procesos híbridos.
- No es necesaria la adición de químicos.
- Las membranas tienen gran variedad de propiedades y, por ello, pueden ajustarse a los diferentes tipos de procesos en los que intervienen.

A continuación, se muestra un esquema en el que se puede observar que los procesos con membranas trabajan con tres corrientes diferentes. Una de estas es el alimento, es decir, la corriente que va a ser tratada. Esta corriente de entrada, una vez pasa a través de la membrana, se divide en dos: corriente de rechazo y corriente de permeado.



**FIGURA 3.** ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS PROCESOS CON MEMBRANAS. IMAGEN ADAPTADA DE (MULDER, 1997).

A la vista de la figura 3, podría definirse una membrana como una barrera fina semipermeable que permite el paso selectivo de ciertas sustancias (corriente de permeado), impidiendo a su vez el transporte de otros compuestos (corriente de rechazo). Por tanto, los componentes de la mezcla son retenidos o no en función del tamaño de poro, de su geometría y de las cargas electrostáticas del material. El rendimiento de las membranas viene determinado por dos parámetros característicos, como son la selectividad de la membrana y la densidad de flujo, el cual mide el caudal por unidad de área que fluye a través de la membrana (Mulder, 1997).

Un factor determinante que implica la separación de los componentes durante el proceso se trata de una fuerza impulsora aplicada a ambos lados del sistema. Esta fuerza suele consistir en la aplicación de un gradiente de concentración, de presión o de temperatura, así como de un potencial eléctrico o químico. Para el tratamiento de aguas residuales y producción de agua regenerada, la fuerza impulsora más adecuada en este tipo de procesos es el gradiente de presión. La aplicación de este gradiente da lugar a la convección de masa (Klein, 2009).

En general, los procesos que utilizan un gradiente de presión como fuerza impulsora son microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa. Estos procesos se ven diferenciados en el tamaño de poro y, consecuentemente, en el tipo de materiales que los constituyen y los compuestos que son capaces de separar. En la Tabla 3 se pueden observar los diferentes tamaños de poro correspondientes a cada uno de los procesos mencionados.



**TABLA 3.** CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE SEPARACIÓN (COULSON Y RICHARDSON, 2002).

PROCESO	RANGO DE SEPARACIÓN	MATERIALES
<b>MICROFILTRACIÓN</b>	0,1 - 10 $\mu\text{m}$	Partículas pequeñas, coloides, células microbianas
<b>ULTRAFILTRACIÓN</b>	< 0,1 $\mu\text{m}$ – 5 nm	Emulsiones, coloides, macromoléculas, proteínas
<b>NANOFILTRACIÓN</b>	< 0,002 $\mu\text{m}$	Sales disueltas, iones multivalentes, compuestos orgánicos
<b>ÓSMOSIS INVERSA</b>	< 0,0002 $\mu\text{m}$	Sales disueltas, iones monovalentes, compuestos orgánicos pequeños.

La disposición del agua tratada depende, además del tipo de membrana empleada, de las condiciones de trabajo que se llevan a cabo durante la separación. La presión aplicada, el caudal de trabajo, la temperatura, la viscosidad y el pH de la mezcla condicionan este proceso de una manera determinada, afectando considerablemente a la densidad de flujo (Strathmann, 2000).

Específicamente, para procesos en los que se emplean membranas de ultrafiltración, como el de este proyecto, el rango de presiones de trabajo adecuado se encuentra entre 0,5 y 5 bar (Mulder, 1997).

### **3.4.2 APLICACIONES DE LOS PROCESOS DE MEMBRANAS AL AGUA**

La tecnología de membranas abarca un amplio campo de aplicación. Las más consideradas son la separación de gases y líquidos, la industria petroquímica, del papel y la recuperación de compuestos del agua, entre otras. La aplicación más reveladora es la relacionada con el tratamiento de aguas (Ayala, 2006).

A continuación, se muestra una lista del tipo de aguas para el que se aplica este método (Tami Industries):

- Aguas de manantial.
- Lixiviados.
- Control biológico de la contaminación de aguas residuales.
- Lavado de contenedores y tanques.
- Aguas amoniacadas.

### **3.4.3 ULTRAFILTRACIÓN**

Los tratamientos de separación con membranas poseen una serie de ventajas que caracterizan a estos métodos y los diferencian de los demás. Ahora bien, en los procesos de ultrafiltración, junto a los de microfiltración, las membranas son vulnerables de ser afectadas de manera perjudicada a causa del fenómeno de ensuciamiento (García Ivars, 2015). Este

fenómeno viene determinado por una serie de factores, como las propiedades de la membrana, que determinarán el coste del proceso y del mantenimiento.

El ensuciamiento es el factor que provoca inestabilidad en el comportamiento de las membranas, causando una disminución de la densidad de flujo o, incluso, su rotura.

#### **3.4.4 CLASIFICACIÓN DE LAS MEMBRANAS**

Las membranas pueden ser clasificadas de acuerdo a diferentes criterios: su naturaleza, su material de fabricación, su geometría y su estructura. Los procesos de separación de ultrafiltración y microfiltración ya mencionados son caracterizados por el empleo de membranas porosas (Gozálvez Zafrilla, 1998).

Esta clase de membranas porosas puede ser clasificada según el tipo de material del que están fabricadas y según la geometría en la que se disponen (Diez González y De la Macorra García, 2014).

En relación al tipo de material de la membrana, éstas pueden clasificarse como membranas orgánicas e inorgánicas:

- **Membranas orgánicas:** Estas membranas son fabricadas a partir de materiales poliméricos o mezclas de polímeros. Los polímeros más utilizados son acetato de celulosa, poliétersulfona, polisulfona y polifluoruro de vinilideno. Estas membranas poseen un amplio campo de aplicación debido a la versatilidad de los polímeros. Dependiendo de su naturaleza y de la forma en la que está diseñada pueden ser empleadas para un tipo de proceso u otro (Sotto, 2008).
- **Membranas inorgánicas:** Este tipo de membranas se basa en materiales metálicos y cerámicos. Sus costes son más elevados y poseen mayor resistencia térmica, mecánica y química que las orgánicas. Por ello, se utilizan para procesos en los que se trabaja con temperaturas elevadas y con fluidos agresivos. Estas membranas soportan niveles menores de esfuerzos a tracción (Baker, 2004).

Las membranas cerámicas poseen grandes ventajas que las diferencian clara y simplemente del resto, convirtiéndolas en un sistema de gran fiabilidad. Una de estas ventajas es su alto grado de hidrofiliidad, minimizando la adherencia de moléculas sobre la superficie activa y, de este modo, minimizando el ensuciamiento de la membrana (Benito et al, 2004).

Otra gran ventaja que caracteriza las membranas cerámicas es su fácil regeneración. Esto es debido a la elevada resistencia de este material, que soporta fluidos agresivos, y a elevadas temperaturas, como las empleadas en las operaciones de limpieza (Diez González y De la Macorra García, 2014).

### **3.4.5 CLORACIÓN**

Para la completa eliminación de los fármacos en este Trabajo Final de Grado se utiliza un tratamiento de desinfección mediante la adición de cloro, posterior al pretratamiento de ultrafiltración. Este método de cloración es el método más común y empleado.

Los orígenes de este tratamiento se remontan a principios del siglo XX. Con este método, el cloro, o compuesto clorado, se introduce en el agua para poder disminuir el riesgo de contagios infecciosos, mediante mecanismos de oxidación que provocan la rotura de las células (Osorio et al, 2010). Con esto, se consigue eliminar Fe, Mn, amonio y nitritos, entre otros (Marín, 2006).

A pesar de que con este tratamiento se eliminan algunos microorganismos perjudiciales, el cloro reacciona formando subproductos que suponen riesgos para el medio ambiente y la salud. Esto es debido a las reacciones que se producen entre el cloro y la materia orgánica. Estas reacciones dan lugar a la formación de trihalometanos, los cuales presentan las propiedades de carcinógenos y tóxicos (Calderón, 2002).

Por otro lado, en las aguas que contienen fenoles y amoníaco (o compuestos amino nitrogenados), se produce la formación de polifenoles y cloraminas, respectivamente (Diez González y De la Macorra García, 2014). Este hecho afecta considerablemente a la eficacia de este tratamiento, junto con otros perturbantes como la turbidez. En las aguas residuales con un índice muy elevado de turbidez, los microorganismos patógenos son protegidos por las partículas, ya que se quedan adheridos a ellas (González et al, 2003).

Con el objetivo de mejorar los resultados obtenidos a partir de la cloración, (Blume y Neis, 2005) realizan una publicación en la que consta un estudio realizado en el que se verifica que la eficacia de este método aumenta gracias a la aplicación de ultrasonidos. Esto mejora la dispersión de las partículas y del cloro y facilita la rotura de las células. Esta técnica aumenta el consumo energético notablemente, por lo que representa un gran inconveniente.



## 4 METODOLOGÍA

En este apartado se explica la metodología seguida durante el procedimiento experimental. Para comenzar, se comenta en qué consiste el diseño de experimentos realizado mediante el programa estadístico. Seguidamente, se explican los pasos realizados durante la realización de los ensayos de permeabilidad, de caracterización de las membranas y del factor de reducción de volumen. Por último, se especifican los pasos a seguir para realizar una correcta caracterización del agua residual.

### 4.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Los experimentos realizados en el presente trabajo son diseñados y analizados a través del programa estadístico STATGRAPHICS Centurion XVI. Previamente a los experimentos, se realizó un diseño de experimentos con el fin de organizar una serie de experimentos de forma que, con el mínimo número de ensayos, poder extraer información útil sobre la influencia de distintos parámetros característicos del proceso y permitir analizar de forma rigurosa los datos extraídos. En este Trabajo Final de Grado, los factores a estudiar son la presión de trabajo y el pH de la disolución alimento. Estos factores se analizan a través de los parámetros obtenidos durante los ensayos o variables de respuesta, que son: el pH del permeado, la densidad de flujo y los índices de rechazo para cada uno de los compuestos farmacéuticos estudiados.

El primer factor, definido como el pH de alimento, constará de tres niveles que corresponden a los valores de pH de 6, 8 y 10; mientras que el segundo factor, definido como el incremento de presión de trabajo o presión transmembranal (diferencia de presiones entre un lado y otro de la membrana), está nivelado en tres puntos correspondientes a las presiones de 2, 3 y 4 bar. Por tanto, en este estudio, se tienen dos factores a tres niveles cada uno, lo que conlleva a un diseño de experimentos de 9 ensayos. Este diseño será útil para encontrar las condiciones que faciliten la mayor eliminación de fármacos.

	BLOCK	pH alimento	Presión
1	1	6,0	2,0
2	1	8,0	4,0
3	1	8,0	2,0
4	1	6,0	3,0
5	1	8,0	3,0
6	1	6,0	4,0
7	1	10,0	4,0
8	1	10,0	3,0
9	1	10,0	2,0

**FIGURA 4.** DISEÑO DE EXPERIMENTOS REALIZADO CON STATGRAPHICS.

En la figura 4 se pueden observar las condiciones de los ensayos a realizar extraídas del diseño de experimentos para las membranas cerámicas que serán utilizadas en este trabajo, con

cortes moleculares de 1 y 15 kDa. Así pues, el diseño de experimentos crea las nueve combinaciones existentes que conformarán los ensayos a realizar. Posteriormente, se introduce el valor de las variables respuesta obtenidas de manera experimental, con el objetivo de estudiar y analizar la influencia de los factores sobre éstas. Estos resultados son analizados mediante el estudio de los siguientes diagramas: diagrama de Pareto, diagrama de superficie respuesta y diagrama de interacciones.

Las variables respuesta analizadas en este trabajo son medidas según proceda. La conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y el pH del permeado (unidades de pH) son medidas durante los ensayos con un conductímetro y un pH-metro, respectivamente. La densidad de flujo ( $\text{L}/\text{m}^2\text{h}$ ) se calcula a partir del cociente entre el caudal medido ( $\text{L}/\text{h}$ ) y el área efectiva de la membrana ( $\text{m}^2$ ). Por último, los índices de rechazo (%) de cada compuesto se hallan a partir de las concentraciones de alimento y permeado, siguiendo la siguiente ecuación:

$$\text{Índices de rechazo}(\%) = \left(1 - \frac{C.\text{permeado}}{C.\text{alimento}}\right) \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Las concentraciones de cada fármaco en las corrientes de alimento y permeado son analizadas mediante cromatografía líquida de alta eficacia, a partir de la extracción de dichos fármacos, tal y como se explicará posteriormente en el apartado 4.2.5.

## 4.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los ensayos realizados en este trabajo se llevan a cabo en una planta piloto de ultrafiltración situada en el laboratorio del edificio 5K del Departamento de Ingeniería Química y Nuclear de la Universitat Politècnica de València. A continuación, en la figura 5, se puede observar un esquema de la planta en forma de diagrama de flujo.

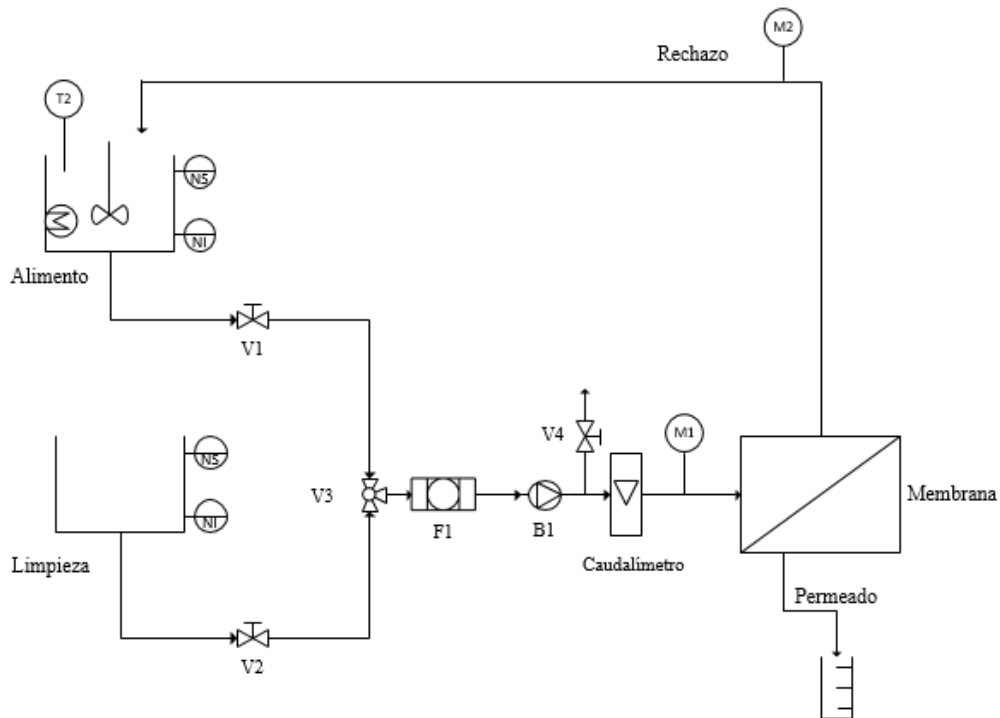


FIGURA 5. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA PILOTO.

Los equipos e instrumentos utilizados durante la realización de los ensayos se detallan en la siguiente lista:

- Un tanque de poliuretano de 120 litros para el alimento y otro tanque de acero inoxidable de 120 litros para el agua osmotizada empleada en la limpieza.
- Un intercambiador de calor para el tanque de alimento.
- Un agitador de tres hélices (modelo RZR-1 de Heido ph Instruments) que mantiene la disolución del alimento homogénea.
- Una sonda de temperatura en el tanque de alimento para controlar la temperatura de la disolución.
- Dos válvulas de bola, una válvula de tres vías y una válvula de alivio.
- Un filtro de tela de Cintropur.
- Una bomba centrífuga de pistones con motor modelo 3CP1241 de Cat Pumps.
- Un caudalímetro con un caudal máximo 8000 L/h.
- Dos manómetros (con DN 63), uno a cada lado de la membrana, para medir la presión transmembranal. El rango de medida de estos manómetros es (0-6) bar.
- Un módulo de membranas tubulares de la marca TAMI Industries de 25mm x 580mm.

- Un conductímetro modelo HD 2306.0.
- Un pH-metro modelo PH25+ de Crison Instruments S.A.
- Dos cronómetros, uno para controlar el tiempo total y otro para la toma de muestras.
- Probetas de 100, 250, 500 y 1000 mL de capacidad.
- Un vaso de precipitados de 1000 mL de capacidad.

En la figura 6 se observa una fotografía de la planta piloto.



**FIGURA 6.** PLANTA PILOTO EN LA QUE SE REALIZAN LOS ENSAYOS DE SEPARACIÓN CON LAS MEMBRANAS DE ULTRAFILTRACIÓN.

#### **4.2.1 PERMEABILIDAD DE LAS MEMBRANAS.**

Los ensayos realizados en el presente trabajo se realizan con dos membranas cerámicas de diferente corte molecular o tamaño de poro (1 y 15 kDa) y con un caudal constante de 2500 L/h.

El ensayo de permeabilidad al agua permite comprobar la resistencia de la membrana al paso de agua y permite conocer sus condiciones iniciales. Según la ecuación de Darcy (Ecuación 6), el coeficiente de permeabilidad viene determinado por la pendiente de la recta (K).

$$Jp = K \cdot (\Delta P - \Delta \pi) = \frac{Q_{\text{permeado}}}{A_{\text{membrana}}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde, K es el parámetro que define el coeficiente de permeabilidad (L/m<sup>2</sup>·h·bar).



Con este ensayo, se determinará la densidad de flujo de permeado a diferentes presiones transmembranales, y de la pendiente de la representación entre ambas variables se obtendrá el coeficiente de permeabilidad.

Para poder llevar a cabo el ensayo, la válvula del tanque de alimento permanece cerrada, mientras que se abre la del tanque de limpieza. A lo largo del ensayo, se toman datos de tiempo y volumen a intervalos de tiempo regulares (cada dos/tres minutos) para cada una de las presiones transmembranales seleccionadas (cuatro presiones comprendidas entre 0,5 a 3 bar). Las condiciones de presión y caudal constante se mantienen durante media hora, incrementando la presión hasta el siguiente valor (1, 2 y, finalmente, 3 bar). El volumen se anota para calcular el caudal a partir del tiempo en el que se ha tomado ese volumen de muestra, y así poder calcular la densidad de flujo, como ya se ha explicado anteriormente.

Una vez representada la densidad de flujo ( $L/m^2h$ ) y la presión (bar), se obtiene el coeficiente de permeabilidad  $K$  ( $L/m^2h \cdot bar$ ) a través de la pendiente de la recta representada.

#### **4.2.2 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN**

Con la realización de estos ensayos, se caracteriza el comportamiento de la membrana en diferentes condiciones de operación.

Como paso previo al comienzo de todo tipo de ensayo, se comprueba la disposición del circuito (válvulas) para no causar ningún perjuicio a la planta.

Para este ensayo de caracterización, la disolución de alimento está formada por el agua residual procedente de la salida del tratamiento secundario de una EDAR. A este agua se le añaden las disoluciones de los fármacos a las concentraciones correspondientes a la bibliografía consultada, que vienen detalladas en la siguiente tabla 4:

**TABLA 4.** CONCENTRACIONES DE LOS FÁRMACOS ADICIONADOS AL AGUA RESIDUAL.

<b>FÁRMACO</b>	<b>CONCENTRACIÓN</b>		<b>FÁRMACO</b>	<b>CONCENTRACIÓN</b>
Ibuprofeno	1000 ng/L		Diazepán	300 ng/L
Sulfametoxazol	1000 ng/L		Naproxeno	300 ng/L
Acetaminofén	1000 ng/L		Eritromicina	300 ng/L
Diclofenaco	300 ng/L		Trimetoprima	300 ng/L
Cafeína	300 ng/L		Triclosan	300 ng/L

Para calcular el volumen necesario de las disoluciones de fármacos que se tiene que adicionar al tanque de agua, se sigue la siguiente ecuación:

$$C1 \cdot V1 = C2 \cdot V2 \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde,

C1: concentración de fármaco en la disolución.

V1: volumen de la disolución de fármaco.

C2: concentración de fármaco que tiene que tener el agua.

V2: volumen de agua en el tanque.

Para este ensayo, como ya se ha comentado en la parte de diseño de experimentos mediante Statgraphics, se varía la presión transmembranal y el pH del alimento. Para ajustar el pH del alimento se emplean los reactivos de NaOH (2M) y HCl (2M), adicionando un reactivo u otro dependiendo del ajuste que se desea realizar, manteniendo la mezcla homogénea para que el pH-metro realice una medida correcta. La presión y el caudal son regulados a través del ajuste de la válvula de rosca situada tras el módulo de membranas cerámicas y el variador de frecuencia de la bomba.

Tras la homogenización de la disolución de alimento y ajustadas las condiciones de operación, se procede a la puesta en marcha de la planta piloto para realizar el ensayo experimental de caracterización.

Se realizan nueve ensayos para cada una de las membranas, realizando diferentes combinaciones de las condiciones de operación (como se mostró anteriormente en el diseño de experimentos, es un diseño factorial  $3^2$ ).

En cada uno de estos ensayos el procedimiento a realizar es el mismo. La toma de muestras de volumen, durante la primera media hora de ensayo, se realiza cada 3 minutos. Durante la siguiente hora y media de ensayo, estas tomas se recogen cada 5 minutos. Para la última media hora, éstas se toman cada 10 minutos. La toma de estas muestras se realiza cronometrando un minuto de tiempo mientras se recoge el permeado en una probeta, anotando el tiempo exacto en el que se para el cronómetro y el volumen de permeado recogido. De este modo, se obtiene el caudal de permeado.

Del mismo modo, cada media hora de ensayo se mide el pH y la conductividad del permeado, para poder analizar su evolución e introducir los datos en el programa estadístico para poder comprobar la influencia de los factores sobre esta variable respuesta. Finalmente, se analiza la concentración de fármacos existente en estas muestras.

Es importante que esté activado el control de temperatura con una unidad de refrigeración, así cuando esta variable alcanza los 25°C, el intercambiador se pone en funcionamiento para mantener la temperatura de la disolución tratada.

Una vez finalizado este ensayo, se realiza un aclarado con agua osmotizada a contracorriente. Para este procedimiento se cambian las válvulas del circuito, quedando así el tanque del alimento cerrado y el de limpieza abierto.

#### **4.2.3 FACTOR DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN**

Este ensayo se realiza mediante un procedimiento similar al de caracterización, pero difiere del mismo en que el permeado no es retornado al tanque de alimentación y que el tiempo de ensayo es mayor, ya que para averiguar el factor de reducción de volumen (FRV) es necesario que el tanque de alimento se vacíe lo máximo posible sin afectar a ningún equipo del sistema. Por ello, este ensayo no tiene límite de tiempo, si no que finaliza cuando el tanque se haya vaciado. Este ensayo simula el ensuciamiento de la membrana en unas condiciones lo más parecidas posible a la industria.

Este experimento se realiza a una presión de 4 bar y a pH 10 para ambas membranas cerámicas. Se toman muestras de permeado para unos valores de FRV indicados. Este factor representa el cociente entre el caudal de alimento y el de rechazo. Viene dado por la siguiente ecuación:

$$FRV = \frac{Q_{alimento}}{Q_{rechazo}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

En cada una de estas muestras se mide el pH y la conductividad, como en los ensayos anteriores. Éstas también son analizadas para analizar la densidad de flujo y averiguar la concentración de fármacos que contienen.

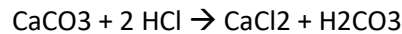
#### **4.2.4 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL**

En este apartado se realiza la caracterización física y química de las muestras de agua residual utilizadas en los ensayos realizados, siendo las propiedades a analizar las siguientes:

- **Sólidos en suspensión:** La determinación de los sólidos en suspensión se realiza según la norma UNE 77030:1982. Se introducen un volumen de muestra en un crisol (aproximadamente 10 mL) y se pesa. Este crisol se introduce en una estufa a 105°C y se vuelve a pesar. Se calcula la diferencia de masas y, de este modo, se hallan los sólidos que contiene la muestra. Este resultado debe de mostrarse en mg/L (ppm).
- **Turbidez:** La turbidez es causada por los sólidos sedimentables. Esta variable se mide con un turbidímetro óptico. Antes de medir la turbidez de la muestra, se realizan medidas con patrones ya creados para calibrar el instrumento. Las unidades de la turbidez se proporcionan en NTU.
- **Demanda química de oxígeno (DQO):** Para realizar la medida de la DQO se utiliza un kit que contiene los reactivos que se tienen que utilizar y las instrucciones de uso. El kit proporciona unos tubos en los que está contenido el reactivo. Se agita el tubo y se introduce la cantidad de muestra indicada. Se vuelve a agitar el tubo ligeramente y con cuidado, ya que la reacción que se produce es exotérmica. La reacción que se produce en el interior de los tubos se basa en que, con sulfato de plata como catalizador, las sustancias oxidables reaccionan con el ácido sulfúrico y el dicromato de potasio. Se

introduce el tubo en calentador de tubos de ensayo durante un intervalo de tiempo de dos horas a 148°C. Cuando finalice este tiempo, se dejan enfriar las muestras y se introducen en el espectrofotómetro para medir el parámetro indicado (mgO<sub>2</sub>/L).

- **Color:** La medida de este parámetro se realiza mediante un espectrofotómetro ultravioleta-visible a una longitud de onda de 254 nm. Primero se realiza la medida de un blanco. Seguidamente se introducen las muestras a medir. El resultado para este parámetro se halla mediante la diferencia entre el valor de absorbancia del de la muestra y el del blanco.
- **Conductividad:** Este parámetro se mide para comprobar la cantidad de sales disueltas que contiene el agua. Éstas son las que hacen que el agua sea capaz de conducir la corriente eléctrica.
- **Alcalinidad:** La alcalinidad viene determinada por la cantidad de iones carbonato y bicarbonato que contiene el agua, es decir, la alcalinidad hace referencia a la capacidad que tiene el agua de neutralizar disoluciones ácidas. Se introducen en el vaso aproximadamente 50 mL de muestra y unas gotas de indicador (rojo de metilo). La muestra es valorada con HCl (0,1N). El indicador adicionado hace que la muestra cambie de color cuando se produce la neutralización del CaCO<sub>3</sub>.



A partir de la molaridad y el volumen empleado de HCl en la valoración, se averiguan los moles de HCl que han sido necesarios para neutralizar el CaCO<sub>3</sub>:

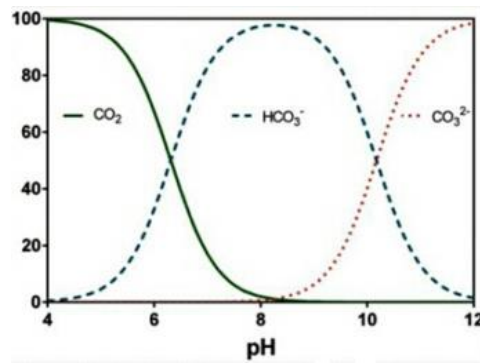
$$n(\text{HCl}) = M(\text{HCl}) \cdot V(\text{HCl}) \quad (\text{Ecuación 5})$$

Según la estequiometría de la reacción, por cada 2 moles de HCl reacciona 1 mol de CaCO<sub>3</sub>. Por lo que, a partir de esta relación, se pueden calcular los moles de carbonato de calcio que contiene la muestra.

Como este parámetro se mide en ppm de CaCO<sub>3</sub>, a partir de los moles calculados en el paso anterior, se puede hallar la masa, como se puede observar en la ecuación 6.

$$m(\text{CaCO}_3) = PM(\text{CaCO}_3) \cdot n(\text{CaCO}_3) \quad (\text{Ecuación 6})$$

Una vez obtenidos los gramos de carbonato de calcio y con el volumen de muestra utilizado, realizando el cambio de unidades correspondiente, se calculan los mg/L (ppm) de CaCO<sub>3</sub>.



**FIGURA 7.** EFECTO DEL PH SOBRE LAS ESPECIES INDICADAS (BRAGADO, 2017).

#### **4.2.5 EXTRACCIÓN DE LOS COMPUESTOS FARMACÉUTICOS**

Antes de comenzar la extracción, con la bomba realizando el vacío, se hacen pasar por los cartuchos SPE 6 mL de metanol y 6 mL de agua destilada para activarlos. Se para la bomba, se introducen las muestras en unos matraces aforados de 250 mL y se colocan los tubos que permiten que las muestras pasen de los matraces a los cartuchos. Se vuelve a conectar la bomba y controlando el vacío generado en el sistema, se espera el tiempo necesario para que todo el volumen de muestra haya pasado por los cartuchos. Una vez vaciados los matraces, se quitan los tubos y se vuelve a conectar la bomba a vacío para realizar el secado de los cartuchos. Transcurrido este tiempo, se colocan unos viales debajo de los cartuchos y se hacen pasar 6 ml de metanol a través de ellos. Estos viales son analizados mediante cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC) acoplado a un espectrómetro de masas. Con la cromatografía se calcula la concentración de cada uno de los fármacos utilizados.

De este modo, podemos analizar la eficacia de la planta mediante los índices de rechazo (%).



## 5 RESULTADOS

En este apartado se evalúan los resultados obtenidos durante los ensayos realizados en el laboratorio, con el mismo orden seguido que en el apartado anterior.

### 5.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

En este apartado se evalúa cada variable respuesta por separado, las cuales ya se han nombrado en el apartado 4.1. De este modo, los valores de las condiciones de operación y de las variables respuesta (obtenidos a partir de los ensayos experimentales) son introducidos en el programa estadístico. Este programa nos devuelve estos resultados en forma de diagramas, de los cuales podemos obtener la siguiente información:

- Valores significativamente estadísticos: A través del diagrama de Pareto se pueden averiguar los factores que son significativamente estadísticos y sus efectos en relación a cada una de las variables respuesta.
- A través del diagrama de superficie de respuesta se pueden observar los resultados obtenidos experimentalmente para cada variable respuesta en función de las condiciones de operación iniciales.
- Interacciones entre las variables respuesta y los factores mediante el diagrama de interacciones.

#### 5.1.1 CONDUCTIVIDAD DEL PERMEADO (MEMBRANA 1 KDA)

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la membrana de 1 kDa.

**TABLA 5.** RESULTADOS EXPERIMENTALES DE CONDUCTIVIDAD INTRODUCIDOS EN STATGRAPHICS.  
MEMBRANA 1 KDA.

Ensayo	pH alimento	Presión (bar)	Conductividad permeado ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
1	6	2	1579
2	6	3	1485
3	6	4	1666
4	8	2	1467
5	8	3	1587
6	8	4	1436
7	10	2	1359
8	10	3	1366
9	10	4	1425

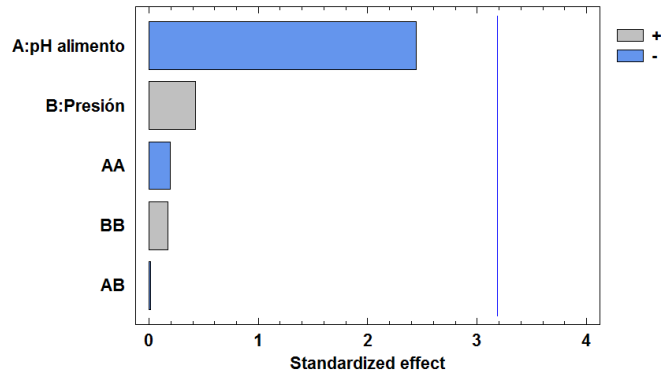


FIGURA 8. DIAGRAMA DE PARETO PARA LA CONDUCTIVIDAD DEL PERMEADO. MEMBRANA 1 KDA.

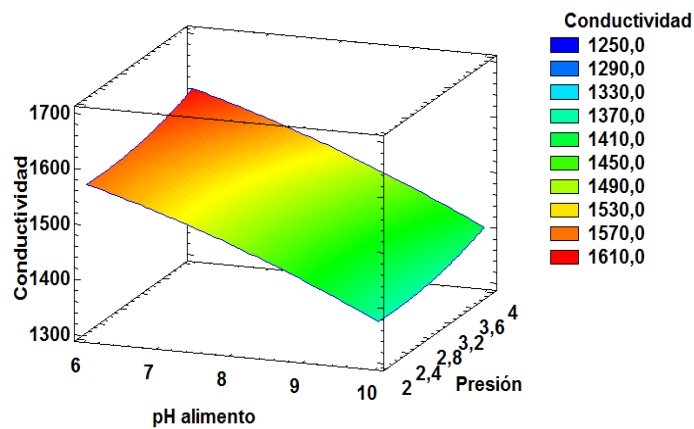


FIGURA 9. DIAGRAMA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA LA CONDUCTIVIDAD DEL PERMEADO. MEMBRANA 1 KDA.

En la figura 8 se representa el efecto estandarizado de las condiciones de operación sobre la conductividad del permeado. Como se puede observar, las barras que representan el pH del alimento, la presión y sus efectos cuadráticos no sobrepasan la línea azul. Esto significa que estos factores no son estadísticamente significativos en relación a la conductividad del permeado, es decir, que no afectan a esta variable.

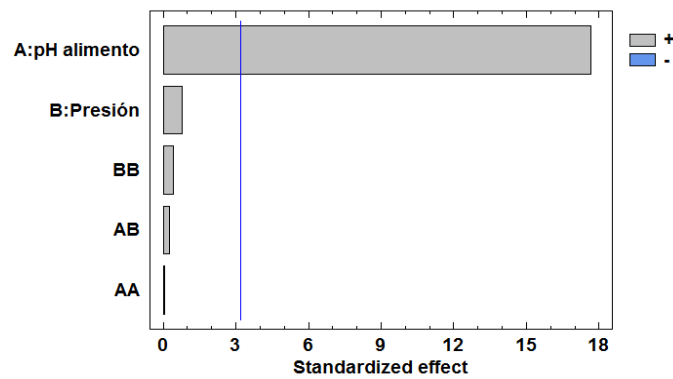
En la figura 9, en la cual está representado el diagrama de superficie de respuesta, se observa que la conductividad alcanza sus valores más elevados a un pH de alimento cercano a 6, encontrándose su valor máximo a un pH 6 y una presión de 4 bar. Para obtener valores bajos de conductividad, las condiciones de operación se deben fijar con un pH de alimento cercano a 10. Se observa como la conductividad disminuye cuando el pH del alimento aumenta, independientemente de la presión a la que se trabaja.



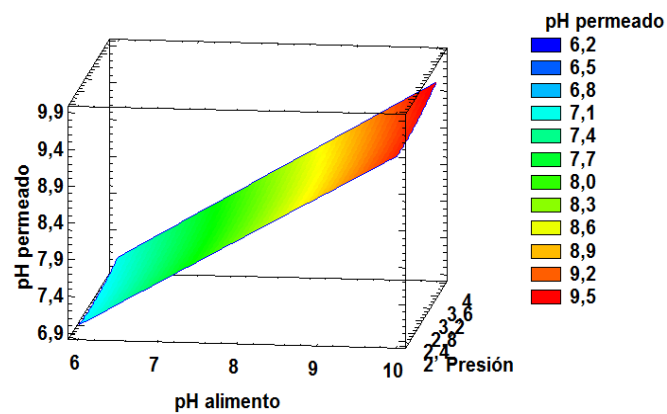
### 5.1.2 PH PERMEADO (MEMBRANA 1 KDA)

**TABLA 6.** RESULTADOS EXPERIMENTALES DE PH INTRODUCIDOS EN STATGRAPHICS. MEMBRANA 1 KDA.

Ensayo	pH alimento	Presión (bar)	pH permeado
1	6	2	6,98
2	6	3	7,1
3	6	4	6,94
4	8	2	8,15
5	8	3	8,07
6	8	4	8,48
7	10	2	9,44
8	10	3	9,42
9	10	4	9,48



**FIGURA 10.** DIAGRAMA DE PARETO PARA EL PH DEL PERMEADO. MEMBRANA 1 KDA.



**FIGURA 11.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA EL PH DEL PERMEADO. MEMBRANA 1 KDA.

Con el diagrama de Pareto (figura 10) se puede observar que, para la variable pH del permeado, el pH del alimento es estadísticamente muy significativo y con un efecto directamente proporcional, como es lógico.

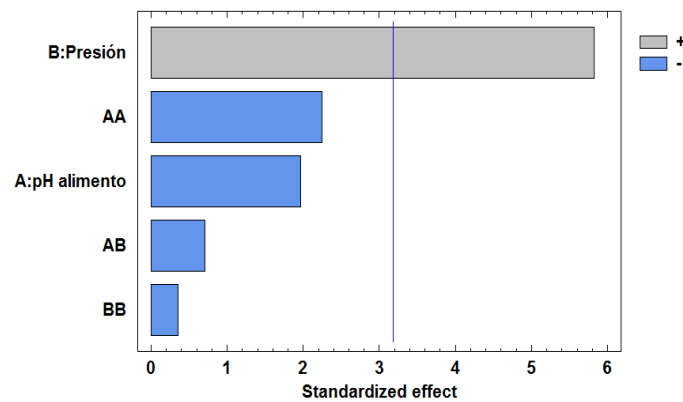
En la figura 11 se observa cómo el pH del alimento y el pH del permeado siguen la misma evolución y cómo la presión no afecta a esta variable respuesta.

Como se puede observar, ocurre lo contrario que con la variable conductividad (figura 9), es decir, ahora el pH del permeado aumenta cuando el pH del alimento aumenta.

### 5.1.3 DENSIDAD DE FLUJO (MEMBRANA 1 KDA)

**TABLA 7.** RESULTADOS EXPERIMENTALES DE DENSIDAD DE FLUJO INTRODUCIDOS EN STATGRAPHICS.  
MEMBRANA 1 KDA.

Ensayo	pH alimento	Presión (bar)	Densidad de flujo (L/m <sup>2</sup> h)
1	6	2	8,782
2	6	3	11,927
3	6	4	16,307
4	8	2	9,566
5	8	3	15,134
6	8	4	15,578
7	10	2	7,707
8	10	3	9,538
9	10	4	13,332



**FIGURA 12.** DIAGRAMA DE PARETO PARA LA DENSIDAD DE FLUJO. MEMBRANA 1 KDA.

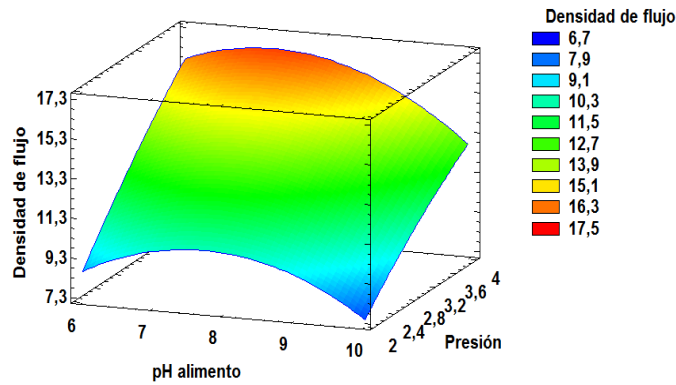


FIGURA 13. DIAGRAMA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA LA DENSIDAD DE FLUJO. MEMBRANA 1 KDA.

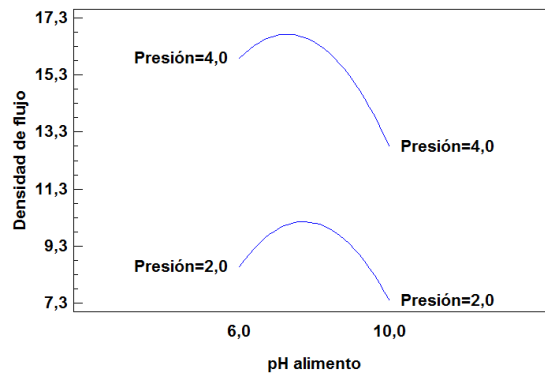


FIGURA 14. DIAGRAMA DE INTERACCIONES PARA LA DENSIDAD DE FLUJO. MEMBRANA 1 KDA.

El diagrama de Pareto (figura 12) muestra que la presión afecta de manera positiva a la densidad de flujo del permeado, mientras que el pH de alimento y los efectos cuadráticos entre pH y presión no son estadísticamente significativos ante esta variable respuesta.

En el diagrama de superficie de respuesta, en la figura 13, se observa que los valores más elevados de densidad de flujo de permeado se obtienen a presiones cercanas a 4 bar. Este hecho era de esperar debido al efecto significativo y directamente proporcional de la presión sobre esta variable.

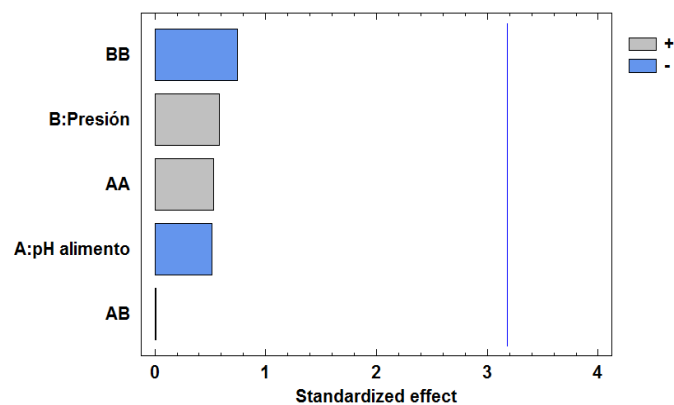
En el diagrama de interacciones, figura 14, se observa que, independientemente de la presión a la que se trabaje, la evolución de la densidad de flujo tiene un máximo, es decir, crece y luego decrece. Esto puede ser debido a las interacciones de los compuestos con las cargas de la membrana en el cambio de pH ácido a pH básico.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la membrana de 15 kDa.

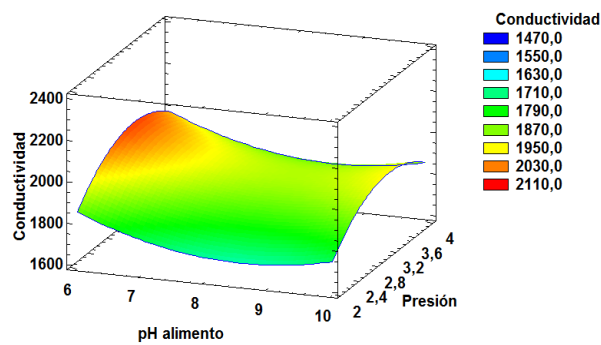
#### 5.1.4 CONDUCTIVIDAD DEL PERMEADO (MEMBRANA 15 KDA)

**TABLA 8.** RESULTADOS EXPERIMENTALES DE CONDUCTIVIDAD INTRODUCIDOS EN STATGRAPHICS.  
MEMBRANA 15 KDA.

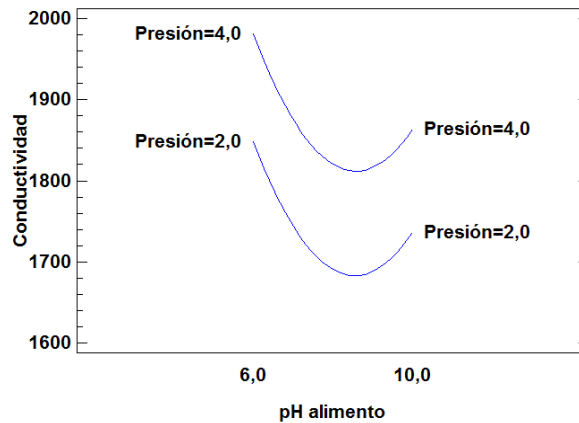
Ensayo	pH alimento	Presión (bar)	Conductividad permeado (L/m <sup>2</sup> h)
1	6	2	1793
2	6	3	2300
3	6	4	1795
4	8	2	1678
5	8	3	1662
6	8	4	2070
7	10	2	1804
8	10	3	1939
9	10	4	1800



**FIGURA 15.** DIAGRAMA DE PARETO PARA LA CONDUCTIVIDAD DEL PERMEADO. MEMBRANA 15 KDA.



**FIGURA 16.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA LA CONDUCTIVIDAD DEL PERMEADO.  
MEMBRANA 15 KDA.



**FIGURA 17.** DIAGRAMA DE INTERACCIONES PARA LA CONDUCTIVIDAD DEL PERMEADO. MEMBRANA 15 KDA.

El efecto que tienen el pH del alimento, la presión y los efectos cuadráticos entre ellos, sobre la conductividad del permeado, no es estadísticamente significativo, como se puede observar en la figura 15.

Del mismo modo que ocurre con la membrana de 1 kDa, los valores más elevados de conductividad se obtienen para un pH de alimento aproximado a 6. Esto se observa en el diagrama de superficie de respuesta de la figura 16.

La evolución de la conductividad en función del pH del alimento tiene un mínimo cuando el pH del alimento es aproximadamente 9, como se puede observar en la figura 17. Cuando se trabaja con una presión menor, los valores de la conductividad de permeado también alcanzan unos valores menores.

### 5.1.5 PH PERMEADO (MEMBRANA 15 KDA)

**TABLA 9.** RESULTADOS EXPERIMENTALES DE PH INTRODUCIDOS EN STATGRAPHICS. MEMBRANA 15 KDA.

Ensayo	pH alimento	Presión (bar)	pH permeado
1	6	2	7,06
2	6	3	7,25
3	6	4	7,36
4	8	2	8,19
5	8	3	7,96
6	8	4	8,1
7	10	2	9,25
8	10	3	9,37
9	10	4	9,57

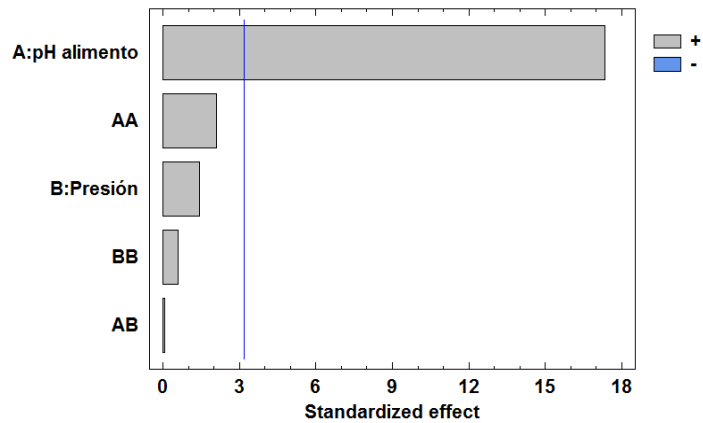


FIGURA 18. DIAGRAMA DE PARETO PARA EL PH DEL PERMEADO. MEMBRANA 15 KDA.

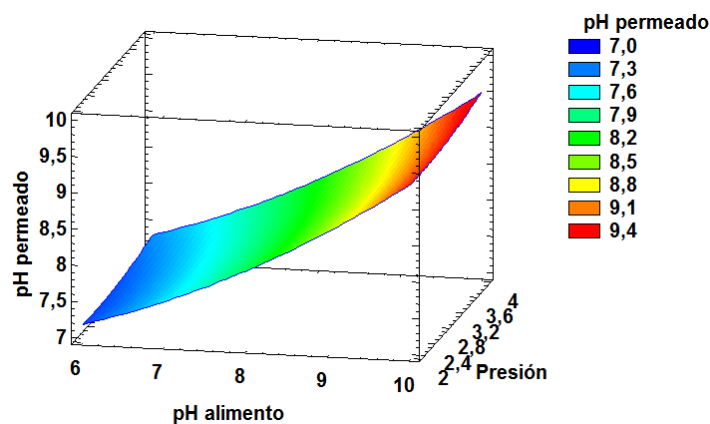


FIGURA 19. DIAGRAMA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA EL PH DE PERMEADO. MEMBRANA 15 KDA.

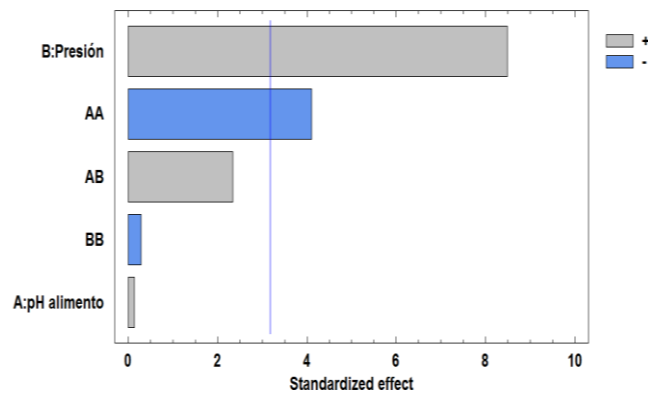
Como es de esperar, ocurre lo mismo con las dos membranas de diferente corte molecular, el pH del alimento tiene un efecto muy significativo y positivo sobre el pH del permeado (figura 18).

La influencia que tiene el pH del alimento, la presión y sus efectos cuadráticos entre estos dos factores, sobre el pH del permeado, es la misma que para la membrana de 1 kDa. El pH del permeado aumenta de manera proporcional a como lo hace el pH del alimento, como se puede observar en la figura 19.

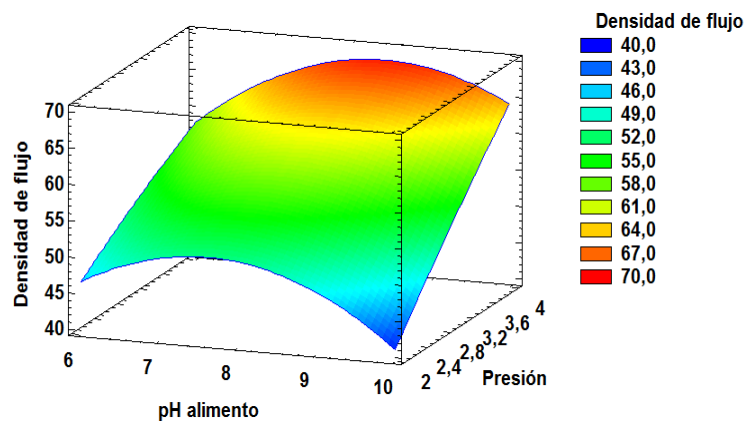
### 5.1.6 DENSIDAD DE FLUJO (MEMBRANA 15 KDA)

**TABLA 10.** RESULTADOS EXPERIMENTALES DE DENSIDAD DE FLUJO INTRODUCIDOS EN STATGRAPHICS.  
MEMBRANA 15 KDA.

Ensayo	pH alimento	Presión (bar)	Densidad de flujo (L/m <sup>2</sup> h)
1	6	2	46,887
2	6	3	50,516
3	6	4	59,799
4	8	2	51,023
5	8	3	62,543
6	8	4	66,262
7	10	2	40,114
8	10	3	53,050
9	10	4	64,944



**FIGURA 20.** DIAGRAMA DE PARETO PARA LA DENSIDAD DE FLUJO. MEMBRANA 15 KDA.



**FIGURA 21.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA LA DENSIDAD DE FLUJO. MEMBRANA 15 KDA.

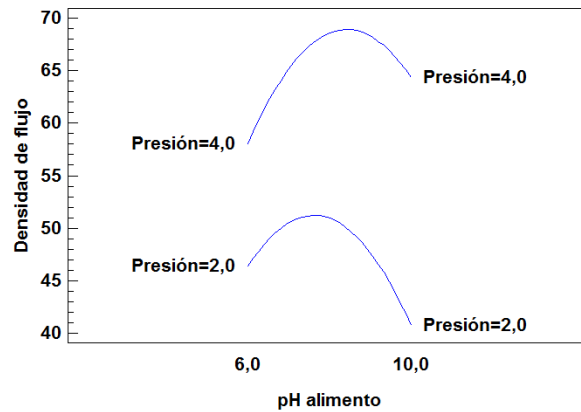


FIGURA 22. DIAGRAMA DE INTERACCIONES PARA LA DENSIDAD DE FLUJO. MEMBRANA 15 KDA.

En la figura 20 se observa, mediante el diagrama de Pareto, como la presión es estadísticamente muy significativa sobre la variable respuesta densidad de flujo. Esta influencia es directamente proporcional, es decir, a mayor presión, mayor densidad de flujo se obtiene.

En la siguiente figura (figura 21), los resultados obtenidos concluyen en lo comentado anteriormente, esto es, los valores más elevados de densidad de flujo se dan para una presión aplicada de 4 bar. Por otro lado, los valores más bajos de densidad de flujo obtenidos se dan para una presión de 2 bar y un pH de alimento de 10 unidades.

Con el diagrama de interacciones ocurre lo mismo que con la membrana de 1 kDa. Debido al cambio de configuración en las cargas cuando se produce un cambio de pH de ácido a básico, se observa un máximo en la evolución de esta variable (figura 22).



### 5.1.7 ÍNDICES DE RECHAZO DE LOS COMPUESTOS FARMACÉUTICOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los índices de rechazo de cada uno de los compuestos farmacéuticos empleados, en forma de diagrama de Pareto y de superficie de respuesta, para así poder analizar cuáles son las condiciones de operación con las que se obtiene un mayor índice de rechazo.

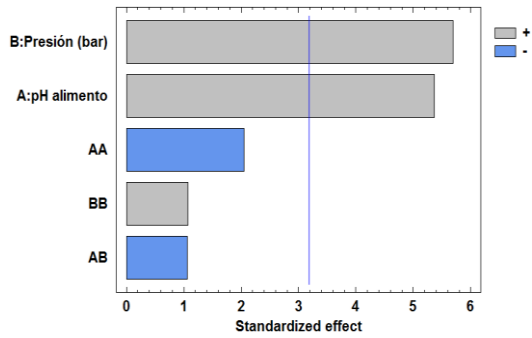
#### ➤ Membrana 1 kDa

**TABLA 11.** RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LOS ÍNDICES DE RECHAZO INTRODUCIDOS EN STATGRAPHICS. MEMBRANA 1 KDA.

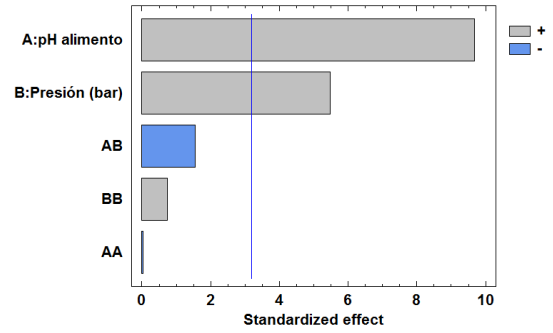
Ensayo	pH alim	Presión (bar)	Ibuprofeno (%)	Sulfametoxazol (%)	Acetaminofén (%)	Diclofenaco (%)	Cafeína (%)
1	6	2	37,75	11,18	27,51	6,98	11,20
2	6	3	51,04	19,74	29,53	24,96	17,54
3	6	4	60,89	28,12	44,91	32,46	36,28
4	8	2	53,09	18,77	39,11	19,23	31,85
5	8	3	65,22	45,99	43,43	26,72	37,16
6	8	4	89,65	81,80	51,30	36,00	54,49
7	10	2	78,73	28,29	40,60	19,55	34,11
8	10	3	91,70	62,19	47,99	26,91	61,08
9	10	4	93,75	82,60	51,78	44,53	75,33

**TABLA 11 (CONTINUACIÓN).** RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LOS ÍNDICES DE RECHAZO INTRODUCIDOS EN STATGRAPHICS. MEMBRANA 1 KDA.

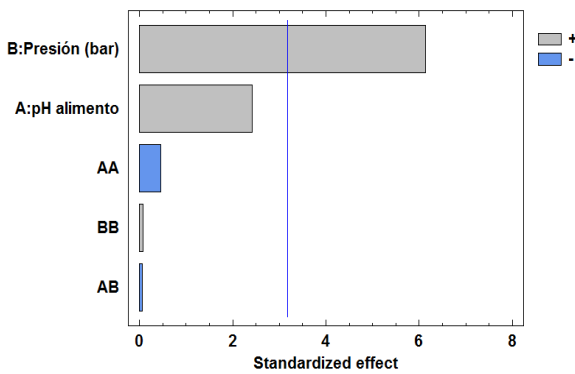
Ensayo	pH alim	Presión (bar)	Diazepán (%)	Naproxeno (%)	Eritromicina (%)	Trimetoprima (%)	Triclosán (%)
1	6	2	10,18	15,52	29,67	5,16	21,74
2	6	3	14,36	19,64	62,97	8,94	27,61
3	6	4	49,95	30,98	61,68	12,78	36,94
4	8	2	10,97	28,00	30,73	16,77	41,17
5	8	3	25,60	29,80	64,02	20,44	56,47
6	8	4	64,96	37,57	79,82	38,66	64,17
7	10	2	23,54	36,54	30,65	32,95	68,25
8	10	3	64,69	43,26	81,05	47,45	70,32
9	10	4	74,86	44,42	86,70	56,60	84,91



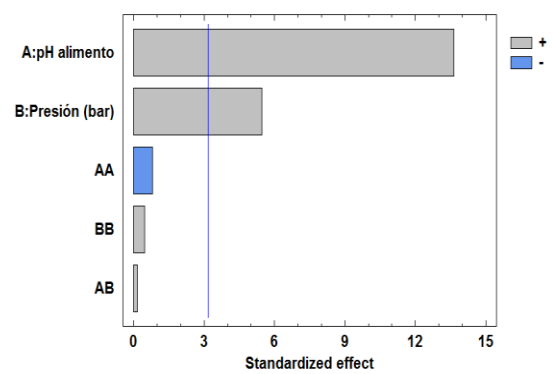
**FIGURA 23.** DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL ACETAMINOFÉN. MEMBRANA 1 KDA.



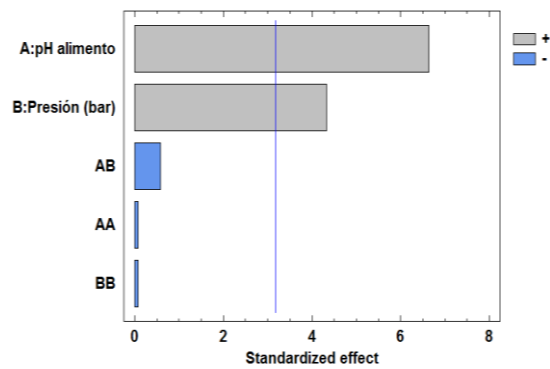
**FIGURA 24.** DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL NAPROXENO. MEMBRANA 1 KDA.



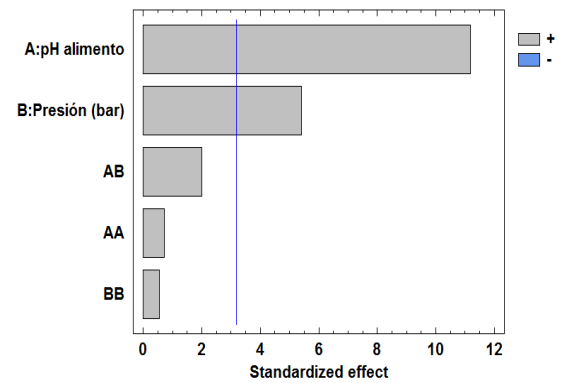
**FIGURA 25.** DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL DICLOFENAC. MEMBRANA 1 KDA.



**FIGURA 27.** DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL TRICLOSÁN. MEMBRANA 1 KDA.



**FIGURA 26.** DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL IBUPROFENO. MEMBRANA 1 KDA.



**FIGURA 28.** DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DE LA TRIMETOPRIMA. MEMBRANA 1 KDA.

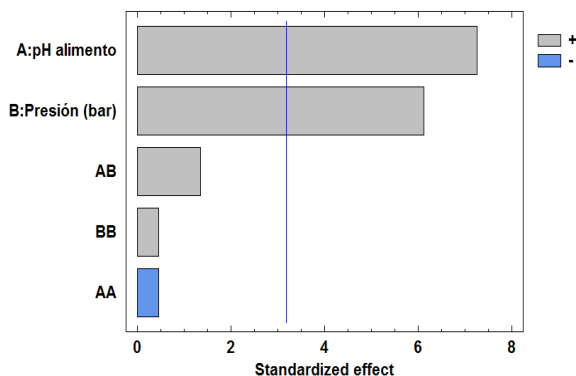


FIGURA 29. DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DE LA CAFÉINA. MEMBRANA 1 KDA.

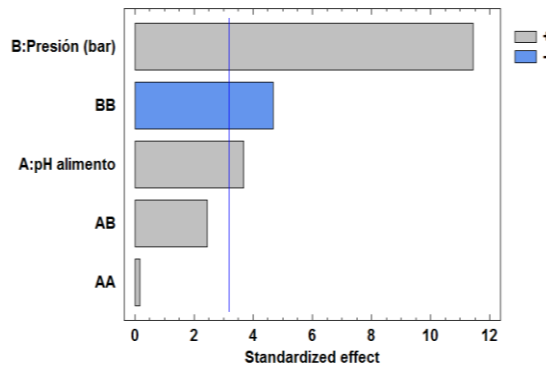


FIGURA 31. DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DE LA ERITROMICINA. MEMBRANA 1 KDA.

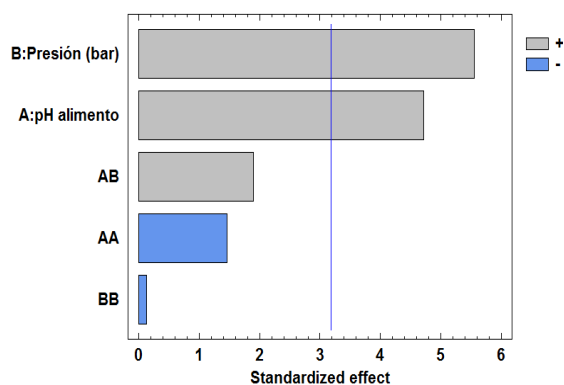


FIGURA 30. DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL SULFAMETOXAZOL. MEMBRANA 1 KDA.

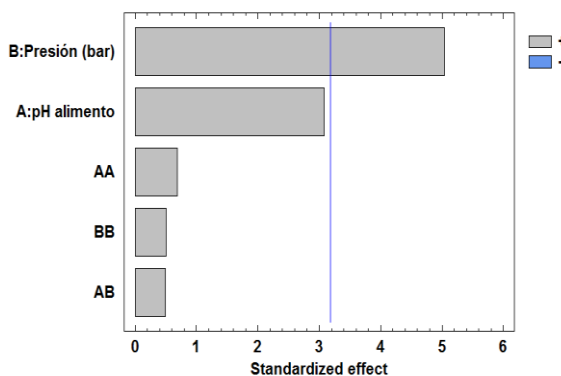


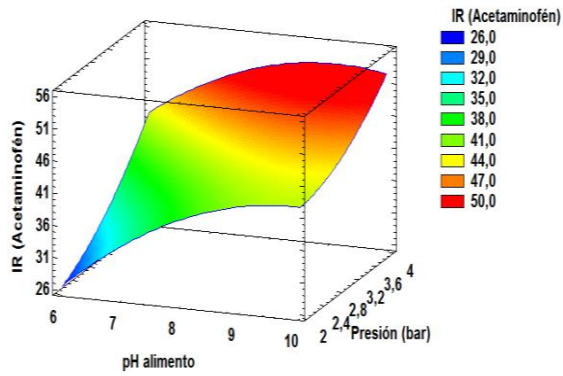
FIGURA 32. DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL DIAZEPÁN. MEMBRANA 1 KDA.

En las figuras representadas anteriormente (figuras 23 – 32) se muestra la representación del diagrama de Pareto para cada uno de los compuestos farmacéuticos analizados.

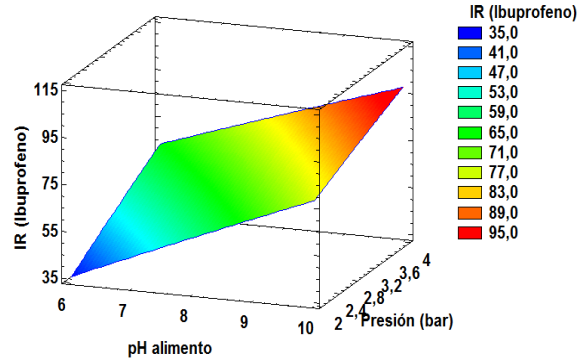
Como se puede observar, el pH del alimento y la presión aplicada, son parámetros estadísticamente significativos y con un efecto positivo sobre los índices de rechazo de los siguientes compuestos: acetaminofén, naproxeno, ibuprofeno, triclosán, trimetoprima, cafeína, sulfametoxazol y eritromicina.

Por el contrario, los diagramas de Pareto representados para el diclofenaco y el diazepam, indican que el pH sí que tiene un efecto estadísticamente significativo y positivo, pero, la presión transmembranal, no tiene efecto sobre los índices de rechazo correspondientes a estos compuestos farmacéuticos.

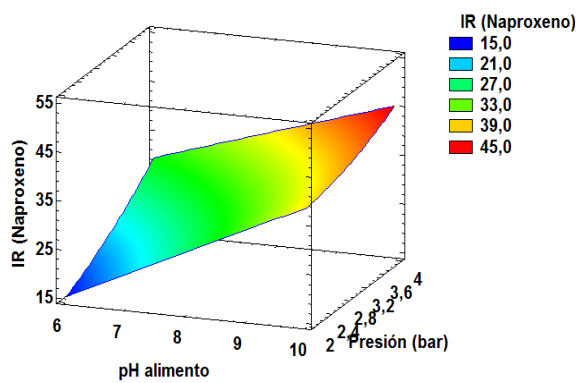
También se puede observar en la figura 31, como el efecto cuadrático de la presión tiene un efecto estadísticamente significativo pero negativo sobre los índices de rechazo de la eritromicina.



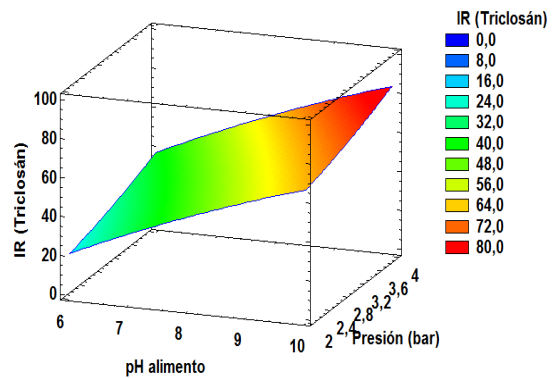
**FIGURA 33.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL ACETAMINOFÉN. MEMBRANA 1 KDA.



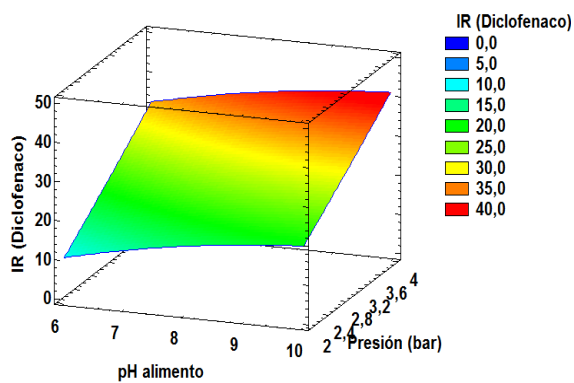
**FIGURA 36.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL IBUPROFENO. MEMBRANA 1 KDA.



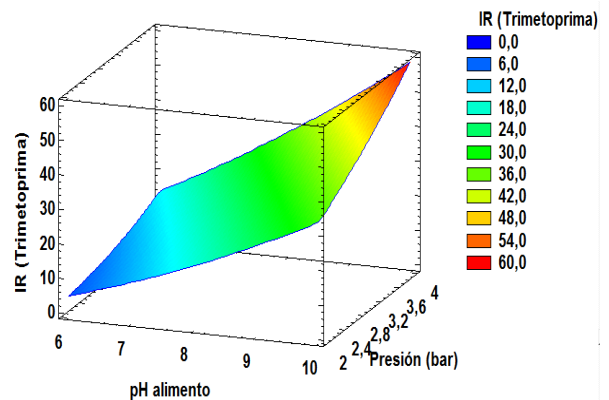
**FIGURA 34.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL NAPROXENO. MEMBRANA 1 KDA.



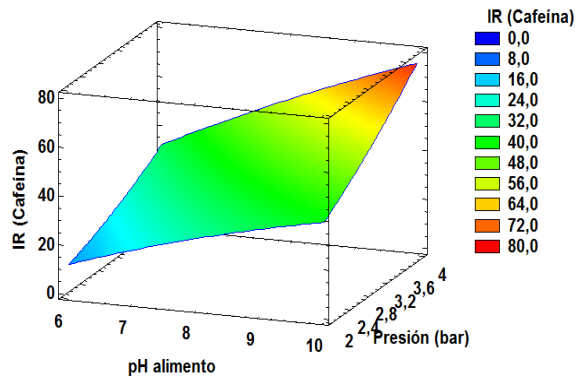
**FIGURA 37.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL TRICLOSÁN. MEMBRANA 1 KDA.



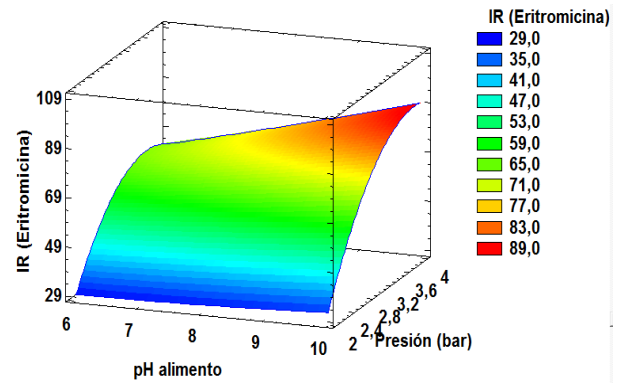
**FIGURA 35.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL DICLOFENACO. MEMBRANA 1 KDA.



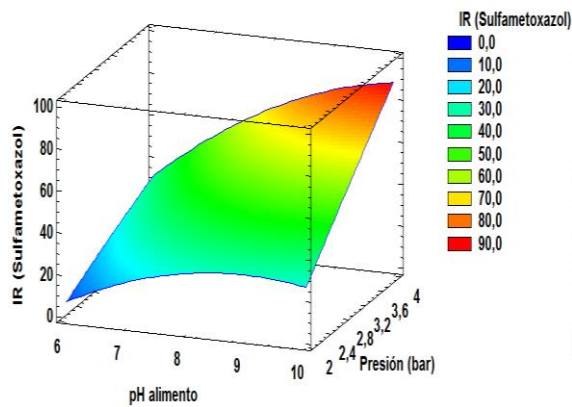
**FIGURA 38.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL TRIMETOPRIMA. MEMBRANA 1 KDA.



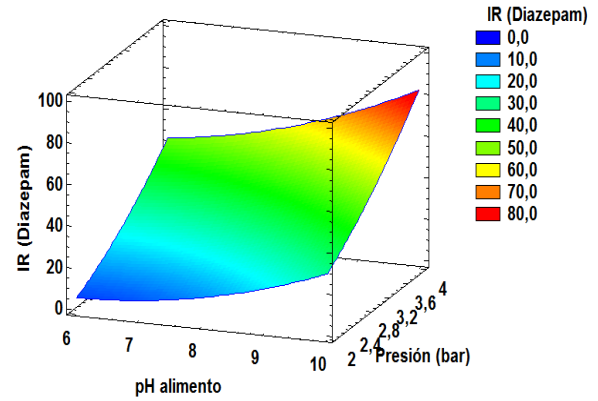
**FIGURA 39.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DE LA CAFEÍNA. MEMBRANA 1 KDA.



**FIGURA 41.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DE LA ERITROMICINA. MEMBRANA 1 KDA.



**FIGURA 40.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL SULFAMETOXAZOL. MEMBRANA 1 KDA.



**FIGURA 42.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL DIAZEPÁN. MEMBRANA 1 KDA.

En las figuras 33 – 42, se representan los diagramas de superficie de cada uno de los compuestos farmacéuticos correspondientes.

En todos los diagramas se observa como los valores más elevados para los índices de rechazo de los compuestos se encuentran en las condiciones de operación establecidas a pH de alimento 10 y presión 4 bar.

➤ **Coefficientes de regresión**

A continuación, se muestra una tabla con los coeficientes de regresión obtenidos de cada diseño de experimentos realizado con cada uno de los compuestos. Con esto, se pretende aproximar la relación de dependencia entre unas variables y otras.

**TABLA 12.** COEFICIENTES DE REGRESIÓN OBTENIDOS EN EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS. MEMBRANA 1 KDA.

<b>Ibuprofeno</b>	$IR = -77,09 + 13,96 \cdot \text{pH alimento} + 22,63 \cdot \text{Presión} - 0,086 \cdot \text{pH alimento}^2 - 1,015 \cdot \text{pH alimento} \cdot \text{Presión} - 0,34 \cdot \text{Presión}^2$
<b>Sulfametoxazol</b>	$IR = -151,93 + 36,16 \cdot \text{pH alimento} - 9,91 \cdot \text{Presión} - 2,54 \cdot \text{pH alimento}^2 + 4,67 \cdot \text{pH alimento} \cdot \text{Presión} - 0,85 \cdot \text{Presión}^2$
<b>Acetaminofén</b>	$IR = -69,19 + 22,44 \cdot \text{pH alimento} - 0,295 \cdot \text{Presión} - 1,06 \cdot \text{pH alimento}^2 - 0,78 \cdot \text{pH alimento} \cdot \text{Presión} + 2,22 \cdot \text{Presión}^2$
<b>Diclofenaco</b>	$IR = -46,038 + 8,08 \cdot \text{pH alimento} + 10,14 \cdot \text{Presión} - 0,35 \cdot \text{pH alimento}^2 - 0,06 \cdot \text{pH alimento} \cdot \text{Presión} + 0,26 \cdot \text{Presión}^2$
<b>Cafeína</b>	$IR = -39,53 + 10,38 \cdot \text{pH alimento} - 13,02 \cdot \text{Presión} - 0,48 \cdot \text{pH alimento}^2 + 2,0175 \cdot \text{pH alimento} \cdot \text{Presión} + 1,95 \cdot \text{Presión}^2$
<b>Diazepán</b>	$IR = 63,88 - 19,96 \cdot \text{pH alimento} - 12,53 \cdot \text{Presión} + 1,438 \cdot \text{pH alimento}^2 + 1,44 \cdot \text{pH alimento} \cdot \text{Presión} + 4,19 \cdot \text{Presión}^2$
<b>Naproxeno</b>	$IR = -36,54 + 7,94 \cdot \text{pH alimento} + 5,44 \cdot \text{Presión} - 0,016 \cdot \text{pH alimento}^2 - 0,95 \cdot \text{pH alimento} \cdot \text{Presión (bar)} + 1,27 \cdot \text{Presión}^2$
<b>Eritromicina</b>	$IR = -92,59 - 7,73 \cdot \text{pH alimento} + 95,65 \cdot \text{Presión} + 0,15 \cdot \text{pH alimento}^2 + 3,005 \cdot \text{pH alimento} \cdot \text{Presión} - 16,14 \cdot \text{Presión}^2$
<b>Trimetoprima</b>	$IR = 18,62 - 4,93 \cdot \text{pH alimento} - 16,43 \cdot \text{Presión} + 0,51 \cdot \text{pH alimento}^2 + 2,004 \cdot \text{pH alimento} \cdot \text{Presión} + 1,54 \cdot \text{Presión}^2$
<b>Triclosan</b>	$IR = -85,87 + 20,12 \cdot \text{pH alimento} - 0,697 \cdot \text{Presión} - 0,577 \cdot \text{pH alimento}^2 + 0,18 \cdot \text{pH alimento} \cdot \text{Presión} + 1,397 \cdot \text{Presión}^2$

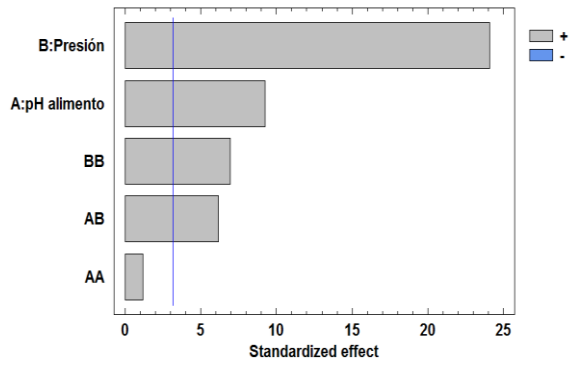
- **Membrana 15 kDa**

**TABLA 13.** RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LOS ÍNDICES DE RECHAZO INTRODUCIDOS EN STATGRAPHICS. MEMBRANA 15 KDA.

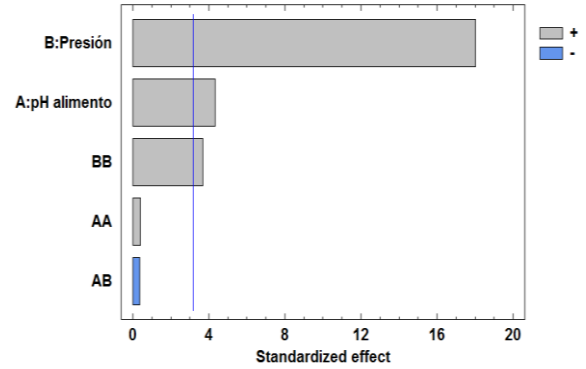
Ensayo	pH alim	Presión (bar)	Ibuprofeno (%)	Sulfametoxazol (%)	Acetaminofén (%)	Diclofenaco (%)	Cafeína (%)
1	6	2	20,29	1,13	10,15	5,43	9,01
2	6	3	33,58	12,23	15,80	10,95	17,28
3	6	4	53,00	21,91	34,58	13,64	32,58
4	8	2	23,70	4,78	11,83	13,52	11,20
5	8	3	35,67	23,44	19,91	14,04	29,02
6	8	4	57,38	42,33	44,14	25,27	37,65
7	10	2	30,95	19,29	14,00	18,43	16,14
8	10	3	37,24	28,36	25,99	29,28	44,53
9	10	4	62,09	65,54	59,77	38,20	49,83

**TABLA 13 (CONTINUACIÓN).** RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LOS ÍNDICES DE RECHAZO INTRODUCIDOS EN STATGRAPHICS. MEMBRANA 15 KDA.

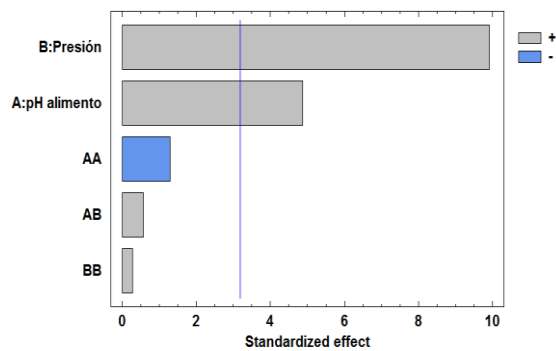
Ensayo	pH alim	Presión (bar)	Diazepán (%)	Naproxeno (%)	Eritromicina (%)	Trimetoprima (%)	Triclosán (%)
1	6	2	3,54	8,51	9,47	4,75	16,74
2	6	3	9,86	21,34	26,68	8,95	29,41
3	6	4	15,50	26,74	37,34	9,07	39,43
4	8	2	4,87	16,25	14,00	12,23	37,10
5	8	3	23,32	24,52	35,62	17,41	45,42
6	8	4	27,35	37,58	62,95	25,69	52,80
7	10	2	4,74	19,19	14,78	16,94	38,03
8	10	3	23,42	26,93	47,93	24,53	49,21
9	10	4	31,94	40,32	67,17	32,79	60,38



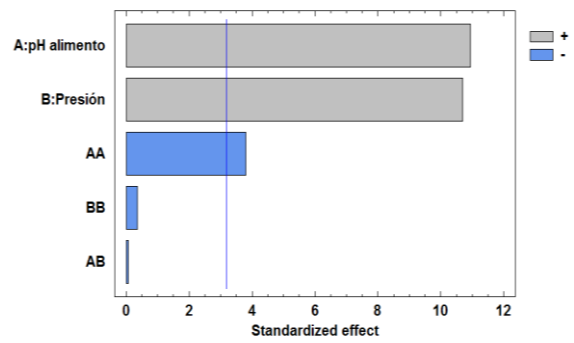
**FIGURA 43.** DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL ACETAMINOFÉN. MEMBRANA 15 KDA.



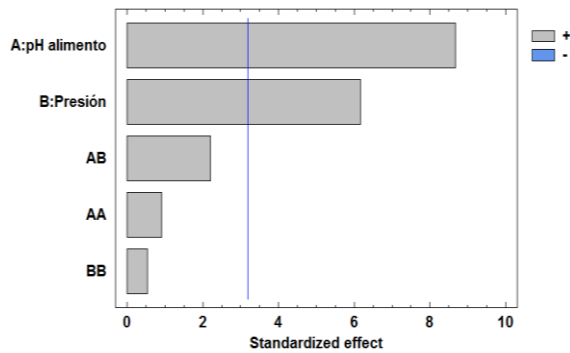
**FIGURA 46.** DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL IBUPROFENO. MEMBRANA 15 KDA.



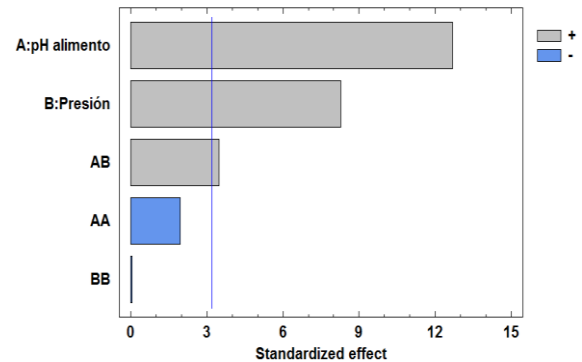
**FIGURA 44.** DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL NAPROXENO. MEMBRANA 15 KDA.



**FIGURA 47.** DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL TRICLOSÁN. MEMBRANA 15 KDA.

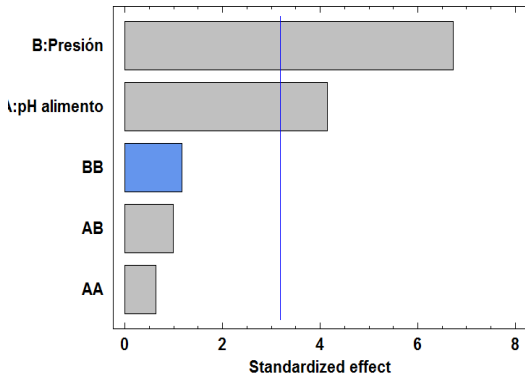


**FIGURA 45.** DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL DICLOFENAC. MEMBRANA 15 KDA.

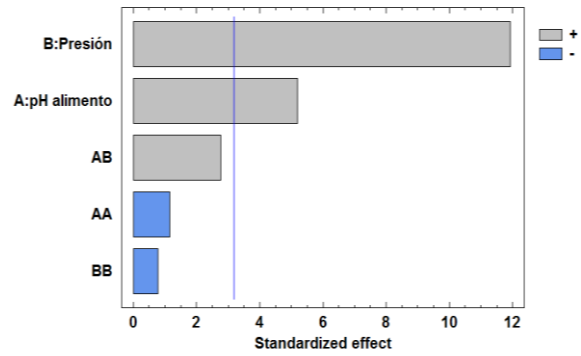


**FIGURA 48.** DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DE LA TRIMETOPRIMA. MEMBRANA 15 KDA.

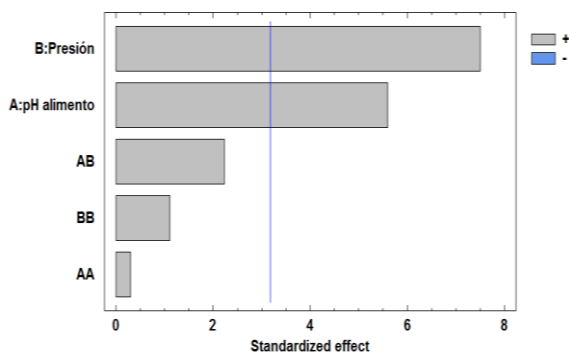




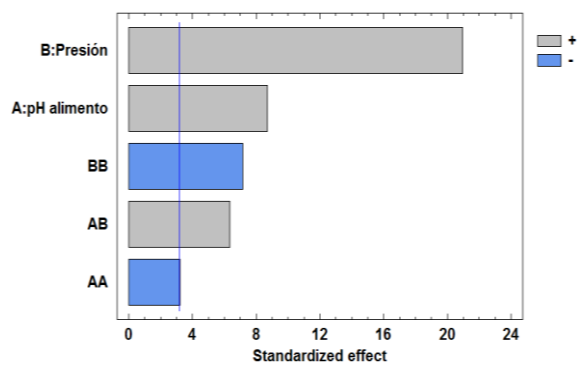
**FIGURA 49.** DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DE LA CAFEÍNA. MEMBRANA 15 KDA.



**FIGURA 51.** DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DE LA ERITROMICINA. MEMBRANA 15 KDA.



**FIGURA 50.** DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL SULFAMETOXAZOL. MEMBRANA 15 KDA.



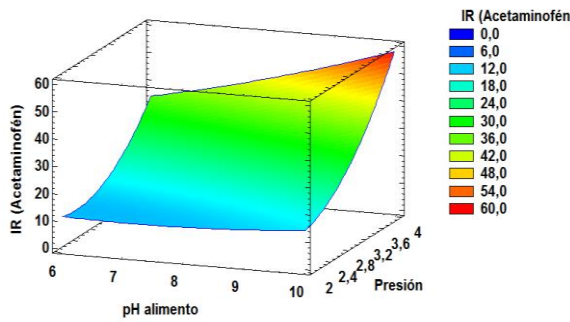
**FIGURA 52.** DIAGRAMA DE PARETO PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL DIAZEPÁN. MEMBRANA 15 KDA.

Como se puede observar en las figuras 43 – 52, mediante el diagrama de Pareto, el pH del alimento y la presión transmembranal aplicada son estadísticamente significativos y con un efecto positivo sobre los índices de rechazo de todos los compuestos farmacéuticos empleados.

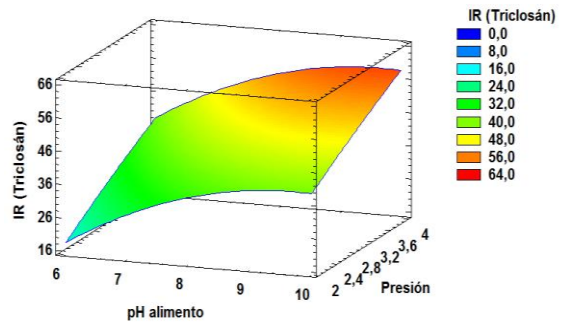
Para el acetaminofén y el ibuprofeno, se puede observar como el efecto cuadrático de la presión tiene un efecto significativamente estadístico y positivo sobre los índices de rechazo correspondientes a estos compuestos. Sin embargo, para el índice de rechazo del diazepam, este parámetro tiene un efecto negativo sobre el mismo.

En la figura 47, se observa como el efecto cuadrático del pH del alimento es significativamente estadístico con un efecto negativo sobre los índices de rechazo del triclosán.

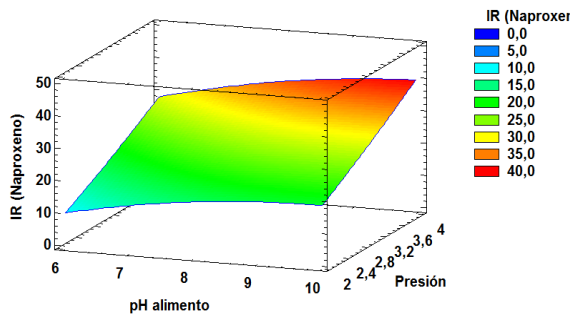
Por último, en las figuras 43, 48 y 52, se muestra el efecto positivo que tiene la combinación entre el pH del alimento y la presión sobre los índices de rechazo del acetaminofén, la trimetoprima y el diazepam.



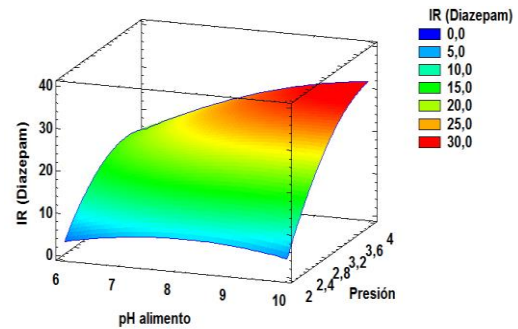
**FIGURA 53.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL ACETAMINOFÉN. MEMBRANA 15 KDA.



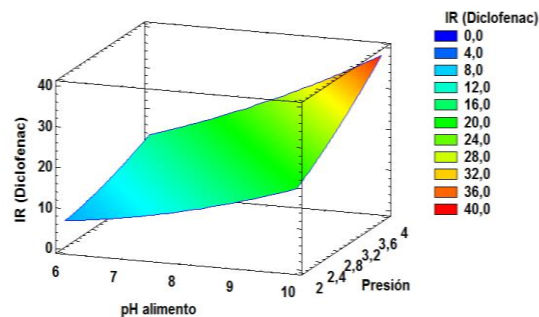
**FIGURA 57.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL TRICLOSÁN. MEMBRANA 15 KDA.



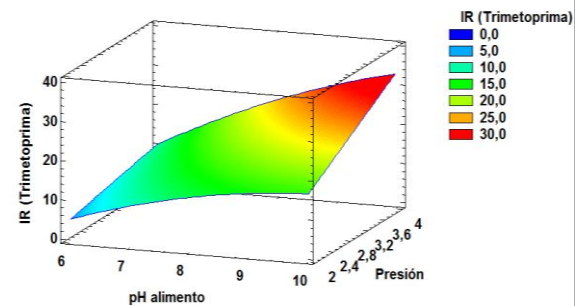
**FIGURA 54.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL NAPROXENO. MEMBRANA 15 KDA.



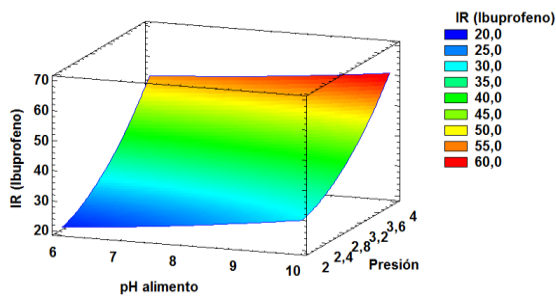
**FIGURA 58.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL DIAZEPÁN. MEMBRANA 15 KDA.



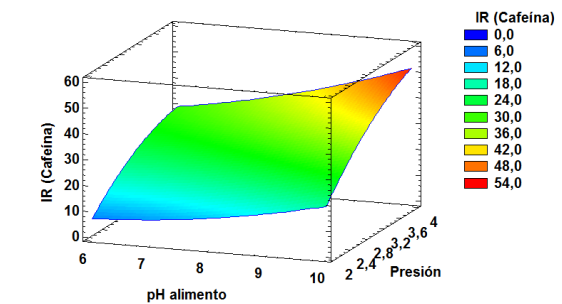
**FIGURA 55.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL DICLOFENAC. MEMBRANA 15 KDA.



**FIGURA 59.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL TRIMETOPRIMA. MEMBRANA 15 KDA.



**FIGURA 56.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL IBUPROFENO. MEMBRANA 15 KDA.



**FIGURA 60.** DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DE LA CAFÉINA. MEMBRANA 15 KDA.

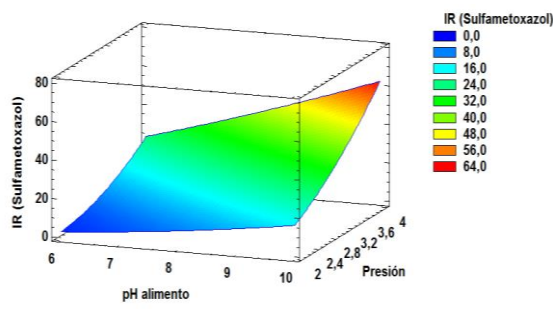


FIGURA 61. DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL SULFAMETOXAZOL. MEMBRANA 15 KDA.

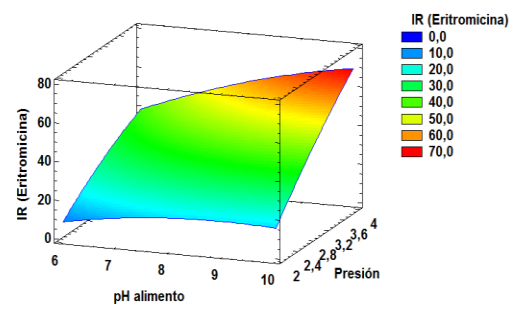


FIGURA 62. DIAGRAMA DE SUPERFICIE PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DE LA ERITROMICINA. MEMBRANA 15 KDA.

En los diagramas de superficie de respuesta representados en las figuras anteriores (figuras 53 – 62), se observa que ocurre lo mismo que con la membrana de 1 kDa. Los valores más elevados de rechazo se obtienen para unas condiciones de operación de pH de alimento 10 y presión 4 bar.

- **Coefficientes de Regresión**

TABLA 14. COEFICIENTES DE REGRESIÓN OBTENIDOS PARA LOS ÍNDICES DE RECHAZO DE LOS COMPUESTOS FARMACÉUTICOS. MEMBRANA 15 KDA.

<b>Ibuprofeno</b>	$IR = 27,39 + 0,11 \cdot \text{pH alimento} - 16,605 \cdot \text{Presión} + 0,15 \cdot \text{pH alimento}^2 - 0,196 \cdot \text{pH} \cdot \text{alimento} \cdot \text{Presión} + 5,74 \cdot \text{Presión}^2$
<b>Sulfametoxazol</b>	$IR = 52,71 - 7,97 \cdot \text{pH alimento} - 34,96 \cdot \text{Presión} + 0,31 \cdot \text{pH alimento}^2 + 3,18 \cdot \text{pH} \cdot \text{alimento} \cdot \text{Presión} + 4,49 \cdot \text{Presión}^2$
<b>Acetaminofén</b>	$IR = 105,582 - 10,42 \cdot \text{pH alimento} - 55,325 \cdot \text{Presión} + 0,36 \cdot \text{pH alimento}^2 + 2,67 \cdot \text{pH} \cdot \text{alimento} \cdot \text{Presión} + 8,51 \cdot \text{Presión}^2$
<b>Diclofenaco</b>	$IR = 30,82 - 6,53 \cdot \text{pH alimento} - 10,89 \cdot \text{Presión} + 0,43 \cdot \text{pH alimento}^2 + 1,445 \cdot \text{pH} \cdot \text{alimento} \cdot \text{Presión} + 0,99 \cdot \text{Presión}^2$
<b>Cafeína</b>	$IR = -18,68 - 8,58 \cdot \text{pH alimento} + 29,08 \cdot \text{Presión} + 0,57 \cdot \text{pH alimento}^2 + 1,27 \cdot \text{pH} \cdot \text{alimento} \cdot \text{Presión} - 4,21 \cdot \text{Presión}^2$
<b>Diazepán</b>	$IR = -78,22 + 7,38 \cdot \text{pH alimento} + 31,57 \cdot \text{Presión} - 0,685 \cdot \text{pH alimento}^2 + 1,91 \cdot \text{pH} \cdot \text{alimento} \cdot \text{Presión} - 6,09 \cdot \text{Presión}^2$
<b>Naproxeno</b>	$IR = -47,7 + 10,51 \cdot \text{pH alimento} + 4,205 \cdot \text{Presión} - 0,57 \cdot \text{pH alimento}^2 + 0,36 \cdot \text{pH} \cdot \text{alimento} \cdot \text{Presión} + 0,502 \cdot \text{Presión}^2$
<b>Eritromicina</b>	$IR = -69,65 + 10,017 \cdot \text{pH alimento} + 11,77 \cdot \text{Presión} - 0,91 \cdot \text{pH alimento}^2 + 3,065 \cdot \text{pH} \cdot \text{alimento} \cdot \text{Presión} - 2,46 \cdot \text{Presión}^2$
<b>Trimetoprima</b>	$IR = -34,89 + 9,05 \cdot \text{pH alimento} - 5,62 \cdot \text{Presión} - 0,57 \cdot \text{pH alimento}^2 + 1,44 \cdot \text{pH} \cdot \text{alimento} \cdot \text{Presión} - 0,052 \cdot \text{Presión}^2$
<b>Triclosan</b>	$IR = -132,483 + 30,26 \cdot \text{pH alimento} + 14,06 \cdot \text{Presión} - 1,56 \cdot \text{pH alimento}^2 - 0,04 \cdot \text{pH} \cdot \text{alimento} \cdot \text{Presión} - 0,6 \cdot \text{Presión}^2$

En la siguiente tabla, se muestra un resumen global de los resultados obtenidos, es decir, las condiciones con las que se produce un mayor rechazo de los fármacos analizados:

**TABLA 15. RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.**

Fármaco	pH alimento	Presión transmembranal	Membrana (kDa)
Ibuprofeno	10	4	1
Sulfametoxazol	10	4	1
Acetaminofén	10	4	15
Diclofenaco	10	4	1
Cafeína	10	4	1
Diazepán	10	4	1
Naproxeno	10	4	1
Eritromicina	10	4	1
Trimetoprima	10	4	1
Triclosan	10	4	1

Como se puede observar en la tabla resumen anterior, las mejores condiciones de operación con las que se debe de trabajar para obtener unos índices de rechazo más elevados son pH de alimento 10, 4 bar y membrana de corte molecular de 1 kDa.

#### 5.1.8 FACTOR DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN

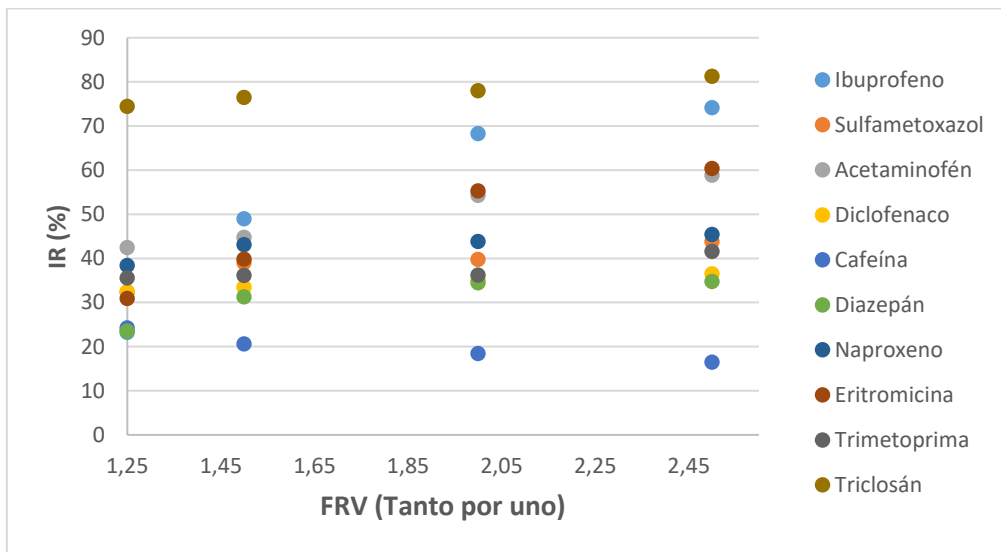
- **Membrana 1 kDa**

**TABLA 16. RESULTADOS DE LOS ÍNDICES DE RECHAZO PARA EL ENSAYO DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN. MEMBRANA 1 KDA.**

Fármaco	Índices de rechazo (%)			
	FRV 1,25	FRV 1,50	FRV 2,00	FRV 2,50
Ibuprofeno	23,24	48,95	68,27	74,14
Sulfametoxazol	32,32	39,04	39,79	43,80
Acetaminofén	42,41	44,79	54,28	58,86
Diclofenaco	32,40	33,42	35,11	36,49
Cafeína	24,20	20,59	18,40	16,50
Diazepán	23,50	31,30	34,45	34,74

**TABLA 16 (CONTINUACIÓN).** RESULTADOS DE LOS ÍNDICES DE RECHAZO PARA EL ENSAYO DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN. MEMBRANA 1 KDA.

Fármaco	Índices de rechazo (%)			
	FRV 1,25	FRV 1,50	FRV 2,00	FRV 2,50
Naproxeno	38,39	43,10	43,79	45,40
Eritromicina	30,93	39,80	55,31	60,33
Trimetoprima	35,58	36,10	36,22	41,6
Triclosan	74,41	76,43	77,99	81,26



**GRÁFICO 1.** EVOLUCIÓN DE LOS ÍNDICES DE RECHAZO DE CADA COMPUESTO FARMACÉUTICO EN FUNCIÓN DEL FACTOR DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN. MEMBRANA 1 KDA.

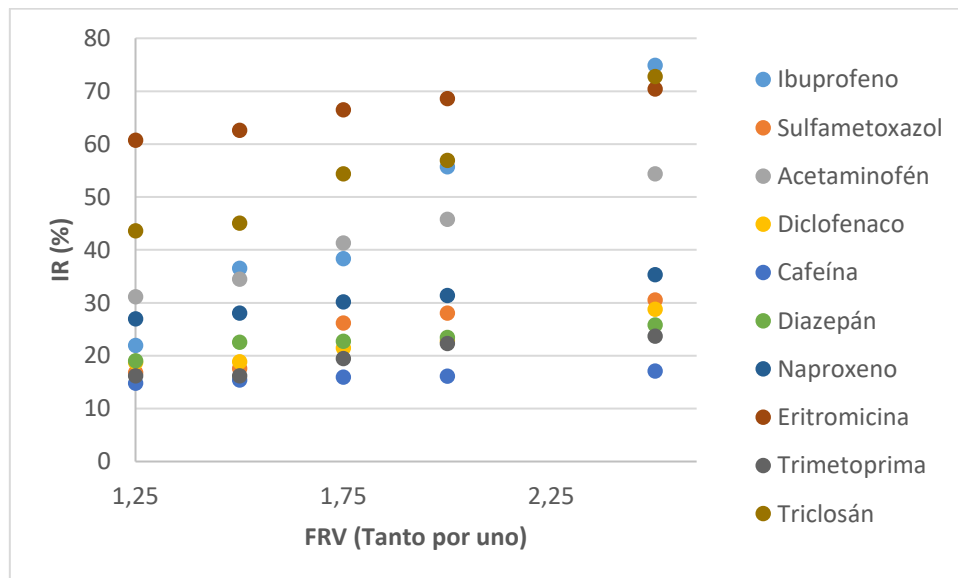
En el gráfico 1, se observa como los índices de rechazo de cada compuesto aumentan en función del factor de reducción de volumen, es decir, a mayor concentración de fármaco, mayor rechazo se produce.

Se observa como para el triclosán los índices de rechazo son mayores, esto es debido a su insolubilidad en el agua y a las posibles precipitaciones a mayor concentración.

- Membrana 15 kDa

**TABLA 17.** RESULTADOS DE LOS ÍNDICES DE RECHAZO PARA EL ENSAYO DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN. MEMBRANA 15 KDA.

Fármaco	Índices de rechazo (%)				
	FRV 1,25	FRV 1,50	FRV 1,75	FRV 2,00	FRV 2,50
Ibuprofeno	21,95	36,53	38,30	55,71	74,90
Sulfametoxazol	16,79	17,57	26,17	28,04	30,50
Acetaminofén	31,14	34,47	41,30	45,79	54,38
Diclofenaco	18,72	18,85	21,47	22,80	28,75
Cafeína	14,78	15,41	15,91	16,10	17,08
Diazepán	19,03	22,54	22,71	23,45	25,81
Naproxeno	26,97	28,07	30,18	31,39	35,30
Eritromicina	60,74	62,57	66,45	68,59	70,39
Trimetoprima	16,17	16,20	19,42	22,31	23,67
Triclosan	43,59	45,05	54,37	56,91	72,79



**GRÁFICO 2.** EVOLUCIÓN DE LOS ÍNDICES DE RECHAZO DE CADA COMPUESTO FARMACÉUTICO EN FUNCIÓN DEL FACTOR DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN. MEMBRANA 15 KDA.

En el gráfico 2 se puede observar como los índices de rechazo de los compuestos farmacéuticos siguen la misma evolución que para la membrana de 1 kDa.

Se observa como los valores más elevados para los índices de rechazo se dan con la eritromicina, el ibuprofeno y el triclosán, en este caso.

Tal y como se observa en los gráficos 1 y 2, y como era de esperar, los índices de rechazo más elevados se obtienen para la membrana de 1 kDa. Esto es debido a que, a menor tamaño de poro, mayor cantidad de moléculas son retenidas por los poros de la membrana

## 5.2 PERMEABILIDAD

Los resultados obtenidos en los ensayos de permeabilidad para cada una de las membranas se muestran en los gráficos 3 y 4. En estos gráficos se representa la densidad de flujo en función de la presión aplicada.

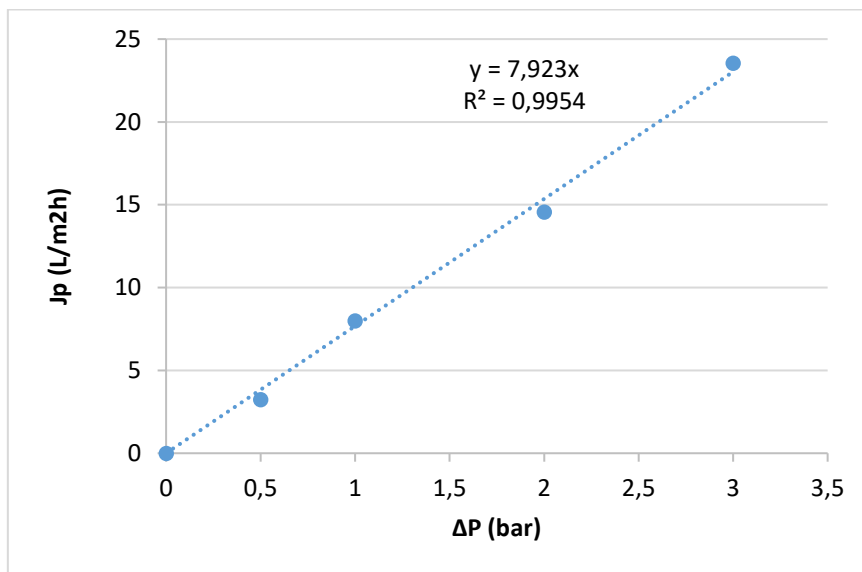


GRÁFICO 3. DENSIDAD DE FLUJO EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN. MEMBRANA 1 KDA.

Para la membrana de 1 kDa el coeficiente de permeabilidad tiene un valor de 7,923  $L/m^2 \cdot h \cdot bar$ .

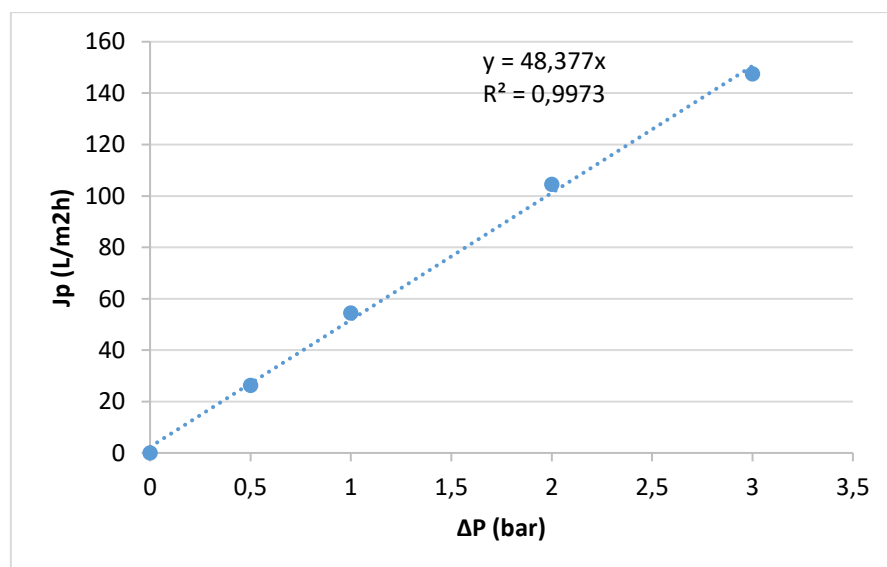


GRÁFICO 4. DENSIDAD DE FLUJO EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN. MEMBRANA 15 KDA.

Como se puede observar en el gráfico 4, para la membrana de 15 kDa, el coeficiente de permeabilidad toma un valor de 48,377 L/m<sup>2</sup>·h·bar. Es esperado que el coeficiente de permeabilidad sea mayor en las membranas con mayor corte molecular, la cual, en este caso, es la membrana de 15 kDa. Esto es debido a que, a mayor tamaño de poro, mayor es la densidad de flujo.

### 5.3 ENSAYO DE CARACTERIZACIÓN

El ensayo de caracterización se realiza para 3 valores de pH diferentes (6, 8 y 10). Además, se varía la presión transmembranal (2, 3 y 4 bar). Con estos valores, se diseñan 9 ensayos diferentes para cada una de las membranas, realizadas con la ayuda del programa estadístico Statgraphics Centurion, convirtiéndose en un total de 18 ensayos.

Estos valores son introducidos en el programa estadístico con el objetivo de que realice el diseño de experimentos y nos proporcione unas condiciones de operación mejoradas. Es decir, el programa realiza barridos experimentales con cada uno de los factores o condiciones y, de este modo, mediante los diagramas correspondientes, se puede observar que condiciones son las que afectan más, menos o nada a las variables respuesta.

En la tabla 18 se pueden observar las diferentes combinaciones realizadas con el programa para cada una de las condiciones de operación.

**TABLA 18.** COMBINACIONES DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA CADA ENSAYO. REALIZADO CON STATGRAPHICS.

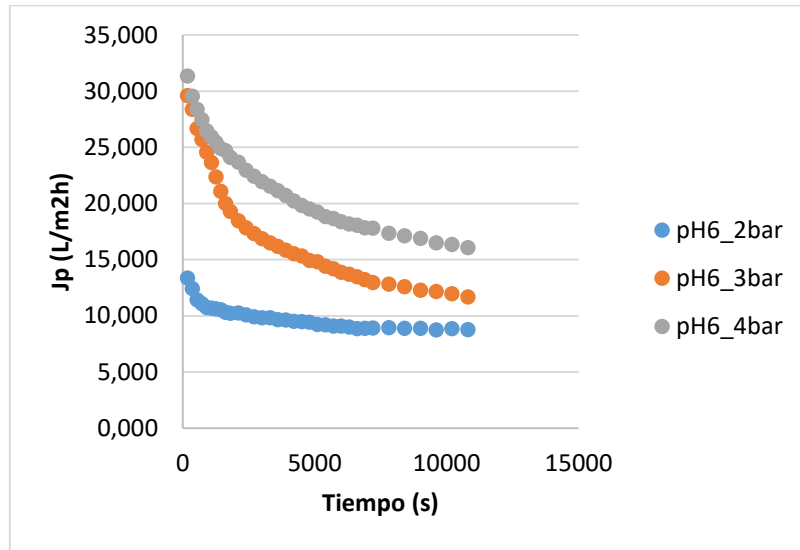
Ensayo	pH	Presión
1	6	2
2	8	4
3	8	2
4	6	3
5	8	3
6	6	4
7	10	4
8	10	3
9	10	2

Los resultados obtenidos en estos ensayos de caracterización para las membranas de 1 y 15 kDa se plasman en los gráficos 5, 6, 7, 8, 9 y 10. En cada uno de estos gráficos se representa la evolución de la densidad de flujo en función del tiempo.

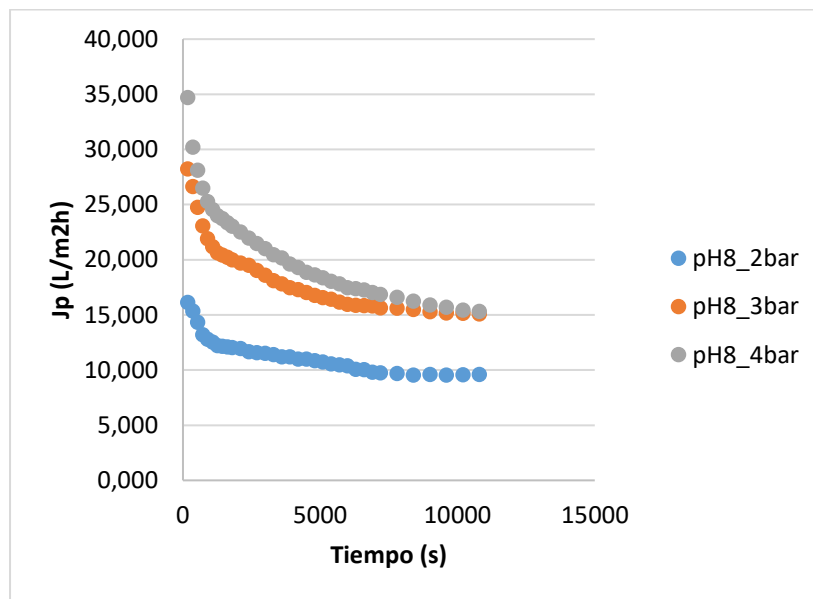
En los gráficos 5 y 8, se observa la evolución de la densidad de flujo para un pH de alimento 6, variando la presión transmembranal. En los gráficos 6 y 9, se representan los ensayos realizados a un pH de alimento 8 con variaciones en la presión. Por último, en los gráficos 7 y 10, se representan los ensayos en los que se trabaja a pH de alimento 10.



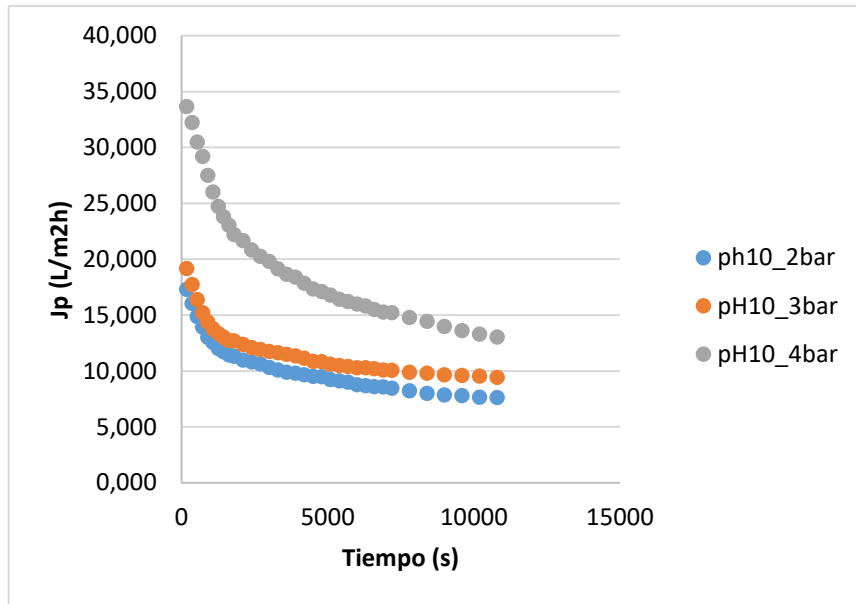
- **Membrana 1 kDa**



**GRÁFICO 5.** EVOLUCIÓN DE LA DENSIDAD DE FLUJO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA CADA UNA DE LAS PRESIONES DEFINIDAS A PH 6. MEMBRANA 1 KDA.



**GRÁFICO 6.** EVOLUCIÓN DE LA DENSIDAD DE FLUJO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA CADA UNA DE LAS PRESIONES DEFINIDAS A PH 8. MEMBRANA 1 KDA.



**GRÁFICO 7.** EVOLUCIÓN DE LA DENSIDAD DE FLUJO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA CADA UNA DE LAS PRESIONES DEFINIDAS A PH 10. MEMBRANA 1 KDA.

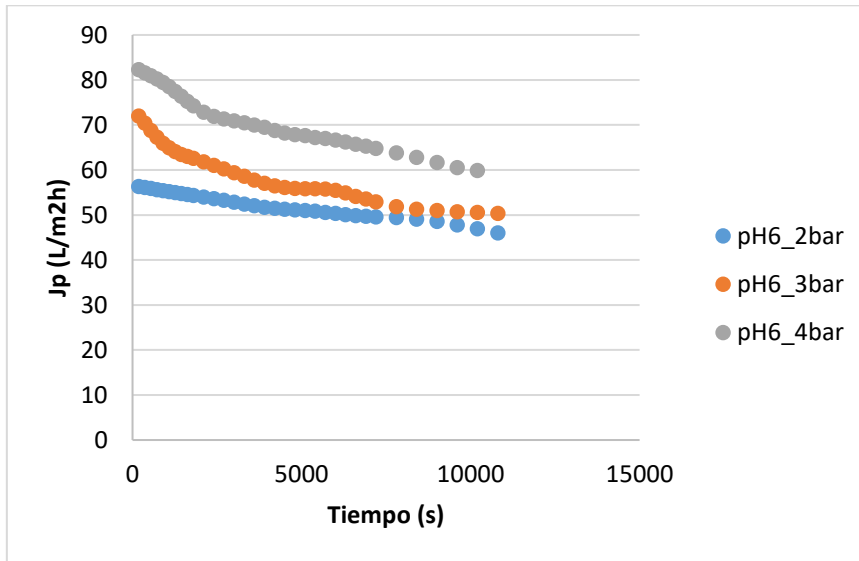
Como se puede observar en los gráficos, la densidad de flujo sufre una evolución decreciente en función del tiempo. Esto es debido a que en la membrana se produce un ensuciamiento con el paso del alimento. Las moléculas quedan retenidas en los poros de la membrana, lo que hace que el tamaño de estos poros disminuya con el paso del tiempo. Como consecuencia de la disminución del tamaño de poro, se crea una barrera que ofrece resistencia al paso de las moléculas, por ello dificulta el paso de agua a través de la membrana y su densidad de flujo es cada vez menor.

Se observa que para pH 8, la densidad de flujo es mayor que para los otros dos pH (6 y 10) cuando el fenómeno de ensuciamiento se estabiliza.

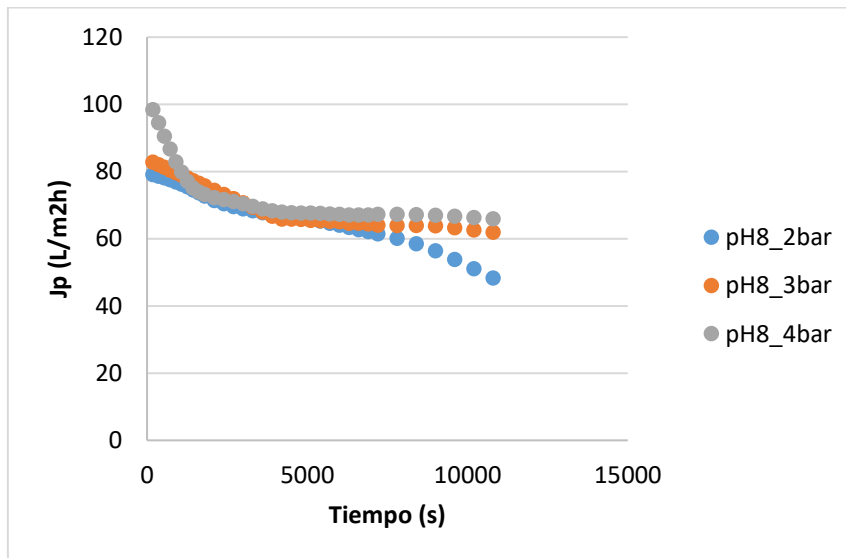
Según los gráficos, y como es de esperar, a mayor presión, la densidad de flujo es mayor, independientemente del pH de alimento con el que se opera. Se observa que la caída de la curva de la densidad de flujo es menos notable para los ensayos a presión 2 bar. Esto es debido a que, a mayor presión, el sistema tarda más en estabilizarse.

Para los ensayos realizados a pH de alimento 8 (gráfico 6), con las presiones aplicadas de 3 y 4 bar, se observa que la densidad de flujo tiende a 15 L/m²h.

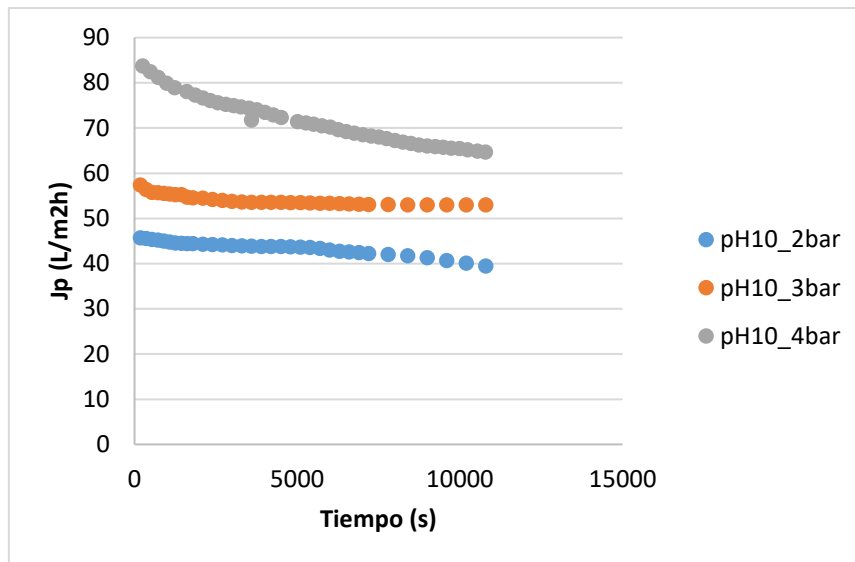
- Membrana 15 kDa



**GRÁFICO 8.** EVOLUCIÓN DE LA DENSIDAD DE FLUJO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA CADA UNA DE LAS PRESIONES DEFINIDAS A PH 6. MEMBRANA 15 KDA.



**GRÁFICO 9.** EVOLUCIÓN DE LA DENSIDAD DE FLUJO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA CADA UNA DE LAS PRESIONES DEFINIDAS A PH 8. MEMBRANA 15 KDA.



**GRÁFICO 10.** EVOLUCIÓN DE LA DENSIDAD DE FLUJO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA CADA UNA DE LAS PRESIONES DEFINIDAS A PH 10. MEMBRANA 15 KDA.

Con la membrana de 15 kDa, ocurre como con la de 1 kDa, la densidad de flujo sigue una evolución decreciente debido al ensuciamiento de la membrana por las moléculas retenidas en sus poros.

Para esta membrana se observa, mediante los gráficos 8, 9 y 10, que para un pH de alimento 8, se consigue una densidad de flujo mayor, al igual que ocurre con la membrana de 1 kDa.

Para los ensayos realizados con un pH de alimento de 8, el comportamiento en la evolución de la densidad de flujo es similar para las tres presiones empleadas.

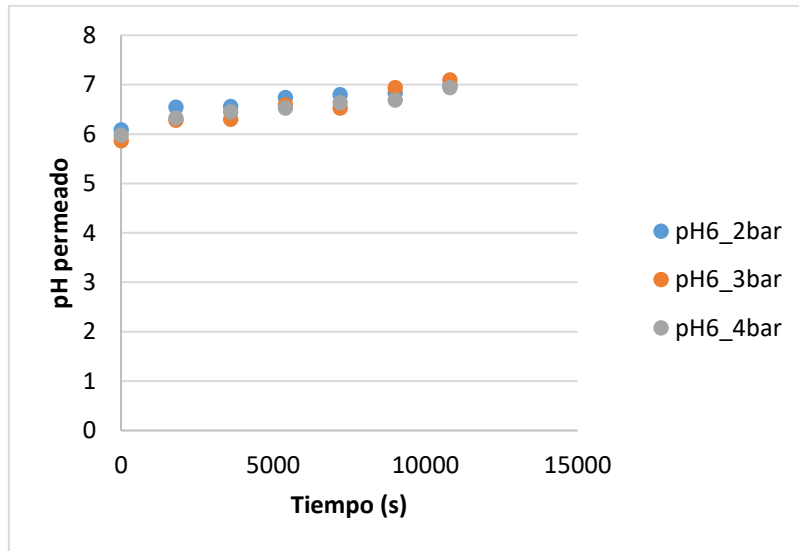
Se puede observar, comparando los resultados para cada una de las membranas, como la densidad de flujo en la zona de estabilización es mayor para la membrana de 15 kDa, para todas las condiciones de operación empleadas. Esto se debe principalmente al mayor corte molecular (mayor tamaño de poro) de la membrana de 15 kDa, la cual permite el paso a un mayor número de moléculas a través de ella.

La caída de la curva a lo largo del tiempo, la cual representa la evolución del ensuciamiento de la membrana, es menos pronunciada para los ensayos realizados con la membrana de mayor corte molecular (15 kDa). Esto ocurre porque, como se ha comentado anteriormente, es atravesada por más moléculas y, por ello, la estabilización del fenómeno de ensuciamiento se produce más rápidamente.

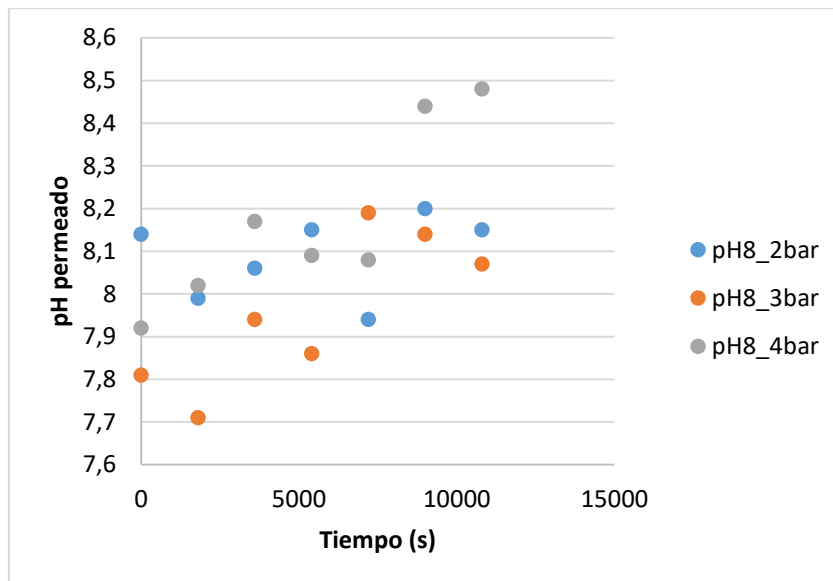
### 5.3.1 EVOLUCIÓN PH Y CONDUCTIVIDAD

Se toman datos de pH de permeado y de conductividad cada media hora de ensayo para estudiar su evolución con el tiempo. Estos datos son reflejados en los gráficos 11 – 22. Estos parámetros, que son las variables respuesta del estudio, son empleados en el programa estadístico para obtener la influencia de las condiciones de operación sobre ellos.

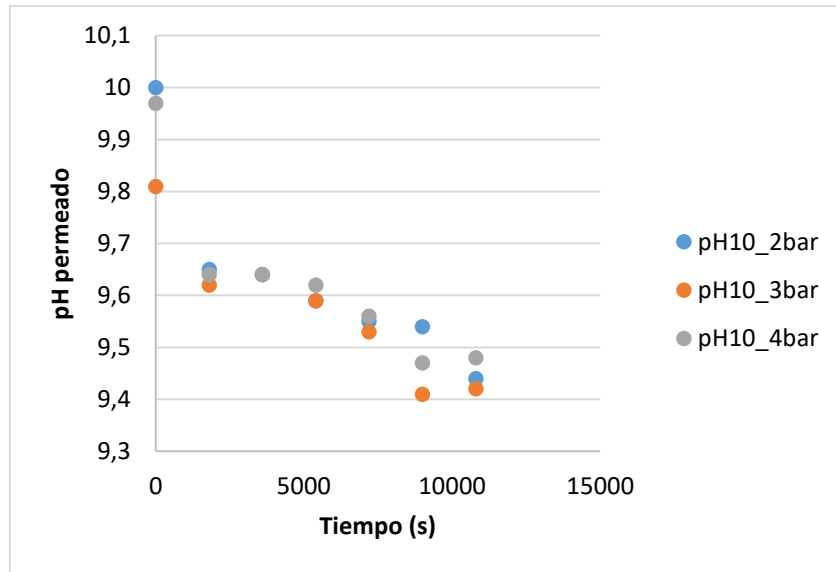
- **Membrana 1 kDa**



**GRÁFICO 11.** EVOLUCIÓN DEL PH DE PERMEADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON UN PH INICIAL DE ALIMENTO 6. MEMBRANA 1 KDA.

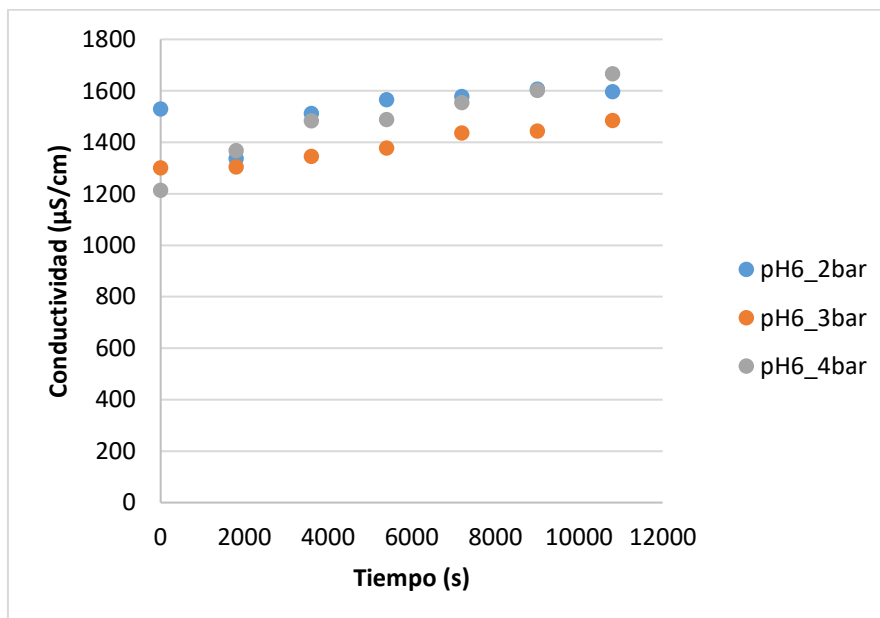


**GRÁFICO 12.** EVOLUCIÓN DEL PH DE PERMEADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON UN PH INICIAL DE ALIMENTO 8. MEMBRANA 1 KDA.

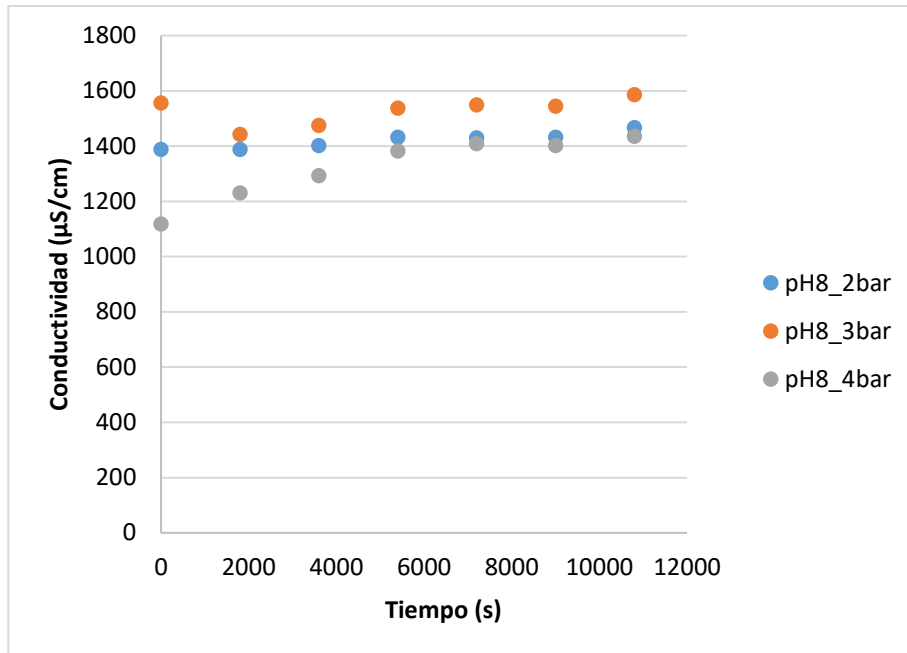


**GRÁFICO 13.** EVOLUCIÓN DEL PH DE PERMEADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON UN PH INICIAL DE ALIMENTO 10. MEMBRANA 1 KDA.

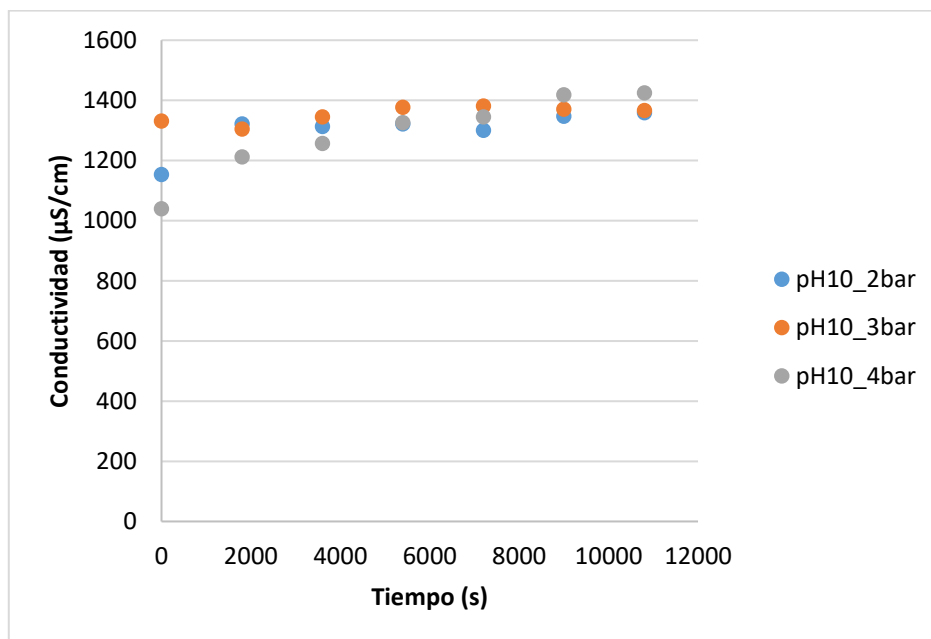
En los gráficos 11 y 12 se observa como el pH aumenta en función del tiempo. Para las condiciones de operación en las que el pH del alimento es 6 (gráfico 11), en los tres ensayos realizados con las tres presiones diferentes, el pH del permeado tiende a 7. Sin embargo, en la gráfica 13, el pH del permeado disminuye y tiende a 9,45, en el caso de las tres presiones aplicadas.



**GRÁFICO 14.** EVOLUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON UN PH INICIAL DE ALIMENTO 6. MEMBRANA 1 KDA.



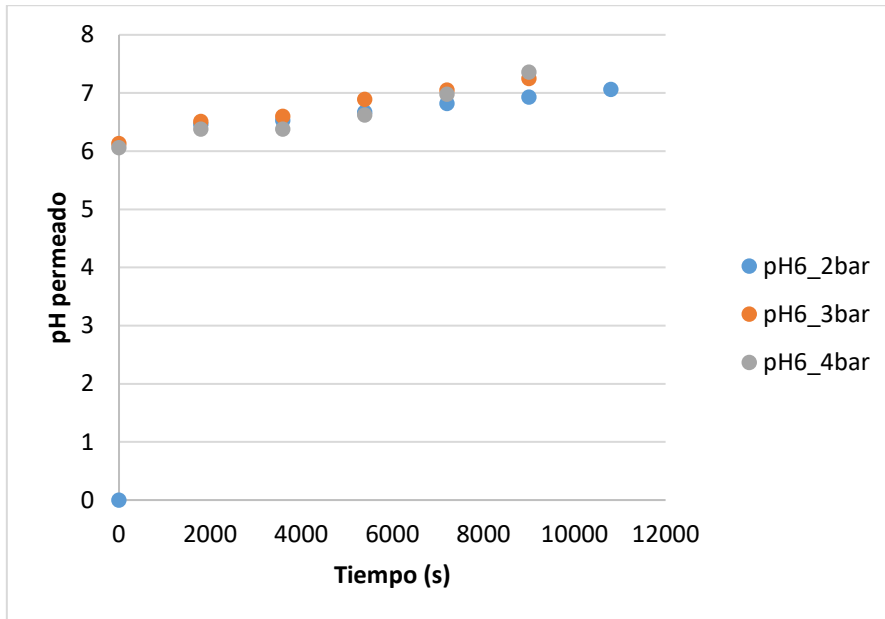
**GRÁFICO 15.** EVOLUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON UN PH INICIAL DE ALIMENTO 8. MEMBRANA 1 KDA.



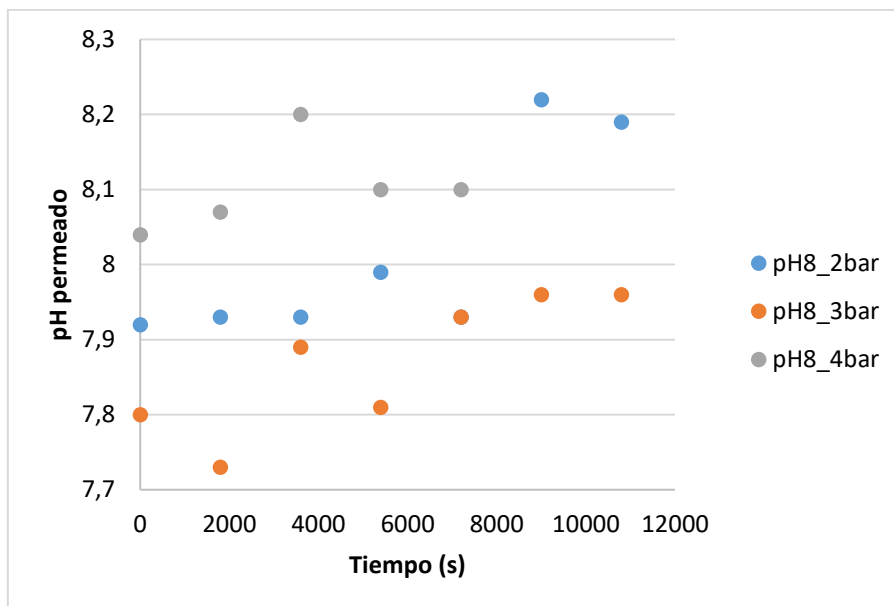
**GRÁFICO 16.** EVOLUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON UN PH INICIAL DE ALIMENTO 10. MEMBRANA 1 KDA.

Los gráficos 14, 15 y 16 muestran la evolución de la conductividad del permeado con el tiempo. Se puede observar que esta variable aumenta ligeramente en función del tiempo. La conductividad es menor en los ensayos realizados a pH de alimento 10 que para los otros dos (6 y 8).

- **Membrana 15 kDa**

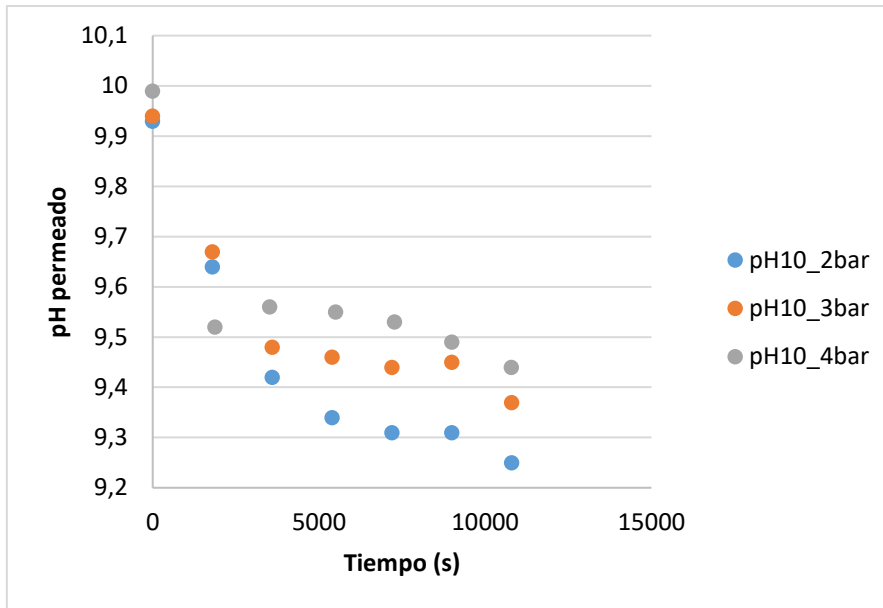


**GRÁFICO 17.** EVOLUCIÓN DEL PH DE PERMEADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON UN PH INICIAL DE ALIMENTO 6. MEMBRANA 15 KDA.



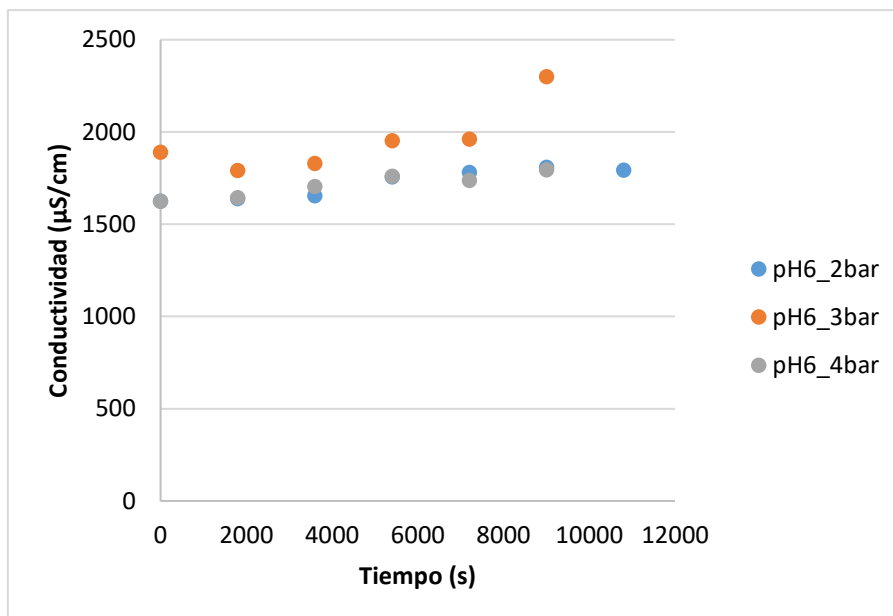
**GRÁFICO 18.** EVOLUCIÓN DEL PH DE PERMEADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON UN PH INICIAL DE ALIMENTO 8. MEMBRANA 15 KDA.



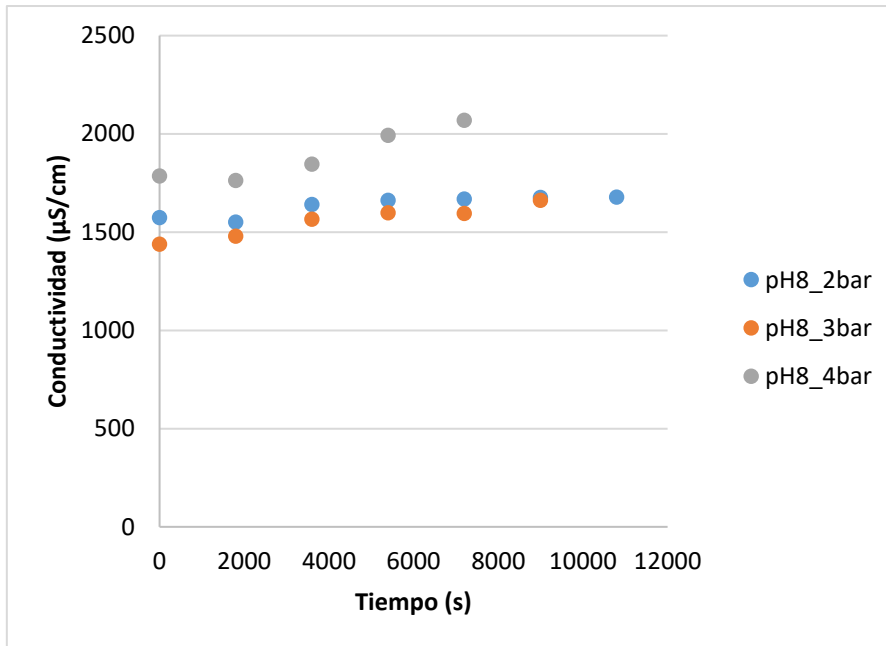


**GRÁFICO 19.** EVOLUCIÓN DEL PH DE PERMEADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON UN PH INICIAL DE ALIMENTO 10. MEMBRANA 15 KDA.

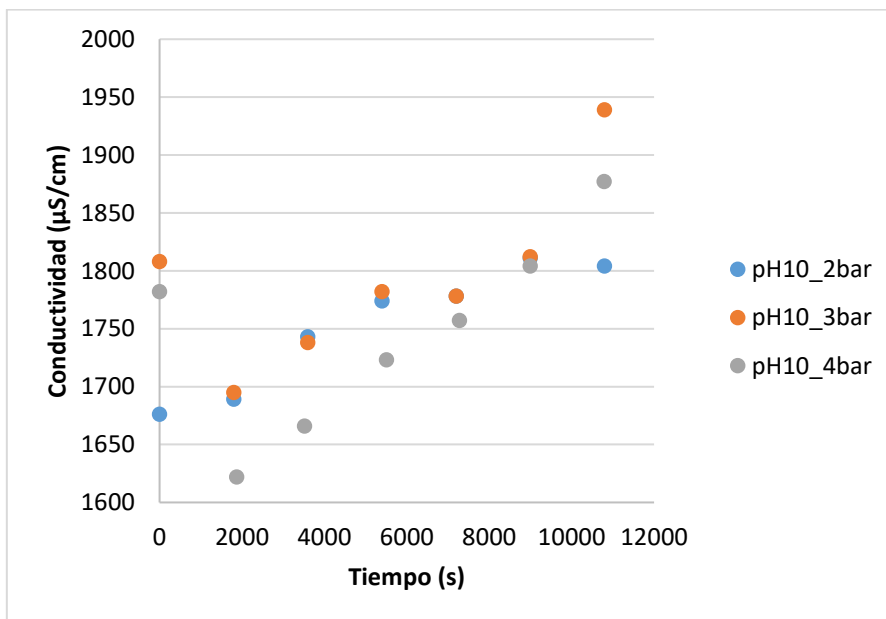
En los gráficos anteriores se muestra la evolución del pH de permeado en función del tiempo. En el gráfico 17 (pH alimento 6), como ocurre con la membrana de 1 kDa, el pH tiende a 7. Por otro lado, el gráfico 18 muestra como el pH de permeado aumenta ligeramente en función del tiempo. Por el contrario, con un pH de alimento 10, el pH de permeado disminuye en función del tiempo, como se puede observar en el gráfico 19.



**GRÁFICO 20.** EVOLUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON UN PH INICIAL DE ALIMENTO 6. MEMBRANA 15 KDA.



**GRÁFICO 21.** EVOLUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON UN PH INICIAL DE ALIMENTO 8. MEMBRANA 15 KDA.



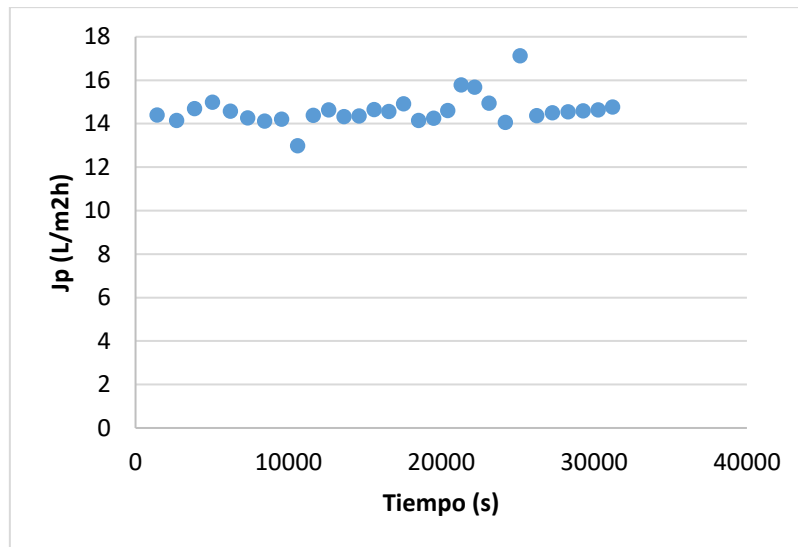
**GRÁFICO 22.** EVOLUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON UN PH INICIAL DE ALIMENTO 10. MEMBRANA 15 KDA.

Los gráficos 20, 21 y 22 muestran la evolución de la conductividad en función del tiempo. Se puede observar en todos ellos como la conductividad sufre un ligero aumento con el paso del tiempo de ensayo. Este parámetro no es concluyente ya que no nos proporciona información útil relacionada con su evolución en el tiempo.

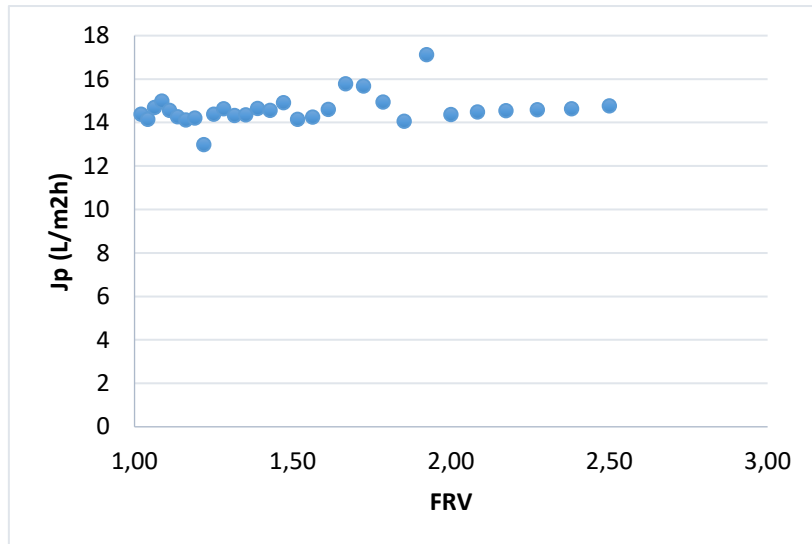
#### 5.4 FACTOR DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN

Estos ensayos se realizan a 4 bar y con un pH de alimento 10. Durante la realización de estos ensayos se anotan datos de temperatura y pH y conductividad de permeado. Se toman muestras de volumen cada vez que el tanque del alimento se vacía un litro y se recogen muestras de rechazo y permeado por cada factor de reducción especificado. Con estos datos, se realiza la representación gráfica de la densidad de flujo en función del factor de reducción de volumen (en tanto por uno) y de la evolución de la densidad de flujo en función del tiempo.

- **Membrana 1 kDa**



**GRÁFICO 23.** EVOLUCIÓN DE LA DENSIDAD DEL FLUJO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO EN EL ENSAYO DE FRV. MEMBRANA 1 kDa.

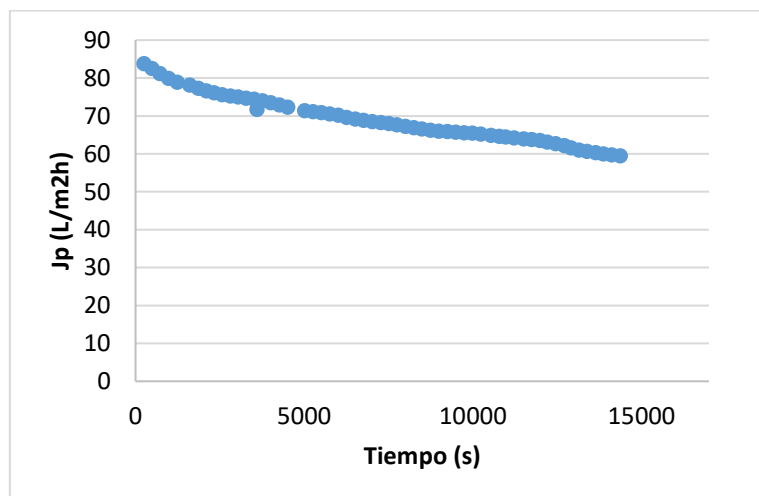


**GRÁFICO 24.** EVOLUCIÓN DE LA DENSIDAD DE FLUJO EN FUNCIÓN DEL FACTOR DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN PARA EL ENSAYO DE FRV. MEMBRANA DE 1 KDA

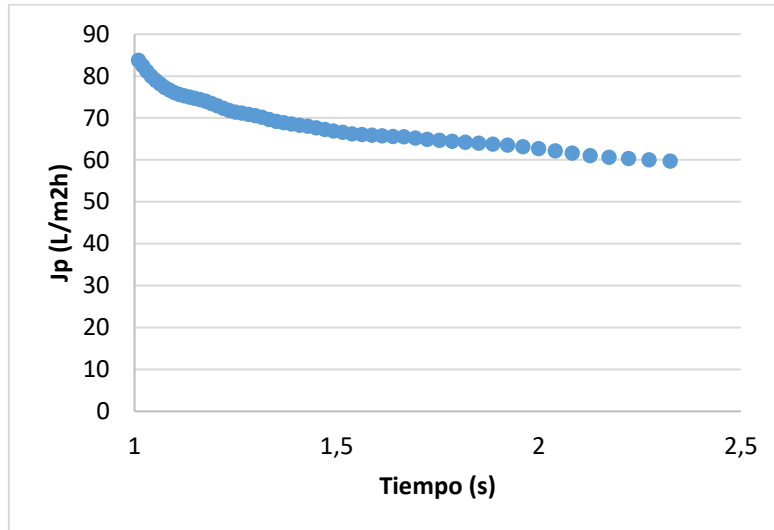
**TABLA 19.** DATOS DE PH Y CONDUCTIVIDAD DEL PERMEADO PARA LOS FACTORES DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN INDICADOS. MEMBRANA 1 KDA.

FRV (tanto por uno)	pH permeado	Conductividad permeado ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
1	9,94	1332
1,25	8,99	1669
1,5151	8,46	1782
2	8,26	1771
2,5	8,03	1728

- Membrana 15 kDa



**GRÁFICO 25.** EVOLUCIÓN DE LA DENSIDAD DEL FLUJO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO EN EL ENSAYO DE FRV. MEMBRANA 15 KDA.



**GRÁFICO 26.** EVOLUCIÓN DE LA DENSIDAD DE FLUJO EN FUNCIÓN DEL FACTOR DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN PARA EL ENSAYO DE FRV. MEMBRANA DE 15 KDA.

**TABLA 20.** DATOS DE PH Y CONDUCTIVIDAD DEL PERMEADO PARA LOS FACTORES DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN INDICADOS. MEMBRANA 15 KDA.

FRV (tanto por uno)	pH permeado	Conductividad permeado ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
1	9,99	1782
1,25	9,55	1670
1,5151	9,49	1764
1,75	9,44	1877
2	9,49	1962
2,5	9,43	1990

Se observa que la densidad de flujo para la membrana de 15 kDa (gráfico 25) es mayor que para la de 1 kDa (gráfico 23) por el mayor número de moléculas que pasan a través de los poros de mayor tamaño.

En las tablas 19 y 20 se observa la misma evolución de las variables de pH y conductividad del permeado. El pH de permeado disminuye mientras que la conductividad aumenta notablemente debido a la concentración de las moléculas en esta corriente. La variable pH permeado alcanza un valor de 8,03 para la membrana de 1 kDa y un valor de 9,43 para la de 15 kDa, partiendo del mismo pH inicial de alimento. Estos datos indican que el pH se mantiene más estable en el ensayo realizado con la membrana de 15 kDa.

## 5.5 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

- **Sólidos en suspensión**

**TABLA 21.** DATOS OBTENIDOS DE LOS SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN PARA LA PRIMERA TANDA DE AGUA RESIDUAL.

Ensayo	m_crisol (g)	m_tras estufa (g)	Diferencia (g)	ppm	ppm promedio	Desviación estándar
1	43,9292	43,9231	0,0061	1220	1013,33	200,333056
2	43,0212	43,0162	0,005	1000		
3	44,0622	44,0581	0,0041	820		

**TABLA 22.** DATOS OBTENIDOS DE LOS SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN PARA LA SEGUNDA TANDA DE AGUA RESIDUAL.

Ensayo	m_crisol (g)	m_tras estufa (g)	Diferencia (g)	ppm	ppm promedio	Desviación estándar
1	43,933	43,902	0,031	3100	3587,5	2097,77
2	43,272	43,207	0,066	6550		
3	42,3065	42,291	0,016	1600		
4	43,069	43,038	0,031	3100		

- **Turbidez:**

**TABLA 23.** DATOS OBTENIDOS DE TURBIDEZ PARA LA PRIMERA TANDA DE AGUA RESIDUAL.

Ensayo	Turbidez (NTU)	Promedio (NTU)	Desviación estándar
1	0,4527	0,428	0,0291
2	0,4296		
3	0,3866		
4	0,4428		

**TABLA 24.** DATOS OBTENIDOS DE TURBIDEZ PARA LA SEGUNDA TANDA DE AGUA RESIDUAL.

Ensayo	Turbidez (NTU)	Promedio (NTU)	Desviación estándar
1	0,483	0,6316	0,187
2	0,468		
3	0,920		
4	0,585		
5	0,702		

- **DQO:**

**TABLA 25.** DATOS OBTENIDOS DE DQO PARA LA PRIMERA TANDA DE AGUA RESIDUAL.

Ensayo	DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	Promedio DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	Desviación estándar
1	49,6	46,9	3,764
2	42,6		
3	48,5		

**TABLA 26.** DATOS OBTENIDOS DE DQO PARA LA SEGUNDA TANDA DE AGUA RESIDUAL.

Ensayo	DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	Promedio DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	Desviación estándar
1	26	28,15	4,26
2	23,8		
3	33,6		
4	29,2		

- **Color:**

**TABLA 27.** DATOS OBTENIDOS DE COLOR PARA LA PRIMERA TANDA DE AGUA RESIDUAL.

Ensayo	Color	Promedio Color	Desviación estándar
1	0,171	0,201	0,0312
2	0,173		
3	0,174		
4	0,229		
5	0,231		
6	0,228		

**TABLA 28.** DATOS OBTENIDOS DE COLOR PARA LA SEGUNDA TANDA DE AGUA RESIDUAL.

Ensayo	Color	Promedio Color	Desviación estándar
1	0,0213	0,11	0,0475
2	0,102		
3	0,102		
4	0,143		
5	0,144		
6	0,143		

- **Conductividad:**

**TABLA 29.** DATOS OBTENIDOS DE CONDUCTIVIDAD PARA LA PRIMERA TANDA DE AGUA RESIDUAL.

Ensayo	Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	Promedio conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	Desviación estándar
1	1388	1354,33	220,44
2	1556		
3	1119		

**TABLA30.** DATOS OBTENIDOS DE CONDUCTIVIDAD PARA LA SEGUNDA TANDA DE AGUA RESIDUAL.

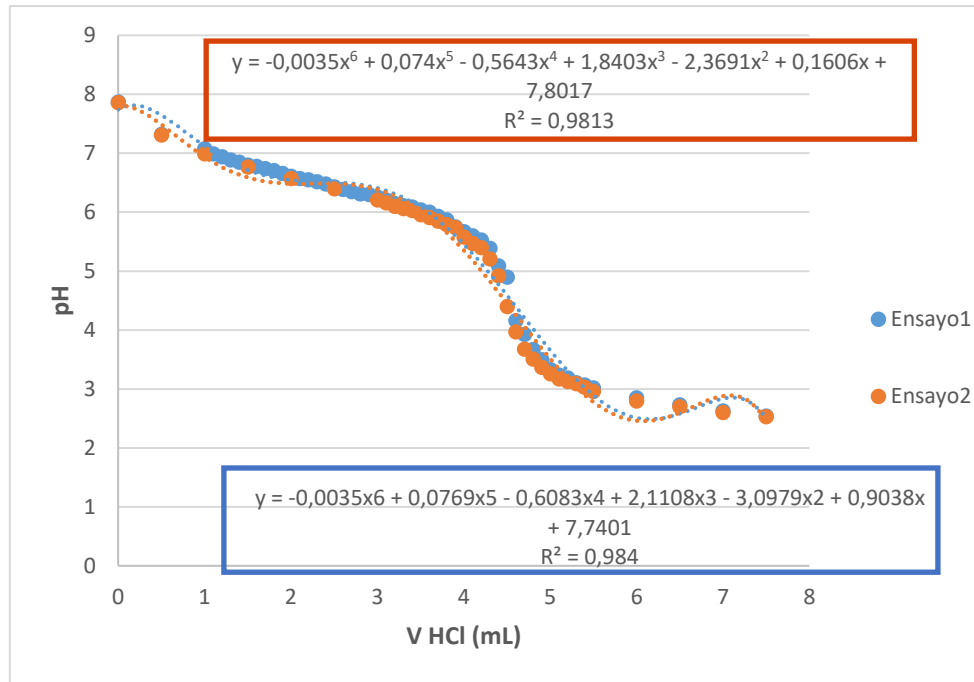
Ensayo	Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	Promedio conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	Desviación estándar
1	1468	1551	117,38
2	1634		

- **Alcalinidad:**

**TABLA31.** DATOS OBTENIDOS DE M-ALCALINIDAD PARA LA PRIMERA TANDA DE AGUA RESIDUAL.

Ensayo	V(HCl) (L)	n(HCl)	n(CaCO <sub>3</sub> )	m(CaCO <sub>3</sub> ) (g)	Alcalinidad (ppm)	Promedio Alcalinidad	Desviación estándar
1	0,0046	0,00046	0,00023	0,023	460	461,625	15,99
2	0,0045	0,00045	0,000225	0,0225	450		
3	0,004518	0,0004518	0,0002259	0,02259	451,8		
4	0,004847	0,0004847	0,00024235	0,024235	484,7		

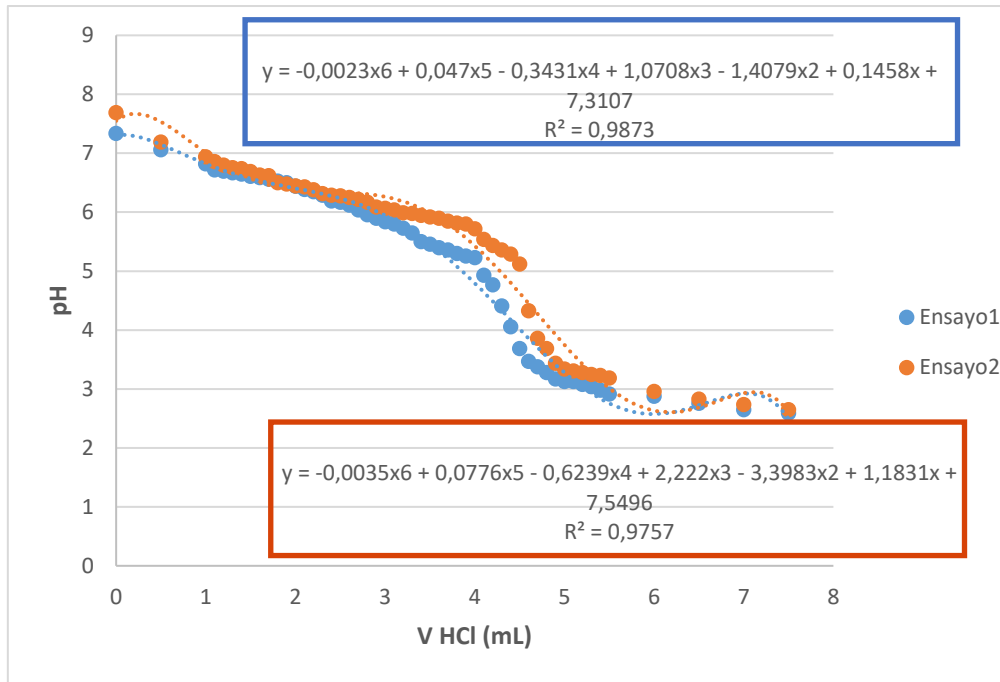




**GRÁFICO 27.** REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PH EN FUNCIÓN DE LOS ML DE HCL AÑADIDOS. PARA LA PRIMERA TANDA DE AGUA RESIDUAL.

**TABLA 32.** DATOS OBTENIDOS DE M-ALCALINIDAD PARA LA SEGUNDA TANDA DE AGUA RESIDUAL.

Ensayo	V(HCl) (L)	n(HCl)	n(CaCO <sub>3</sub> )	m(CaCO <sub>3</sub> ) (g)	Alcalinidad (ppm)	Promedio Alcalinidad	Desviación estándar
1	0,0044	0,00044	0,00022	0,022	440	456,7	26,44
2	0,0047	0,00047	0,000235	0,0235	470		
3	0,004298	0,0004298	0,0002149	0,02149	429,8		
4	0,00487	0,000487	0,0002435	0,02435	487		



**GRÁFICO 28.** REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PH EN FUNCIÓN DE LOS ML DE HCL AÑADIDOS. PARA LA SEGUNDA TANDA DE AGUA RESIDUAL.

## 6 DISEÑO DE LA INSTALACIÓN

La planta diseñada para ultrafiltración consta de dos circuitos, un circuito principal o primario, y un circuito de limpieza o secundario.

El proceso diseñado cubre, por completo, el tratamiento terciario de una EDAR, con capacidad para tratar un caudal equivalente a 15.000 HE. Para el dimensionamiento del circuito de ultrafiltración, se ha fijado un parámetro de conversión del 60%, como se puede observar en los cálculos realizados a continuación.

### 6.1 DIMENSIONAMIENTO INSTALACIÓN

#### 6.1.1 CÁLCULO DEL NÚMERO DE MEMBRANAS

En el presente Trabajo Final de Grado se trata un caudal equivalente a 15.000 HE (150 L/día = 1 HE). Por ello, el caudal a tratar en la instalación es:

$$Q_{alimento} = 15.000 \text{ HE} \cdot 150 \frac{\text{L}}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 93750 \text{ L/h} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Conocido el caudal de alimento de la instalación y fijando un rendimiento para la misma del 60%, se puede obtener el caudal de permeado de la instalación diseñada mediante la siguiente ecuación:

$$Y(\%) = \frac{Q_{permeado}}{Q_{alimento}} \rightarrow Q_{permeado} = \frac{60}{100} \cdot 93750 \frac{\text{L}}{\text{h}} = 56350 \text{ L/h} \quad (\text{Ecuación 8})$$



La densidad de flujo obtenida en la instalación es la misma que para la planta del laboratorio debido a que la velocidad transversal se mantiene constante. La densidad de flujo óptima obtenida durante los ensayos experimentales realizados se consigue con la membrana de 1 kDa, con unas condiciones de operación establecidas de 10 unidades para el pH de alimento y una presión de 4 bar.

A partir de la densidad de flujo obtenida con las condiciones óptimas comentadas anteriormente y del caudal de permeado ya calculado, se puede obtener el área total de membrana necesaria para la instalación industrial a través de la siguiente ecuación:

$$A_T \text{ membrana} = \frac{Q_{permeado}}{\text{Densidad de flujo}} = \frac{56350 \text{ L/h}}{33,661 \text{ L/m}^2 \text{ h}} = 1671,07 \text{ m}^2 \quad (\text{Ecuación 9})$$

Para la selección de la membrana de la instalación, se recurre al manual TAMI Industries. La membrana escogida se trata de una membrana de la marca "Sunflower", cuyas características se muestran en la siguiente tabla:

**TABLA 33.** CARACTERÍSTICAS DE LAS MEMBRANAS EMPLEADAS EN EL LABORATORIO Y EN LA INSTALACIÓN. TAMI INDUSTRIES.

Membrana	Corte transversal	Nº canales	Diámetro hidráulico (mm)	Área específica (m <sup>2</sup> )	Longitud (mm)
Laboratorio		8	6	0,2	250
Instalación		23	3,5	0,35	1178

Como la corriente tratada por la instalación es agua residual, la membrana escogida no debe de tener un número muy elevado de canales. Esto es debido a que, a mayor número de canales, menor radio hidráulico tienen estos canales y, de este modo, se incrementa la capacidad de ensuciamiento de la membrana. Esta solución es seleccionada con el fin de llegar a una solución de compromiso a través del área de la membrana y el radio hidráulico de la misma.

A continuación, se procede al cálculo de las membranas necesarias a imponer en la instalación:

$$n^{\circ}memb = \frac{A_T membrana}{A_{membrana}} = \frac{1671,07 \text{ m}^2}{0,2 \text{ m}^2} = 4474,49 \approx 4475 \text{ memb} \quad (\text{Ecuación 10})$$

El área total de las membranas de la instalación se ve reflejada en la siguiente ecuación:

$$A_T = 49 \frac{memb}{cartucho} \cdot 99 \text{ cartuchos} \cdot 0,35 \text{ m}^2 = 1697,85 \text{ m}^2 \quad (\text{Ecuación 13})$$

Por lo tanto, la instalación constará de 4475 membranas, es decir, **49 cartuchos de 99 membranas** cada uno (TAMI Industries). Con esta información, se procede al cálculo de la densidad de flujo de la instalación para comprobar si el rendimiento de la misma es el esperado.

$$J_p = 33,661 \frac{L}{\text{m}^2 h} \cdot 99 \text{ cartuchos} \cdot 49 \frac{memb}{\text{cartucho}} = 163289,5 \frac{L}{\text{m}^2 h} \quad (\text{Ecuación 11})$$

A partir de la densidad de flujo y del área de la membrana, se halla el caudal de permeado de la instalación:

$$Q_{\text{permeado}} = J_p \cdot A_{memb} = 163289,5 \frac{L}{\text{m}^2 h} \cdot 0,35 \text{ m}^2 = 57151,33 \frac{L}{h} \quad (\text{Ecuación 12})$$

A continuación, se procede al cálculo del rendimiento de la instalación:

$$Y(\%) = \frac{Q_{\text{permeado}}}{Q_{\text{alimento}}} = \frac{57151,33 \frac{L}{h}}{93750 \frac{L}{h}} \cdot 100 = 60,96\% \quad (\text{Ecuación 14})$$

### 6.1.2 CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE LAS TUBERÍAS

Para calcular el diámetro que deben de tener las tuberías de la instalación, se realizan los siguientes cálculos:

1)

$$\text{Velocidad} = \frac{Q_{\text{alimento}}}{A_{\text{tubería}}} \rightarrow A_{\text{tubería}} = \frac{Q_{\text{alimento}}}{\text{Velocidad}} \quad (\text{Ecuación 15})$$

2)

$$Q_{A_{\text{tubería}}} = \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} \quad (\text{Ecuación 16})$$

A partir de la ecuación 14 se calcula el área de la tubería a instalar y, mediante la ecuación 15 se despeja el diámetro que tienen las tuberías de la instalación. En este caso, el diámetro de las tuberías del circuito principal es de 0,104 metros, es decir, 104 mm. Se seleccionan tuberías de PVC de 110 DN. Las tuberías del circuito de limpieza poseen las mismas características ya que el caudal es el mismo.

Para el proceso de adición de NaOH, para el ajuste del pH, se trabaja con caudales muy pequeños. Por lo tanto, el diámetro de las tuberías de estos circuitos es muy reducido. La tubería seleccionada para este proceso es de PVC de 10 DN.

### 6.1.3 ADICIÓN DE CLORO

El volumen de permeado en un día equivale a 1.350 m<sup>3</sup> de agua. Debido a que, según rige el RD 140/2003, la concentración de cloro libre residual en el agua potable debe de ser inferior a 1 mg/L, la cantidad de cloro libre residual que se debe de adicionar es de 1,35 · 10<sup>3</sup> gramos. A continuación, se procede al cálculo del número de moles de cloro:

$$n(Cl_2) = \frac{m(Cl_2)}{PM(Cl_2)} = \frac{1,35 \cdot 10^3 g}{35,5 \frac{g}{mol}} = 38 \text{ moles de } Cl_2 \quad (\text{Ecuación 17})$$

El cloro, introducido en el agua, da lugar a la formación del ácido hipocloroso (no disociado), según la siguiente reacción:



Por lo tanto, según la estequiometría de la reacción, se forma la misma cantidad de moles de ácido hipocloroso (HClO) que reacciona de cloro (Cl<sub>2</sub>). Por ello, el número de moles de HClO es 38. A partir de la siguiente ecuación, se calculan los gramos de ácido hipocloroso necesarios:

$$n(\text{HClO}) = \frac{m(\text{HClO})}{PM(\text{HClO})} \rightarrow m(\text{HClO}) = 1,99 \cdot 10^3 \text{ g de HClO} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Teniendo en cuenta la riqueza del hipoclorito de sodio empleado para la cloración (12%), se calculan los kilogramos necesarios que hay que adicionar de este compuesto al tanque de permeado por día:

$$m(\text{NaClO}) = \frac{1,99 \text{ kg}}{0,12} = 16,61 \frac{\text{kg}(\text{NaClO})}{\text{día}} \quad (\text{Ecuación 19})$$

A partir de la densidad del hipoclorito sódico (1,1 kg/L), se hallan los litros de este compuesto que se adicionan al día:

$$\rho(\text{NaClO}) = \frac{m(\text{NaClO})}{V(\text{NaClO})} \rightarrow V(\text{NaClO}) = 15,1 \frac{L(\text{NaClO})}{\text{día}} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Esta cantidad de hipoclorito sódico es adicionada al depósito de permeado al final del día, manteniendo el mismo en homogeneización durante la noche. Finalmente, el agua es suministrada a la red por la mañana.

## **6.2 CIRCUITO PRINCIPAL**

Este circuito es el que recibe el agua residual procedente de la EDAR. Esta agua es almacenada en un depósito de homogeneización, en continua agitación. Este depósito contiene un medidor de temperatura con posibilidad de refrigeración, con el objetivo de controlar la temperatura del alimento. Además, este depósito está provisto de un medidor de pH, el cual nos indica si el alimento se encuentra en las condiciones de operación adecuadas para comenzar el proceso. El agua residual no es la única corriente de entrada a este depósito, otro recipiente proporciona NaOH al alimento para ajustar el pH a 10 ya que, tras el análisis de los experimentos, se ha concluido que a pH 10 el tratamiento es más efectivo.

A la salida de este tanque se coloca un filtro para preservar la bomba a causa de los sólidos que pueda contener el alimento.

Tras la bomba, se coloca un manómetro para controlar la presión a la que trabaja la bomba y asegurar su adecuado funcionamiento. Un caudalímetro situado tras el manómetro mide el caudal que impulsa la bomba hacia el módulo de membranas.

A continuación del caudalímetro, se sitúa el módulo de membranas, el cual consta de **49 cartuchos de 99 membranas** cada uno. Estas membranas provienen de la casa comercial TAMI Industries con marca "Sunflower" de 23 canales, con un diámetro hidráulico de 3,5 mm y un área específica de 0,35 m<sup>2</sup>.

Para medir la diferencia de presiones existente en el módulo, se colocan dos manómetros. Uno de ellos antes del módulo de membranas y otro después del mismo.

Del módulo de membranas salen dos corrientes, rechazo y permeado. El rechazo es recirculado al tanque de alimento y a cabecera de planta. Por otro lado, el permeado es introducido en otro depósito de homogeneización, dotado de agitación continua, medidor de temperatura, medidor de pH y posibilidad de refrigeración. Finalmente, un depósito que contiene cloro, dosifica la cantidad necesaria de esta sustancia al tanque de permeado para que se produzca la desinfección. Este depósito está dotado de medidores de temperatura, pH y posibilidad de refrigeración. A la salida de este depósito se coloca un filtro para no causar perjuicios a la bomba dosificadora de cloro.

Los volúmenes y datos del diseño de estos elementos se muestran indicadas en la tabla de presupuesto.

### **6.3 CIRCUITO DE LIMPIEZA**

Este circuito es diseñado siguiendo las instrucciones del fabricante de membranas (TAMI Industries).

La limpieza de la instalación consta de una serie de etapas especificadas a continuación:

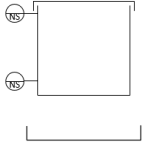

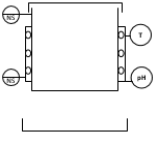










Para comenzar, se hace pasar agua a contracorriente para eliminar la suciedad. Se comprueba la permeabilidad de la membrana y, si no ha vuelto a su valor inicial, se hace pasar hidróxido sódico (NaOH) por la instalación, el cual es necesario para que se produzca la eliminación de la materia orgánica. Se vuelve a pasar agua por la instalación para eliminar los restos de hidróxido sódico que puedan quedar en ella. Se vuelve a comprobar la permeabilidad y si tampoco ha vuelto a su valor inicial, se realiza un último lavado con ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>). Posteriormente, se realiza un lavado con agua para eliminar los restos de los reactivos que puedan quedar en la planta.

Los tanques que contienen el hidróxido de sodio y el ácido nítrico son tanques complementados de un sistema de medición de temperatura, agitación mecánica continua y posibilidad de refrigeración,

Todos los tanques de la instalación están provistos de indicadores de nivel superior e inferior, toma de tierra y cubeto de contención; y los volúmenes y datos del diseño de estos elementos se encuentran en las tablas de presupuesto.

En la siguiente tabla se recoge la leyenda de la instalación

**TABLA 34.** LEYENDA PARA LA INSTALACIÓN DE ULTRAFILTRACIÓN DISEÑADA.

	Tanque con indicadores de nivel y cubeto de contención		Módulo de membranas
	Tanque con indicadores de nivel, medidor de pH, medidor de temperatura, sistema de refrigeración y cubeto de contención		Caudalímetro
	Agitador		Manómetro
	Bomba		Filtro
	Válvula de alivio		Válvula de paso
	Válvula de obturación de tres vías		Toma de tierra
	Válvula de seguridad		



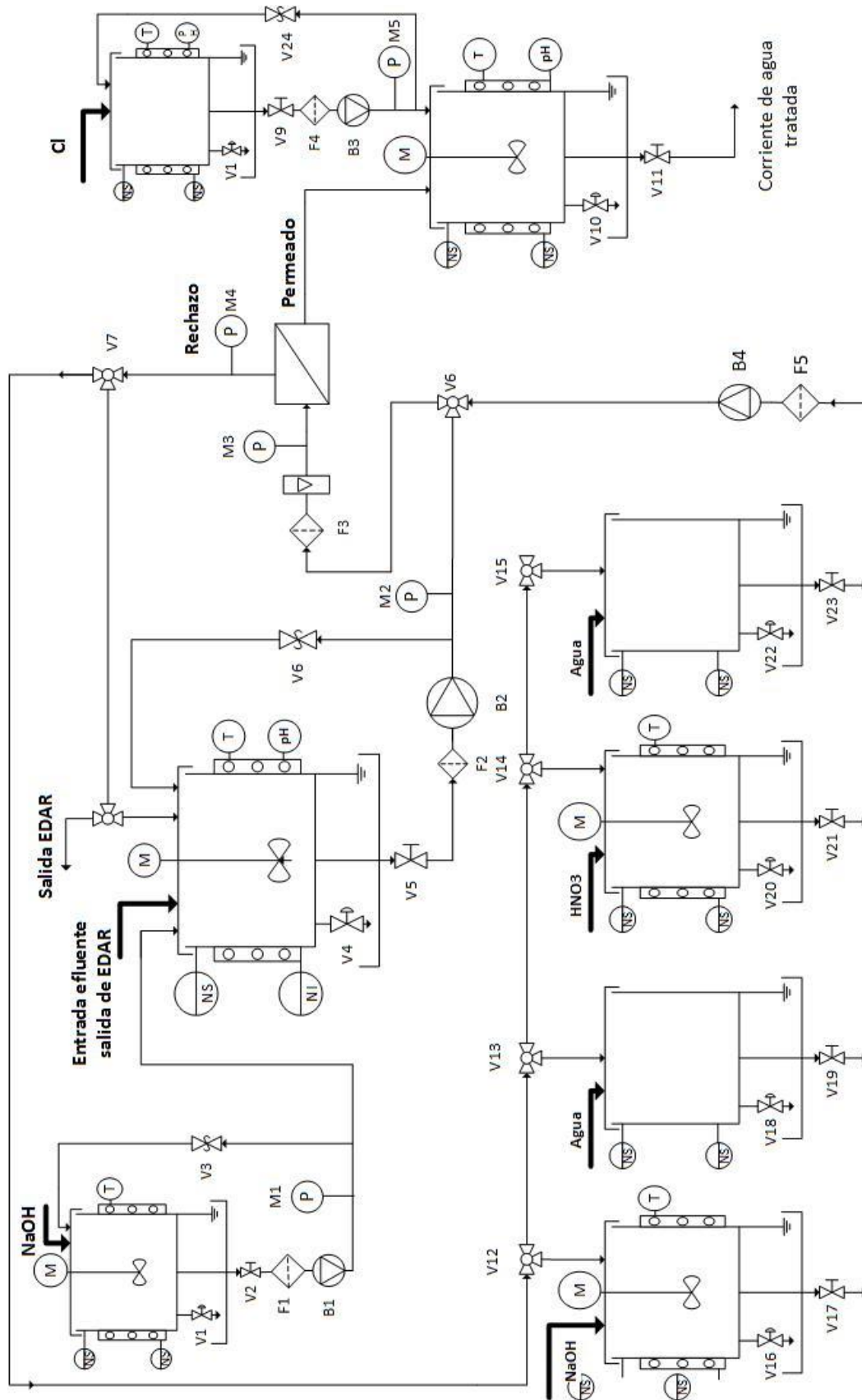


FIGURA 63. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA INSTALACIÓN.



## **7 CONCLUSIONES**

Para la realización de este trabajo, se han realizado una gran variedad de ensayos experimentales a través del empleo de procesos de separación con membranas, específicamente membranas de ultrafiltración. Con estos ensayos, se pretende conocer cuáles son las condiciones de operación adecuadas, es decir, qué condiciones de operación se deben de emplear para conseguir una mayor efectividad en cuanto a la eliminación de los compuestos farmacéuticos contenidos en la corriente de proceso.

Tras el análisis del diseño de experimentos realizado, se ha comprobado que las condiciones de operación con las que se obtienen unos índices de rechazo más elevados son, como ya se ha comentado, pH de alimento 10 y presión 4 bar, para las dos membranas empleadas (1 y 15 kDa). Sin embargo, la membrana con menor corte molecular (1 kDa) proporciona unos índices de rechazo más elevados que la membrana con mayor corte molecular (15 kDa). Esto es debido a que, a menor tamaño de poro, más moléculas son retenidas por los mismos.

Por otro lado, cabe mencionar que se han cumplido los objetivos de este Trabajo Final de Grado. Se ha realizado el diseño de una instalación a través de los resultados obtenidos en el laboratorio, empleando conocimientos adquiridos en las asignaturas cursadas durante el Grado en Ingeniería Química y en las competencias transversales del mismo.



## 8 BIBLIOGRAFÍA

Baker, R.W. (2004). *Membrane Technology and Applications*, 2n edition.

Chon, K., Cho, J., Shon, H. K., “Fouling characteristics of a membrane bioreactor and nanofiltration hybrid system for municipal wastewater reclamation” en *Elsevier (Journal of Water Process Engineering)*. <https://www.elsevier.com/locate/biortech>. Diciembre, 2012.

Clark, S.W., Parrotta, M.J., “Membrane Technologies and Drinking Water Regulations”. Proceedings of the AWWA Seminar on Membrane Technologies in the Water Industry. Marzo, 1991.

Díez González, M.T., De la Macorra García, C., (2014). “Utilización de membranas como tratamientos terciarios para regeneración de aguas residuales: membranas cerámicas” en *Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente*. Universidad Alfonso X El Sabio. Volumen XII, 2014.

García Ivars, J. (2015). *Obtención y caracterización de membranas poliméricas de ultrafiltración de bajo ensuciamiento y estudio de condiciones de fabricación*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.

García Ivars, J., Iborra Clar, M.I., Massellac, M., Carbonell Alcaina, C., Alcaina Miranda, M.I., (2016). “Removal of pharmaceutically active compounds using low-pressure membrane processes” en *Desalination and Water Treatment*. Desalination Publicacions. Mayo, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2870-7>.

Gozálvez Zafrilla, J.M., (1998). *Fabricación de membranas de acetato de celulosa aptas para osmosis inversa y nanofiltración mediante el método de inversión de fase*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.

Janet Gil, M., Soto, A.M., Usma, J.I., Gutiérrez, O.D, (2012). “Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos” en *Producción + Limpia, Vol. 7, nº2*. <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v7n2/v7n2a05.pdf>. (Diciembre, 2012).

Kümmerer, K., (2009) “Pharmaceuticals in the environment: source, fate, effects and risks”. Spring-Verlag, 2n edition.

Ley Orgánica 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de calidad del agua de consumo humano. BOE, 21 de febrero de 2003, num. 45, BOE-A-2003-3596.

Mendoza Roca, J. A., Montañés i Sanjuán, M. T., & Palomares i Gimeno, A. E. (1998). *Ciència i Tecnologia del Medi Ambient*. (Servei de publicacions UPV, Ed.) (1st ed.). Valencia: Universitat Politècnica de València.

Mourato, D., (2008). “Microfiltración y nanofiltración en el área de agua potable” en *ZENON Inveronmental Inc*. Mayo, 2012.

Mulder, M. (1997). *Basic principles of Membrane Technology*, Second Edition. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Ozgun, H., Yu Tao, Evren, M. Zhou, Z., Giménez, J.B., Spanjers, H., Van Lier, J. B., “Impact of temperatura on feed-flow characteristics and filtration performance of an upflow anaerobic sludge blanket coupled ultrafiltration membrane treating municipal wastewater” en *Elsevier (Journal of Water Process Engineering)*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.06.035>. Junio, 2015.

Peña-Álvarez, A., & Castillo-Alanís, A. (2015). “Identificación y cuantificación de contaminantes emergentes en aguas residuales por microextracción en fase sólida-cromatografía de gasesespectrometría de masas”.

Perdigón Melón, J.A., (2015). “Eliminación de antibióticos en aguas residuales mediante ozonización y estudio de ecotoxicidad asociada” en *Journal of Hazardous Materials*. <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2015/05/27/132281>. Mayo, 2015.

Rodríguez, E., Campinas, M., Acero, J.L., João Rosa, M., (2012). “Investigating PPCP Removal from Wastewater by Powdered Activated Carbon/Ultrafiltration” en *Water Air Soil Pollut.* Springer International Publishing Switzerland, 2016.

Roig Bondia, J., (2007). Eliminación de contaminantes emergentes mediante Humedales Artificiales como sistema alternativo o complementario a un tratamiento de aguas convencional. Tesis. Universitat Politècnica de València.

Romero González, J.F., (2010). *Control Avanzado en Procesos Industriales de Microfiltración y Ultrafiltración tangencial*. Tesis. Universitat Politècnica de València.

Sotto Díaz, A., 2008. *Aplicación de la tecnología de membranas de nanofiltración y ósmosis inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas de compuestos fenólicos y ácidos carboxílicos*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.

Vona, A., di Martino, F., García Ivars, J., Picó, Y., Mendoza Roca, J.A., Iborra Clar, M.I., (2015). “Comparison of different removal techniques for selected pharmaceuticals” en *Elsevier (Journal of Water Process Engineering)*. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.12.011>. Enero, 2015.

## **PRESUPUESTO**

---





## 9 PRESUPUESTO

En este apartado se realiza el presupuesto del proyecto. Este documento muestra el coste de inversión necesario para la ejecución del proyecto. Para su realización, es necesario conocer las mediciones y los precios unitarios de cada una de todas las unidades de obra. Con estos datos es posible conocer el precio total de cada una de las unidades y, como consecuente, el precio total del proyecto (Gómez-Senent Martínez, et al, 2015).

### 9.1 PRESUPUESTO PARCIAL

#### 9.1.1 PRESUPUESTO DE LA MANO DE OBRA

A continuación, se detallan todas las mediciones y los costes unitarios, así como el coste total para cada una de las unidades del proyecto. En la primera tabla, se muestran las mediciones y el precio de la unidad de mano de obra. Este proyecto está previsto para que se realice en 5 semanas.

**TABLA 35.** PRESUPUESTO DE LA MANO DE OBRA.

<b>Código</b>	<b>Unidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario (€/hora)</b>	<b>Importe Total (€)</b>
<b>1.01</b>	<b>h</b>	<b>Peón ordinario</b>	200	12,54	2.508,00
<b>1.02</b>	<b>h</b>	<b>Peón especializado</b>	200	12,85	2.570,00
<b>1.03</b>	<b>h</b>	<b>Oficial 1ª</b>	200	14,10	2.820,00
<b>1.04</b>	<b>h</b>	<b>Ingeniero Químico</b>	200	21,50	4.300,00
<b>Total</b>					<b>12.198,00</b>

### 9.1.2 PRESUPUESTO DE EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN

En el resto de tablas se muestra un resumen todos los equipos, instrumentos, equipos auxiliares, reactivos y material necesario para llevar a cabo el proyecto.

A continuación, en la tabla 36, se muestra el presupuesto de los depósitos de la instalación.

**TABLA 36.** PRESUPUESTO DE LOS DEPÓSITOS DE LA INSTALACIÓN.

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€/unidad)	Importe Total (€)
2.01	Depósito de 2500 m <sup>3</sup> para el alimento	1	37.554,00	37.554,00
2.02	Depósito de 1500 m <sup>2</sup> para el permeado	1	22.456,50	22.456,50
2.03	Depósito de 1500 Litros para el ajuste de pH (NaOH)	1	825,60	825,60
2.04	Depósito de 1000 Litros para limpieza (NaOH)	1	652,35	652,35
2.05	Depósito de 1000 Litros para limpieza (HNO <sub>3</sub> )	1	754,99	754,99
2.06	Depósito de 1000 Litros para limpieza (H <sub>2</sub> O)	2	473,79	947,58
2.07	Depósito de 50 Litros (Cloración)	1	100,00	100,00
2.08	Cubeto para tanque de alimento	7	1014,00	7098,00
2.09	Cubeto	1	1.965,79	1.965,79
<b>Total</b>				<b>72.354,81</b>

El presupuesto de los depósitos de la instalación asciende a la cantidad de **SETENTA Y DOS MIL TRESCIENTOS CINCUENTA Y CUATRO EUROS CON OCHENTA Y UN CÉNTIMOS.**

La tabla siguiente muestra el presupuesto de los equipos auxiliares y la instrumentación necesarios para la instalación.

**TABLA 37. PRESUPUESTO DE LOS EQUIPOS AUXILIARES E INSTRUMENTACIÓN**

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€/unidad)	Importe Total (€)
3.01	Agitador vertical	5	1.005,69	5.028,45
3.02	Intercambiador de calor de placas	6	1.125,30	6.751,80
3.03	Manómetro industrial (0 – 6 bar)	6	118,80	712,80
3.04	Filtro (25 µm)	5	1.230,75	6.153,75
3.05	Caudalímetro	1	704,00	704,00
3.06	Electrodo de pH	3	230,55	691,65
3.07	Sonda Temperatura	6	58,85	353,10
<b>Total</b>				<b>20.395,55</b>

El presupuesto para los equipos auxiliares y la instrumentación asciende a la cantidad total de **VEINTE MIL TRESCIENTOS NOVENTA Y CINCO EUROS CON CINCUENTA Y CINCO CÉNTIMOS**.

En la tabla 38, se especifica el presupuesto de las válvulas y las bombas que contiene la instalación diseñada.

**TABLA 38. PRESUPUESTO DE LAS VÁLVULAS Y BOMBAS DE LA INSTALACIÓN.**

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€/unidad)	Importe Total (€)
4.01	Válvula de alivio DN 10	2	43,28	86,56
4.02	Válvula de alivio DN 110	6	223,56	1.341,36
4.03	Válvula de seguridad	8	84,54	676,32
4.04	Válvula de 3 vías DN 110	7	476,67	3.336,69
4.05	Válvula de paso DN 10	2	43,34	86,68
4.06	Válvula de paso DN 110	6	256,78	1.540,68
4.07	Bomba dosificadora para el ajuste de pH	1	105,06	105,06
4.08	Bomba centrífuga (Alimento y limpieza)	2	2.064,53	4.129,06
4.09	Bomba dosificadora a motor (Cloración)	1	237,90	237,90
<b>Total</b>				<b>11.540,31</b>

El presupuesto para las válvulas y las bombas de la instalación asciende a la cantidad total de **ONCE MIL QUINIENTOS CUARENTA EUROS CON TREINTA Y UN CÉNTIMOS**.

La tabla 39 muestra el presupuesto de los reactivos empleados en el proceso de separación.

**TABLA 39.** PRESUPUESTO DE LOS REACTIVOS NECESARIOS PARA EL TRATAMIENTO.

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€/unidad)	Importe Total (€)
5.01	Ácido Nítrico (53%) 5 Litros	100	86,60	866,00
5.02	Hidróxido Sódico (15% p/p) 10 Litros	100	130,00	1.300,00
5.03	Hipoclorito Sódico (12%) 25 Litros	2	30,00	60,00
<b>Total</b>				<b>2.226,00</b>

A continuación, en la tabla 40, se especifica el presupuesto para el módulo de membranas de la instalación.

**TABLA 40.** PRESUPUESTO DEL MÓDULO DE MEMBRANAS.

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€/unidad)	Importe Total (€)
6.01	Membrana cerámica Ø25 (23 canales) Tami 1 kDa	4475	135,50	60.6362,50
6.02	Cárter 99 membranas	48	2.600,00	124.800,00
6.03	Juntas EDPM para las membranas	96	5,00	480,00
<b>Total</b>				<b>731.642,50</b>

El presupuesto para el módulo de membranas de la instalación asciende a la cantidad total de **SETECIENTOS TREINTA Y UN MIL SEISCIENTOS CUARENTA Y DOS EUROS CON CINCUENTA CÉNTIMOS**.

En la tabla 41 se muestra el presupuesto que conlleva el cuadro de control de la instalación.

**TABLA 1241.** PRESUPUESTO DEL CUADRO DE CONTROL DE LA INSTALACIÓN.

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€/unidad)	Importe Total (€)
7.01	Caja de alimentación (Instalación)	1	56,76	56,76
7.02	Caja de alimentación (Bombas)	3	34,79	104,37
7.03	Variador de frecuencia de las bombas	3	945,65	2.836,95
7.04	Controlador PID pH	3	54,60	163,80
7.05	Controlador PID Temperatura	6	43,75	262,50
8.05	Controlador PID nivel tanque	8	39,90	319,20
8.06	Controlador válvulas	4	26,67	106,68
<b>Total</b>				<b>3.850,26</b>

En la siguiente tabla, se muestra un resumen de los precios de la instalación, así como el importe total.

**TABLA 42.** RESUMEN DEL PRESUPUESTO DE EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN.

Descripción	Importe Total (€)
Depósitos	825,60
Equipos auxiliares e instrumentación	72.354,81
Válvulas y bombas	20.395,55
Reactivos	11.540,31
Módulo de membranas	2.226,00
Cuadro de control	731.642,50
<b>Total</b>	<b>838.984,77</b>

El presupuesto total de los equipos y la instrumentación de la instalación asciende a la cantidad total de **OCHOCIENTOS TREINTA Y OCHO MIL NOVECIENTOS OCHENTA Y CUATRO EUROS CON SETENTA Y SIETE CÉNTIMOS.**

## 9.2 PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCIÓN MATERIAL

En la siguiente tabla se muestra un resumen del presupuesto total de ejecución material, el cual es la suma de los presupuestos parciales de mano de obra y de equipos e instrumentación.

**TABLA 43.** PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCIÓN MATERIAL.

Descripción	Importe Total (€)
Mano de obra	12.198,00
Equipos e instrumentación	838.984,77
<b>Total</b>	<b>851.182,77</b>

El presupuesto total de ejecución material asciende a la cantidad de **OCHOCIENTOS CINCUENTA Y UN MIL CIENTO OCHENTA Y DOS EUROS CON SETENTA Y SIETE CÉNTIMOS.**

## 9.3 PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCIÓN POR CONTRATA

**TABLA 44.** PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCIÓN POR CONTRATA.

Presupuesto total de ejecución material	851.182,77
Gastos Generales(15%)	127.677,42
Beneficio industrial (6%)	51.070,97
<b>Total</b>	<b>1.029.931,15</b>

El presupuesto total de ejecución por contrata asciende a la cantidad de **UN MILLÓN VEINTINUEVE MIL NOVECIENTOS TREINTA Y UN EUROS CON QUINCE CÉNTIMOS.**

#### **9.4 PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN**

**TABLA 45.** PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN.

<b>Presupuesto total de ejecución por contrata</b>	<b>1.029.931,15</b>
<b>IVA (21%)</b>	<b>216.285,542</b>
<b>Total</b>	<b>1.246.216,69</b>

El presupuesto base de licitación asciende a la cantidad total de **UN MILLÓN DOSCIENTOS CUARENTA Y SEIS MIL DOSCIENTOS DIECISEIS EUROS CON SESENTA Y NUEVE CÉNTIMOS.**





## **ANEXOS**

---



## ANEXOS

### ANEXO I: CÁLCULOS

- **Disolución NaOH (0,1N)**

Conocido el peso molecular (40 g/mol) y la molaridad (0,1 N  $\rightarrow$  0,1 M) del hidróxido de sodio (NaOH), se puede calcular la masa que se debe de adicionar al matraz de 250 mL:

$$m(\text{NaOH}) = V(\text{disolución}) \cdot PM \cdot \text{Molaridad} = 0,25 \text{ L} \cdot 40 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 0,1 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

$$m(\text{NaOH}) = 2 \text{ g}(\text{NaOH})$$

- **Disolución HCl (0,1 N)**

Para realizar esta disolución disponemos de una botella de ácido clorhídrico (HCl) con una riqueza del 37 %. Para averiguar la concentración de esta botella, se realiza el siguiente cálculo:

$$[\text{HCl}]_{\text{botella}} = \frac{\rho}{PM} = \frac{1190 \frac{\text{g}}{\text{L}}}{36,5 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 32,6 \frac{\text{mol}(\text{HCl})}{\text{L}} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Teniendo en cuenta la riqueza del compuesto:



$$[\text{HCl}]_{\text{botella}} = 32,6 \frac{\text{mol}(\text{HCl})}{\text{L}} \cdot 0,37 = 12,06 \frac{\text{mol}(\text{HCl})}{\text{L}}$$


El cálculo del volumen necesario de ácido que se debe de adicionar al matraz de 250 mL, se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$[\text{HCl}]_{\text{botella}} \cdot V(\text{HCl})_{\text{botella}} = [\text{HCl}]_{\text{don}} \cdot V(\text{HCl})_{\text{don}} \quad (\text{Ecuación 22})$$

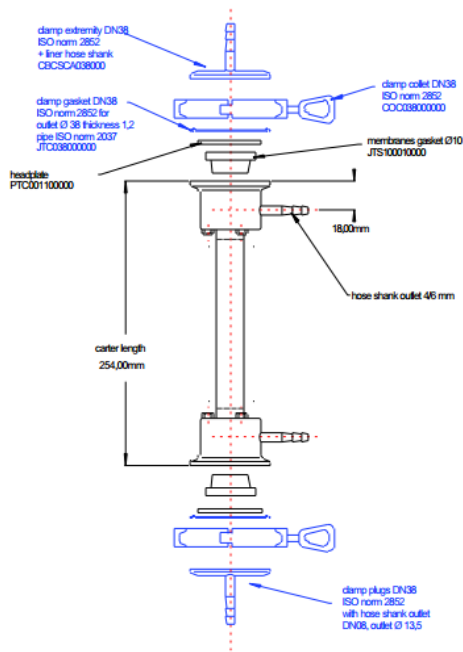
$$V(\text{HCl})_{\text{botella}} = \frac{[\text{HCl}]_{\text{don}} \cdot V(\text{HCl})_{\text{don}}}{[\text{HCl}]_{\text{botella}}} = \frac{0,1 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \cdot 0,25 \text{ L}}{12,06 \frac{\text{mol}}{\text{L}}} = 0,00207 \text{ L} = 2,07 \text{ mL}$$

**ANEXO II: REACTIVOS. PICTOGRAMAS Y FRASES H Y P**

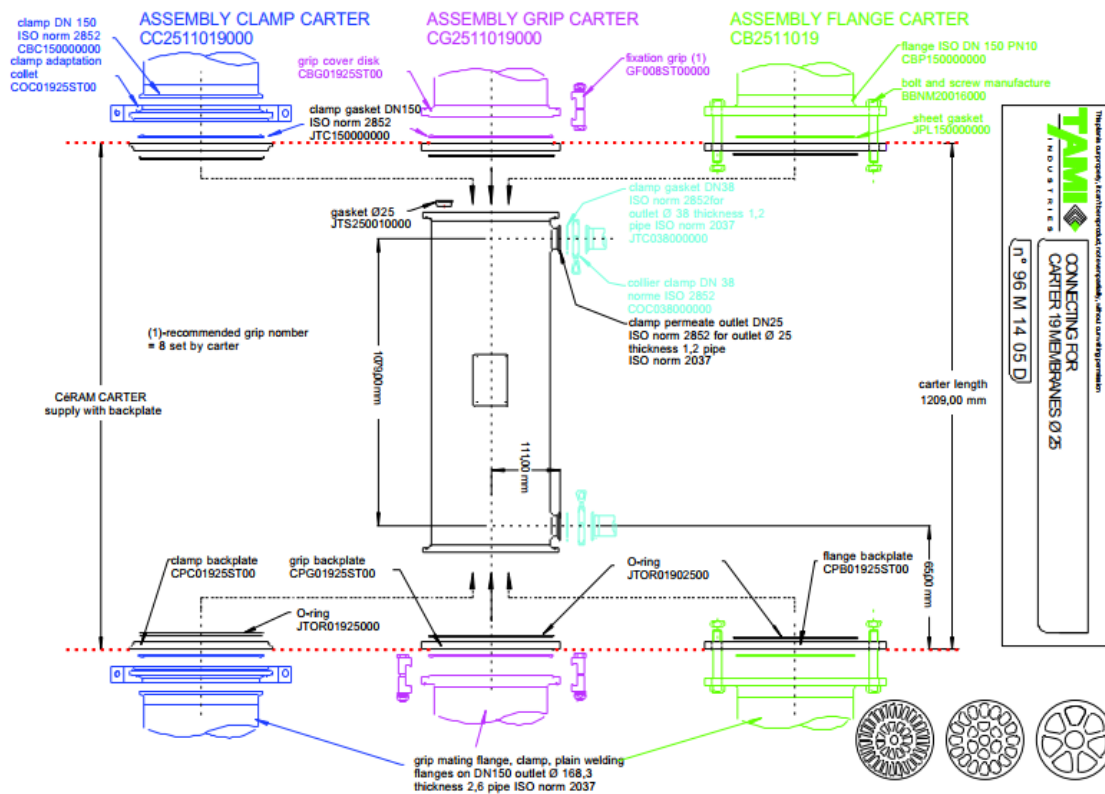
Compuesto	Pictograma	Frases H	Frases P
<p>Ácido Clorhídrico (37%) PANREAC</p>		<p>H290 Puede ser corrosivo para los metales.</p> <p>H335 Puede irritar las vías respiratorias.</p> <p>H314 Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares.</p>	<p>P234 Conservar únicamente en el recipiente original.</p> <p>P390 Absorber el vertido para que no dañe otros materiales.</p> <p>P264 Lavarse... concienzudamente tras la manipulación.</p> <p>P280 Llevar guantes, prendas, gafas o máscara de protección.</p> <p>P302+P352 EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Lavar con agua y jabón abundantes.</p>
<p>Hidróxido Sódico (lentejas) PANREAC</p>		<p>H314 Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares.</p> <p>H290 Puede ser corrosivo para los metales.</p>	<p>P260 No respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/el aerosol.</p> <p>P280 Llevar guantes, prendas, gafas o máscara de protección.</p> <p>P303+P361+P353 EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitarse inmediatamente las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua o ducharse.</p> <p>P305+P351+P338 EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.</p> <p>P310 Llamar inmediatamente a un CENTRO DE INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA o a un médico.</p> <p>P501 Eliminar el contenido/recipiente según Directiva 94/62/CE o 2008/98/CE.</p>

<p>Hipoclorito Sódico PANREAC</p>		<p>H314 Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.</p> <p>H400 Muy tóxico para los organismos acuáticos.</p>	<p>P280 Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección.</p> <p>P305+P351+P338 EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.</p> <p>P313 Consultar a un médico.</p>
---	---	--	---

**ANEXO III: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MÓDULO DE MEMBRANAS**



**FIGURA 64.** ESTRUCTURA DE UN CARTER PARA UNA MEMBRANA, COMO EL DE LA PLANTA PILOTO. (TAMI INDUSTRIES).



**FIGURA 65.** ESTRUCTURA DE UN CARTER PARA MÁS DE UNA MEMBRANA, COMO EL MÓDULO DE LA INSTALACIÓN. (TAMI INDUSTRIES).

## ANEXO IV: ANÁLISIS DE VARIANZA

- Membrana 1 kDa

### Analysis of Variance for Var 1

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	246,016	1	246,016	28,79	0,0127
B:Presión (bar)	277,032	1	277,032	32,42	0,0107
AA	35,7294	1	35,7294	4,18	0,1334
AB	9,6721	1	9,6721	1,13	0,3654
BB	9,84201	1	9,84201	1,15	0,3618
Total error	25,6367	3	8,54556		
Total (corr.)	603,928	8			

R-squared = 95,755 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 88,68 percent

Standard Error of Est. = 2,92328

Mean absolute error = 1,44469

Durbin-Watson statistic = 1,42773 (P=0,3213)

Lag 1 residual autocorrelation = 0,111879

FIGURA 66. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL ACETAMINOFÉN.

### Analysis of Variance for Var 2

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	562,214	1	562,214	93,62	0,0023
B:Presión (bar)	180,511	1	180,511	30,06	0,0119
AA	0,00802222	1	0,00802222	0,00	0,9731
AB	14,3641	1	14,3641	2,39	0,2197
BB	3,23427	1	3,23427	0,54	0,5162
Total error	18,0162	3	6,0054		
Total (corr.)	778,348	8			

R-squared = 97,6853 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 93,8275 percent

Standard Error of Est. = 2,45059

Mean absolute error = 1,22914

Durbin-Watson statistic = 1,45815 (P=0,3640)

Lag 1 residual autocorrelation = 0,167275

FIGURA 67. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL NAPROXENO.

**Analysis of Variance for Var\_3**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	117,838	1	117,838	5,88	0,0937
B:Presión (bar)	753,312	1	753,312	37,60	0,0087
AA	4,02334	1	4,02334	0,20	0,6844
AB	0,0625	1	0,0625	0,00	0,9590
BB	0,136939	1	0,136939	0,01	0,9393
Total error	60,1039	3	20,0346		
Total (corr.)	935,477	8			

R-squared = 93,575 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 82,8668 percent  
 Standard Error of Est. = 4,47601  
 Mean absolute error = 2,20988  
 Durbin-Watson statistic = 1,14588 (P=0,0562)  
 Lag 1 residual autocorrelation = 0,313663

FIGURA 68. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL DICLOFENACO.

**Analysis of Variance for Var\_4**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	2185,04	1	2185,04	44,09	0,0070
B:Presión (bar)	930,513	1	930,513	18,78	0,0227
AA	0,235756	1	0,235756	0,00	0,9494
AB	16,4836	1	16,4836	0,33	0,6046
BB	0,235756	1	0,235756	0,00	0,9494
Total error	148,676	3	49,5587		
Total (corr.)	3281,19	8			

R-squared = 95,4688 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 87,9169 percent  
 Standard Error of Est. = 7,03979  
 Mean absolute error = 3,5516  
 Durbin-Watson statistic = 1,72801 (P=0,7455)  
 Lag 1 residual autocorrelation = 0,07014

FIGURA 69. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL IBUPROFENO.

**Analysis of Variance for Var\_5**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	3136,85	1	3136,85	186,32	0,0009
B:Presión (bar)	501,603	1	501,603	29,79	0,0121
AA	10,6568	1	10,6568	0,63	0,4844
AB	0,5329	1	0,5329	0,03	0,8701
BB	3,90136	1	3,90136	0,23	0,6632
Total error	50,5073	3	16,8358		
Total (corr.)	3704,05	8			

R-squared = 98,6364 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 96,3638 percent  
 Standard Error of Est. = 4,10314  
 Mean absolute error = 1,91568  
 Durbin-Watson statistic = 1,51777 (P=0,4517)  
 Lag 1 residual autocorrelation = 0,121809

FIGURA 70. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL TRICLOSÁN.



**Analysis of Variance for Var\_6**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	2021,07	1	2021,07	125,45	0,0015
B:Presión (bar)	470,998	1	470,998	29,23	0,0124
AA	8,18776	1	8,18776	0,51	0,5274
AB	64,2402	1	64,2402	3,99	0,1398
BB	4,76376	1	4,76376	0,30	0,6244
Total error	48,3327	3	16,1109		
Total (corr.)	2617,59	8			

R-squared = 98,1535 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 95,0761 percent  
 Standard Error of Est. = 4,01384  
 Mean absolute error = 1,8566  
 Durbin-Watson statistic = 1,99483 (P=0,9489)  
 Lag 1 residual autocorrelation = -0,15899

FIGURA 71. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DE LA TRIMETOPRIMA.

**Analysis of Variance for Var\_7**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	1855,04	1	1855,04	52,56	0,0054
B:Presión (bar)	1318,39	1	1318,39	37,35	0,0088
AA	7,2962	1	7,2962	0,21	0,6802
AB	65,1249	1	65,1249	1,85	0,2675
BB	7,605	1	7,605	0,22	0,6741
Total error	105,888	3	35,2961		
Total (corr.)	3359,34	8			

R-squared = 96,848 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 91,5945 percent  
 Standard Error of Est. = 5,94105  
 Mean absolute error = 3,01444  
 Durbin-Watson statistic = 1,4413 (P=0,3402)  
 Lag 1 residual autocorrelation = 0,206848

FIGURA 72. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DE LA CAFEÍNA.

**Analysis of Variance for Var\_8**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	2167,52	1	2167,52	22,30	0,0180
B:Presión (bar)	3005,19	1	3005,19	30,92	0,0115
AA	206,722	1	206,722	2,13	0,2408
AB	349,129	1	349,129	3,59	0,1543
BB	1,43369	1	1,43369	0,01	0,9110
Total error	291,544	3	97,1815		
Total (corr.)	6021,54	8			

R-squared = 95,1583 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 87,0888 percent  
 Standard Error of Est. = 9,85807  
 Mean absolute error = 4,93383  
 Durbin-Watson statistic = 1,48538 (P=0,4036)  
 Lag 1 residual autocorrelation = 0,236722

FIGURA 73. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL SULFAMETOXAZOL.

**Analysis of Variance for Var\_9**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	323,841	1	323,841	13,53	0,0348
B:Presión (bar)	3135,02	1	3135,02	130,99	0,0014
AA	0,712022	1	0,712022	0,03	0,8740
AB	144,48	1	144,48	6,04	0,0911
BB	520,892	1	520,892	21,76	0,0186
Total error	71,798	3	23,9327		
Total (corr.)	4196,74	8			

R-squared = 98,2892 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 95,4379 percent  
 Standard Error of Est. = 4,8921  
 Mean absolute error = 2,29235  
 Durbin-Watson statistic = 1,97478 (P=0,9407)  
 Lag 1 residual autocorrelation = -0,160715

FIGURA 74. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DE LA ERITROMICINA.

**Analysis of Variance for Var\_10**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	1308,33	1	1308,33	9,46	0,0543
B:Presión (bar)	3508,03	1	3508,03	25,36	0,0151
AA	66,2017	1	66,2017	0,48	0,5388
AB	33,3506	1	33,3506	0,24	0,6571
BB	35,1681	1	35,1681	0,25	0,6488
Total error	414,925	3	138,308		
Total (corr.)	5366,01	8			

R-squared = 92,2675 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 79,3801 percent  
 Standard Error of Est. = 11,7605  
 Mean absolute error = 5,85235  
 Durbin-Watson statistic = 1,42552 (P=0,3183)  
 Lag 1 residual autocorrelation = 0,180505

FIGURA 75. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL DIAZEPÁN.

- **Membrana 15 kDa**

**Analysis of Variance for Var 4**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	256,499	1	256,499	85,17	0,0027
B:Presión	1751,38	1	1751,38	581,53	0,0002
AA	4,04227	1	4,04227	1,34	0,3305
AB	113,849	1	113,849	37,80	0,0087
BB	144,897	1	144,897	48,11	0,0061
Total error	9,03501	3	3,01167		
Total (corr.)	2279,71	8			

R-squared = 99,6037 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 98,9431 percent  
 Standard Error of Est. = 1,73542  
 Mean absolute error = 0,880494  
 Durbin-Watson statistic = 3,20913 (P=0,9175)  
 Lag 1 residual autocorrelation = -0,670457

FIGURA 76. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL ACETAMINOFÉN.

**Analysis of Variance for Var 5**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	148,504	1	148,504	23,76	0,0165
B:Presión	613,879	1	613,879	98,22	0,0022
AA	10,3816	1	10,3816	1,66	0,2878
AB	2,1025	1	2,1025	0,34	0,6026
BB	0,503339	1	0,503339	0,08	0,7950
Total error	18,7494	3	6,2498		
Total (corr.)	794,12	8			

R-squared = 97,639 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 93,7039 percent  
 Standard Error of Est. = 2,49996  
 Mean absolute error = 1,24938  
 Durbin-Watson statistic = 2,43534 (P=0,3065)  
 Lag 1 residual autocorrelation = -0,330185

FIGURA 77. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL NAPROXENO.

**Analysis of Variance for Var 6**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	520,615	1	520,615	75,17	0,0032
B:Presión	263,079	1	263,079	37,98	0,0086
AA	5,85961	1	5,85961	0,85	0,4255
AB	33,4084	1	33,4084	4,82	0,1156
BB	1,96681	1	1,96681	0,28	0,6311
Total error	20,7787	3	6,92624		
Total (corr.)	845,708	8			

R-squared = 97,543 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 93,4481 percent  
 Standard Error of Est. = 2,63177  
 Mean absolute error = 1,29284  
 Durbin-Watson statistic = 2,9486 (P=0,7539)  
 Lag 1 residual autocorrelation = -0,490781

FIGURA 78. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL DICLOFENACO.

**Analysis of Variance for Var\_7**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	91,338	1	91,338	18,70	0,0228
B:Presión	1585,35	1	1585,35	324,51	0,0004
AA	0,740139	1	0,740139	0,15	0,7231
AB	0,616225	1	0,616225	0,13	0,7460
BB	65,8569	1	65,8569	13,48	0,0350
Total error	14,6561	3	4,88536		
Total (corr.)	1758,56	8			

R-squared = 99,1666 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 97,7776 percent  
 Standard Error of Est. = 2,21029  
 Mean absolute error = 1,11506  
 Durbin-Watson statistic = 2,68533 (P=0,5218)  
 Lag 1 residual autocorrelation = -0,39344

FIGURA 79. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL IBUPROFENO.

**Analysis of Variance for Var\_8**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	641,494	1	641,494	119,52	0,0016
B:Presión	614,891	1	614,891	114,56	0,0017
AA	77,8752	1	77,8752	14,51	0,0318
AB	0,0289	1	0,0289	0,01	0,9461
BB	0,72	1	0,72	0,13	0,7385
Total error	16,1018	3	5,36728		
Total (corr.)	1351,11	8			

R-squared = 98,8083 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 96,822 percent  
 Standard Error of Est. = 2,31674  
 Mean absolute error = 1,11778  
 Durbin-Watson statistic = 2,51775 (P=0,3730)  
 Lag 1 residual autocorrelation = -0,43817

FIGURA 80. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL TRICLOSÁN.

**Analysis of Variance for Var\_9**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	441,87	1	441,87	160,83	0,0011
B:Presión	188,496	1	188,496	68,61	0,0037
AA	10,3209	1	10,3209	3,76	0,1480
AB	33,2352	1	33,2352	12,10	0,0401
BB	0,00533889	1	0,00533889	0,00	0,9676
Total error	8,24242	3	2,74747		
Total (corr.)	682,17	8			

R-squared = 98,7917 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 96,778 percent  
 Standard Error of Est. = 1,65755  
 Mean absolute error = 0,816852  
 Durbin-Watson statistic = 1,77467 (P=0,0270)  
 Lag 1 residual autocorrelation = -0,145344

FIGURA 81. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DE LA TRIMETOPRIMA.

**Analysis of Variance for Var\_10**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	444,276	1	444,276	17,23	0,0254
B:Presión	1167,89	1	1167,89	45,31	0,0067
AA	10,3209	1	10,3209	0,40	0,5718
AB	25,6036	1	25,6036	0,99	0,3924
BB	35,4201	1	35,4201	1,37	0,3257
Total error	77,3348	3	25,7783		
Total (corr.)	1760,85	8			

R-squared = 95,6081 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 88,2883 percent  
 Standard Error of Est. = 5,07723  
 Mean absolute error = 2,42123  
 Durbin-Watson statistic = 2,71959 (P=0,5532)  
 Lag 1 residual autocorrelation = -0,42033

FIGURA 82. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DE LA CAFEÍNA.

**Analysis of Variance for Var\_11**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	1011,92	1	1011,92	31,23	0,0113
B:Presión	1822,83	1	1822,83	56,26	0,0049
AA	3,00942	1	3,00942	0,09	0,7805
AB	162,18	1	162,18	5,01	0,1112
BB	40,2604	1	40,2604	1,24	0,3462
Total error	97,207	3	32,4023		
Total (corr.)	3137,41	8			

R-squared = 96,9017 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 91,7378 percent  
 Standard Error of Est. = 5,6923  
 Mean absolute error = 2,83506  
 Durbin-Watson statistic = 2,80974 (P=0,6354)  
 Lag 1 residual autocorrelation = -0,434678

FIGURA 83. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL SULFAMETOXAZOL.

**Analysis of Variance for Var\_12**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	529,972	1	529,972	27,10	0,0138
B:Presión	2782,54	1	2782,54	142,27	0,0013
AA	26,3296	1	26,3296	1,35	0,3299
AB	150,308	1	150,308	7,68	0,0694
BB	12,0868	1	12,0868	0,62	0,4892
Total error	58,6764	3	19,5588		
Total (corr.)	3559,91	8			

R-squared = 98,3517 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 95,6046 percent  
 Standard Error of Est. = 4,42253  
 Mean absolute error = 2,10025  
 Durbin-Watson statistic = 2,41318 (P=0,2897)  
 Lag 1 residual autocorrelation = -0,42158

FIGURA 84. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DE LA ERITROMICINA.

**Analysis of Variance for Var\_13**

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:pH alimento	108,886	1	108,886	75,48	0,0032
B:Presión	633,248	1	633,248	438,97	0,0002
AA	15,0152	1	15,0152	10,41	0,0484
AB	58,0644	1	58,0644	40,25	0,0079
BB	74,1762	1	74,1762	51,42	0,0056
Total error	4,32773	3	1,44258		
Total (corr.)	893,717	8			

R-squared = 99,5158 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 98,7087 percent  
 Standard Error of Est. = 1,20107  
 Mean absolute error = 0,595556  
 Durbin-Watson statistic = 2,61606 (P=0,4587)  
 Lag 1 residual autocorrelation = -0,371752

FIGURA 85. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ÍNDICE DE RECHAZO DEL DIAZEPÁN.



