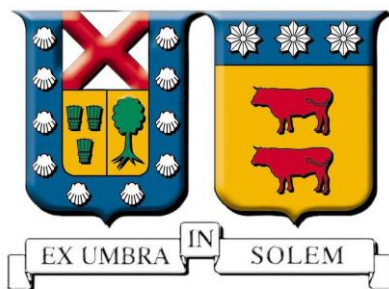


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO-CHILE



“APLICACIÓN PULSOS ELÉCTRICOS COMO PRE TRATAMIENTO PARA ACELERAR EL PROCESO DE MARINADO DE POLLO”

MATÍAS ALEJANDRO LÓPEZ PORTUGUEZ

TESIS PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO:
MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA QUÍMICA

Profesor Guía
Dr. Ricardo Simpson R.

Profesores Co-Referentes
Dr. Cristian Ramírez B.
MSc. Helena Núñez A.

Profesor Co-Referente Externo
Dr. Jorge Moreno C.

Octubre 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a mis padres por la excelente educación que me dieron a lo largo de mi vida y darme la oportunidad de continuar mis estudios universitarios. En especial a mi padre por sus consejos en todo momento, apoyo incondicional y cariño a lo largo de toda mi vida. A mi madre por darme su apoyo, cariño, ganas de surgir en la vida y ánimo cuando más lo necesité.

A mis hermanos Alfreto, Cata, Coni y Amparo por estar siempre conmigo en todo momento y aportar alegría a mi vida.

A mis amigos de Chiloé (Chamo, Pacheco, Ángel, Pato, Goma, Katrín, Evandri y Caro) por el apoyo emocional y los buenos momentos que hemos vivido juntos.

Agradezco especialmente a Paulina Santis, Gabriela Gambeta, Sebastián Franco y Cristopher Da Silva por el tremendo apoyo emocional y académico a lo largo de esta etapa universitaria.

A los profesores Helena Núñez y Cristian Ramírez por guiarme a lo largo del laboratorio y estar siempre con buena disposición.

Al profesor Ricardo Simpson por su gran apoyo a lo largo del Magister y por la oportunidad de desarrollar este tema.

Por último, al Proyecto Fondecyt 1151380 por el financiamiento entregado al trabajo de laboratorio.

RESUMEN

Actualmente la producción de pollo ha aumentado su demanda y exigencias por parte de los consumidores, la cual obliga a las grandes empresas a optimizar los procesos productivos en términos de tiempo, sin perder atributos de sabor, textura y durabilidad.

La siguiente investigación, tiene por objetivo acelerar el proceso de marinado de pollo mediante la aplicación de campos de pulsos eléctricos (PEF de inglés Pulsed Electric Field). Para ello, la experiencia se realiza sobre una muestra de pollo sin marinar, la cual tiene forma de paralelepípedo con dimensiones de 4.0 x 3.0 x 0.5[cm] y un peso aproximado de 6.0 [g], con el fin de simular una placa infinita. La metodología consiste en caracterizar el pollo sin marinar que consiste en registrar la concentración inicial de sal y agua en el pollo, aplicar PEF, realizar un marinado por inmersión compuesto por 90% de agua, 6% de sal y 4% de tripolifosfato de sodio, durante 24 horas y caracterización final. A partir de esto, se obtiene la ganancia de agua y sal para cada experiencia con 3 réplicas.

Mediante el método de diseño de experimentos de Box-Behnken, se analizan 3 factores con 3 niveles cada uno, voltaje (10, 5, 1[kV]), frecuencia (40, 20, 10[Hz]) y pulsos a distinta intensidad (5000, 3000, 2000).

Se obtiene como resultado que los máximos coeficiente de transferencia de materia para el agua y sal son de $3,32 \pm 0,59 \cdot 10^{-10} [m^2/s]$ y $2,78 \pm 0,24 \cdot 10^{-10} [m^2/s]$, respectivamente. Los cuales se producen en condiciones de 10[kV], 20[Hz], 2000[pulsos] y 1[kV], 10[Hz], 3000[pulsos], respectivamente. Mientras que para la experiencia control se obtuvo un coeficiente de difusión de $0,47 \pm 0,04 \cdot 10^{-10} [m^2/s]$ para el agua y $2,44 \pm 0,10 \cdot 10^{-10} [m^2/s]$ para la sal. De esta forma, se concluye que la aplicación PEF, aumenta el coeficiente de difusión del agua en el pollo en un 600%, lo que se traduce en una disminución del 87% en el tiempo de marinado. Sin embargo, para el caso de la sal, el coeficiente de difusión no presenta un aumento significativo.

Finalmente, el óptimo global se produce con un voltaje de 10[kV], una frecuencia cercana a 40[Hz] y una cantidad de pulsos de 2000 [pulsos], con un coeficiente de difusión de sal en el pollo de $2,95 \cdot 10^{-10} [m^2/s]$ y un coeficiente de difusión de agua en el pollo de $2,34 \cdot 10^{-10} [m^2/s]$, aumentando en un 20% la difusión de la sal en el pollo y un 400% la difusión del agua en el pollo con referencia a un pollo marinado sin aplicar PEF. Esto implica la reducción en el tiempo de marinado del 17%.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE TABLAS	10
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	12
1.1.- Introducción	13
1.2.- Hipótesis	14
1.3.- Objetivos	14
1.3.1.- Objetivo General.....	14
1.3.2.- Objetivos Específicos.....	14
CAPÍTULO II: ANTECEDENTES GENERALES	15
2.1.- Producción de carne de pollo	16
2.1.1.- Producción mundial de carne de pollo	16
2.1.2.- Producción nacional de carne de pollo.....	17
2.2.- Proceso de marinado de pollo.....	18
2.2.1.- Requisitos de la carne marinada	19
2.2.2.- Métodos de marinado	20
2.2.3.- Composición de la solución de marinado	21
2.2.4.- Condiciones de operación	21
2.3.- Transferencia de materia	23
2.3.1.- Ley de Fick.....	24
2.4.- Pulso eléctrico de alto voltaje	27
2.4.1.- Mecanismo de acción	27
2.4.2.- Principales componentes de un equipo PEF	29
2.4.3.- Parámetros del proceso PEF	31
2.4.4.- Factores que afectan el proceso PEF	34
2.4.5.- Aplicaciones de PEF.....	35
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS	37
3.1.- Materiales y Equipos.....	38
3.1.1.- Materiales	38

3.1.2.- Equipos	38
3.2.- Metodología Experimental	40
3.2.1.- Procedimiento experimental	40
3.2.2.- Determinación de ganancia de agua (WG) y ganancia de sal (SG) en las muestras de pollo	42
3.3.- Modelo Matemático	43
3.4.- Diseño de experimentos y estadístico	43
3.4.1.- Diseño de experimentos	43
3.4.2.- Análisis estadístico	45
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
4.1.- Ganancia de agua y sal	51
4.1.1.- Ganancia de agua	51
4.1.2.- Ganancia de Sal	52
4.2.- Coeficiente de difusión	54
4.2.1.- Coeficiente de difusión de agua en el pollo	54
4.2.2.- Coeficiente de difusión de sal en el pollo	55
4.3.- Modelo estadístico	57
4.3.1.- Modelo de coeficiente de difusión del agua	57
4.3.2.- Modelo de coeficiente de difusión de sal	61
4.4.- Optimización simultánea	65
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	67
5.1.- CONCLUSIONES	68
BIBLIOGRAFIA	69
ANEXOS	72
ANEXO A.	73
A.1 Datos	73
A.1.1 Ganancia de agua [g/100g]	73
A.1.2 Ganancia de sal [g/100g]	89
A.2. Gráficos.	105
A.2.1. Ganancia de agua [g/100g]	105
A.2.2. Ganancia de sal [g/100g]	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Consumo de carne en Chile [2].	17
Figura 2: Producción de carne de ave en Chile.	18
Figura 3: Producción de marinado: Tanque de agitación [11].	22
Figura 4: Equipo de inyección[10].	23
Figura 5: Mecanismo de permeabilización.	28
Figura 6: Comportamiento de la membrana ante la cantidad de energía aplicada.	28
Figura 7: Componentes básicos de instalación PEF [19].	29
Figura 8: Configuraciones más usadas en cámaras de tratamiento PEF [20].	31
Figura 9: Tipos de ondas [20].	32
Figura 10: Tiempo de tratamiento.	33
Figura 11: Equipo de pulsos eléctricos de alto voltaje.	39
Figura 12: Configuración experimental.	40
Figura 13: Dimensión de la muestra después del pre tratamiento.	41
Figura 14: Esquema lámina infinita con sus condiciones de borde[34].	43
Figura 15: Representación del diseño Box-Behnken para tres factores.	44
Figura 16: Coeficiente de difusión del agua [m^2/s].	55
Figura 17: Coeficiente de difusión de sal en el pollo[m^2/s].	57
Figura 18: Gráfica de residuos para Ymodelo, Deff, agua.	60
Figura 19: Gráfica de residuos para Ymodelo, Deff, sal.	64
Figura 20: Resultados ganancia de agua, experiencia control.	105
Figura 21: Resultados ganancia de agua, experiencia N°1.	106
Figura 22: Resultados ganancia de agua, experiencia N°2.	107
Figura 23: Resultados ganancia de agua, experiencia N°3.	108
Figura 24: Resultados ganancia de agua, experiencia N°4.	109
Figura 25: Resultados ganancia de agua, experiencia N°5.	110
Figura 26: Resultados ganancia de agua, experiencia N°6.	111
Figura 27: Resultados ganancia de agua, experiencia N°7.	112
Figura 28: Resultados ganancia de agua, experiencia N°8.	113
Figura 29: Resultados ganancia de agua, experiencia N°9.	114

Figura 30: Resultados ganancia de agua, experiencia N°10.....	115
Figura 31: Resultados ganancia de agua, experiencia N°11.....	116
Figura 32: Resultados ganancia de agua, experiencia N°12.....	117
Figura 33: Resultados ganancia de agua, experiencia N°13.....	118
Figura 34: Resultados ganancia de agua, experiencia N°14.....	119
Figura 35: Resultados ganancia de agua, experiencia N°15.....	120
Figura 36: Resultados ganancia de sal ,experiencia control.....	121
Figura 37: Resultados ganancia de sal ,experiencia N°1.....	122
Figura 38: Resultados ganancia de sal ,experiencia N°2.....	123
Figura 39: Resultados ganancia de sal, experiencia N°3.....	124
Figura 40: Resultados ganancia de sal, experiencia N°4.....	125
Figura 41: Resultados ganancia de sal, experiencia N°5.....	126
Figura 42: Resultados ganancia de sal, experiencia N°6.....	127
Figura 43: Resultados ganancia de sal, experiencia N°7.....	128
Figura 44: Resultados ganancia de sal, experiencia N°8.....	129
Figura 45: Resultados ganancia de sal, experiencia N°9.....	130
Figura 46: Resultados ganancia de sal, experiencia N°10.....	131
Figura 47: Resultados ganancia de sal, experiencia N°11.....	132
Figura 48: Resultados ganancia de sal, experiencia N°12.....	133
Figura 49: Resultados ganancia de sal, experiencia N°13.....	134
Figura 50: Resultados ganancia de sal, experiencia N°14.....	135
Figura 51: Resultados ganancia de sal, experiencia N°15.....	136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Producción mundial de carne, [MMton] [1].....	16
Tabla 2: Factores y niveles del diseño experimental.	44
Tabla 3: Combinación de niveles.	44
Tabla 4: Criterios para la evaluación cualitativa de la bondad de ajuste[25].	46
Tabla 5: Resultados de ganancia de agua luego de 24 horas.....	51
Tabla 6: Resultados de ganancia de sal luego de 24 horas.....	52
Tabla 7: Coeficiente de difusión del agua en el pollo.	54
Tabla 8: Coeficiente de difusión de sal en el pollo.....	56
Tabla 9: Tabla ANOVA p-valor, agua.	58
Tabla 10: Tabla ANOVA f-valor, agua.	59
Tabla 11: Coeficiente de interacción del modelo, agua.....	59
Tabla 12: Coeficiente de difusión, agua. Modelo-Experimental.....	60
Tabla 13: Tabla ANOVA p-valor, sal.	62
Tabla 14: Tabla ANOVA f-valor, sal.	63
Tabla 15: Coeficiente de interacción del modelo, sal.....	63
Tabla 16: Coeficiente de difusión, sal. Modelo-Experimental.....	65
Tabla 17: Óptimo simultáneo.	66
Tabla 18: Respuestas y deseabilidad.	66
Tabla 19: Resultado ganancia de agua, experiencia control.....	73
Tabla 20: Resultados ganancia de agua, experiencia N°1.	74
Tabla 21: Resultados ganancia de agua, experiencia N°2.	75
Tabla 22: Resultados ganancia de agua, experiencia N° 3.	76
Tabla 23: Resultados ganancia de agua, experiencia N°4.	77
Tabla 24: Resultados ganancia de agua, experiencia N°5.	78
Tabla 25: Resultados ganancia de agua, experiencia N°6.	79
Tabla 26: Resultados ganancia de agua, experiencia N°7.	80
Tabla 27: Resultados ganancia de agua, experiencia N°8.	81
Tabla 28: Resultados ganancia agua, experiencia N°9.	82
Tabla 29: Resultados ganancia de agua, experiencia N°10.	83

Tabla 30: Resultados ganancia de agua, experiencia N°11.	84
Tabla 31: Resultados ganancia de agua, experiencia N°12.	85
Tabla 32: Resultados ganancia de agua, experiencia N°13.	86
Tabla 33: Resultados ganancia de agua, experiencia N°14.	87
Tabla 34: Resultados ganancia de agua, experiencia N°15.	88
Tabla 35: Resultado ganancia de sal, experiencia control.	89
Tabla 36: Resultado ganancia de sal, experiencia N°1,	90
Tabla 37: Resultados ganancia de sal, experiencia N°2.	91
Tabla 38: Resultados ganancia de sal, experiencia N°3.	92
Tabla 39: Resultados ganancia de sal, experiencia N°4	93
Tabla 40: Resultados ganancia de sal, experiencia N°5.	94
Tabla 41: Resultados ganancia de sal, experiencia N°6.	95
Tabla 42: Resultados ganancia de sal, experiencia N°7.	96
Tabla 43: Resultados ganancia de sal, experiencia N°8.	97
Tabla 44: Resultados ganancia de sal, experiencia N°9.	98
Tabla 45: Resultados ganancia de sal, experiencia N°10.	99
Tabla 46: Resultados ganancia de sal, experiencia N°11.	100
Tabla 47: Resultados ganancia de sal, experiencia N°12.	101
Tabla 48: Resultados ganancia de sal, experiencia N°13.	102
Tabla 49: Resultados ganancia de sal, experiencia N°14.	103
Tabla 50: Resultados ganancia de sal, experiencia N°15.	104

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1.- Introducción

En las últimas décadas, la industria alimenticia ha aumentado su demanda y producción debido al aumento de la población en el planeta. Esta, se divide en distintos sectores, tales como la industria agrícola, agropecuaria, avícola, entre otras. La industria avícola se dedica a la cría de aves de corral, tales como pollos, pavos, patos, gansos, con el objetivo de usarlos como base alimenticia, ya sea para el consumo de carne o huevos.

El pollo es uno de los productos que presentan el más alto consumo en la población. Ya sea por su fácil acceso y/o su valor nutricional, la industria se ha visto obligada a aumentar su oferta. Para ello, ha sido necesaria la inserción de otros productos para aumentar su conservación y entregar un mejor producto al mercado.

La carne de pollo que se encuentra en el mercado, en su mayoría, contienen una solución compuesta principalmente de agua, sal, fosfato y otras especias, llamada marinado. Para agregar esta solución en el pollo, se utilizan dos tipos de métodos, estático y dinámico. El método estático consiste en sumergir la carne en solución de marinado durante 12 horas aproximadamente, esperando que la solución penetre por osmosis; el método dinámico puede ser por masaje (trozos pequeños de carne) o por inyección. El marinado por inyección es el método que tiene mejores resultados, ya que se consigue una mayor difusión y homogeneidad de la solución en el pollo y en un menor tiempo. El objetivo del pollo marinado es entregar un mejor sabor, color y textura al consumidor.

Actualmente, la mayor parte del pollo comercializado se encuentra marinado. Esto significa que, ya sea por la aplicación de distintos métodos, el pollo se vende con una solución compuesta principalmente de agua y sal, lo cual trae ventajas tales como la reducción de pérdidas durante la cocción, mejorar la textura (quedando la carne más blanca luego de la cocción), calidad de color y aceptabilidad por parte del consumidor.

Como se indicó, el proceso de marinado se caracteriza por durar varias horas, es por esto, que se plantea disminuir el tiempo de marinado. Una solución a esto, es usar la tecnología basada en el uso de pulsos eléctricos de alto voltaje (Pulsed electric fieldsPEF), que consiste en aplicar pulsos eléctricos de alto voltaje a través de 2 electrodos, con el objetivo de aumentar la permeabilidad de las membranas por medio del fenómeno de electroporación y de esta manera aumentar la velocidad de transferencia de materia.

1.2.- Hipótesis

La aplicación de campos de pulsos eléctricos (PEF) produce la formación de poros a nivel de membrana celular del tejido de pollo, lo que aumenta la velocidad de transferencia de materia reduciendo el tiempo de proceso en el marinado de pollo.

1.3.- Objetivos

1.3.1.- Objetivo General

Acelerar el proceso de marinado de pollo mediante la aplicación de campos de pulsos eléctricos.

1.3.2.- Objetivos Específicos

- Desarrollar un estudio experimental en el proceso de marinado de pollo aplicando pulsos de campos eléctricos.
- Determinar los parámetros óptimos (frecuencia, número de pulso e intensidad del campo eléctrico) en el marinado de pollo usando pulso de campos eléctricos.
- Determinar el coeficiente de difusión efectiva D_{eff} al utilizar pulsos eléctricos con respecto al marinado tradicional.

CAPÍTULO II: ANTECEDENTES GENERALES

2.1.- Producción de carne de pollo

2.1.1.- Producción mundial de carne de pollo

La ingesta de carne aporta valiosos nutrientes, tales como proteínas, vitaminas, minerales y micronutrientes, esenciales para el crecimiento y desarrollo humano.

El consumo de carne varía en cada país dependiente de su desarrollo. En general, el consumo en países industrializados es alto, sin embargo, en países en desarrollo el consumo es notoriamente inferior. La demanda mundial de carne por persona se ha mantenido en 42.9 [Kg/año] los últimos 4 años.

La producción mundial de carnes, se presenta en la Tabla 1, donde se observa que la producción anual aumenta entre un 0.5% hasta un 1.6% dependiendo del tipo de carne. La mayor producción de carne es la de cerdo y la de ave, donde la que presenta una mayor tendencia en el aumento de la producción es la carne de ave. Dentro de este tipo de carne, se encuentra el pollo, pavo, entre otros [1].

Tabla 1: Producción mundial de carne, [MMton] [1].

Producción [MMton]	2013	2014
Carne de bovino	67.7	68.7
Carne de ave	107.0	108.7
Carne de cerdo	114.3	115.5
Carne de ovino	13.9	14.0

El constante crecimiento demográfico y el aumento de los ingresos genera una mayor demanda de carne, que, a su vez, limita los espacios de producción. Es por esto, que es necesario explotar al máximo los recursos alimentarios.

La producción de carne de pollo a nivel mundial aumenta constantemente, el año 2000 fue de 58 millones de toneladas, 12 años después, la producción aumento hasta 90 millones de toneladas. Los mayores productores de carne de pollo en el mundo son Estados Unidos, abarcando el 26 % de la producción, seguido por China con un 20.2% de la producción y Brasil aportando el 19.8 % a la producción mundial.

2.1.2.-Producción nacional de carne de pollo

2.1.2.1.- Consumo y producción de carne en Chile

Se estima que el consumo de carne en Chile por persona al año es de 87.2[Kg], donde se identifica el pollo como el tipo de carne con mayor consumo con un 42% sobre el total. La producción industrial de carne de pollo, se reduce a una pequeña cantidad de productores, alcanzando cerca de 700 mil toneladas. El segundo tipo de carne de mayor consumo es la de cerdo, con un 30% sobre el total. De su producción (600 mil toneladas), el 40% es destinado a la exportación. Finalmente, la carne de bovina, tiene un consumo del 26%, siendo su producción anual de 200 mil toneladas, orientadas principalmente al mercado interno [2] (Figura 1).

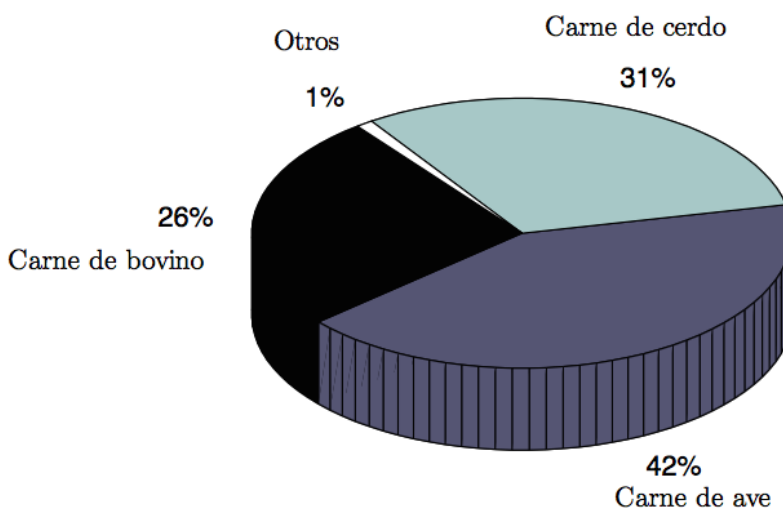


Figura 1: Consumo de carne en Chile [2].

2.1.2.2.- Producción de carne de pollo en Chile

En la producción de carne de aves en Chile, el 84% corresponde a carne de pollo, el 15% a carne de pavo y el resto a otros tipos de carne de aves. Dentro de los 5 años anteriores, se observa una tendencia al aumento en la producción de carne de pollo (Figura 2).

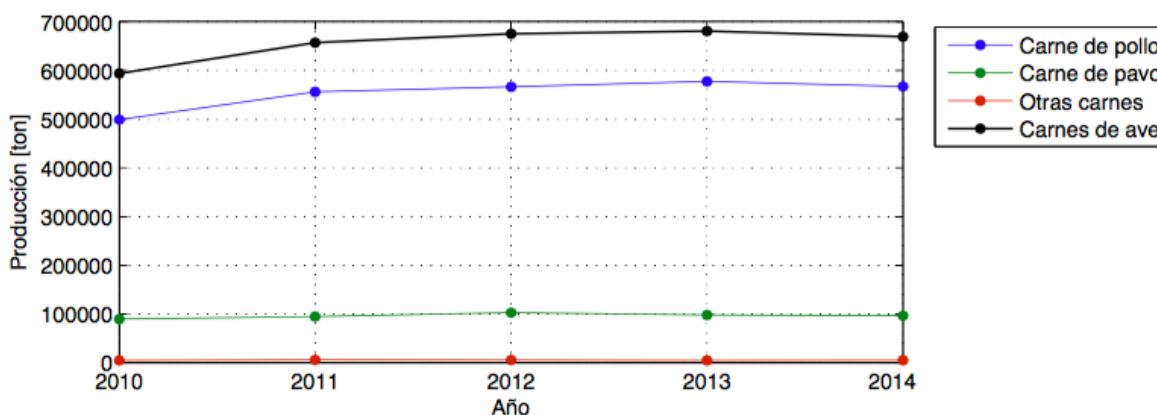


Figura 2: Producción de carne de ave en Chile.

Actualmente, existen 3 grandes empresas en Chile, las cuales participan en un 92% en la producción total de carne de pollo, Agrosuper, Arizona y Don Pollo. Sin embargo, la empresa que lidera el comercio es Agrosuper. El proceso de producción proviene de aves reproductoras que producen huevos. Estas, se mantienen en incubadora durante 21 días. Luego, los pollos nacidos son enviados a planteles de crianza o engorde por 45 días para posteriormente ir a la planta faenadora donde se realiza el tratamiento de marinado, envasado, etiquetado y cortes de selección. [3]

2.1.2.3.- Exportación e importación de carne de pollo en Chile

Chile exporta carne de pollo a México, Estados Unidos, China, entre otros. El 76,5% de las exportaciones de carne de ave en el año 2015 corresponde a pollo.

La importación de carne de pollo tuvo comienzo el año 2003, cuando se ingresó carne de pollo proveniente de Argentina. A partir de esta fecha, los volúmenes importados fueron aumentando tanto en diversidad de productos como en cantidad, debido a importaciones provenientes de Brasil y Estados Unidos, lo cual representó un 14% del consumo total en Chile el año 2014 [4].

2.2.- Proceso de marinado de pollo

El proceso de marinado es una técnica ampliamente difundida en Europa y Estados Unidos desde la época del noventa. De acuerdo al Reglamento Sanitario de los Alimentos en Chile,

desde el año 2002 se permite la comercialización de alimentos marinados hasta con un 15% de su peso.

Las ventajas del proceso de marinado de alimentos son:

- Mejorar la textura.
- Incrementar la ternura y la jugosidad.
- Aumenta la conservación.

Esto permite que el consumidor reciba un alimento más sabroso y mejorado y permite que la industria del pollo amplíe sus condiciones de competitividad, aumentando la posibilidad de salir a los mercados externos.

El proceso de marinado consiste en la incorporación de una salmuera, conformada por agua, sal y otras sustancias de uso permitido por la legislación chilena, por medio del principio de osmosis. Se realiza un balance hídrico, el cual consiste en el paso de la salmuera a través de la membrana semipermeable de las células, permitiendo la difusión de esta a lo largo del espacio extracelular y las células, siendo la concentración de los solutos presentes el factor clave para el resultado esperado.

Se aplica principalmente en carnes y pescados y en menor cantidad en verduras. El consumo de pescados crudos marinados, que se comen sin un tratamiento térmico, tienen cierto riesgo de propagar anisakis (parásito perjudicial para los seres humanos). Sin embargo, gracias a que las carnes marinadas deben ser tratadas térmicamente antes de su ingesta, se evita la proliferación de bacterias [5].

2.2.1.- Requisitos de la carne marinada

La Norma Chilena Oficial NCh2881 establece los requisitos técnicos del proceso referidos a la temperatura, equipos y medidas de inoculación además de los requisitos sanitarios.

Deben tener una presentación específica: color uniforme, sabor y aroma característico y condiciones físico químicas específicas.

El cumplimiento de esta norma a nivel nacional recae en la norma que rige la producción de

alimentos en Chile, el Reglamento Sanitario de los Alimentos Decreto N°977 y sus modificaciones posteriores. De acuerdo al reglamento, la rotulación del marinado debe presentarse como el porcentaje de la proporción del peso que representa el marinado sobre el peso total del producto.

El nivel de marinado se mide de acuerdo a un protocolo que obliga a las faenas a registrar la medición de este, la cual es verificada por la Autoridad Sanitaria [6].

2.2.2.- Métodos de marinado

2.2.2.1.- Procesos estáticos

También llamado como proceso por inmersión, es el proceso más antiguo. Consiste en sumergir la carne en la salmuera de 8 a 12 horas[7], esperando que la solución penetre por osmosis. Se recomienda una temperatura no menor a 10[°C] (mientras menor sea la temperatura, mayor tiempo se requiere) y piezas pequeñas.

2.2.2.2.- Procesos dinámicos

Los procesos dinámicos tales como masaje o inyección, logran mejores resultados en un menor período de tiempo.

El marinado por masajes se aplica a trozos pequeños y deshuesados. De lo contrario, los huesos pueden ser dañados provocando la separación de estos y la pérdida de la forma del producto. Además, para trozos muy grandes es difícil lograr la homogeneidad del marinado agregado.

El tipo de marinado más utilizado es por inyección, es un proceso seguro y moderno. Se consigue una mayor difusión y homogeneidad de la solución en un menor tiempo. Industrialmente se utilizan máquinas inyectoras capaces de inyectar soluciones salinas, marinados y cualquier otro tipo de solución en carnes, pollos y pescados. [8].

2.2.3.- Composición de la solución de marinado

Los componentes más utilizados son:

- Sal: Reduce la actividad del agua y además mejora la capacidad de retención de agua, ayudando a la conservación del producto y su sabor [9].
- Fosfato: estos son capaces de romper los puentes entre los filamentos de actina y miosina, generando un aumento en la capacidad de retención de agua. [9].
- Otros ingredientes: ayudan a incrementar y potenciar el sabor, estos son las especias, esencias de fruta, alcoholes aromáticos (vino o coñac), jugos cítricos y aceites [10].

La industria chilena de carne de aves junto al Ministerio de Salud, han trabajado en la Estrategia Global contra la Obesidad (EGO), donde se limita la cantidad de sodio agregado hasta 140[mg] por porción de consumo habitual (100[g]). De esta forma, se evita que las carnes de ave marinadas afecte a la población hipertensa.

2.2.4.- Condiciones de operación

2.2.4.1.- Equipo de preparación de marinado

Se utiliza un tanque de material inoxidable y fácil de limpiar. Su forma debe ser cónica (Figura 3) por la parte inferior para evitar puntos muertos donde se puedan acumular los componentes del marinado sin disolver.

La velocidad de agitación debe ser alta permitiendo una alta turbulencia y por ende la formación de partículas muy pequeñas a modo de incrementar la efectividad de los ingredientes.

La distancia entre el tanque y la máquina inyectora debe ser mínima ya que el sistema de conducción de salmuera debe mantenerse en perfectas condiciones sanitarias, por lo tanto, mientras menos largo tenga, menor será el tiempo empleado en su desinfección, además es importante evitar el aumento de la temperatura producido por la fricción en el sistema de

agitación [11].



Figura 3: Producción de marinado: Tanque de agitación [11].

2.2.4.2.- Equipos de inyección

Es importante lograr una inyección homogénea del marinado trozo por trozo. Para esto se requiere una evaluación constante por cada tipo de pieza, para detectar variaciones y mantener el proceso bajo control. Dentro de las causas mas comunes de falta de homogeneidad, se encuentran el peso del producto, taponamiento de agujas y colocación de las piezas. La detección de estos parámetros permite regular la inyección disminuyendo la desviación estándar. El modelo y tipo de inyectora que se maneje y el mantenimiento que se dé al equipo son factores claves para obtener los resultados deseados.

Las piezas se colocan en la banda de la inyectora, de manera tal que la zona con mayor carne se encuentre hacia arriba, evitando la inyección en los huesos ya que se presentan diferencias en el porcentaje de inyección del 8%. Sumado a esto, se agregar la organización de la carne para evitar el movimiento y cambios en la posición debida como se observa en la Figura 4.



(a) Máquina inyectora.



(b) Pollos siendo inyectados.

Figura 4: Equipo de inyección[10].

Son inevitables las pérdidas de salmuera debido al desgaste de las máquinas y fugas provenientes del pollo las cuales se cuantifican entre el 10 y 15%. En general esta cantidad de salmuera es recogida y cumple la función de lavar el producto.

La limpieza y mantención es fundamental en el proceso. Se debe evitar la acumulación de sólidos atrapados y la grasa atrapada en la bandeja y filtros para evitar el taponamiento de las agujas ya que se van acumulando trazas de proteína y grasa en las paredes de las agujas y mangueras del equipo produciendo desviaciones en los porcentajes de inyección. [12]

2.3.- Transferencia de materia

Lograr un producto homogéneamente marinado requiere de una buena transferencia de materia de la solución en la carne.

La transferencia de materia es la tendencia de uno o más componentes de una mezcla a transportarse desde una zona de alta concentración a otra zona donde la concentración es menor.

La transferencia de materia puede ocurrir por distintos mecanismos, tales como molecular (difusión molecular) y convectiva. La difusión molecular surge como resultado del movimiento desordenado de las propias moléculas. Es un proceso irreversible que tiende a la homogeneidad. Se define a través de la primera ley de Fick. [13]

2.3.1.- Ley de Fick

Al flujo irreversible provocado por la diferencia de concentraciones se le denomina difusión.

Primera ley de Fick Plantea que la cantidad de masa que se difunde, durante un intervalo de tiempo, a través de una superficie normal (perpendicular) a la dirección de la difusión, será proporcional al gradiente de la concentración de la sustancia que se difunde ecuación (1).

$$M = -DA t \frac{dX}{dn} \quad (1)$$

Donde:

M: Cantidad de masa que se difunde, [Kg].

A: Superficie normal a la dirección de la difusión, [m²].

t: Tiempo, [s].

$\frac{dX}{dn}$: Gradiente de concentración, $\left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3 * \text{m}}\right]$.

D: Coeficiente de difusión, $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$.

Segunda ley de Fick A partir de la segunda Ley de Fick, es posible obtener modelos semi-empíricos para determinar el coeficiente de difusión efectiva (D_{eff}) en geometría de placa plana infinita y con diversas condiciones de contorno y de operación [14].

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (2)$$

Donde:

X : Concentración de soluto en la fase líquida del producto alimenticio.

x : Dimensión espacial, [m].

D_{ef} : Coeficiente de difusión efectiva en el tejido, $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$.

2.3.1.1.- Modelo matemático Crank

Generalmente, para representar un modelo fenomenológico para procesos a presión atmosférica se emplea el Modelo de Crank, que consiste en una solución de la Ley de Fick en estado no estacionario y que representa el mecanismo de difusión para diferentes geometrías, condiciones límite y condiciones iniciales.

Con el modelo de Crank, se estiman la difusión efectiva D_{ef} del agua y del soluto, simulando los experimentos con condiciones límites y resolviendo las ecuaciones analítica o numéricamente.

Las limitaciones del modelo de difusión de Fick para propósitos prácticos son:

- Se asume un cuerpo semi-infinito por lo tanto la transferencia de masa es unidireccional.
- Se asume que el agente osmótico es un medio semi-infinito, por lo tanto, se requiere una relación disolución/alimento muy grande.
- Aunque tiene en cuenta la forma y las dimensiones, sólo hay soluciones analíticas para láminas planas, cilindros, cubos y esferas. Por lo tanto, se requieren técnicas numéricas para materiales irregulares.
- El punto de equilibrio tiene que determinarse experimentalmente.
- No hay efecto de los sólidos ganados ni de los solutos perdidos sobre la pérdida de agua.
- Se desprecia el encogimiento debido a la transferencia de masa, pero esto no se puede lograr a baja temperatura ni a alta concentración de soluto.

Considerando que la distribución inicial de marinado es uniforme ($X = X_0$ en $t = 0$) y que la superficie está en equilibrio ($X = X_e$ en $x = \pm L$) la ecuación (2) se integra:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}} \quad (3)$$

Donde:

M_t : Ganancia en el tiempo, $\left[\frac{\text{Kg}_{\text{solución}}}{\text{Kg}_{\text{sólido}}} \right]$.

M_{∞} : Ganancia en equilibrio, $\left[\frac{\text{Kg}_{\text{solución}}}{\text{Kg}_{\text{sólido}}} \right]$.

D_{eff} : Difusividad efectiva, $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$.

t : Tiempo, [s].

L : Espesor de placa, [m].

La ecuación (3) que describe la evolución temporal del marinado medio de un cuerpo, se obtiene por integración en el espacio de la solución de la segunda ley de Fick con las siguientes consideraciones [15]:

- Geometría de placa plana infinita.
- Transferencia unidireccional de masa.
- La resistencia externa convectiva es mucho menor que la resistencia de difusión interna.

Una simplificación usual es utilizar una solución asintótica de la ecuación (3), que consiste en reducir la serie infinita al primer término, debido a que los términos superiores se hacen muy pequeños (despreciables) con respecto a los términos anteriores para tiempos largos [16]:

$$\frac{M_t}{M_{\infty}} = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}} \quad (4)$$

Donde:

M_t : Ganancia en el tiempo, $\left[\frac{\text{Kg}_{\text{solución}}}{\text{Kg}_{\text{sólido}}} \right]$.

M_{∞} : Ganancia en equilibrio, $\left[\frac{\text{Kg}_{\text{solución}}}{\text{Kg}_{\text{sólido}}} \right]$.

D_{eff} : Difusividad efectiva, $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$.

t : Tiempo, [s].

L : Espesor de placa, [m].

2.4.- Pulso eléctrico de alto voltaje

Pulsed electric fields (PEF), es una tecnología no térmica que ha sido objeto de atención por su potencial permeabilización en la membrana celular. Cuando un alimento fluido, semifluido o sólido se coloca entre dos electrodos que envían repetidos pulsos cortos (del orden de microsegundos) de electricidad de alto voltaje (entre 2000 y 40000 voltios/cm), se provoca la aparición de poros en la membrana celular. Este mecanismo de electroporación se produce cuando el potencial transmembrana supera un valor crítico.

Puede tener efectos de alteración en la textura de la comida y propiedades de retención de agua o mejorar los procesos de transferencia de masa. Dentro de sus ventajas se encuentran:

- Alimentos con características similares a los frescos y con una vida útil extendida.
- Inactivación de enzimas y destrucción de microorganismos.
- Mejor estabilización.

Sin embargo, es importante realizar estudios que determinen los parámetros de operación para evitar las pérdidas de nutrientes esenciales y cambios en las propiedades organolépticas del producto [17].

En general se aplica a alimentos que cumplan con las siguientes características:

- Tolerar altas intensidad de campo.
- Baja conductividad eléctrica.
- Sin capacidad de formar burbujas.

2.4.1.- Mecanismo de acción

La electroporación consiste en el incremento de la permeabilidad de la membrana celular aumentando significativamente su conductividad eléctrica por medio de la aplicación de un

campo eléctrico como se observa en la Figura 5.

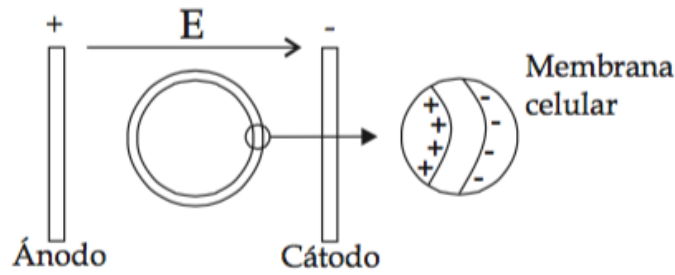


Figura 5: Mecanismo de permeabilización.

Al aplicar un campo eléctrico externo sobre la membrana se produce una reorganización de las cargas, lo que trae como consecuencia un aumento del potencial transmembrana, originando una compresión en la membrana, como consecuencia de las fuerzas de atracción entre las cargas de signos opuestos (electrocompresión). Se le llama campo eléctrico crítico al potencial transmembrana límite que provoca estos cambios.

De esta forma, el material pierde su propiedad aislante y pasa a ser conductor. Biológicamente significa la formación de defectos locales o poros en las membranas celulares. Dependiendo de la intensidad del campo eléctrico externo aplicada, se pueden formar poros reversibles o irreversibles como se observa en la Figura 6. Si el proceso es irreversible, se produce la muerte celular, en cambio, si es reversibles se aplica habitualmente en biología molecular y aplicaciones biotecnológicas para acceder al citoplasma.

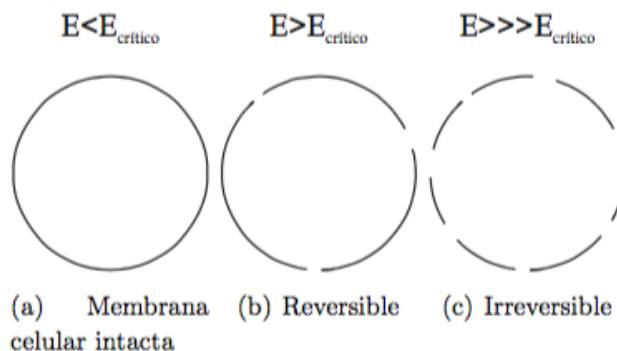


Figura 6: Comportamiento de la membrana ante la cantidad de energía aplicada.

El campo eléctrico crítico, depende del radio de la célula y de la forma de esta, si el campo eléctrico aplicado está bajo este umbral crítico o el tiempo de tratamiento es muy corto, se produce una permeabilización reversible, es decir, la membrana vuelve a su estado normal.

Los factores que determinan la reversibilidad de los poros son:

- Grosor de membrana.
- Forma y tamaño de la membrana.
- Intensidad de campo eléctrico aplicado.

En una membrana gruesa, con poros pequeños formados a la aplicación de un campo de baja intensidad, probablemente será un proceso reversible. Caso contrario, en membranas delgadas y/o poros formados muy grandes en comparación al área de la membrana, desencadenará un proceso irreversible o la destrucción total de la célula [18].

2.4.2.- Principales componentes de un equipo PEF

La generación de PEFs requiere de una descarga rápida de energía eléctrica dentro de un corto período de tiempo. El sistema de tratamiento está compuesto por una fuente de poder (generador), condensador, interruptor (switch) y cámara de tratamiento (Figura 7). [19]

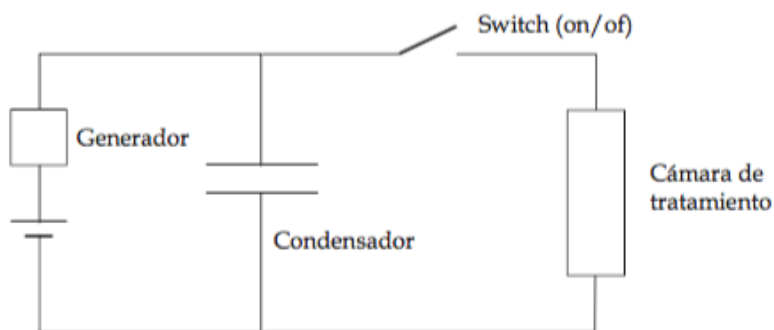


Figura 7: Componentes básicos de instalación PEF [19].

a. Generador de PEF: El generador de impulsos se compone de un generador que transforma la corriente alterna a corriente continua y un dispositivo de almacenamiento de energía tal como un condensador. La descarga de la energía eléctrica en la cámara de tratamiento es controlada por un interruptor que es el componente clave en un sistema pulsado, porque impone una limitación práctica del generador de impulsos en potencia y

nivel de tensión. La potencia total del sistema está limitada por el número de veces que un condensador se puede cargar y descargar.

El interruptor tiene un papel importante en la eficiencia del sistema de PEF, y se selecciona sobre la base de su capacidad para funcionar a un alto voltaje y tasa de repetición. Interruptores de alta potencia que sólo tienen separación de encendido requieren el uso de circuitos con un pequeño depósito de almacenamiento de energía. Sin embargo, los interruptores con el encendido y la capacidad de desvío son cada vez más utilizados debido a que añaden flexibilidad al pulso generador. Aquí, la duración del pulso se determina por la señal de control del interruptor, debido a que el pulso se inicia mediante el cierre del interruptor y termina con la apertura de la misma.

b. Cámara de tratamiento: Se compone de dos electrodos en paralelo, separados por un material aislante, que forma un recinto que contiene el alimento. Los electrodos deben ser diseñados para minimizar el efecto de la electrólisis, así como la corrosión, impidiendo la interacción con el producto. El acero inoxidable se utiliza comúnmente como material de electrodo, pero recientemente se ha observado que los electrodos de titanio muestran una resistencia superior contra la corrosión.

La uniformidad del proceso es altamente dependiente en el diseño característico de la cámara de tratamiento. La comida se caracteriza generalmente por causar daños en las superficies de los electrodos en forma de pozos, un resultado de arqueo y aumento de la presión, dando lugar a explosiones en la cámara de tratamiento y la evolución de burbujas de gas. Resistencia eléctrica y la homogeneidad del campo eléctrico son algunos criterios de diseño importantes para un proceso de bajo consumo de energía y calentamiento del producto. Otros factores importantes son el tipo de aplicación (inactivación microbiana o transferencia de materia) y las condiciones de tratamiento, estáticas o flujo continuo como se observa en la figura 8 [20].

- Estático: Electrodos paralelos.
- Continuo: Co-axial y co-campo.

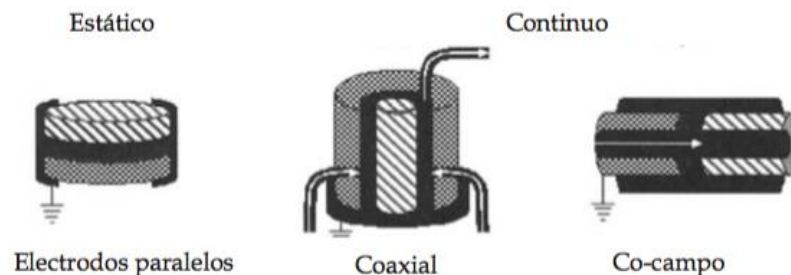


Figura 8: Configuraciones más usadas en cámaras de tratamiento PEF [20].

2.4.3.- Parámetros del proceso PEF

Los parámetros más típicos de procesos que caracterizan el proceso PEF son la intensidad de campo eléctrico, forma del pulso, tiempo de tratamiento, la energía de impulso específico, y frecuencia.

2.4.3.1.- Intensidad de campo

La distancia entre los electrodos de la cámara de tratamiento y la tensión suministrada define la fuerza del campo eléctrico, que se informa generalmente en kV/cm. Mientras que, en cámaras de tratamiento con electrodos configurados en paralelos, la intensidad de campo eléctrico entre los electrodos es uniforme, en configuraciones co-lineales la intensidad de campo eléctrico no es uniforme y cambia en función de la ubicación [19].

La intensidad de campo se calcula como:

$$E = \frac{V}{d} \quad (5)$$

Donde:

E : Intensidad de campo eléctrico, [kV/cm].

V : Voltaje, [V].

d : Distancia entre los electrodos, [cm].

2.4.3.2.- Forma de Pulso

En función del tipo de interruptor y la configuración del circuito de descarga, son posibles

varias formas de pulso, pero las principales son pulsos con decaimiento exponencial y ondas cuadradas.

Los pulsos de decaimiento exponencial son generados por alta potencia que sólo tienen la capacidad de descargar la energía total almacenada en la batería de condensadores. Pulsos de onda cuadrada pueden obtenerse por una descarga incompleta de un condensador, un interruptor con encendido/apagado o de uno más complejo. Tanto pulsos exponenciales y cuadrados de onda pueden ser unipolar (Figura 9(a)) o bipolar (Figura 9 (b)).

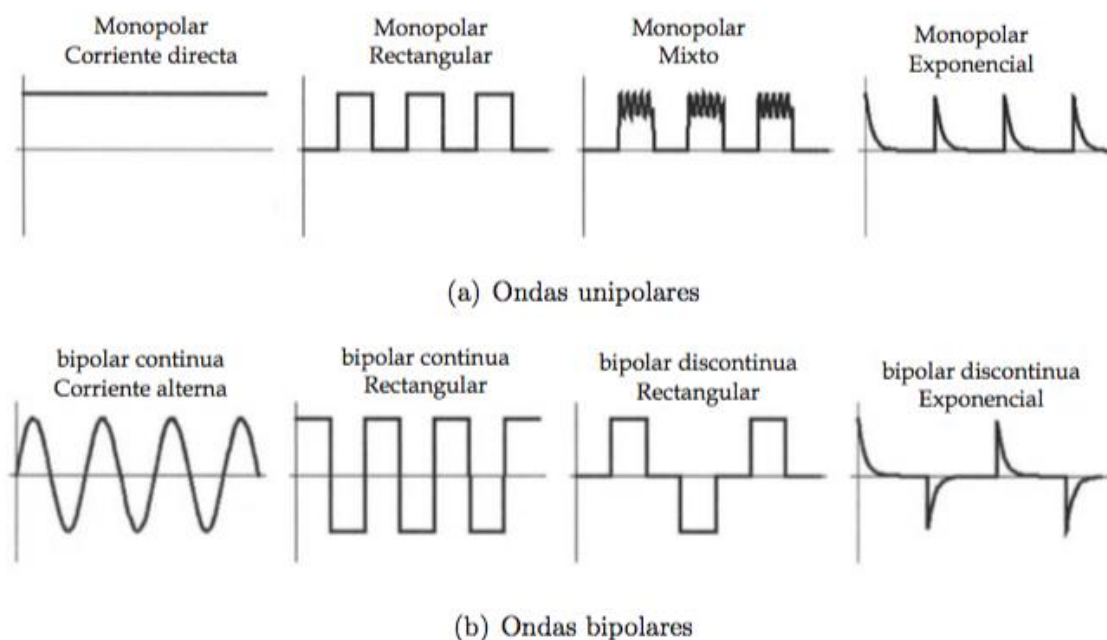


Figura 9: Tipos de ondas [20].

Se ha estudiado que los pulsos bipolares pueden reducir la electrólisis no deseada y la deposición de partículas de alimentos sobre la superficie del electrodo [19].

2.4.3.3.- Tiempo de tratamiento

Se define como una función de la duración del ancho de pulso y el número de pulsos aplicados. Se informa generalmente en milisegundos (ms). En pulsos de onda cuadrada, el ancho corresponde a la duración del pulso, pero en pulsos exponenciales, el tiempo requerido desde la tensión de entrada hasta el decaimiento del 37% de su valor máximo se identifica como el ancho de pulso eficaz (Figura 10) [19].

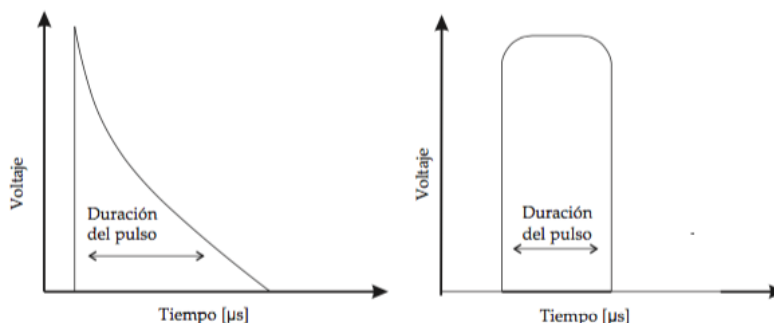


Figura 10: Tiempo de tratamiento.

El tiempo de tratamiento se calcula como:

$$t_i = n * \tau \quad (6)$$

Donde:

t_i : Tiempo de tratamiento, $[\mu s]$.

n : Número de pulsos, $[-]$.

τ : Tiempo de la anchura de un pulso, $[\mu s]$.

2.4.3.4.- Energía específica de pulso

Este parámetro depende del voltaje aplicado, ancho de pulso, y la resistencia de la cámara de tratamiento, que varían en función de la geometría y la conductividad del material tratado. Se informa comúnmente en kJ/kg.

Este parámetro hace que sea posible evaluar los costos de energía del proceso y, en consecuencia, compararlo con otras tecnologías. La energía entregada se disipa en forma de calor, es por esto, que la temperatura del alimento es un parámetro de control muy importante dentro del proceso [19].

La energía específica se calcula como:

$$W = \frac{1}{m} \int_0^{\infty} k * E(t)^2 dt \quad (7)$$

Donde:

W : Energía específica $[kJ/Kg]$.

m : Masa, $[Kg]$.

k : Conductividad eléctrica, $[mS/cm]$.

E: Intensidad de campo eléctrico, [kV/cm].

t: Tiempo, [s].

2.4.3.5.- Frecuencia

Este parámetro indica el número de pulsos aplicado por unidad de tiempo, y se informa en Hz (impulsos por segundo) [19].

2.4.4.- Factores que afectan el proceso PEF

2.4.4.1.- Factores Biológicos

- Tipo de célula: La efectividad del proceso PEF depende de las características de las células, como por ejemplo, las células eucariontes son más sensibles que las procariontes. También, las células cuando están en su fase de crecimientos son más sensibles que en cualquier otra fase [17].
- Tamaño y forma de la célula: estudios realizados por Zimmerman, determinaron que entre más pequeño sea la célula más resistencia tiene, esto se debe a que presenta un menor valor de potencial de membrana inducido por un campo eléctrico externo [17].

2.4.4.2.- Factores del medio

- Conductividad eléctrica: es la facilidad con la que los electrones pueden pasar a través de un material. Los alimentos que poseen mayor conductividad eléctrica, mayor resistencia, presenta menos inactivación. Por lo tanto, cuando se tratan alimentos con alta conductividad eléctrica se debe aumentar el voltaje para mantener la fuerza de campo deseada [17].
- pH: Se han hecho muchos estudios respecto a la influencia que tienen las variaciones de pH en el proceso, donde la inactivación de células está directamente relacionada con el pH ácido. Cuando se presenta inactivación a pH

ácido, cambia la capacidad de la célula para mantener su gradiente de pH transmembrana debido a la formación de poros [17].

- Actividad del agua: este es un parámetro que tiene directa relación con la humedad del alimento lo que permite determinar su capacidad de conservación. Por esto, al disminuir la actividad de agua genera una disminución en la permeabilidad de la célula y en la fluidez de la membrana [17].

2.4.5.- Aplicaciones de PEF

A pesar de ser una tecnología que aún se encuentra en estudio, los PEF se aplica en la industria alimentaria, biotecnológica y genética. Estas dos últimas se utilizan generalmente para la electroporación reversible de membranas, en cambio, en la industria alimentaria, se usa en la formación de poros irreversibles que originan la desintegración celular.

Las aplicaciones más importantes de esta tecnología en la industria alimentaria son:

- La inducción de la producción de determinados metabolitos (respuesta al estrés): se aplica un tratamiento de baja intensidad (0.5-1.5 [kV/cm]) donde no necesariamente hay una ruptura irreversible en la membrana celular. Se aplica un campo eléctrico externo para inducir a reacciones de estrés en las plantas o cultivos celulares, liberando componentes intracelulares de gran valor. Como ejemplo, está la aplicación de PEF en el maíz para favorecer la producción de fitoesteroides y en la soja para beneficiar la producción de isoflavonoides[21].
- La inactivación microbiana y enzimática en alimentos líquidos: se destaca por usar un tratamiento de alta intensidad (20-40[kV/cm]). Solo se puede aplicar para la conservación de alimentos líquidos, debido a que destruye la integridad de la estructura del tejido en alimentos sólidos. Como ejemplo se encuentran los jugos de frutas/vegetales, leche, huevo líquido, extractos de algas, entre otros [21].
- La permeabilización de células eucariotas con el propósito de mejorar los

procesos de transferencia de materia: se aplica un proceso de mediana intensidad, es decir, se utiliza un campo eléctrico de 0.5 a 1.5 [kV/cm]. Esta tecnología se usa en el proceso del jugo, permitiendo un incremento en el rendimiento del 10%. Además, se ocupa en la industria cosmética, específicamente en el proceso de extractos de algas, donde el PEF reemplaza el uso de agua caliente en la etapa de extracción [21].

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.- Materiales y Equipos

3.1.1.- Materiales

3.1.1.1.- Materia prima

Pechuga de pollo deshuesada sin marinar Super Pollo con una humedad inicial de 73.750 ± 1.453 [g] en 100 [g] totales y una concentración de sal inicial de 0.473 ± 0.084 [g] en 100 [g] totales, fueron adquiridos en el supermercado Jumbo ubicado en la ciudad de Concón, Chile. La carne de pollo fue refrigerada a 4[°C] hasta el momento de su utilización.

3.1.1.2.- Marinado

Se ocupa un marinado básico que contiene 6[g/100g] de cloruro de sodio (NaCl), 4[g/100g] de tripolifosfato de sodio (STPP) y 90[g/100g] de agua destilada [22]. Esta solución se mantiene a una temperatura de proceso de 5[°C].

3.1.2.- Equipos

3.1.2.1.- PEF

El generador de PEF tiene una capacidad máxima de 10 [kV], este equipo fue diseñado y construido por el Departamento de Física de la Universidad Técnica Federico Santa María (Casa Central). Este generador entrega pulsos de forma monopolar exponencial, en él se pueden controlar tres variables, estas son: frecuencia, número de pulsos y voltaje. La primera variable tiene un rango de trabajo de 1[Hz] a 40[Hz], el segundo varía de 1 a 999 pulsos y el último varía de 1 a 10[kV].

Este equipo cuenta con una cámara de tratamiento de teflón y dos electrodos de acero inoxidable planos y circulares (6.00[mm] de diámetro), la distancia entre los electrodos es de 10.00[cm]. Además, cuenta con un interruptor y un variador de voltaje que permite modificar el voltaje aplicado en el tratamiento (ver Figura 11).



(a) Electrodo



(b) Variador de frecuencia.



(c) PEF

Figura 11: Equipo de pulsos eléctricos de alto voltaje.

3.1.2.2.- Otros equipos

- Medidor de concentración de sal: el equipo ocupado para obtener la concentración de sal en la muestra corresponde a un medidor de concentración de sal marca PCL modelo DiCromat II Rapid Salt Analyser.
- Balanza analítica: el instrumento utilizado para la medición de la masa de las muestras a lo largo del experimento corresponde a una balanza analítica modelo N° JD-400-3 con precisión de ± 0.001 [g]. Este equipo tiene una capacidad máxima de 410[g].
- Agitador y calentador magnético: las soluciones de marinado se prepararon en un agitador/calentador magnético marca VELP SCIENTIFICA, EUROPA.
- Bomba sumergible: la bomba sumergible fue utilizada para poder recircular el flujo de marinado en el recipiente de acrílico, esta corresponde a una bomba marca Nirox modelo P800, con altura máxima de 0.5[m], flujo máximo de 180[l/h], voltaje de 240[V], frecuencia de 50[Hz] y potencia de 5[W].
- Estufa de secado: para obtener la humedad de las muestras se ocupó una estufa de secado con ventilación forzada marca Memmert UF.
- Sensores de temperatura: se utilizaron dos termocuplas, una para medir la temperatura del pollo y la otra marcaba la temperatura de la solución de marinado. Las termocuplas son de tipo T, poseen una combinación de metales de cobre y constantán, el rango de temperatura de operación es de -75°C a 93°C y posee una desviación estándar de $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$.
- Registrador de datos: la temperatura de la muestra de pollo y marinado se

registraron cada 1[s] con un registrador de datos (data logger), mediante un equipo marca NATIONAL INSTRUMENTS modelo NI cDAO-9174 NI CompactDAQ. El registrador de datos incluye el software LabVIEW que se comunica y recoge los datos del programa en línea.

-
- 3.1.3.- Montaje experimental

Los experimentos de tratamiento osmótico con pre tratamiento PEF se realizaron en la configuración experimental que se muestra en la Figura 12. Esta configuración consiste en un recipiente acrílico, la temperatura se controla de forma manual. La agitación de la solución de marinado se lleva a cabo a través de una bomba sumergible que recircula la solución durante el tiempo del experimento. Las temperaturas de la muestra de pollo y solución de marinado son registradas a través de termocuplas, lo datos son recopilados en el computador.

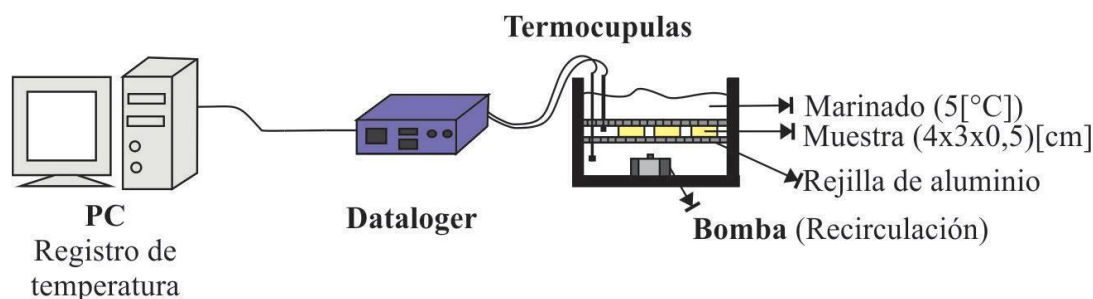


Figura 12: Configuración experimental.

3.2.- Metodología Experimental

3.2.1.- Procedimiento experimental

3.2.1.1.- Preparación de muestras antes del pre tratamiento.

Las pechugas de pollos usadas durante la experiencia fueron previamente lavadas con agua destilada para luego eliminar todo rastro de grasa. Se cortaron en forma de disco con un diámetro de 60[mm] y un espesor de 5[mm].

Una vez cortadas las muestras de pollo en forma de disco, se guardan en un envase plástico

con papel film en el refrigerador a 4[°C].

3.2.1.2.- Preparación de solución de marinado

En un vaso precipitado de 2[L] se agregan 1200[mL] de agua destilada, 80[g] de cloruro de sodio (NaCl) y 53.33[g] de tripolifosfato de sodio (STPP). Luego se agita durante 20 minutos a 25[°C] en el agitador magnético. Una vez lista la solución de marinado, se procede a tapar el vaso precipitado con papel film para ser llevado al refrigerador a 4[°C].

3.2.1.3.- Aplicación del pre-tratamiento.

Las muestras cilíndricas de 60[mm] diámetro y 5[mm] de espesor, son retiradas del refrigerador a una temperatura de 4[°C]. Luego, se colocan en la cámara de tratamiento del PEF aplicando la combinación de los tratamientos elegidos: frecuencia (10[Hz], 20[Hz] y 40[Hz]), voltaje (1[kV], 5[kV] y 10[kV]) y número de pulsos (2000, 3000 y 5000).

3.2.1.4.- Preparación de muestras después del pre tratamiento.

Una vez finalizado el pre-tratamiento, se cortan las muestras (disco) en forma de paralelepípedo de 4[cm] de largo, 3[cm] de ancho y 0.5[cm] de espesor, como se muestra en la Figura 13, El peso de cada muestra corresponde a 6.4 ± 1 [g].

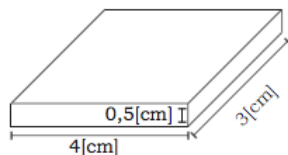


Figura 13: Dimensión de la muestra después del pre tratamiento.

La relación del ancho y espesor de la muestra de pollo en forma de paralelepípedo es de 6 (3[cm]/0.5[cm]), considerado la geometría de la muestra como placa infinita, donde se asume flujo de agua y sólidos soluble en una dirección.

Las muestras de pollo en forma de paralelepípedo se colocan en bandejas de malla de aluminio. Luego, se cubren con papel film y se guardan en el refrigerador a 4[°C].

3.2.1.5.- *Proceso de marinado*

Se coloca la solución de marinado (relación muestra/solución de 1/5[g/g]) en el recipiente acrílico junto con la bomba sumergible. Cuando la temperatura de la solución alcanza los 5[°C] se colocan las bandejas que contienen las muestras en el recipiente acrílico (se regula la temperatura con hielo). En paralelo, se enciende el programa del computador para registrar las temperaturas de la muestra de pollo y la solución de marinado.

Por último, se deja las bandejas con las muestras durante 1[h], 2[h], 3[h], 4[h], 5[h], 10[h] y 24[h]. La transferencia de masa se cuantificó a través de la ganancia de agua (WG) y ganancia de sal (SG) en las muestras de pollo.

3.2.2.- *Determinación de ganancia de agua (WG) y ganancia de sal (SG) en las muestras de pollo*

Las muestras de pollo tratadas se retiran del recipiente y se secan cuidadosamente con papel *tissue* con el objetivo de retirar toda el agua presente en la superficie. Las muestras se pesaron, la humedad se determinó a partir del método gravimétrico [23] y la concentración de sal por medio de equipo DicromatII [24]. Todos los análisis fueron realizados en triplicado.

Los valores de ganancia de agua (WG) y ganancia de sal (SG) fueron calculados por las ecuaciones (8) y (9), respectivamente, y los resultados se presentan en gramos por 100g de muestras no tratada.

$$WG = \frac{w_w - w_{wo}}{w_o} * 100 \quad (8)$$

Donde WG es la ganancia de agua en la muestra de pollo analizada, w_w es el contenido de agua de la muestra después del tratamiento osmótico [g], w_{wo} es el contenido de agua de la muestra no tratada [g] y w_o es la masa de la muestra no tratada [g].

$$SG = \frac{w_s - w_{so}}{w_o} * 100 \quad (9)$$

Donde SG es la ganancia de sal en la muestra de pollo analizada, w_s es el contenido de sal de la muestra después del tratamiento osmótico [g], w_{so} es el contenido de sal de la

muestra no tratada [g] y w_o es la masa de la muestra no tratada [g].

3.3.- Modelo Matemático

Para este estudio, se utilizó la solución analítica de la segunda ley de Fick para una lámina infinita a tiempo largo (Figura 14) con una concentración inicial uniforme y concentración superficial constante, como se muestra en la ecuación (10) [14].

$$\frac{XG}{XG_{\infty}} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}} \quad (10)$$

Donde XG es la ganancia de sal o agua durante el tratamiento, XG_{∞} es la ganancia de sal o agua a tiempo largo de inmersión (equilibrio), D_{eff} es el coeficiente de difusión efectivo del agua en el pollo o sal en el pollo y L es la mitad del espesor de la muestra de pollo.

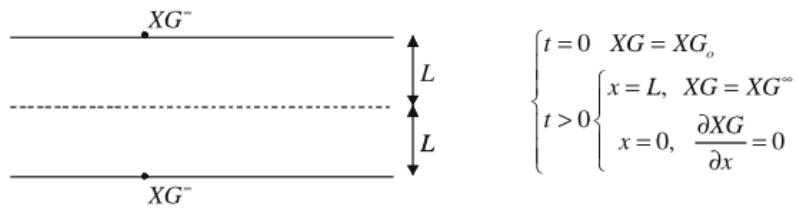


Figura 14: Esquema lámina infinita con sus condiciones de borde[34].

Los valores de ganancia de agua y ganancia de sal durante el tratamiento y los valores de ganancia a tiempo largo de inversión son utilizados para calcular el coeficiente de difusión efectivo, el valor de ganancia a tiempo largo debe ser estimado experimentalmente. El coeficiente de difusión efectivo se determinó con la herramienta de optimización (Solver) del Microsoft Excel. Esta herramienta consiste en minimizar la diferencia entre los datos experimentales y los datos teóricos calculados por el modelo matemático (ecuación 10).

3.4.- Diseño de experimentos y estadístico.

3.4.1.- Diseño de experimentos

La aplicación de pulsos eléctricos como un pre tratamiento para acelerar la etapa de

marinado de carne de pollo se evalúa por medio de un diseño de experimento Box-Behnken. Este diseño se aplica cuando se tiene 3 o mas factores y permite que el diseño sea más eficiente en términos del número de corridas requeridas. Su representación geométrica se observa en la Figura 15.

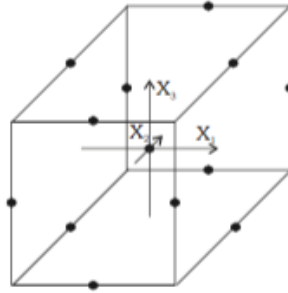


Figura 15: Representación del diseño Box-Behnken para tres factores.

Este diseño se compone de 3 factores con 3 niveles:

Tabla 2: Factores y niveles del diseño experimental.

Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	Nº de pulsos
10	40	5
5	20	3
1	10	2

Los pulsos son monopolares y de decaimiento exponencial. El nivel de pulsos utilizado es de 990. Por lo tanto, la cantidad indicada en la Tabla 2 corresponde a las veces que se aplican los 990 pulsos.

De acuerdo al diseño experimental de Box-Behnken, se realizan 15 experiencias (en lugar de 27 si se realiza de manera convencional) más una experiencia control, como se muestra en la Tabla 3, donde el factor A corresponde al Voltaje [kV], factor B corresponde a frecuencia [Hz] y factor C corresponde a Nº de pulsos.

Tabla 3: Combinación de niveles.

Orden est.	Orden corrida	Bloques	Factor A	Factor B	Factor C
1	1	1	-1	-1	0
11	2	1	0	-1	1
13	3	1	0	0	0

15	4	1	0	0	0
7	5	1	-1	0	1
14	6	1	0	0	0
9	7	1	0	-1	-1
10	8	1	0	1	-1
3	9	1	-1	1	0
12	10	1	0	1	1
6	11	1	1	0	-1
8	12	1	1	0	1
4	13	1	1	1	0
5	14	1	-1	0	-1
2	15	1	1	-1	0

3.4.2.- Análisis estadístico.

El análisis estadístico de este trabajo se divide en 4 partes. Estas son:

- Bondad de ajuste.
- Prueba de Hipótesis.
- Modelo estadístico.
- Optimización simultánea.

3.4.2.1.- Bondad de ajuste

Generalmente, el grado de predicción del modelo es juzgado mediante la comparación entre los valores teóricos y los correspondientes datos observados o medidos. Sin embargo, no existe un acuerdo general sobre el procedimiento estándar para la evaluación de la capacidad de predicción de los modelos.

Utilizando el Modelo de Crank (ecuación 10) y los datos experimentales, se obtienen coeficientes de difusión para cada experiencia en triplicado. Para determinar que tan parecidos son los datos experimentales con los valores teóricos, se calcula la Bondad de ajuste del modelo (describe lo bien que se ajusta un conjunto de observaciones al modelo). Para esto, se consideran los siguientes indicadores estadísticos:

- Raíz del error cuadrático medio (RMSE/SD)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (11)$$

donde O_i y P_i representan las muestra (de tamaño N) de los valores observados y los calculados por el modelo respectivamente.

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X - M)^2}{n - 1}} \quad (12)$$

donde X son valores individuales de la muestra, M es la media de la muestra y n es el tamaño de la muestra.

- Coeficiente de determinación (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (13)$$

En la Tabla 4, se indica el criterio para determinar si el modelo predice efectivamente el comportamiento mostrado por los datos experimentales [25].

Tabla 4: Criterios para la evaluación cualitativa de la bondad de ajuste[25].

Evaluación	RMSE/SD*100	R^2
Muy buena	<30%	>0.91
Buena	30-40%	0.84-0.91
Aceptable	40-50%	0.75-0.84
No aceptable	>50%	<0.75

3.4.2.2.- Prueba de hipótesis

Para poder saber si al aplicar la tecnología PEF aumenta el coeficiente de difusión, primero se debe realizar una prueba de hipótesis entre el control y las experiencias realizadas para verificar si estos coeficientes son significativamente diferentes y así poder compararlas.

La comparación de tratamientos se analiza entre las medias.

Hipótesis para dos medias: comparación de dos tratamientos.

$$H_0: \mu_{control} = \mu_{(experiencia,i)}, \text{ donde } i = 1 \dots, 15$$

$$H_0: \mu_{control} \neq \mu_{(experiencia,i)}, \text{ donde } i = 1 \dots, 15$$

Para poder aceptar o rechazar la hipótesis nula se sigue el siguiente procedimiento.

- Se calcula el estadístico de prueba, donde no se supone igualdad de varianza.

$$t_0 = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{S_x^2}{n_x} + \frac{S_y^2}{n_y}}} \quad (14)$$

Grados de libertad.

$$\nu = \frac{\left(\frac{S_x^2}{n_x} + \frac{S_y^2}{n_y}\right)^2}{\frac{\left(\frac{S_x^2}{n_x}\right)^2}{n_x - 1} + \frac{\left(\frac{S_y^2}{n_y}\right)^2}{n_y - 1}} - 2 \quad (15)$$

donde t_0 es el estadístico de prueba, ν son los grados de libertad, $\bar{X}$ es el promedio de los coeficientes de difusión de la experiencia control, $\bar{Y}$ es el promedio de los coeficientes de difusión de las otras experiencias, S_x es la desviación estándar de los coeficientes de difusión de la experiencia control, S_y es la desviación estándar de los coeficientes de difusión de las otras experiencia, n_x y n_y son el tamaño de muestra que en los dos casos es igual a 3.

- Se utiliza el valor crítico con un 5% de significancia:

$$t_{\left(\frac{\alpha}{2}, \nu\right)} = t_{\left(\frac{0,05}{2}, \nu\right)} \quad (16)$$

- Finalmente, para rechazar la hipótesis nula, es decir, rechazar la igualdad de los coeficientes de difusión, se debe cumplir:

$$|t_0| > t_{\left(\frac{0,05}{2}, \nu\right)} \quad (17)$$

Si se acepta H_0 : Son significativamente iguales, si se rechaza H_0 : Son significativamente diferentes [26].

3.4.2.3.- Modelo estadístico.

Para poder obtener el óptimo simultáneo primero se debe obtener un modelo estadístico para cada respuesta. La ecuación (18) se muestra el modelo estadístico que representa el coeficiente de difusión para el agua y sal en el pollo, evaluando tres factores.

$$Y_{modelo} = \beta_{cte} + \beta_A X_A + \beta_B X_B + \beta_C X_C + \beta_{AA} X_A^2 + \beta_{BB} X_B^2 + \beta_{CC} X_C^2 + \beta_{AB} X_A X_B + \beta_{AC} X_A X_C + \beta_{BC} X_B X_C \quad (18)$$

A partir de los datos, se ingresan los valores a MINITAB 2016, el cual es un programa diseñado para ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas.

Utilizando el diseño de Box-Behnken para 3 factores, 1 réplica, un total de 15 corridas y 3 puntos centrales, se analizan los valores de la combinación de factores en orden aleatorio[27].

3.4.2.4.- Optimización simultánea

En caso de optimizar solo un factor (o respuesta) de un producto, se corre el riesgo de obtener respuestas inadecuadas en un segundo o tercer factor. Para evitar esto, se optimiza simultáneamente todas las respuesta de interés, para tener un producto con mejor calidad y propiedades.

Cuando se tienen dos respuestas (modelos estadísticos), es de esperar, que los óptimos individuales no siempre coincidan con el óptimo simultáneo. La solución a esto, es buscar un solución compromiso (óptimo simultáneo) donde todas las variables tengan un nivel satisfactorio.

El método analítico, función deseabilidad, se emplea para obtener el punto óptimo entre las dos respuestas, este método consiste en definir una función en el espacio de factores que estima la deseabilidad global (DG) del producto en cada punto, convirtiendo el problema multivariable en uno de una sola variable. Se debe maximizar la función DG para encontrar

el óptimo buscado.

Para encontrar el óptimo simultáneo, en este caso, se deben plantear las siguientes restricciones:

- La cota inferior tanto para la respuesta de la sal como para la respuesta del agua corresponde al valor del coeficiente de difusión de la experiencia control.
- El valor objetivo para la respuesta de la sal como para la respuesta del agua corresponde al valor más alto del coeficiente de difusión obtenido a lo largo de las 15 experiencias incluyendo la experiencia control.

Cuando la deseabilidad alcanza el valor 1, significa que la correspondiente respuesta predicha $\hat{Y}_i$ toma su valor máximo deseable. En caso contrario, cuando la deseabilidad es de 0 la respuesta predicha entrega un valor inaceptable.

Se debe verificar que cada modelo cumpla con los supuestos tradicionales de normalidad, varianza constante e independencia de los residuos. Además, que el coeficiente de determinación ajustado de cada modelo sea de al menos 70% [28].

Se ocupó el programa estadístico MINITAB 2016 para obtener el óptimo simultáneo.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.- Ganancia de agua y sal.

4.1.1.- Ganancia de agua.

Los resultados de ganancia de agua se presentan en 100[g] de muestra no tratada, luego de 24 horas de marinado, donde se utilizaron tres réplicas para cada experiencia.

En la Tabla 5, se presentan las ganancias de agua (promedio $\pm$ desviación estándar) luego de 24 horas de marinado.

Tabla 5: Resultados de ganancia de agua luego de 24 horas.

Experiencia Nº	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	Nº de pulsos [corridas]	WG[g/100g]
0	0	0	0	23.29 $\pm$ 1.026
1	1	10	3	34.93 $\pm$ 1.284
2	5	10	5	34.84 $\pm$ 1.986
3	5	20	3	38.31 $\pm$ 2.945
4	5	20	3	35.62 $\pm$ 3.951
5	1	20	5	31.08 $\pm$ 3.978
6	5	20	3	36.76 $\pm$ 2.738
7	5	10	2	34.78 $\pm$ 14.164
8	5	40	2	33.05 $\pm$ 4.560
9	1	40	3	28.79 $\pm$ 6.073
10	5	40	5	32.61 $\pm$ 2.194
11	10	20	2	24.75 $\pm$ 2.952
12	10	20	5	32.66 $\pm$ 2.238
13	10	40	3	34.89 $\pm$ 4.785
14	1	20	2	34.89 $\pm$ 2.107
15	10	10	3	32.05 $\pm$ 3.624

Se confirma que la aplicación de PEF al proceso de marinado aumenta la ganancia de agua desde un 6.3% hasta un 64.5 % al pasar 24 horas. Al analizar en detalle cada experiencia, en el Anexo A, gráficos A.2.1, se concluye que en cada hora registrada para cada experiencia, la aplicación de PEF provoca un mayor ganancia de agua en comparación al proceso convencional. Estos resultados son altos en comparación al estudio realizado por F.C. Smith[28] donde la ganancia de agua en la muestra control a las 24 horas tiene un valor máximo de 14[g/100g], esto se debe principalmente al pre tratamiento aplicado.

Además, la tendencia de los valores obtenidos concuerda con la literatura, donde se plantea que la ganancia de agua se debe principalmente a la aplicación de sal en la carne, teniendo un efecto expansivo en la red de filamentos provocadas por fuerzas electroestáticas, donde los iones de sal (Cl^-) se unen a las proteínas de miofibrina (actina y miosina) causando hinchazón [31].

Se concluye, según el promedio, que la mayor ganancia de agua se produce en las experiencias N°3, N°4 y N°6, donde las tres corresponden a condiciones de voltaje de 5[kV], frecuencia de 20[Hz] y pulsos de 3 corridas. De esta forma, las mayores ganancias obtenidas son: $38.31 \pm 2.945[\text{g}/100\text{g}]$, $35.62 \pm 3.951[\text{g}/100\text{g}]$ y $36.76 \pm 2.738[\text{g}/100\text{g}]$, cifras considerablemente altas si se compara con la ganancia de agua de la experiencia control, marinado sin PEF, la cual tiene un valor de $23.29 \pm 1.026[\text{g}/100\text{g}]$.

Comparando estos resultados con los datos obtenidos por McDonnell[32], este último logra un aumento en la ganancia de agua con el nivel más bajo de frecuencia, a diferencia con los resultados obtenidos en esta investigación, la mayor ganancia de agua se logra con los niveles intermedio de los factores.

Considerando las 15 experiencias, las mayores ganancias tienen en común el factor pulso, siendo este de 3 corridas. Por lo tanto, se considera que este, es el más determinante al momento de obtener una alta concentración de agua.

4.1.2.- Ganancia de Sal

Los resultados de ganancia de sal se presentan en 100[g] de muestra no trata luego de 24 horas de marinado, donde se utilizaron tres réplicas para cada experiencia.

En la Tabla 6, se presentan las ganancias de sal (promedio $\pm$ desviación estándar) luego de 24 horas de marinado.

Tabla 6: Resultados de ganancia de sal luego de 24 horas.

Experiencia N°	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos [corridas]	SG[g/100g]
0	0	0	0	5.07 ± 0.037
1	1	10	3	5.84 ± 0.161
2	5	10	5	5.83 ± 0.161
3	5	20	3	5.88 ± 0.259

4	5	20	3	6.08 ± 0.137
5	1	20	5	5.64 ± 0.042
6	5	20	3	5.90 ± 0.057
7	5	10	2	5.64 ± 0.317
8	5	40	2	5.91 ± 0.215
9	1	40	3	5.93 ± 0.145
10	5	40	5	5.92 ± 0.107
11	10	20	2	5.95 ± 0.096
12	10	20	5	5.88 ± 0.068
13	10	40	3	5.87 ± 0.068
14	1	20	2	5.89 ± 0.013
15	10	10	3	5.91 ± 0.250

A partir de la Tabla 6 se observa que la mayoría de los datos tiene una baja desviación estándar, lo cual se debe principalmente a la triplicación de la ganancia de sal para cada réplica.

Se confirma que la aplicación de PEF al proceso de marinado aumenta la ganancia de sal desde un 11.96% hasta un 20.77% al pasar 24 horas. Al analizar en detalle cada experiencia, en el Anexo A, gráficos A.2.2, se concluye que, en cada hora registrada, para la mayoría de las experiencias, la aplicación de PEF provoca una mayor ganancia de sal en comparación al proceso en ausencia de PEF. Estos resultados son similares al estudio realizado por FC Schmidt, donde la ganancia de sal en la muestra control a las 24 horas es de 4[g/100g]. Esto se debe principalmente a la solubilidad de las proteínas, al agua y al gradiente de concentración de sal que produce flujos difusivos dentro de la muestra [30].

Se concluye, según el promedio, que la mayor ganancia de agua se produce en la experiencia N°4, la cual corresponde a condiciones de voltaje de 5[kV], frecuencia de 20[Hz] y pulsos de 3000. De esta forma, la mayor ganancia obtenida es: 6.089 ± 0.137 [g/100g] cifras levemente mayores si se compara con la ganancia de sal de la experiencia control, marinado sin PEF, la cual tiene un valor de 5.042 ± 0.037 [g/100g].

Comparando estos resultados con los datos obtenidos por McDonnell[32], este último logra un aumento en la ganancia de sal con el nivel más bajo de frecuencia y el más alto de pulsos, a diferencia con los resultados obtenidos en esta investigación, la mayor ganancia de sal se logra cuando el factor pulso se encuentra en el nivel intermedio.

No obstante, si se observa la Tabla 6, las 15 experiencias responden a una misma tendencia.

Las ganancias de sal en el pollo al aplicar PEF, fluctúan en un pequeño rango entre]5.645-6.089[[g/100g] lo que dificulta la identificación de una combinación de factores que logre mejores y peores resultados.

4.2.- Coeficiente de difusión

4.2.1.- Coeficiente de difusión de agua en el pollo

En la Tabla 7 se muestran los valores del coeficiente de difusión del agua en el pollo. Como se observa, se cumple que $RMSE/SD \cdot 100 \leq 30$ y que $R^2 > 0.91$, de lo cual se concluye que, los valores experimentales se ajustan correctamente con el modelo matemático planteado[24].

Tabla 7: Coeficiente de difusión del agua en el pollo.

Nº	$D_{eff,agua}$ $(\bar{X} \pm SE) \cdot 10^{10} [m^2/s]$	R^2	$\frac{RMSE}{SD} \cdot 100$
0	0.47 ± 0.04^a	0.94	25.3
1	0.53 ± 0.02^a	0.98	17.5
2	0.59 ± 0.04^a	0.94	3.4
3	0.55 ± 0.05^a	0.97	18.1
4	0.54 ± 0.04^a	0.98	15.4
5	0.82 ± 0.12^a	0.96	26.0
6	0.55 ± 0.06^a	0.98	18.4
7	0.62 ± 0.10^a	0.95	26.8
8	0.65 ± 0.08^a	0.97	21.2
9	0.95 ± 0.23^a	0.98	18.4
10	0.56 ± 0.05^a	0.97	21.1
11	3.32 ± 0.59^b	0.96	28.2
12	0.63 ± 0.10^a	0.98	17.7
13	0.50 ± 0.07^a	0.96	21.8
14	0.59 ± 0.03^b	0.98	15.6
15	0.59 ± 0.03^b	0.96	16.6

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre medias ($p < 0.05$). *SE: Error estándar, SD: Desviación estándar, RMSE: Error cuadrático medio[28].

Se concluye, con un 95% de confianza, que las experiencias N°11, N°14 y N°15 son significativamente diferentes. Las condiciones de operación en la experiencia N°11 fue de

10[kV], 20[Hz] y 5000[pulso], para la experiencia N°14 fue de 1[kV], 20[Hz] y 2000 pulsos, mientras que en la experiencia N° 15 fue de 10[kV], 10[Hz] y 3000 pulsos. En la experiencia N°11 se alcanza el valor máximo del coeficiente de difusión del agua en el pollo, con un $3.32 \pm 0.59 \cdot 10^{10}[\text{m}^2/\text{s}]$. Este resultado equivale a un aumento del 600% con respecto a la experiencia control (Ver Tabla 7).

Con respecto al tiempo de marinado, en la experiencia N°11(ver Figura 31, Anexo A), para alcanzar una ganancia de agua del 12[g/100g] (equivale a 12 horas de proceso de marinado estándar) se demora 1.6[h], reduciendo su tiempo de marinado en un 87%.

En la Figura 16, se presenta los coeficientes de difusión del agua en el pollo promedio con su error estándar (SE)[28].

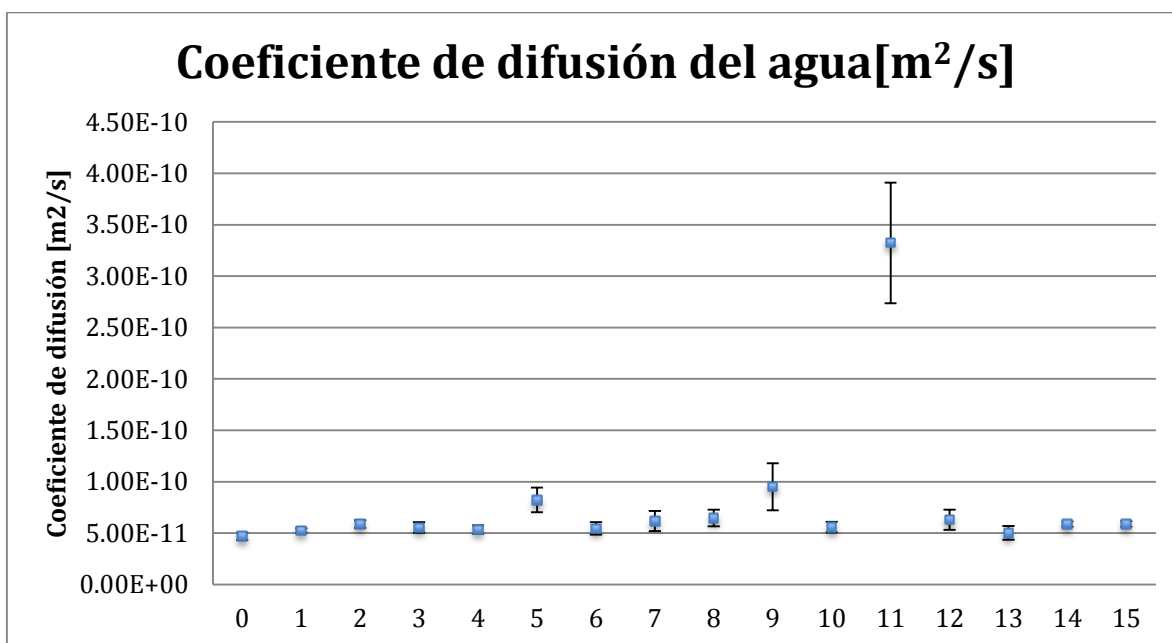


Figura 16: Coeficiente de difusión del agua [m²/s].

Se observa en la figura 16, las experiencias que rechazan la hipótesis nula, las que son significativamente iguales con respecto a la experiencia control, sin embargo, la experiencia más notoria es la N°11 que excede notoriamente la tendencia.

4.2.2.- Coeficiente de difusión de sal en el pollo.

En la Tabla 8 se muestran los valores del coeficiente de difusión de sal en el pollo. Como se observa, se cumple satisfactoriamente que $\text{RMSE}/\text{SD} \cdot 100 \leq 30$ y que $R^2 > 0.91$, donde se

concluye que, los valores experimentales se ajustan correctamente con el modelo matemático planteado [24].

Tabla 8: Coeficiente de difusión de sal en el pollo.

Nº	$D_{ef,sal}$ $(\bar{X} \pm SE) \cdot 10^{10} [m^2/s]$	R^2	$\frac{RMSE}{SD} \cdot 100$
0	2.44 ± 0.10^a	0.98	7.4
1	2.78 ± 0.24^a	0.94	19.9
2	2.49 ± 0.10^a	0.96	15.4
3	2.76 ± 0.11^a	0.96	14.1
4	1.94 ± 0.08^a	0.95	15.5
5	2.50 ± 0.04^a	0.99	7.4
6	2.32 ± 0.16^a	0.98	9.8
7	2.57 ± 0.27^a	0.98	7.7
8	2.29 ± 0.12^a	0.97	11.2
9	2.15 ± 0.04^a	0.94	17.9
10	2.04 ± 0.08^b	0.95	18.6
11	$2,62 \pm 0,18^a$	0.99	6.8
12	1.78 ± 0.06^b	0.96	12.8
13	2.61 ± 0.46^a	0.90	27.2
14	2.08 ± 0.18^a	0.94	18.0
15	2.08 ± 0.16^a	0.96	16.6

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre medias ($p < 0,05$). *SE: Error estándar, SD: Desviación estándar, RMSE: Error cuadrático medio [27].

La mayoría de los experimentos no se rechaza la hipótesis nula, lo que significa que los coeficientes de difusión son significativamente iguales ($\alpha = 5$). No obstante, las experiencias N°10 y N°12 resultaron ser significativamente diferente, lo que permite comparar. Sin embargo, estos coeficientes son menores al coeficiente control. Por lo tanto, se concluye que al aplicar PEF no acelera el proceso de difusión de sal en el pollo.

Cabe destacar, que los órdenes de magnitud de los coeficientes de difusión de sal en el pollo son coherentes con respecto a los datos mencionados por [33], donde este obtuvo un coeficiente de difusión de sal en el pollo igual a $2.5 \pm 0.3 \cdot 10^{-10} [m^2/s]$.

En la Figura 17, se presenta los coeficientes de difusión de sal en el pollo (promedio) con su error estándar (SE)[28].

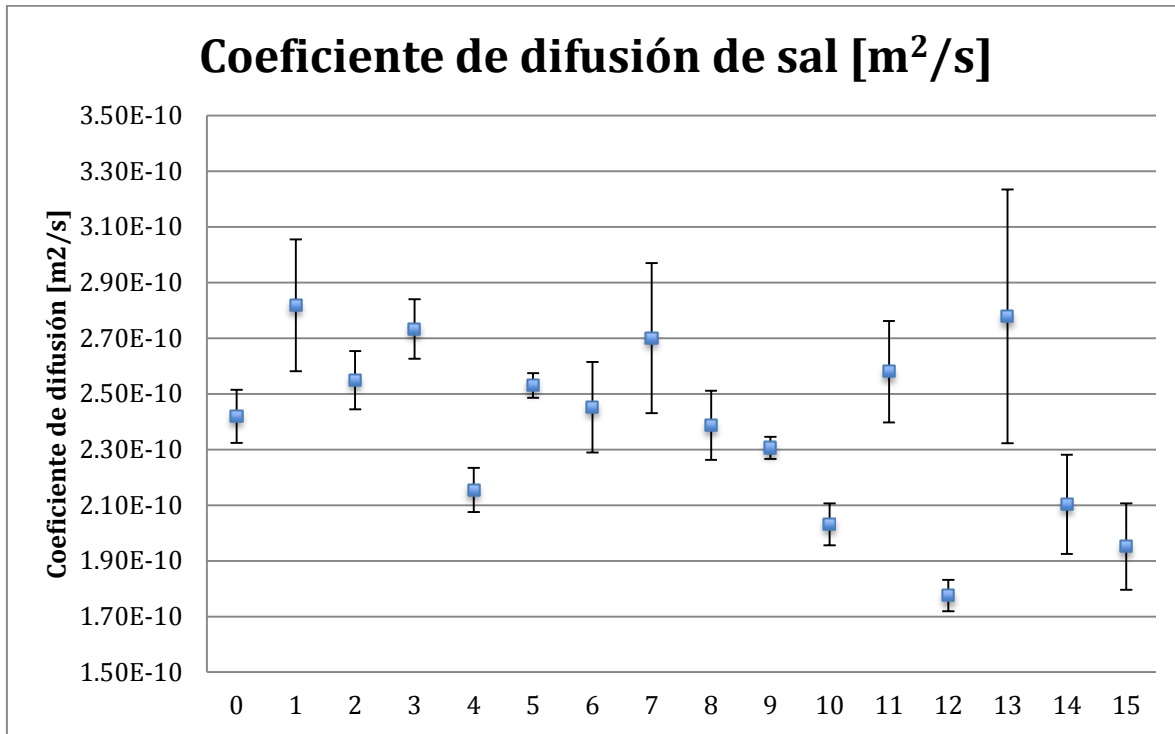


Figura 17: Coeficiente de difusión de sal en el pollo[m²/s].

Al analizar la Figura 17, se puede ver con facilidad que la mitad de las experiencias arrojan resultados de coeficiente de difusión mayores a la experiencia control.

4.3.- Modelo estadístico

4.3.1.- Modelo de coeficiente de difusión del agua

Al realizar la regresión de superficie de respuesta Y v/s A; B; C, da como resultado un R^2 de 74,81% y un R_{aj}^2 de 29.46%, donde se recomiendan valores de R^2 próximos al 100%. Por otro lado, cuando existen varios factores, se recomienda un R_{aj}^2 de al menos 70%. Para este caso el R_{aj}^2 obtenido es inferior al 70% recomendado, esto se puede explicar a través de los siguientes puntos [31]:

- Los factores estimados por sí solo no tienen la suficiente influencia para explicar las variaciones observadas en la variable de respuesta.
- Los niveles de los factores estimados son demasiado estrechos, por lo que el efecto

sobre la variable de respuesta al cambiar de un nivel a otro es demasiado pequeño.

- Otros factores no estudiados en el experimento no se mantuvieron suficientemente fijos, por lo que al tener variaciones durante el experimento causaron mucha variación experimental.
- Errores experimentales y de medición son altos.

En esta investigación, las principales causas de los bajos resultados de los coeficientes de determinación son tanto los errores experimentales como los errores de mediciones, ya que si se analizan los resultados experimentales de ganancias de agua y sal, se observan altas varianzas, sumado a esta, se agrega la dificultad de mantener a $5[^\circ\text{C}]$ el proceso de marinado, lo cual probablemente pudo afectar directamente en los resultados experimentales.

El análisis de varianza entregado por el programa, entrega el p -valor para determinar si los resultados son estadísticamente significativos. Para que esto sea posible, se espera que $p\text{-valor} < 0.05$. En la Tabla 9 se presentan los valores en orden decreciente.

Tabla 9: Tabla ANOVA p -valor, agua.

Orden	Interacción	Factor (es)	$p\text{-valor}$
1°	AC	Voltaje - Pulso	0.057
2°	C	Pulso	0.186
3°	A	Voltaje	0.259
4°	AB	Voltaje - Frecuencia	0.685
5°	B	Frecuencia	0.847
6°	BC	Frecuencia - Pulso	0.962

Se obtiene como resultado que $p\text{-valor} > 0.05$ para todas las combinaciones, lo que significan efectos no significativos. Sin embargo, la interacción que se acerca más a la óptima es $p\text{-valor}_{AC} = 0.057$, que representa la interacción entre voltaje y pulso.

A través del f -valor se determina que tan significativa son los factores con respecto a los demás. Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 10: Tabla ANOVA f-valor, agua.

Orden	Interacción	Factor (es)	<i>p</i> -valor
1°	AC	Voltaje - Pulso	0.057
2°	C	Pulso	0.186
3°	A	Voltaje	0.259
4°	AB	Voltaje - Frecuencia	0.685
5°	B	Frecuencia	0.847
6°	BC	Frecuencia - Pulso	0.962

Se concluye que el efecto con mayor interacción es el AC, voltaje y pulso. Sin embargo, de estos 2 factores, el pulso tiene un mayor efecto que el voltaje.

Los valores de los coeficientes del modelo son:

Tabla 11: Coeficiente de interacción del modelo, agua.

Coeficiente	$\beta_{ij} \cdot 10^{11}$
β_{cte}	5.45
β_A	2.70
β_B	4.26
β_C	-3.22
β_{AA}	4.17
β_{BB}	-3.21
β_{CC}	3.78
β_{AB}	-1.28
β_{AC}	-7.32
β_{BC}	-1.51

Por último, debido a que los p-valor son bajos, se verifica el modelo a través de la siguiente gráfica de residuos para Y.

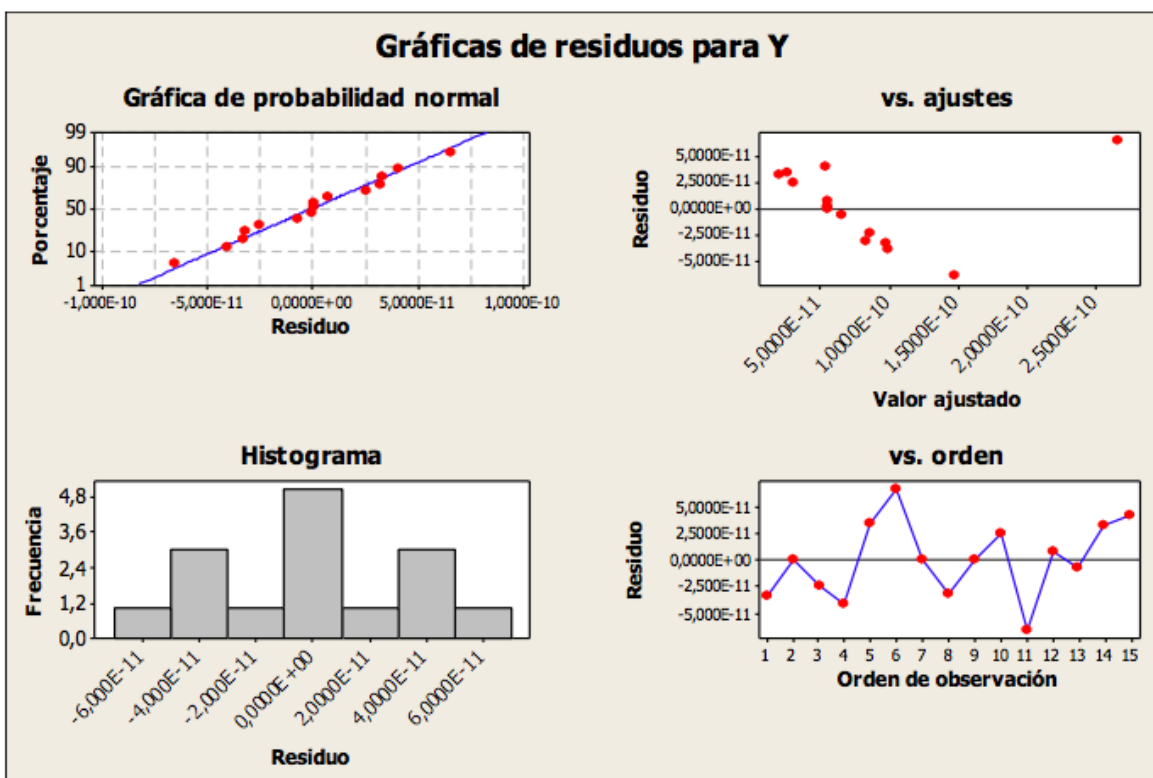


Figura 18: Gráfica de residuos para Y_{modelo} , $D_{\text{eff,agua}}$.

Supuestos:

- Normalidad: Se cumple, los puntos están graficados en línea recta.
- Independencia: Se cumple, no se detecta una tendencia patrón no aleatoriamente definido, no existe relación entre los errores. Esto indica buena planeación y ejecución del experimento.
- Varianza constante: Se cumple, los puntos se distribuyen de manera aleatoria en una banda horizontal (sin ningún patrón claro).

Por lo tanto, se cumplen los supuestos. En conclusión, la Tabla 12 resume los valores de coeficiente de difusión de agua entre Y_{modelo} e $Y_{\text{experimental}}$.

Tabla 12: Coeficiente de difusión, agua. Modelo-Experimental.

Nº	A	B	C	Y_{modelo}	$Y_{\text{experimental}}$
----	---	---	---	---------------------	---------------------------

1	-1	-1	0	2.02E-11	5.25E-11
2	0	-1	1	2.53E-11	5.88E-11
3	0	0	0	5.45E-11	5.55E-11
4	0	0	0	5.45E-11	5.36E-11
5	-1	0	1	1.48E-10	8.23E-11
6	0	0	0	5.45E-11	5.46E-11
7	0	-1	-1	8.67E-11	6.17E-11
8	0	1	-1	9.83E-11	6.48E-11
9	-1	1	0	5.43E-11	9.51E-11
10	0	1	1	3.08E-11	5.59E-11
11	1	0	-1	2.66E-10	3.32E-10
12	1	0	1	5.57E-11	6.30E-11
13	1	1	0	8.26E-11	5.02E-11
14	-1	0	-1	6.62E-11	5.89E-11
15	1	-1	0	9.97E-11	5.89E-11

En la Tabla 12, se observa que el máximo coeficiente de difusión de agua se produce en la experiencia N°11, donde la combinación de factores es (1, 0, -1), lo que se traduce en (10[kV], 20[Hz], 2000[pulsos]).

4.3.2.- Modelo de coeficiente de difusión de sal

Al realizar la regresión de superficie de respuesta Y v/s A; B; C, da como resultado un R^2 de 70.30% y un R_{aj}^2 de 36.43%, donde se recomiendan valores de R^2 próximos al 100%. Por otro lado, cuando existen varios factores, se recomienda un R_{aj}^2 de al menos 70%. Para este caso el R_{aj}^2 obtenido es inferior al 70% recomendado, esto se puede explicar a través de los siguientes puntos [31]:

- Los factores estimados por sí solo no tienen la suficiente influencia para explicar las variaciones observadas en la variable de respuesta.
- Los niveles de los factores estimados son demasiado estrechos, por lo que el efecto sobre la variable de respuesta al cambiar de un nivel a otro es demasiado pequeño.
- Otros factores no estudiados en el experimento no se mantuvieron suficientemente

fijos, por lo que al tener variaciones durante el experimento causaron mucha variación experimental.

- Errores experimentales y de medición son altos.

En esta investigación, las principales causas de los bajos resultados de los coeficientes de determinación son tanto los errores experimentales como los errores de mediciones, ya que si se analizan los resultados experimentales de ganancias de agua y sal, se observan altas varianzas, sumado a esta, se agrega la dificultad de mantener a $5[^\circ\text{C}]$ el proceso de marinado, lo cual probablemente pudo afectar directamente en los resultados experimentales.

El análisis de varianza entregado por el programa, entrega el p-valor para determinar si los resultados son estadísticamente significativos. Para que esto sea posible, se espera que p-valor < 0.05 . En la Tabla 13 se presentan los valores en orden decreciente.

Tabla 13: Tabla ANOVA p-valor, sal.

Orden	Interacción	Factor (es)	<i>p-valor</i>
1º	AB	Voltaje - Frecuencia	0.049
2º	AC	Voltaje - Pulso	0.063
3º	C	Pulso	0.281
4º	A	Voltaje	0.400
5º	B	Frecuencia	0.513
6º	BC	Frecuencia - Pulso	0.711

Sin embargo, la única interacción que se puede considerar estadísticamente significativa es AB (Voltaje – Frecuencia), ya que p-valor (AB) < 0.05 .

A través del f-valor se determina que tan significativa son los factores con respecto a los demás. Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 14: Tabla ANOVA f-valor, sal.

Orden	Interacción	Factor (es)	<i>p</i> -valor
1°	AC	Voltaje - Pulso	0.057
2°	C	Pulso	0.186
3°	A	Voltaje	0.259
4°	AB	Voltaje - Frecuencia	0.685
5°	B	Frecuencia	0.847
6°	BC	Frecuencia - Pulso	0.962

Se concluye que el efecto con mayor interacción es AB, voltaje y frecuencia. Sin embargo, de estos 2 factores, el voltaje tiene un mayor efecto que la frecuencia.

El valor de los coeficientes del modelo de la son:

Tabla 15: Coeficiente de interacción del modelo, sal.

Coeficiente	$\beta_{ij} \cdot 10^{11}$
β_{cte}	24.5
β_A	-0.84
β_B	-0.65
β_C	-1.10
β_{AA}	-0.76
β_{BB}	0.93
β_{CC}	-1.23
β_{AB}	3,35
β_{AC}	-3,08
β_{BC}	-0,51

Por último, debido a que los p-valor son bajos, se verifica el modelo a través de la siguiente gráfica de residuos para Y.

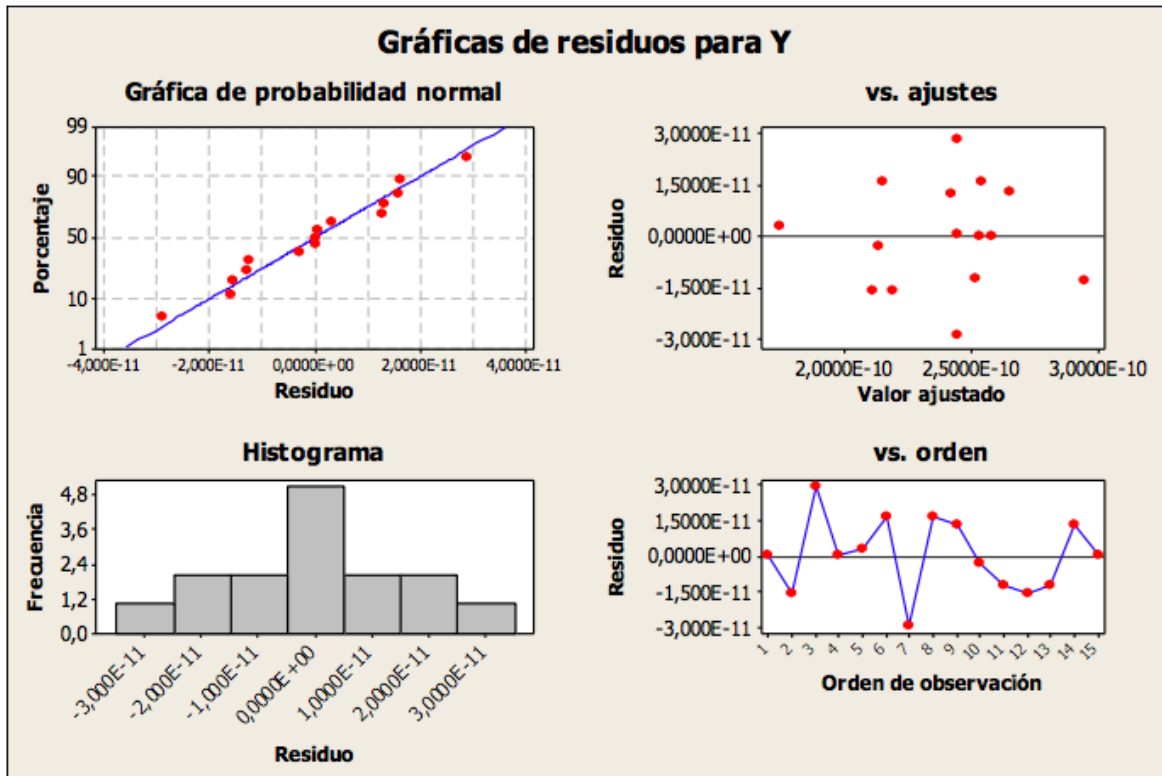


Figura 19: Gráfica de residuos para Y_{modelo} , $D_{\text{eff}, \text{sat}}$.

Supuestos:

- Normalidad: Se cumple, los puntos están graficados en línea recta.
- Independencia: Se cumple, no se detecta una tendencia patrón no aleatoriamente definido, no existe relación entre los errores. Esto indica buena planeación y ejecución del experimento.
- Varianza constante: Se cumple, los puntos se distribuyen de manera aleatoria en una banda horizontal (sin ningún patrón claro).

Por lo tanto, se cumplen los supuestos. En conclusión, la Tabla 16 resume los valores de coeficiente de difusión de agua entre Y_{modelo} e $Y_{\text{experimental}}$.

Tabla 16: Coeficiente de difusión, sal. Modelo-Experimental.

Nº	A	B	C	Y_{modelo}	$Y_{experimental}$
1	-1	-1	0	2.95E-10	2.82E-10
2	0	-1	1	2.42E-10	2.55E-10
3	0	0	0	2.45E-10	2.73E-10
4	0	0	0	2.45E-10	2.15E-10
5	-1	0	1	2.53E-10	2.53E-10
6	0	0	0	2.45E-10	2.45E-10
7	0	-1	-1	2.54E-10	2.70E-10
8	0	1	-1	2.51E-10	2.39E-10
9	-1	1	0	2.15E-10	2.31E-10
10	0	1	1	2.19E-10	2.03E-10
11	1	0	-1	2.58E-10	2.58E-10
12	1	0	1	1.74E-10	1.78E-10
13	1	1	0	2.65E-10	2.78E-10
14	-1	0	-1	2.13E-10	2.10E-10
15	1	-1	0	2.11E-10	1.95E-10

En la Tabla 16, se observa que el máximo valor de coeficiente de difusión de la sal en la experiencia N°1, donde la combinación de factos es (-1,-1,0), que equivale a decir (1[kV], 10[Hz], 3000 [pulsos]).

4.4.- Optimización simultánea.

Para encontrar el óptimo simultáneo, en este caso es el máximo común, se deben plantear las siguientes restricciones del problema:

$$MIN_{Y_{sal}} = 2.42 \times 10^{-10} [m^2/s]$$

$$MIN_{Y_{agua}} = 4.69 \times 10^{-11} [m^2/s]$$

$$OBJETIVO_{Y_{sal}} = 2.95 \times 10^{-10} [m^2/s]$$

$$OBJETIVO_{Y_{agua}} = 2.66 \times 10^{-10} [m^2/s]$$

Estos valores mínimos corresponden a los coeficientes de difusión de sal en el pollo y de agua en el pollo respectivamente de las experiencias control. Los valores objetivos son los máximo coeficientes de difusión obtenidos en las experiencias, usando el modelo estadístico.

Utilizando el programa MINITAB 2016, se calcularon los niveles de cada factor.

Tabla 17: Óptimo simultáneo.

Factor	Nivel
A	1
B	0.8989
C	-1

Lo que significa un voltaje 10[kV], una frecuencia cerca de 40[Hz] y 2000 [pulsos].

Las respuestas pronosticadas se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18: Respuestas y deseabilidad.

Modelo	Respuesta [m^2/s]	Deseabilidad
Y_{sal}	2.95×10^{-10}	0.995
Y_{agua}	2.34×10^{-10}	0.853

Se obtienen resultados de deseabilidad cercano a 1, siendo mayor la deseabilidad de la sal que la del agua. Finalmente, se tiene una deseabilidad compuesta (global) de 0.922, valor que se acerca a 1, por lo tanto, el resultado es aceptable.

Reemplazando estos coeficientes de difusión en el modelo matemático, el proceso con pre tratamiento tiene un tiempo de marina de 1.5 horas con respecto al agua y 10 horas con respecto a sal. Esto finalmente se traduce, en reducir el tiempo de marinado de 17%.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1.- CONCLUSIONES

Los resultados indican que al aplicar un pre tratamiento PEF en el proceso de marinado acelera significativamente la transferencia de materia del agua en el pollo, operando a 1[kV], 10[Hz] y 3000 [pulsos], experimentando un aumento del 600% en su coeficiente de difusión con respecto al proceso estándar, esto equivale a reducir el tiempo de marinado en un 87%. En el caso de la transferencia de materia de la sal en el polo, no existe un aumento o una disminución significativa, ya que no hubo una diferencia significativa entre los coeficientes de difusión de las experiencias y el procedimiento estándar.

Además, al operar a un voltaje de 10[kV], una frecuencia cercana a 40[Hz] y una cantidad de pulso de 2000 [pulsos], se obtiene el óptimo simultáneo entre el coeficiente de difusión del agua y el coeficiente de difusión de la sal, aumentando el primero en un 400%, mientras el segundo lo hizo en un 20%, esto implica la reducción en el tiempo de marino del 17%. Se recomienda mejorar el sistema de refrigeración con el fin de evitar las fluctuaciones de temperatura, lo cual puede influenciar en la variabilidad de los datos de difusión.

Otro aspecto relevante, es evaluar los cambios microestructurales del tejido de pollo durante el proceso de marinado con y sin PEF, de modo de justificar adecuadamente los cambios en los valores de difusión de agua y sal obtenidos en este estudio.

BIBLIOGRAFIA

- [1]: Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura. (2016). *Consumo de carne*. Recuperado en <http://www.fao.org/>.
- [2]: Oficina de Estudios y producción Agraria, ODEPA. (2016). *Rubro: carnes*. Recuperado en <http://www.odepa.cl>.
- [3]: Oficina de estudio y producción agraria, ODEPA. (2016). *Junio 12, las carnes de ave*. Recuperado en <http://www.odepa.cl/>.
- [4]: Oficina de estudio y producción agraria, ODEPA. (2016). *Actualización del mercado avícola*. Recuperado en <http://www.odepa.cl/>.
- [5]: En Colombia. (2016). *Marinado de pollo avicultores, revista de veterinaria*. Recuperado en www.encolombia.com.
- [6]: Tribunal de defensa de la libre competencia. (2016) *Comunicación, boletín N° 9645-11. Proyecto de ley que regula el marinado en las carnes de res y de ave expendidas en establecimientos de venta directa a público*. Recuperado de <http://www.df.cl>.
- [7]: Kerry J.P., Kerry J.F. (2011). 17: Marinationg and enhancement of the nutritional content of processed meat product. En *Processed meats improving safety, nutrition and quality* (pp. 436)
- [8]: Xargayó, M., Lagares J., Fernández E., Ruiz D., Borrell D. Marinado de carnes frescas por efecto spray. *Documento, artículo 7*. 182-190.
- [9]: Andújar G. (2003). Efecto de las sales. En *Química y Bioquímica de la carne y los productos cárnicos* (pp. 33).
- [10]: Smith D. (2014). 24 Poultry processing and product. En *Poultry processing* (pp. 557). North Carolina, Usa.
- [11]: Metalquimia. (2016). *Preparación rápida. Controlada y eficiente de cualquier tipo de salmuera*. Recuperado en es.metalquimia.com/productos.
- [12]: Engormix. (2016). *Condiciones técnicas para garantizar un buen marinado en la carne*. Recuperado en www.engormix.com
- [13]: Geankoplis C. J. (1998). Capítulo 6: Principios de transferencia de masa. En *Proceso de transporte y operaciones unitarias*. (pp.425).

- [14]: Crank (1975). 1: The diffusion equations. En *The mathematics of diffusion*(pp 4). Londres, Inglaterra.
- [15]: J. Crank (1975). 3: Infinite and semi-infinite media. En *The mathematics of diffusion* (pp 28) Londres, Inglaterra.
- [16]: Dandamrongrak R., Young G., Mason R. (2002). Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. *Food Science and Technolpgy*. 139-146.
- [17]: Lopez – Malo A. (2010). Pulsos eléctricos: fundamentos y aplicaciones en alimentos. Mexico.
- [18]: Pagán R., Mañas P. (2006). Chapter 3: Fundamental Aspects Of Microbial Membrane Electroporation. En *Pulsed Electric Fields Technology for the food industry*. Usa.
- [19]: Raso J., Condón S., Álvarez I. (2014). Pulsed electric Field. En *Elsevier*, España
- [20]: Barbosa G., Altunakar B. (2006). Chapter 1: Pulsed Electric Fields Processing of food: An Overview. En *Pulsed Electric Fields Technology for the food industry*. Usa.
- [21]: Heinz V., Knorr D. (2006 Chapter 7: Applications of pulsed electric fields Technology for the industry. En *Pulsed Electric Fields Technology for the food industry*. Usa.
- [22]: Smith D., Acton J. (2010). / Chapter 15: marination, cooking and curing of poultry products. En *Poultry meat Processing* (pp 314).
- [23]: McNeal J. (1990). Chapter 39: meat and meat products. En *AOAC Official Methods of Analysis*.
- [24]: The Noramar Company. *Dicromat II and IIA Salt Analyzers User's Manual*.
- [25]: Ritter A., Muñoz R. (2009). Capacidad de predicción de modelos aplicados a la ZNS: herramienta informática para la adecuada evaluación de la bondad de ajuste con significación estadística. Estudios en la zona no saturada del suelo. Vol X, 259-264.
- [26]: Gutierrez H. (2008). Capítulo 2: Elementos de inferencia estadística. En *Análisis y diseño de experimentos* (pp 38-42).

- [27]: Gutierrez H. (2008). Capítulo 11: Análisis de regresión. En *Análisis y diseño de experimentos* (pp 360-375).
- [28]: Gutierrez H. (2008). Capítulo 13: Optimización simultanea de varias respuestas. En *Análisis y diseño de experimentos* (pp 441-447).
- [29] Fildler F., Vaux D. (2012). Error bars in experimental biology. *School of psychological Science and Department of Biochemistry*.
- [30]: Schmidt FC., Carciofi B., Laurindo JB. (2007). Salting operational diagrams for chicken breast cuts: Hydration-dehydration. *Journal of food engineering*. 553-559.
- [31]: Offer G., Trinick J. (1983). On the mechanism of water holding in meat: The swelling and shrinking of myofibrils. *Meat research institute*. 245-281.
- [32]: Gutierrez H. (2008). Capítulo 6: Diseño factorial 2k. En *Análisis y diseño de experimentos* (pp 177-179).
- [33]: McDonell C., Allen P. (2014). The use of pulsed electric fields for accelerating the salting of pork. *Food science and technology*. 59, 1054-1060
- [34]: Schmidt FC., Carciofil BAM., Laurindo JB. (2009). Application of diffusive and empirical models to hydration, dehydration and salt gain during osmotic treatment of chicken breast cuts. *Journal of food engineering*. 91. 553-559.

ANEXOS

ANEXO A.

A.1 Datos

A.1.1 Ganancia de agua [g/100g]

Tabla 19: Resultado ganancia de agua, experiencia control.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
0	0	0	0
t[h]	Ganancia de H ₂ O	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	3.609 3.604 3.069	3.427	0.310
2	5.376 5.723 5.877	5.659	0.257
3	5.661 5.646 5.229	5.512	0.245
4	12.179 11.458 8.419	10.686	1.996
5	9.016 9.582 9.766	9.455	0.391
10	10.134 11.642 10.034	10.603	0.900
24	22.966 22.480 24.449	23.298	1.026

Tabla 20: Resultados ganancia de agua, experiencia N°1.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
1	10	40	3
t[h]	Ganancia de H ₂ O	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	7.427 8.411 9.122	8.320	0.851
2	7.478 8.476 8.428	8.127	0.563
3	11.072 12.095 10.795	11.321	0.685
4	10.795 14.141 13.848	12.928	1.853
5	15.035 16.749 13.292	15.025	1.729
10	21.263 20.754 16.068	19.361	2.864
24	36.209 37.056 34.532	35.932	1.285

Tabla 21: Resultados ganancia de agua, experiencia N°2.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
2	5	40	2
t[h]	Ganancia de H ₂ O	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	9.105 6.103 7.520	7.576	1.502
2	8.581 7.014 9.375	8.324	1.202
3	12.855 10.383 15.885	13.041	2.756
4	14.789 13.801 16.373	14.988	1.297
5	14.707 14.497 16.145	15.116	0.897
10	23.370 20.237 18.597	20.735	2.425
24	33.316 34.129 37.090	34.845	

Tabla 22: Resultados ganancia de agua, experiencia N° 3.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
3	5	20	3
t[h]	Ganancia de H ₂ O	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	5.351 4.931 3.230	4.504	1.123
2	8.137 8.476 9.004	8.539	0.437
3	10.915 11.693 12.283	11.630	0.686
4	15.079 13.274 12.281	13.545	1.418
5	14.696 15.445 14.212	14.784	0.621
10	22.202 23.215 26.147	23.855	2.049
24	41.030 35.183 38.730	38.314	2.945

Tabla 23: Resultados ganancia de agua, experiencia N°4.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
4	5	20	3
t[h]	Ganancia de H ₂ O	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	5.602 6.019 2.481	4.701	1.933
2	8.640 9.126 6.974	8.247	1.129
3	11.297 12.641 17.578	11.321	0.685
4	10.795 14.141 13.848	13.839	3.307
5	17.140 18.748 11.904	15.931	3.579
10	26.721 14.029 18.849	19.866	6.407
24	38.277 31.080 37.507	35.621	3.951

Tabla 24: Resultados ganancia de agua, experiencia N°5.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
5	10	20	2
t[h]	Ganancia de H ₂ O	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	6.369 6.560 6.244	6.391	0.159
2	8.546 6.990 8.746	8.094	0.962
3	21.025 19.733 17.032	19.263	2.037
4	13.806 10.889 12.967	12.554	1.502
5	13.168 12.987 15.861	14.005	1.610
10	26.973 23.804 22.943	24.574	2.122
24	28.301 35.639 29.305	31.082	3.979

Tabla 25: Resultados ganancia de agua, experiencia N°6.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
6	5	20	3
t[h]	Ganancia de H ₂ O	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	4.512 3.540 4.563	4.205	0.576
2	9.360 7.543 8.959	8.621	0.954
3	14.736 8.654 10.909	11.433	3.075
4	14.807 12.265 12.575	13.216	1.386
5	17.543 15.502 19.117	17.387	1.812
10	19.147 20.620 23.758	21.175	2.355
24	36.167 39.748 34.368	36.761	2.738

Tabla 26: Resultados ganancia de agua, experiencia N°7.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
7	5	40	5
t[h]	Ganancia de H ₂ O	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	5.856 5.813 5.683	5.784	0.090
2	8.450 8.006 8.395	8.284	0.242
3	8.582 15.673 9.628	11.294	3.828
4	13.738 13.155 11.841	12.911	0.972
5	13.586 12.496 16.158	14.080	1.880
10	29.820 37.886 25.798	31.168	6.155
24	32.012 50.124 22.204	34.780	14.165

Tabla 27: Resultados ganancia de agua, experiencia N°8.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
8	5	10	5
t[h]	Ganancia de H ₂ O	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	4.304 3.851 3.813	3.989	0.273
2	7.041 7.401 7.360	7.267	0.197
3	13.139 12.895 19.838	15.290	3.940
4	17.936 14.223 13.542	15.223	2.365
5	12.851 16.787 14.706	14.781	1.969
10	21.047 22.118 19.493	20.886	1.320
24	27.845 36.344 34.975	33.054	4.563

Tabla 28: Resultados ganancia agua, experiencia N°9.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
9	10	10	3
t[h]	Ganancia de H ₂ O	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	6.030 3.833 5.094	4.986	1.103
2	8.546 5.783 13.101	9.143	3.695
3	12.035 15.936 11.314	13.095	2.487
4	11.206 8.657 11.747	10.537	1.650
5	14.574 14.271 22.634	17.160	4.743
10	26.084 25.034 19.952	23.690	3.279
24	26.703 35.632 24.036	28.790	6.073

Tabla 29: Resultados ganancia de agua, experiencia N°10.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
10	5	10	2
t[h]	Ganancia de H ₂ O	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	4.817 4.719 4.000	4.512	0.446
2	6.649 7.076 8.550	7.425	0.998
3	14.833 15.564 9.171	13.189	3.499
4	13.401 10.939 10.981	11.774	1.409
5	12.115 11.648 10.399	11.387	0.887
10	19.859 22.600 21.317	21.259	1.371
24	31.270 31.419 35.143	32.610	2.194

Tabla 30: Resultados ganancia de agua, experiencia N°11.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
11	1	20	5
t[h]	Ganancia de H ₂ O	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	6.214 4.005 4.728	4.982	1.126
2	17.137 15.694 13.264	15.365	2.925
3	23.387 25.540 19.798	22.908	2.900
4	29.150 22.076 26.137	25.788	3.550
5	20.252 22.633 35.643	26.176	8.285
10	19.688 26.036 23.048	22.924	3.176
24	26.688 26.222 21.358	24.756	2.952

Tabla 31: Resultados ganancia de agua, experiencia N°12.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
12	1	20	2
t[h]	Ganancia de H ₂ O	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	5.250 3.564 4.627	4.480	0.852
2	8.199 7.785 8.683	8.222	0.449
3	9.005 11.115 10.926	10.349	1.167
4	12.347 12.296 15.798	13.480	2.007
5	15.944 18.510 14.687	16.380	1.949
10	23.685 18.058 13.766	18.503	4.974
24	30.307 32.931 34.759	32.666	2.238

Tabla 32: Resultados ganancia de agua, experiencia N°13.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
13	1	10	3
t[h]	Ganancia de H ₂ O	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	6.795 9.342 5.378	7.172	2.009
2	7.962 8.933 7.250	8.048	0.844
3	10.880 8.701 9.047	9.543	1.171
4	10.468 12.634 11.406	11.503	1.086
5	18.028 16.191 13.125	15.781	2.477
10	15.742 16.673 17.604	16.673	0.931
24	40.188 30.878 33.618	34.895	4.785

Tabla 33: Resultados ganancia de agua, experiencia N°14.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
14	10	20	5
t[h]	Ganancia de H ₂ O	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	5.095 6.547 7.022	6.221	1.004
2	8.677 12.409 11.133	10.740	1.897
3	9.707 10.839 11.710	10.752	1.005
4	17.205 13.893 15.593	15.563	1.656
5	10.993 14.990 12.467	12.817	2.021
10	26.644 21.902 21.195	22.580	1.822
24	34.087 37.284 33.307	34.892	2.107

Tabla 34: Resultados ganancia de agua, experiencia N°15.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
15	1	40	3
t[h]	Ganancia de H ₂ O	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	5.804 3.987 6.030	5.274	1.120
2	8.573 13.308 8.361	10.081	2.797
3	22.415 8.004 14.636	15.018	7.213
4	11.766 9.694 9.966	10.475	1.126
5	9.010 12.778 16.321	12.703	3.656
10	18.830 20.046 21.717	20.198	1.450
24	32.231 28.251 35.592	32.058	3.624

A.1.2 Ganancia de sal [g/100g]

Tabla 35: Resultado ganancia de sal, experiencia control.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
0	0	0	0
t[h]	Ganancia de sal	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	2.249 2.070 2.235	2.184	0.099
2	2.955 2.900 3.002	2.952	0.051
3	3.307 3.469 3.270	3.349	0.105
4	4.405 4.543 4.357	4.435	0.097
5	3.745 4.309 4.785	4,309	0.525
10	5.141 4.264 5.22	4.876	0.531
24	5.042 5.114 5.068	5.075	0.037

Tabla 36: Resultado ganancia de sal, experiencia N°1,

Experiencia	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
1	10	40	3
t[h]	Ganancia de sal	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	3.253 3.206 2.974	3.144	0.149
2	4.116 4.120 4.165	4.134	0.027
3	4.310 4.358 4.253	4.307	0.052
4	4.591 4.636 4.591	4.606	0.026
5	4.805 4.550 4.627	4.661	0.131
10	4.775 5.289 5.200	5.088	0.275
24	5.670 5.991 5.854	5.839	0.161

Tabla 37: Resultados ganancia de sal, experiencia N°2.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
2	5	40	2
t[h]	Ganancia de sal	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	2.651 3.300 3.028	3.144	0.149
2	3.308 3.231 3.306	3.282	0.044
3	4.439 5.219 4.210	4.623	0.529
4	4.725 4.636 4.636	4.666	0.051
5	4.786 4.550 4.627	4.654	0.120
10	5.318 5.289 5.200	5.269	0.062
24	5.670 5.991 5.854	5.839	0.161

Tabla 38: Resultados ganancia de sal, experiencia N°3.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
3	5	20	3
t[h]	Ganancia de sal	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	2.992 3.155 3.264	3.137	0.137
2	3.607 3.909 4.047	3.854	0.225
3	4.265 4.178 4.736	4.393	0.300
4	4.128 4.930 5.120	4.726	0.527
5	4.966 4.966 4.584	4.839	0.220
10	5.094 5.293 5.230	5.206	0.101
24	5.594 6.080 5.994	5.889	0.259

Tabla 39: Resultados ganancia de sal, experiencia N°4

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
4	5	20	3
t[h]	Ganancia de sal	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	2.514 2.438 2.501	2.484	0.041
2	3.657 3.633 3.645	3.645	0.012
3	3.364 3.920 4.105	3.796	0.386
4	4.784 4.447 4.958	4.730	0.260
5	4.760 4.759 4.742	4.754	0.010
10	4.938 4.874 4.744	4.852	0.099
24	6.222 5.948 6.098	6.089	0.137

Tabla 40: Resultados ganancia de sal, experiencia N°5.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
5	10	20	2
t[h]	Ganancia de sal	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	2.405 2.408 2.366	2.393	0.024
2	3.722 3.660 3.661	3.681	0.036
3	4.173 4.182 4.177	4.177	0.005
4	4.436 4.434 4.423	4.431	0.007
5	4.609 4.591 4.607	4.602	0.010
10	5.312 5.350 5.435	5.366	0.063
24	5.595 5.661 5.675	5.644	0.043

Tabla 41: Resultados ganancia de sal, experiencia N°6.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
6	5	20	3
t[h]	Ganancia de sal	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	2.475 2.408 2.443	2.442	0.034
2	3.611 3.666 3.621	3.633	0.030
3	4.469 4.881 3.774	4.375	0.559
4	4.729 4.676 4.700	4.702	0.026
5	4.818 4.833 4.848	4.833	0.015
10	5.135 5.105 5.179	5.139	0.037
24	5.964 5.904 5.848	5.905	0.058

Tabla 42: Resultados ganancia de sal, experiencia N°7.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
7	5	40	5
t[h]	Ganancia de sal	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	2.466 2.471 2.452	2.463	0.010
2	3.604 3.604 3.621	3.609	0.010
3	4.163 4.174 4.194	4.177	0.016
4	4.505 4.539 4.478	4.507	0.030
5	4.755 4.768 4.731	4.751	0.019
10	5.052 5.034 5.014	5.033	0.019
24	5.952 5.664 5.319	5.645	0.317

Tabla 43: Resultados ganancia de sal, experiencia N°8.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
8	5	10	5
t[h]	Ganancia de sal	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	2.719 2.857 2.508	2.695	0.176
2	4.051 3.640 3.699	3.797	0.222
3	4.155 4.105 3.978	4,079	0.091
4	4.607 4.675 4.544	4.608	0.066
5	4.792 4.592 4.544	4.642	0.132
10	5.127 5.387 5.387	5.301	0.150
24	6.116 5.688 5.940	5.915	0.215

Tabla 44: Resultados ganancia de sal, experiencia N°9.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
9	10	10	3
t[h]	Ganancia de sal	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	2.453 2.447 2.434	2.445	0.010
2	3.561 3.712 3.668	3.647	0.078
3	4.467 4.597 4.510	4.525	0.066
4	4.344 4.326 4.483	4.384	0.086
5	4.541 4.480 4.492	4.504	0.033
10	4.790 4.930 4.895	4.872	0.073
24	6.050 5.984 5.772	5.935	0.145

Tabla 45: Resultados ganancia de sal, experiencia N°10.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
10	5	10	2
t[h]	Ganancia de sal	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	2.334 2.462 2.496	2.431	0.085
2	3.848 3.848 3.805	3.833	0.025
3	4.185 4.161 4,292	4.212	0.070
4	4.219 4.216 4.106	4.180	0.064
5	5.040 4,984 5.158	5.061	0.089
10	5.987 5.978 5.796	5.920	0.108
24	5.987 5.978 5.796	5.920	2.194

Tabla 46: Resultados ganancia de sal, experiencia N°11.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
11	1	20	5
t[h]	Ganancia de sal	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	2.959 2.683 2.960	2.867	0.160
2	3.308 3.494 3.550	3.451	0.127
3	4.615 4.887 3.437	4.313	0.771
4	5.108 5.036 4.921	5.022	0.095
5	5.369 5.228 4.802	5.133	0.295
10	5,838 5.319 5.893	5.683	0.316
24	6.068 5.889 5.916	5.958	0.096

Tabla 47: Resultados ganancia de sal, experiencia N°12.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
12	1	20	2
t[h]	Ganancia de sal	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	2.095 2.101 2.085	2.094	0.008
2	3.353 3.261 3.256	3.290	0.054
3	4.022 4.015 4.147	4.061	0.075
4	4.077 4.173 4.177	4.142	0.057
5	4.407 4.325 4.325	4.352	0.047
10	4.750 4.849 4.849	4.816	0.057
24	5.808 5.937 5.911	5.885	0.068

Tabla 48: Resultados ganancia de sal, experiencia N°13.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
13	1	10	3
t[h]	Ganancia de sal	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	3.124 2.833 2.830	2.929	0.169
2	4.200 4.430 3.090	3.907	0.717
3	5.433 5.433 4.281	5.049	0.665
4	4.559 3.125 5.495	4.393	1.193
5	4.587 4.790 3.866	4.415	0.486
10	5.069 5.458 4.001	4.843	0.754
24	5.834 5.837 5.952	5.874	0.068

Tabla 49: Resultados ganancia de sal, experiencia N°14.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
14	10	20	5
t[h]	Ganancia de sal	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	2.749 2.808 2.727	2.761	0.042
2	3.735 3.982 3.693	3.803	0.156
3	3.782 3.974 3.967	3.908	0.109
4	3.999 4.560 4.298	4.286	0.280
5	4.488 4.602 4.402	4.497	0.100
10	4.768 4.795 5.186	4.916	0.234
24	5.887 5.912 5.894	5.898	0.013

Tabla 50: Resultados ganancia de sal, experiencia N°15.

	Voltaje [kV]	Frecuencia [Hz]	N° de pulsos
15	1	40	3
t[h]	Ganancia de sal	$\bar{X}$	σ
0	0 0 0	0	0
1	2.120 2.096 2.138	2,118	0,021
2	3.447 3.355 3.492	3.431	0.070
3	4.326 4.414 4.356	4.365	0.045
4	4.151 4.153 4.071	4.125	0.047
5	4.379 4.439 4.487	4.435	0.054
10	5.002 4.997 5.045	5.015	0.026
24	6.085 6.034 5.629	5.916	0.250

A.2. Gráficos.

A.2.1. Ganancia de agua [g/100g].

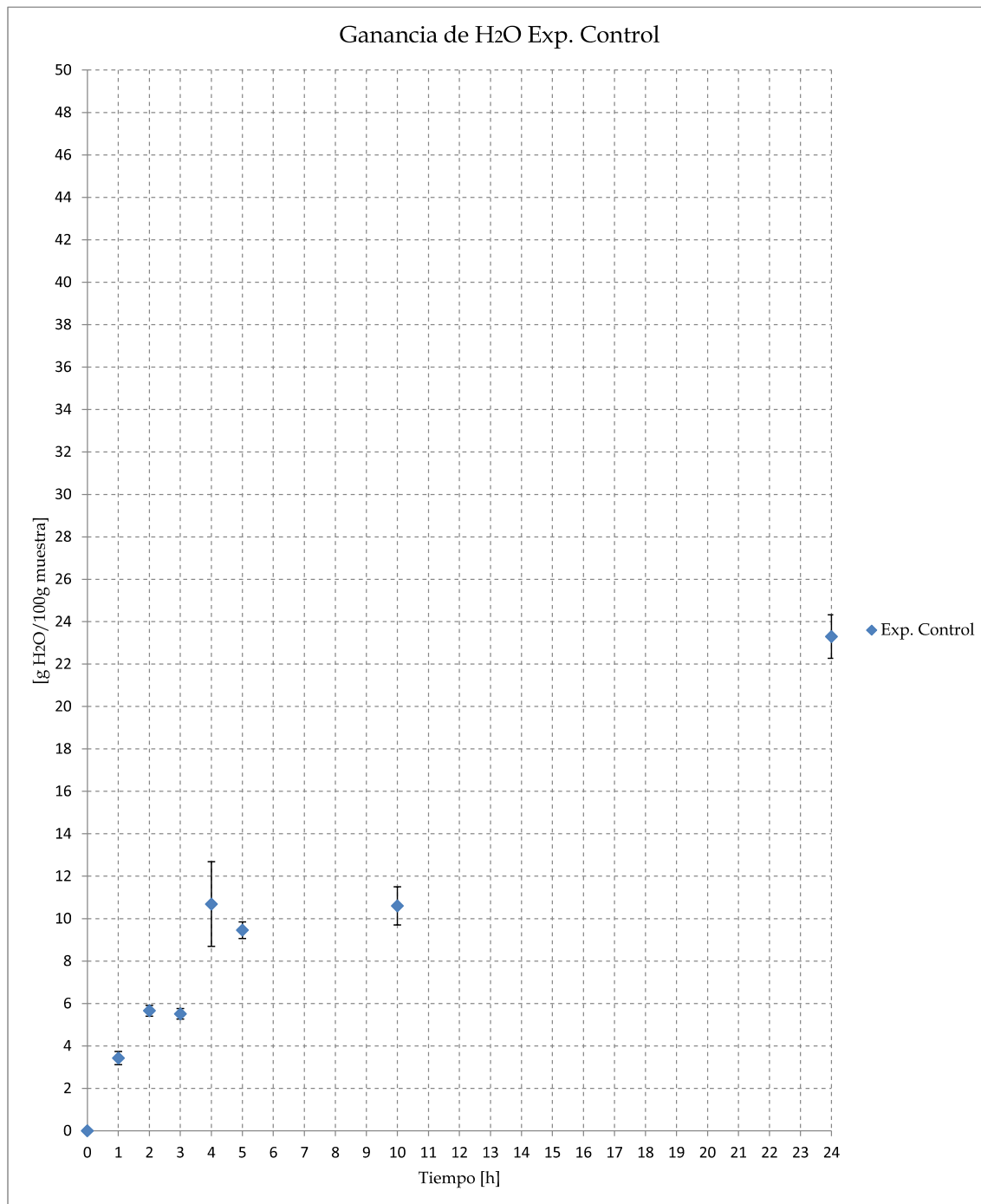


Figura 20: Resultados ganancia de agua, experiencia control.

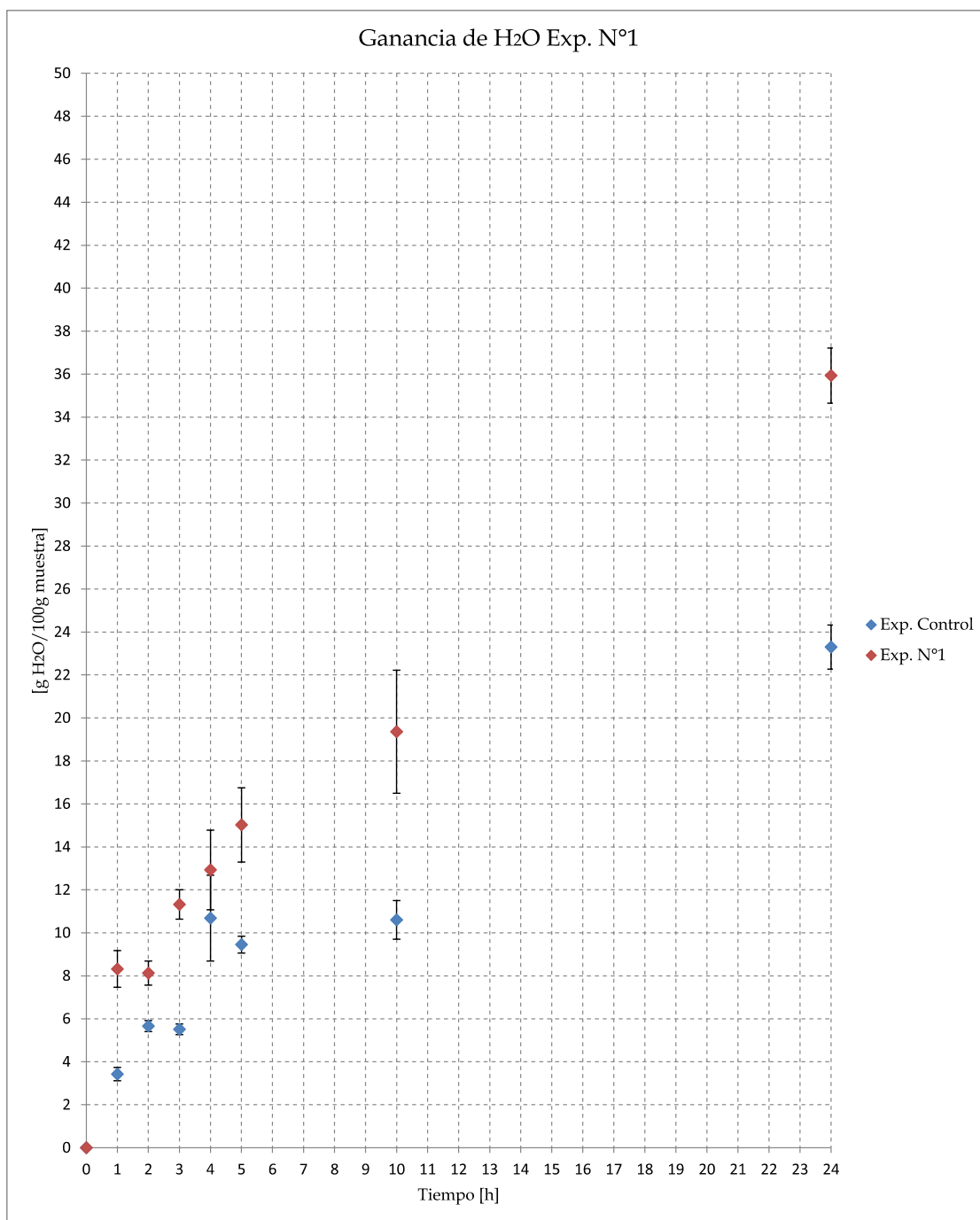


Figura 21: Resultados ganancia de agua, experiencia N°1.

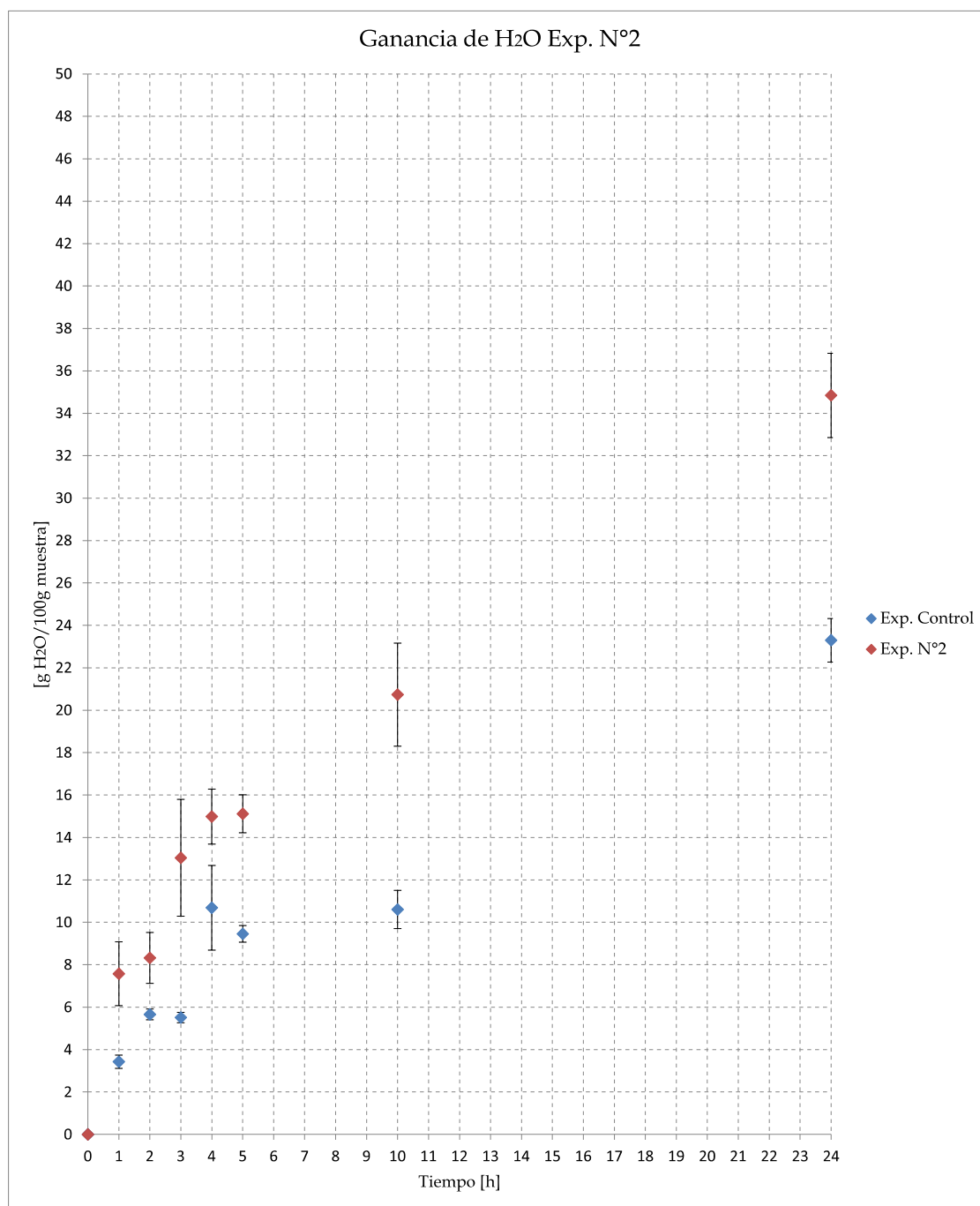


Figura 22: Resultados ganancia de agua, experiencia N°2.

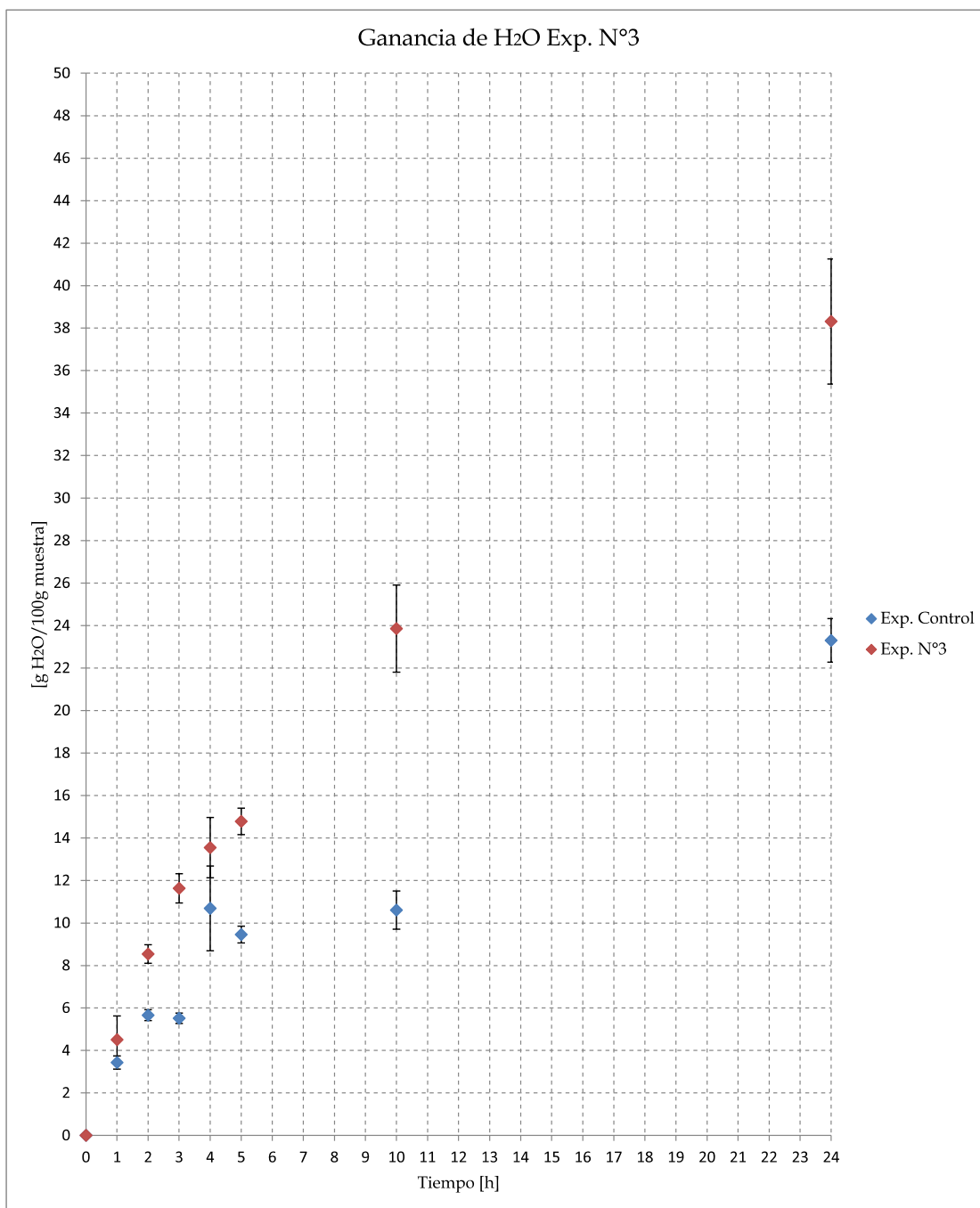


Figura 23: Resultados ganancia de agua, experiencia N°3.

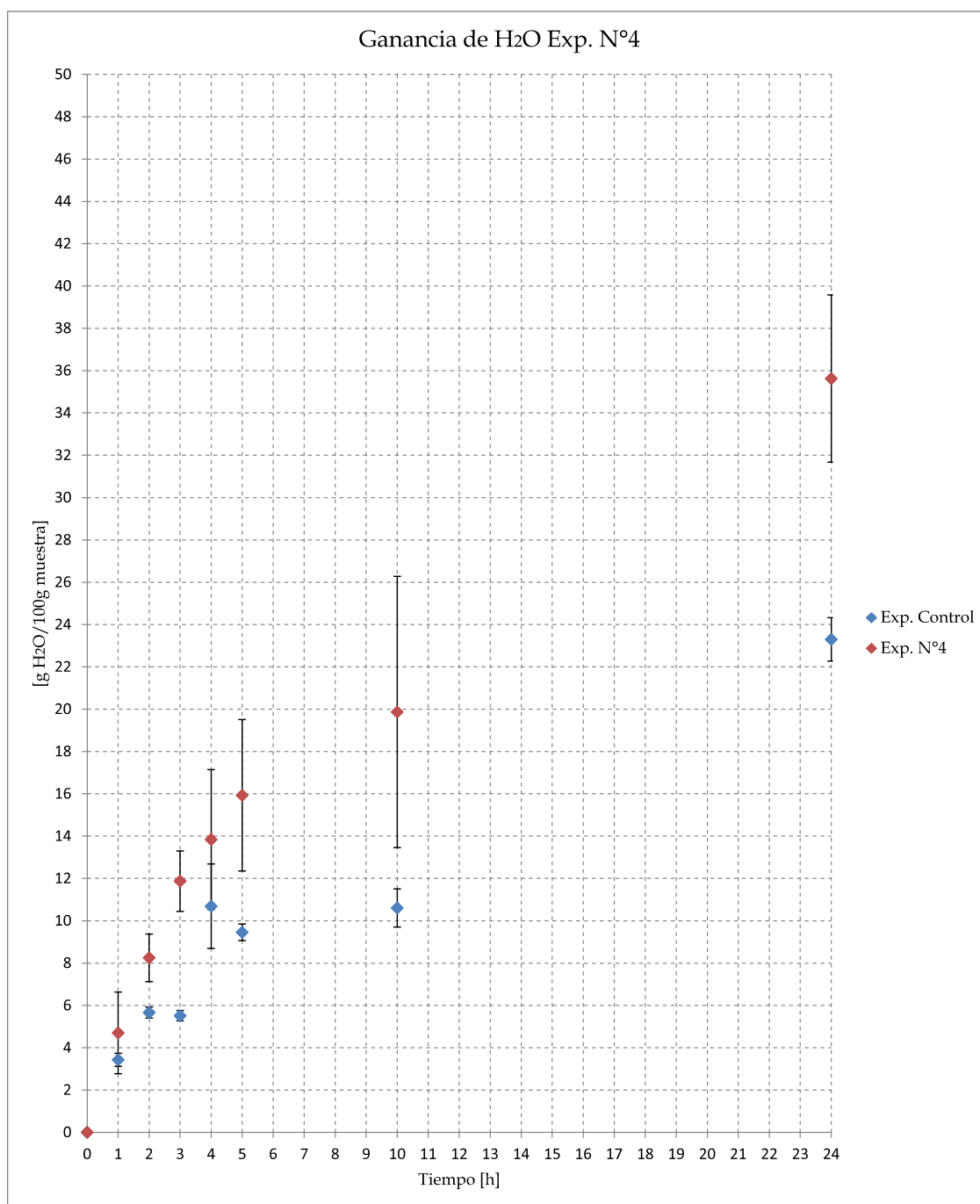


Figura 24: Resultados ganancia de agua, experiencia N°4.

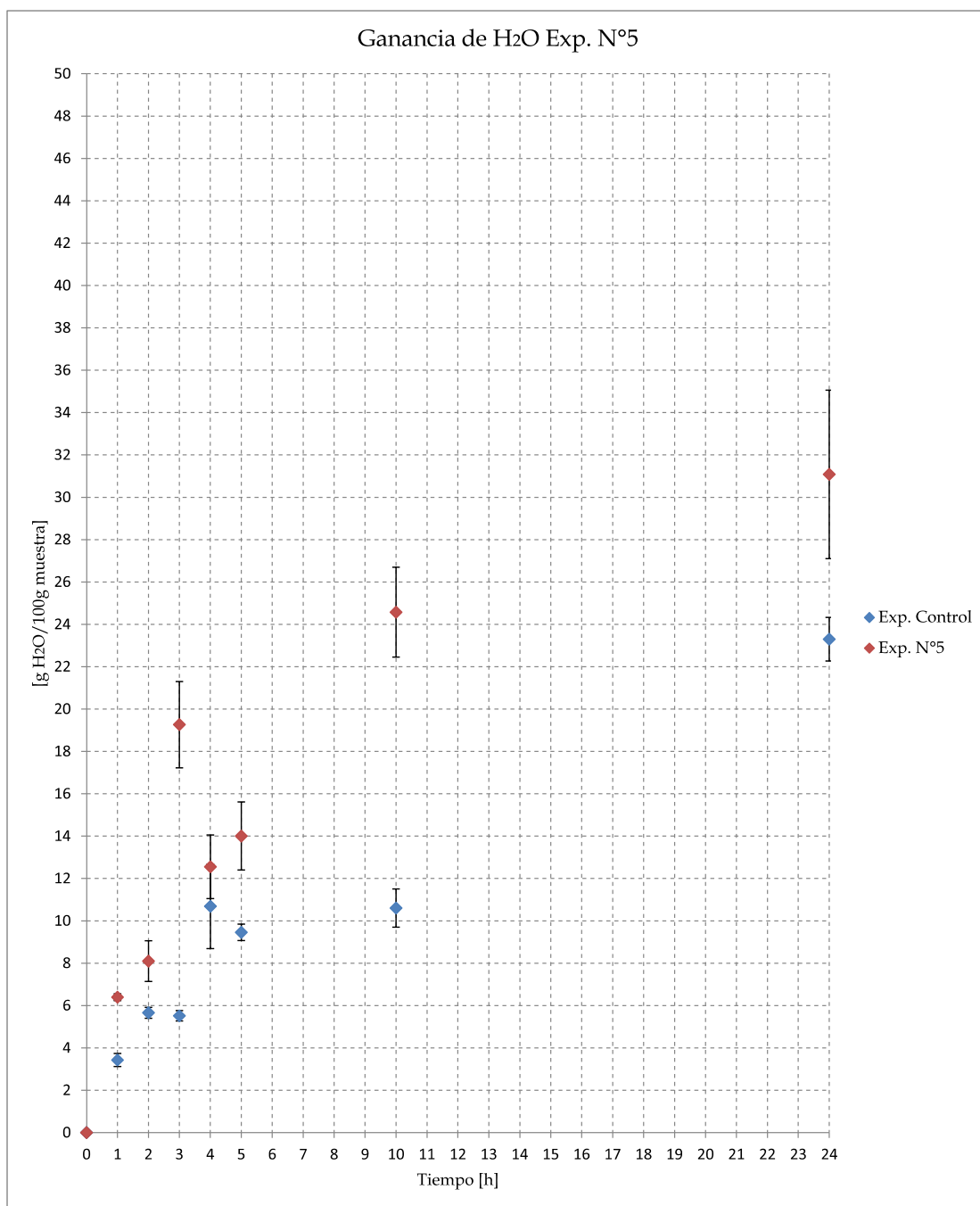


Figura 25: Resultados ganancia de agua, experiencia N°5.

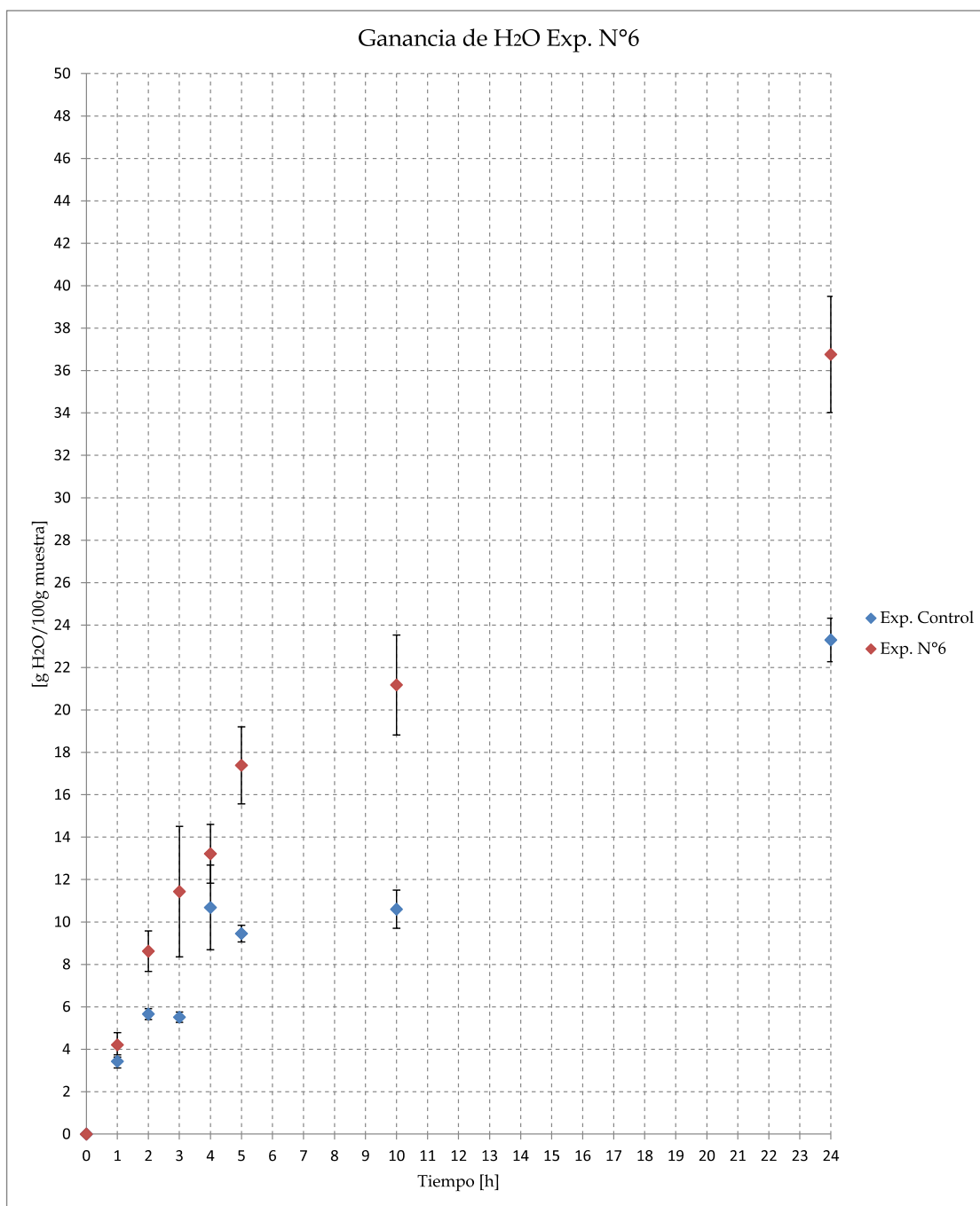


Figura 26: Resultados ganancia de agua, experiencia N°6.

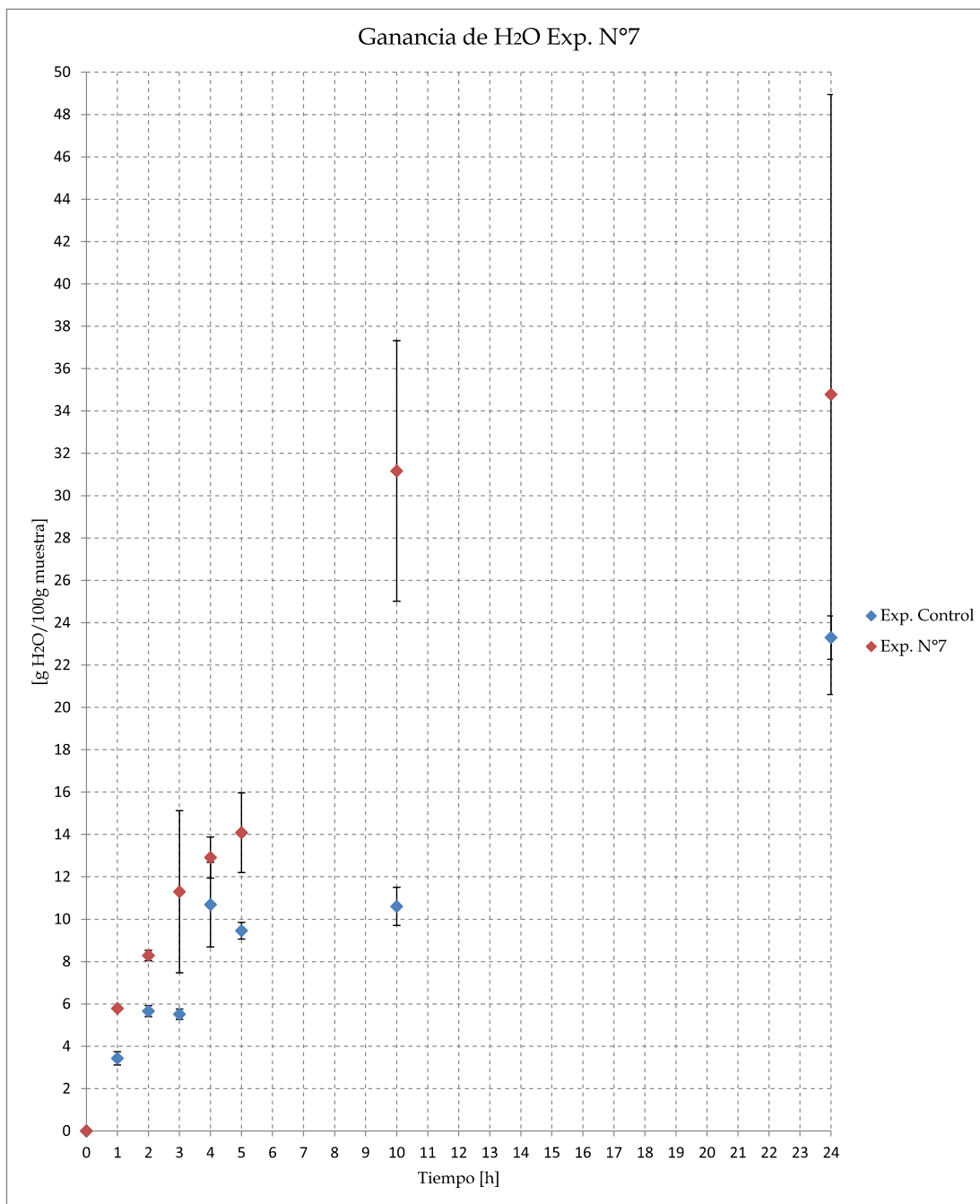


Figura 27: Resultados ganancia de agua, experiencia N°7.

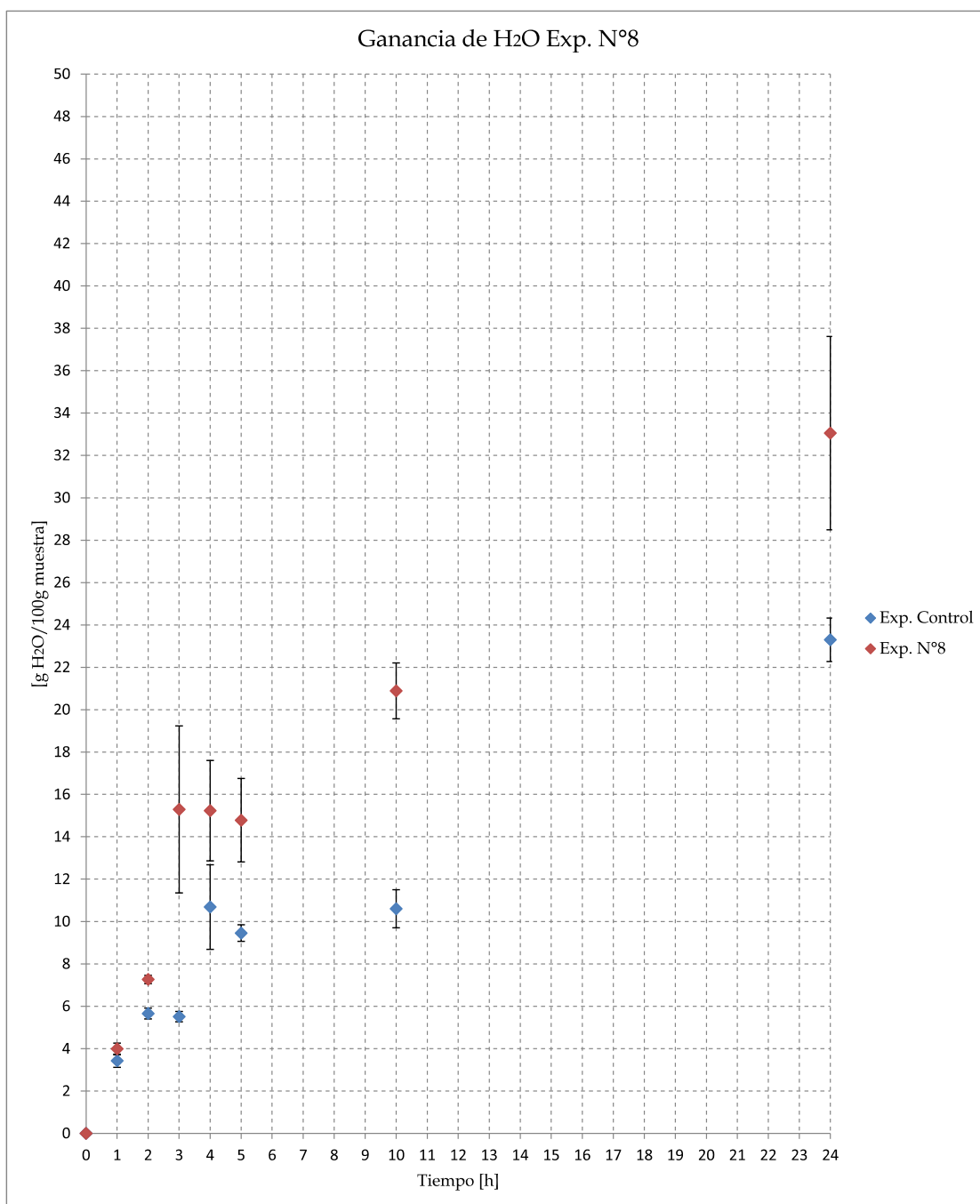


Figura 28: Resultados ganancia de agua, experiencia N°8.

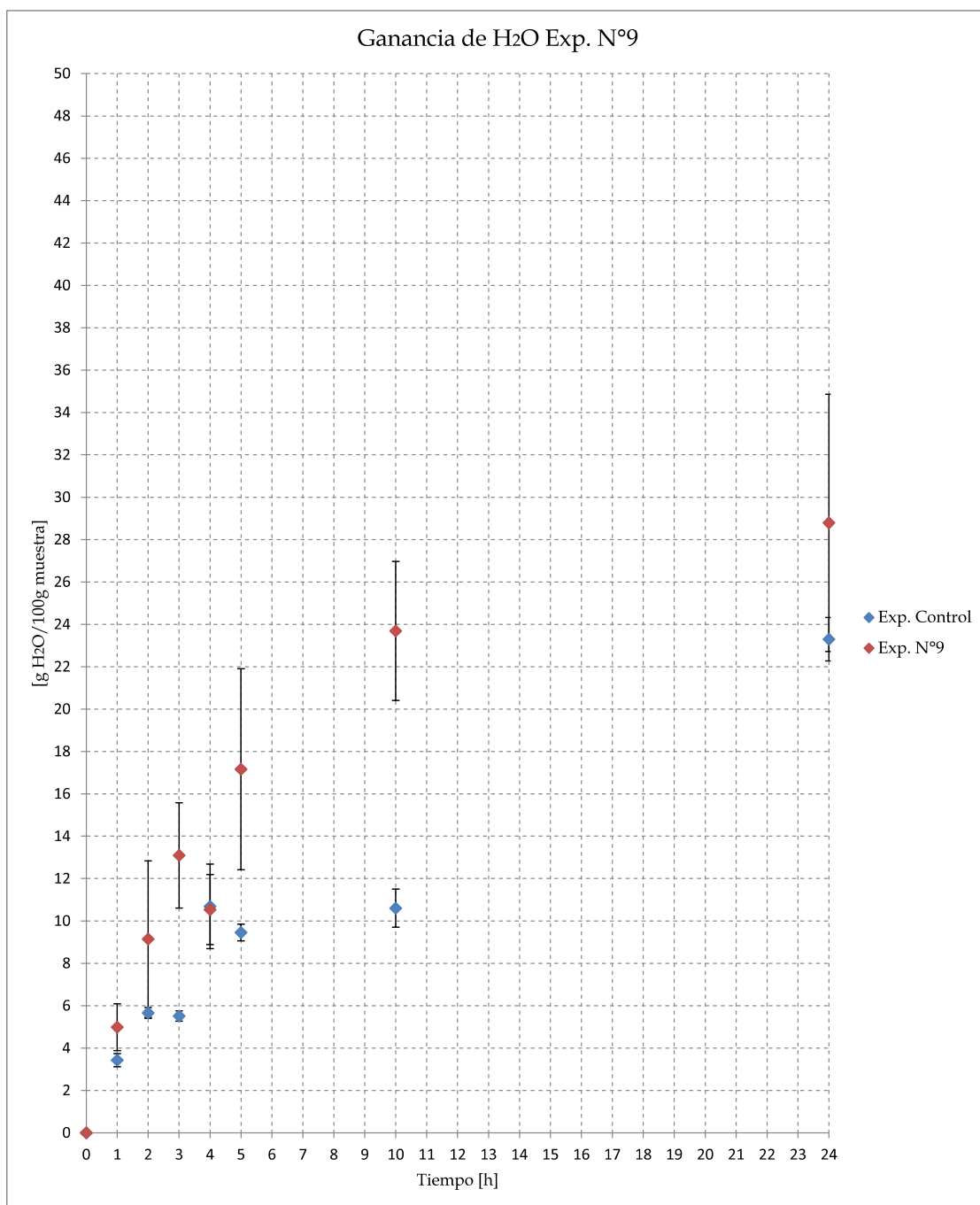


Figura 29: Resultados ganancia de agua, experiencia N°9.

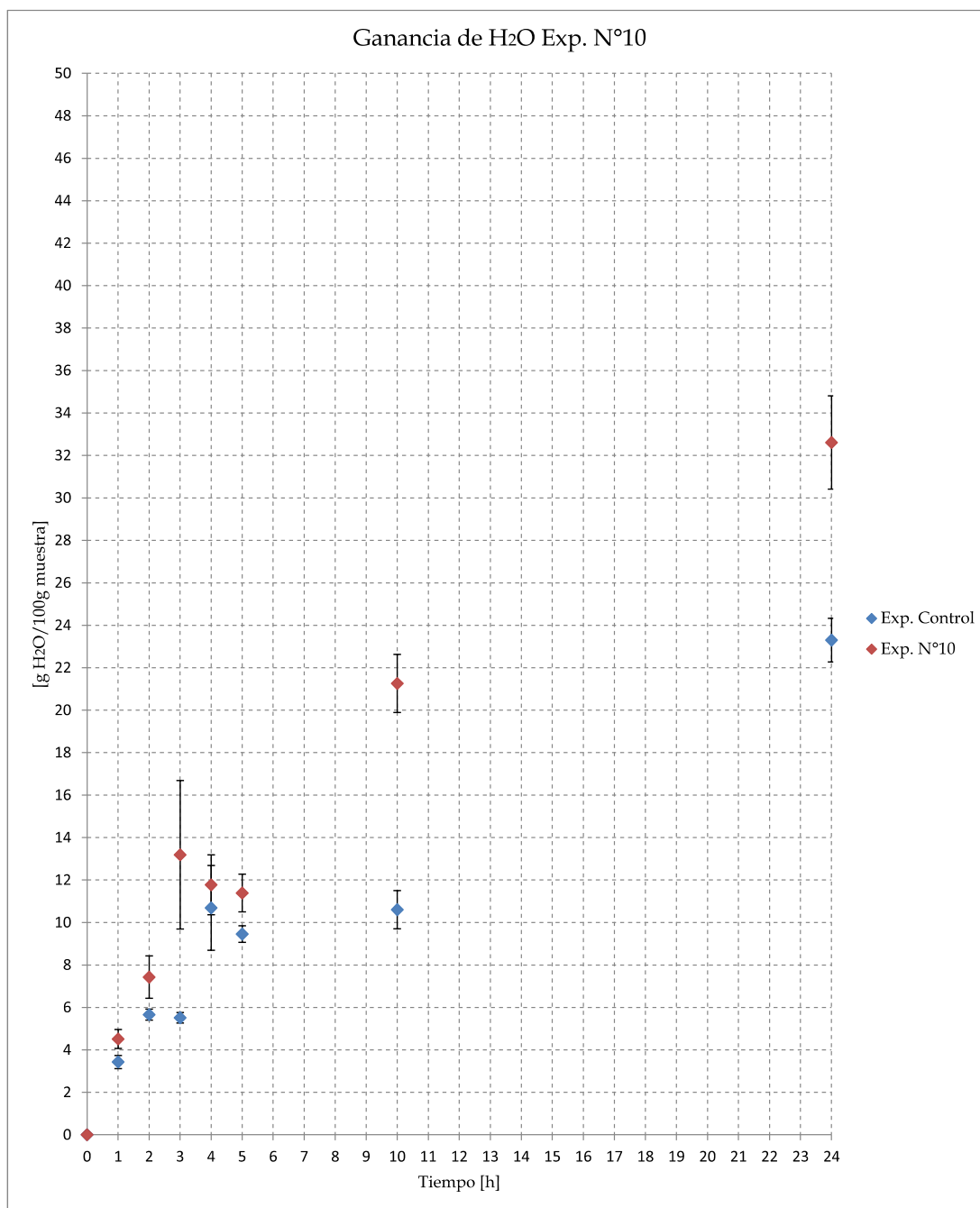


Figura 30: Resultados ganancia de agua, experiencia N°10.

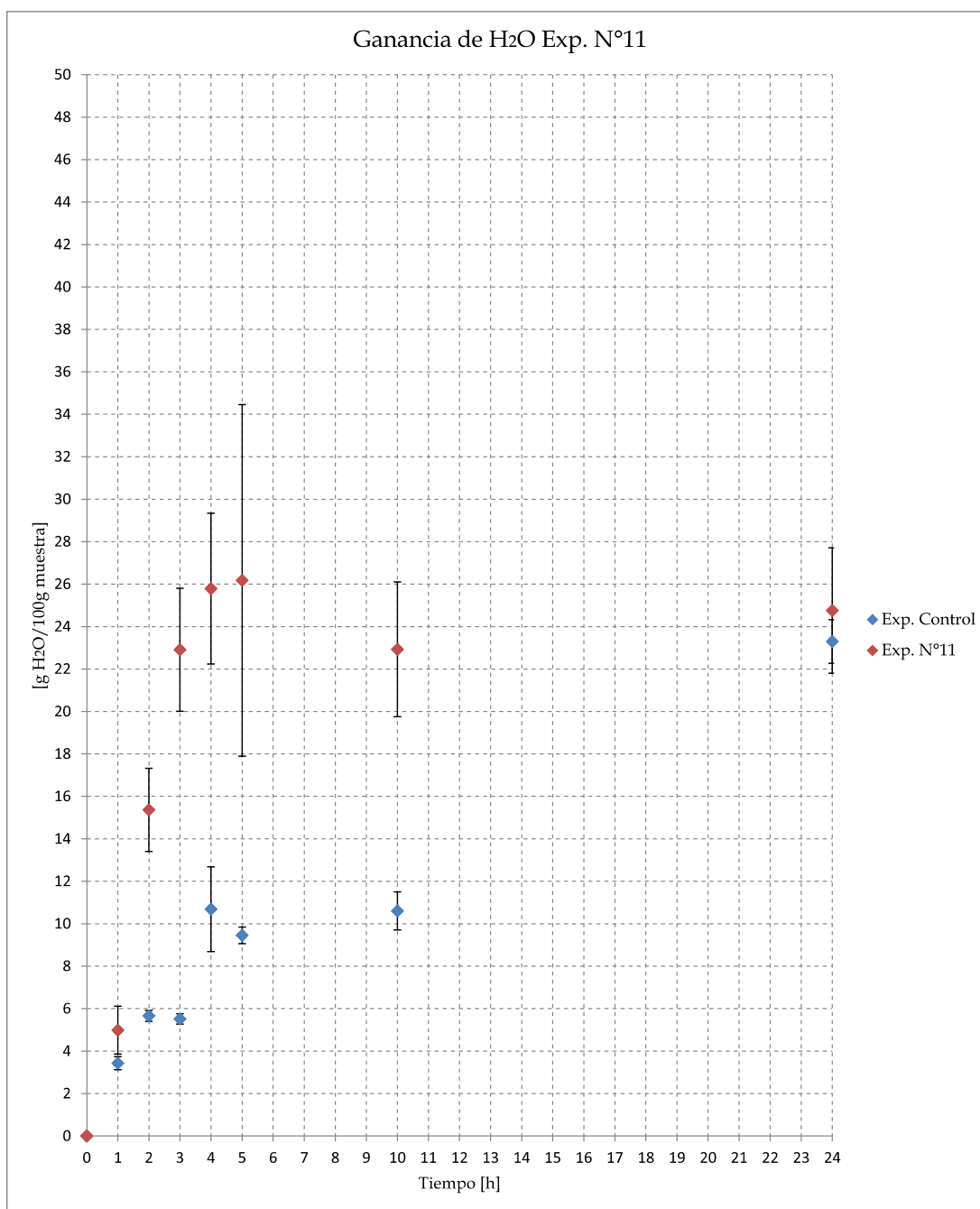


Figura 31: Resultados ganancia de agua, experiencia N°11.

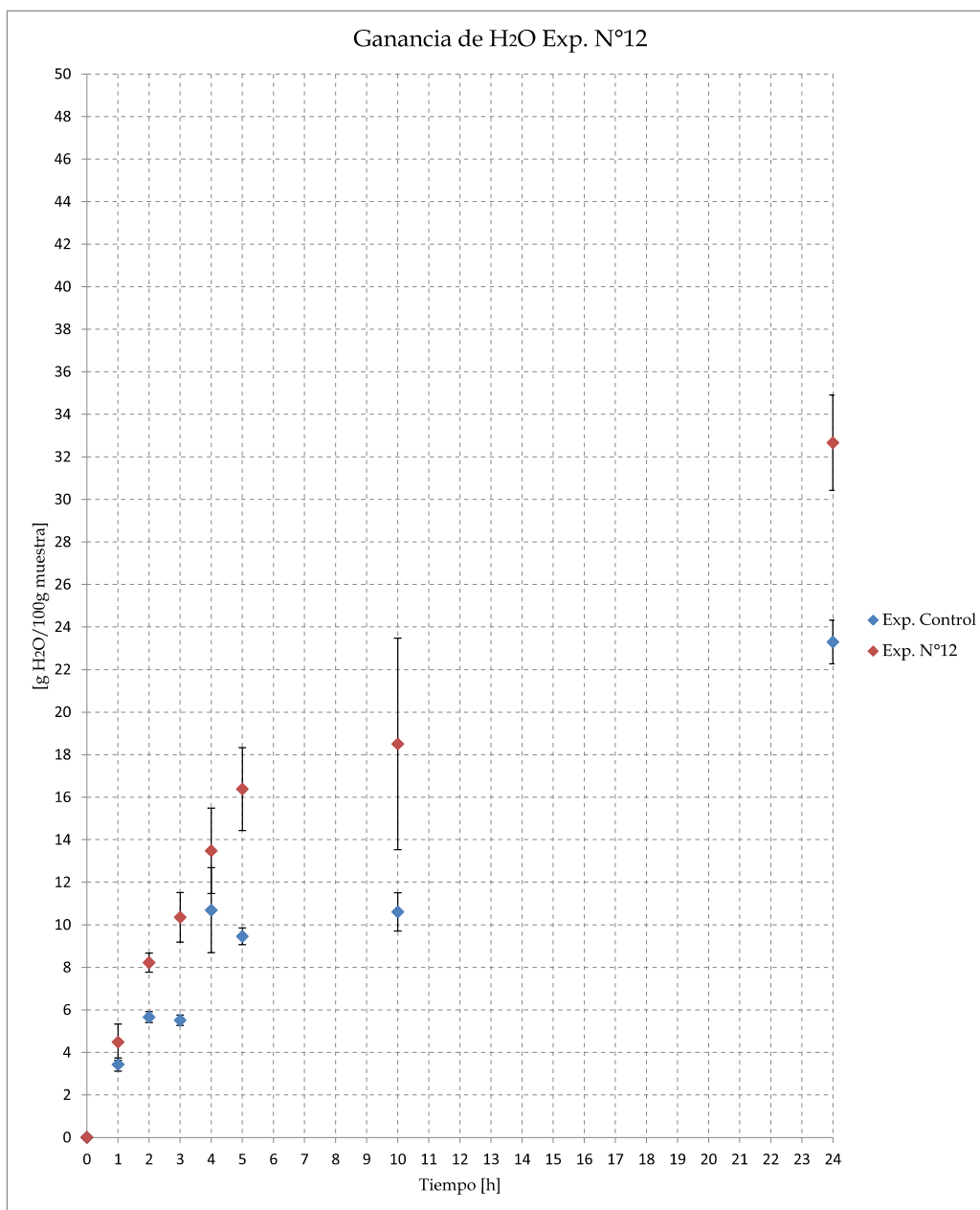


Figura 32: Resultados ganancia de agua, experiencia N°12.

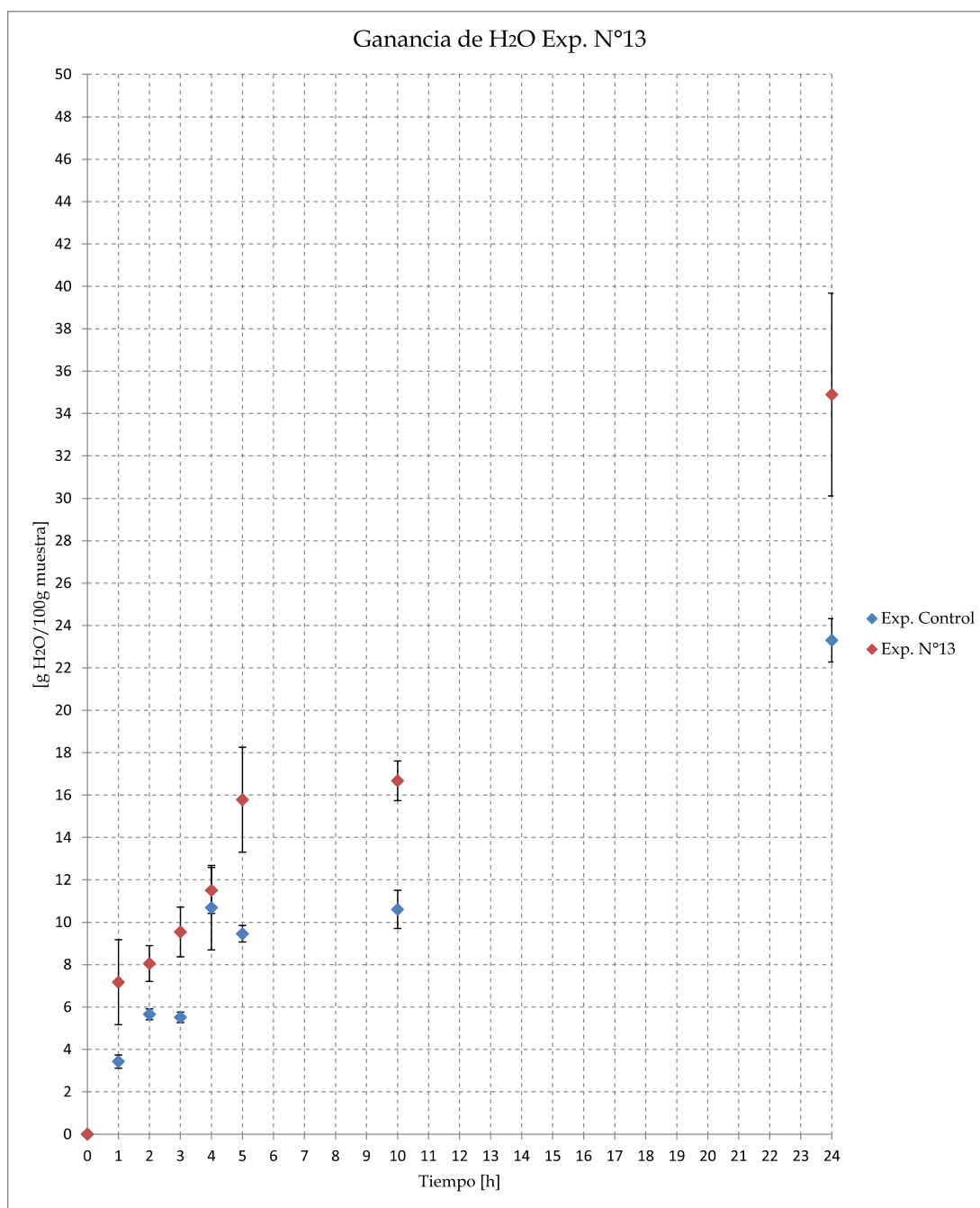


Figura 33: Resultados ganancia de agua, experiencia N°13.

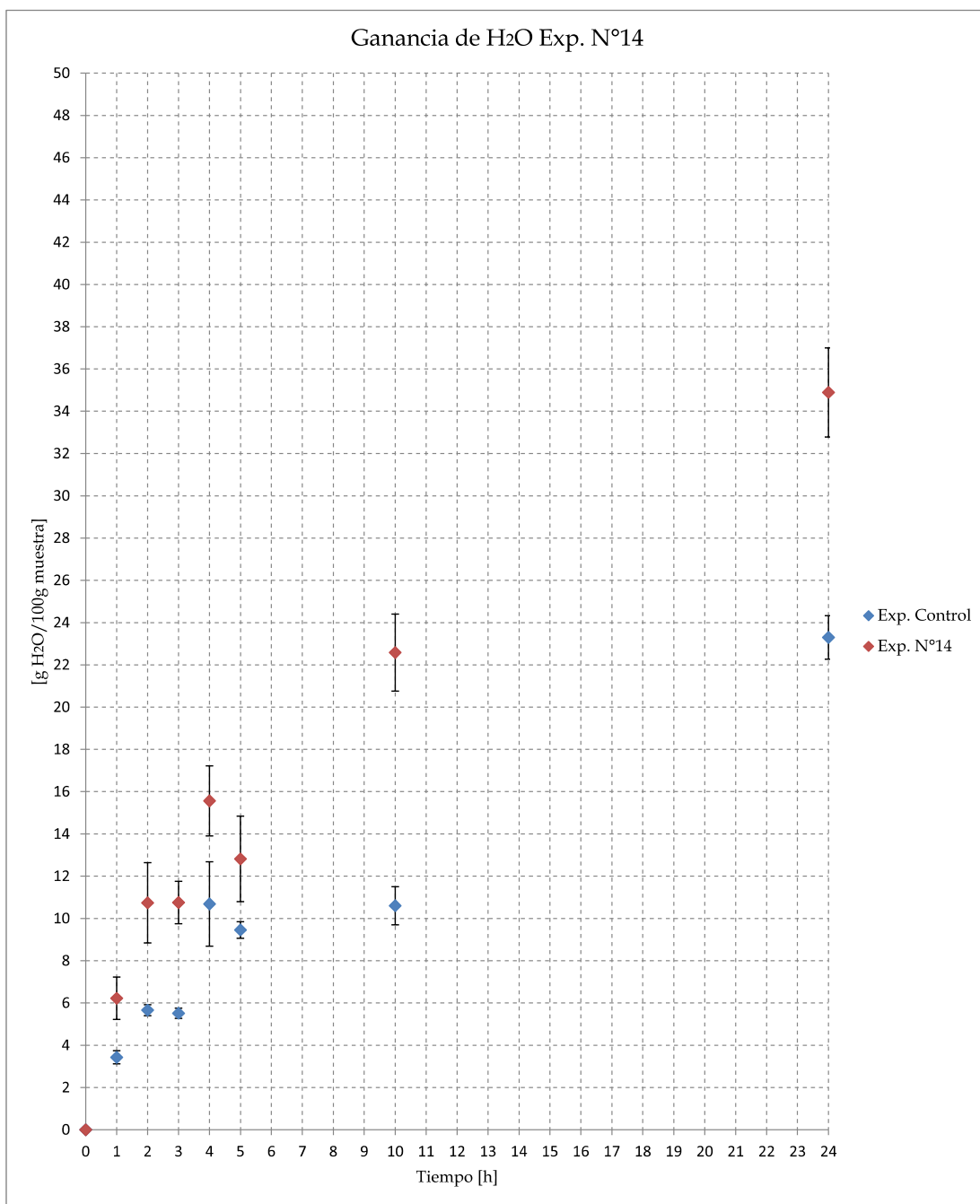


Figura 34: Resultados ganancia de agua, experiencia N°14.

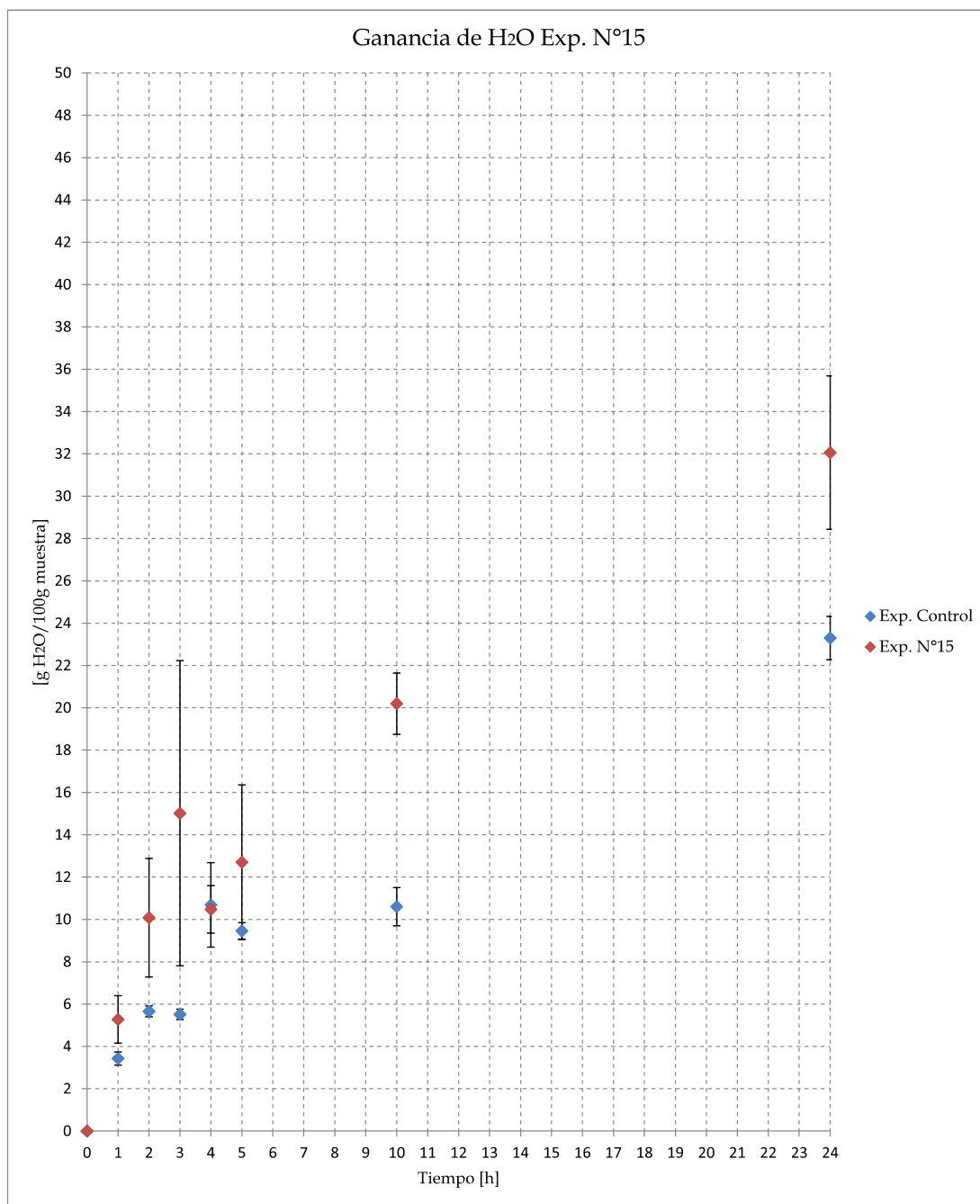


Figura 35: Resultados ganancia de agua, experiencia N°15.

A.2.2. Ganancia de sal [g/100g]

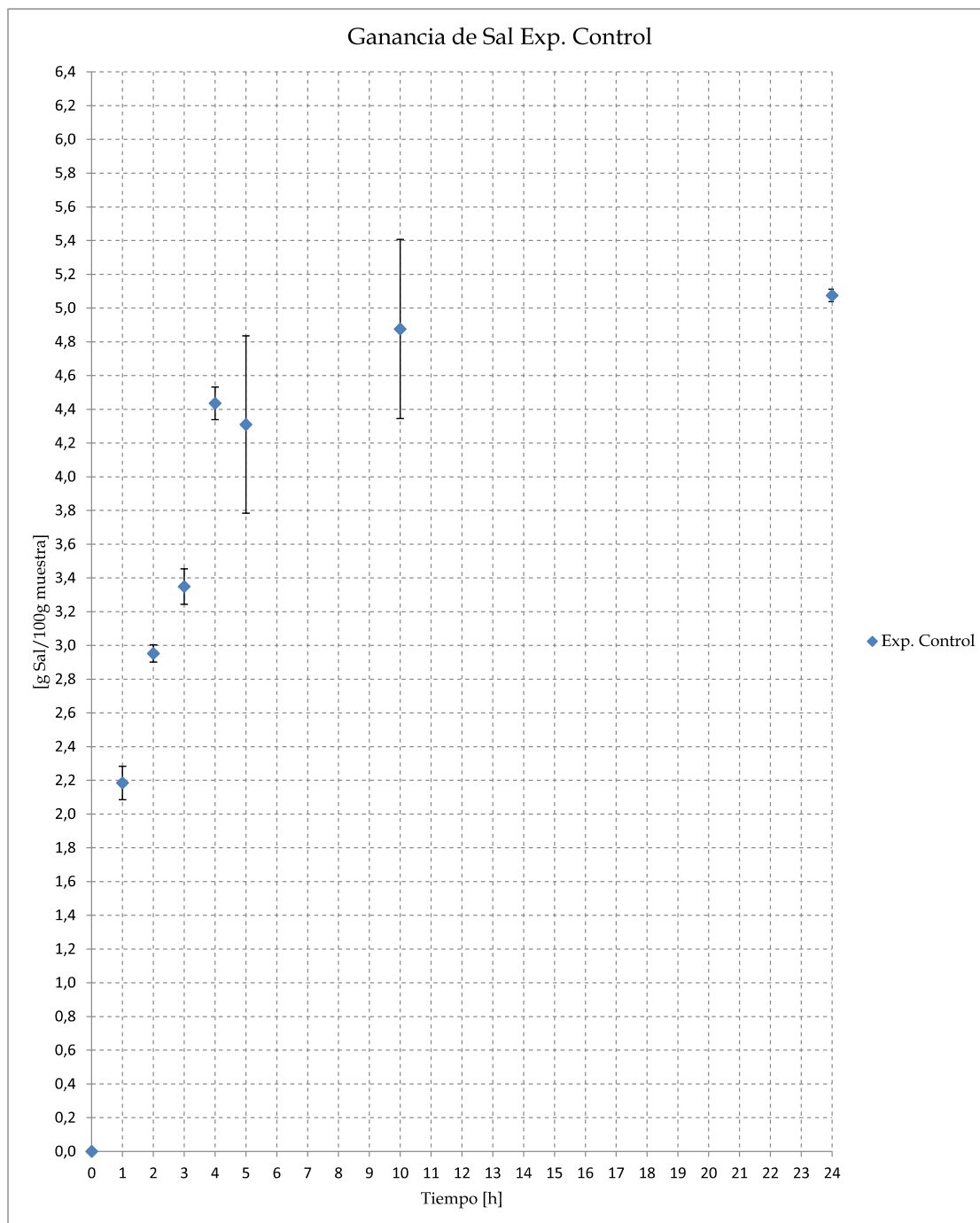


Figura 36: Resultados ganancia de sal ,experiencia control.

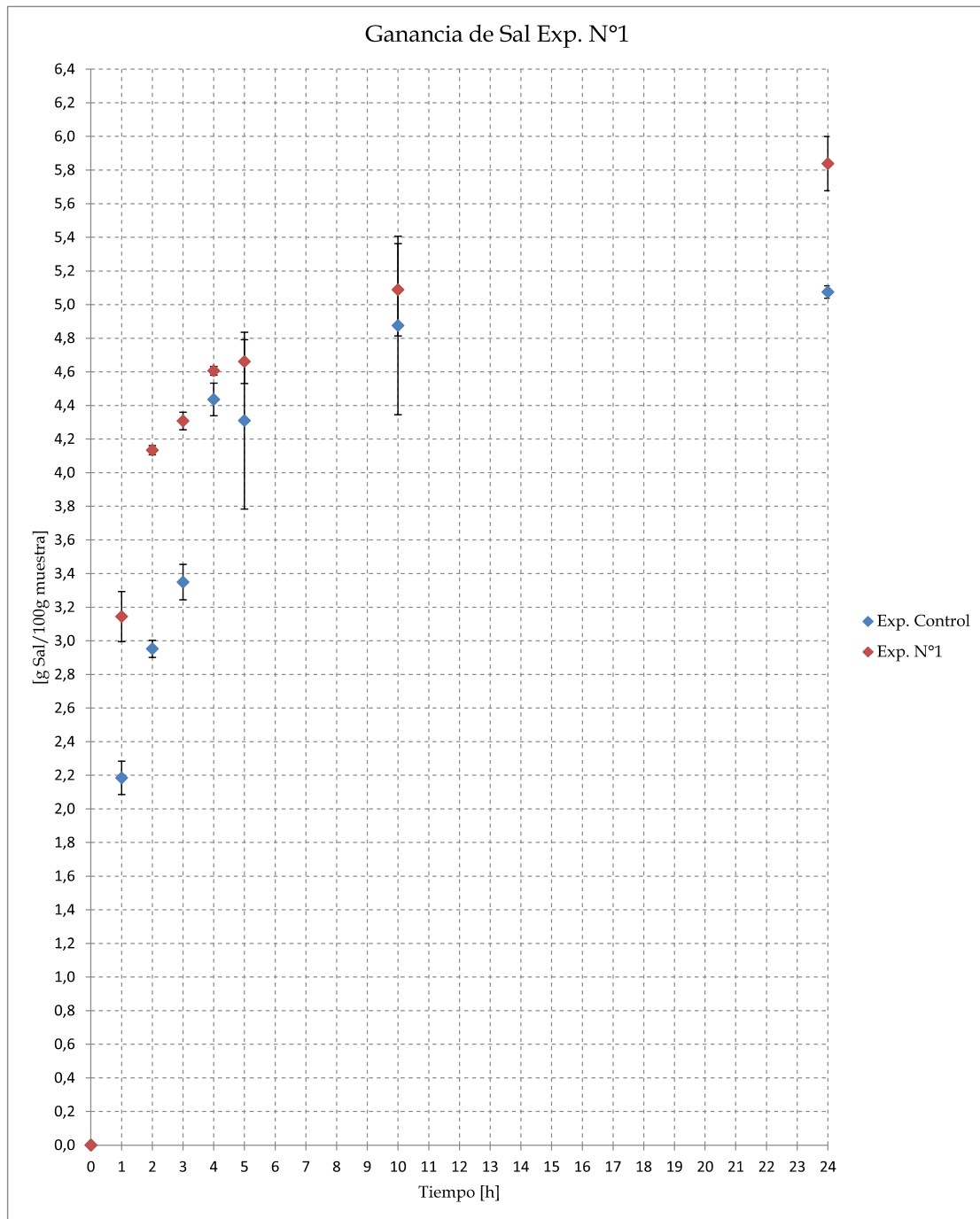


Figura 37: Resultados ganancia de sal ,experiencia N°1.

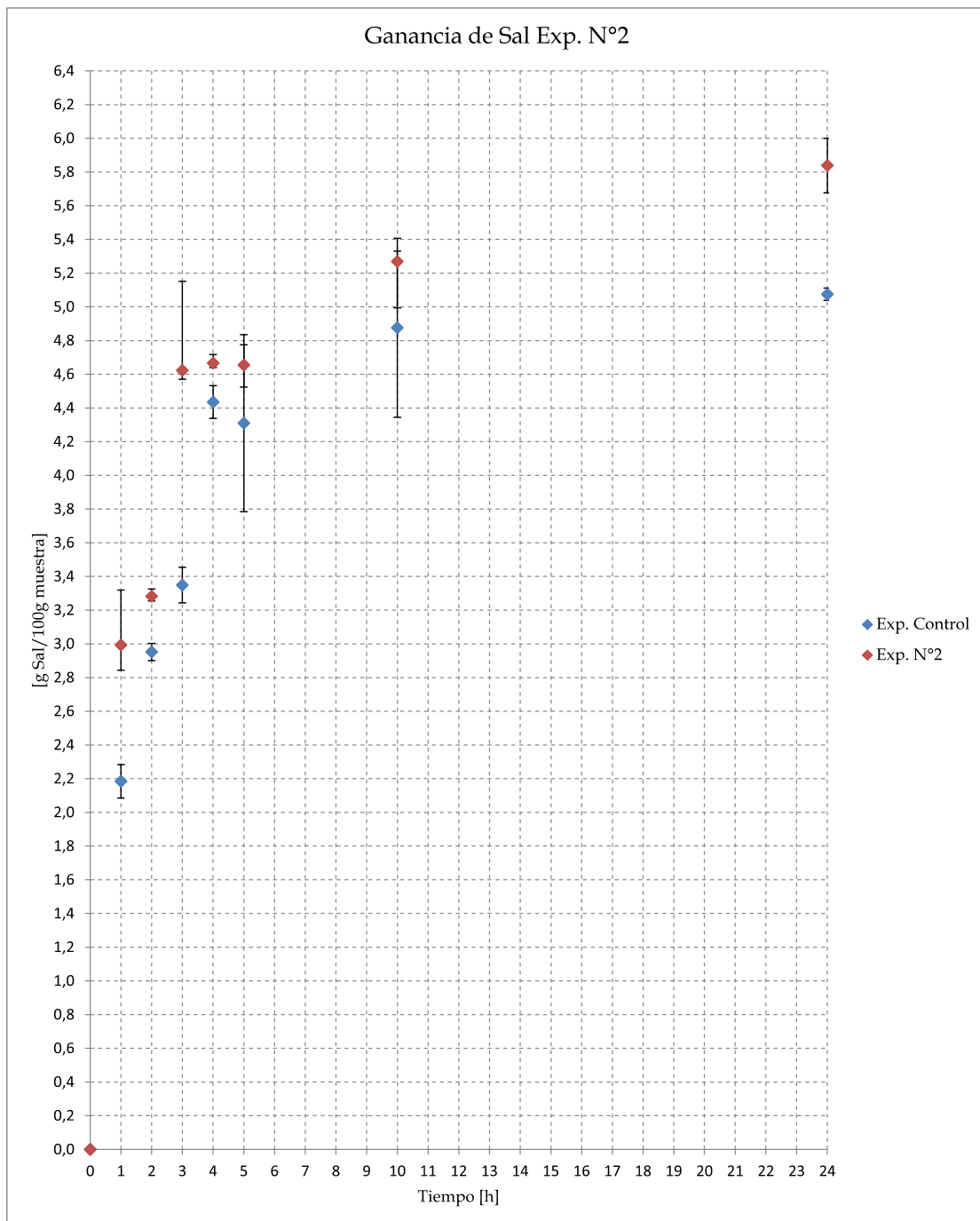


Figura 38: Resultados ganancia de sal ,experiencia N°2.

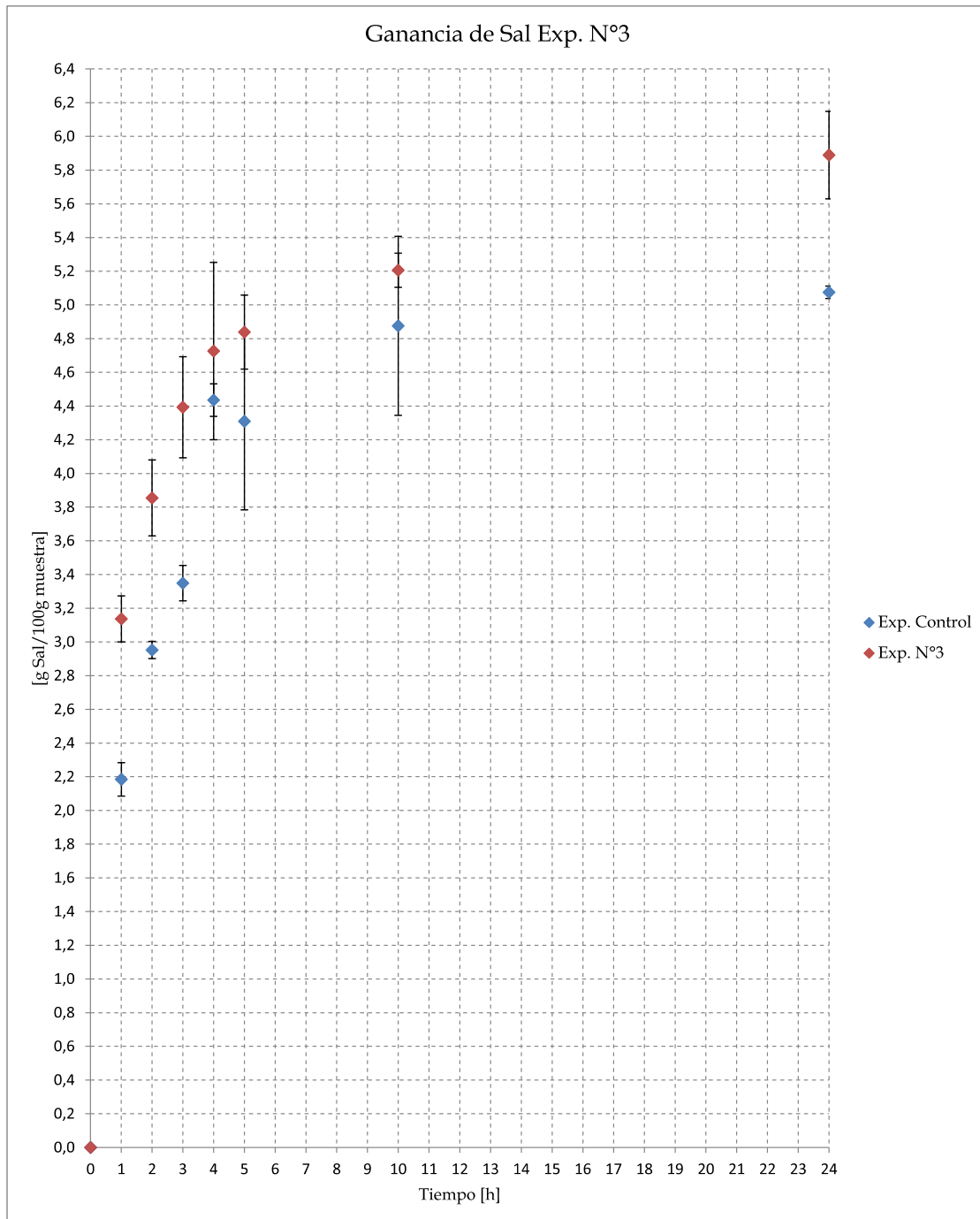


Figura 39: Resultados ganancia de sal, experiencia N°3.

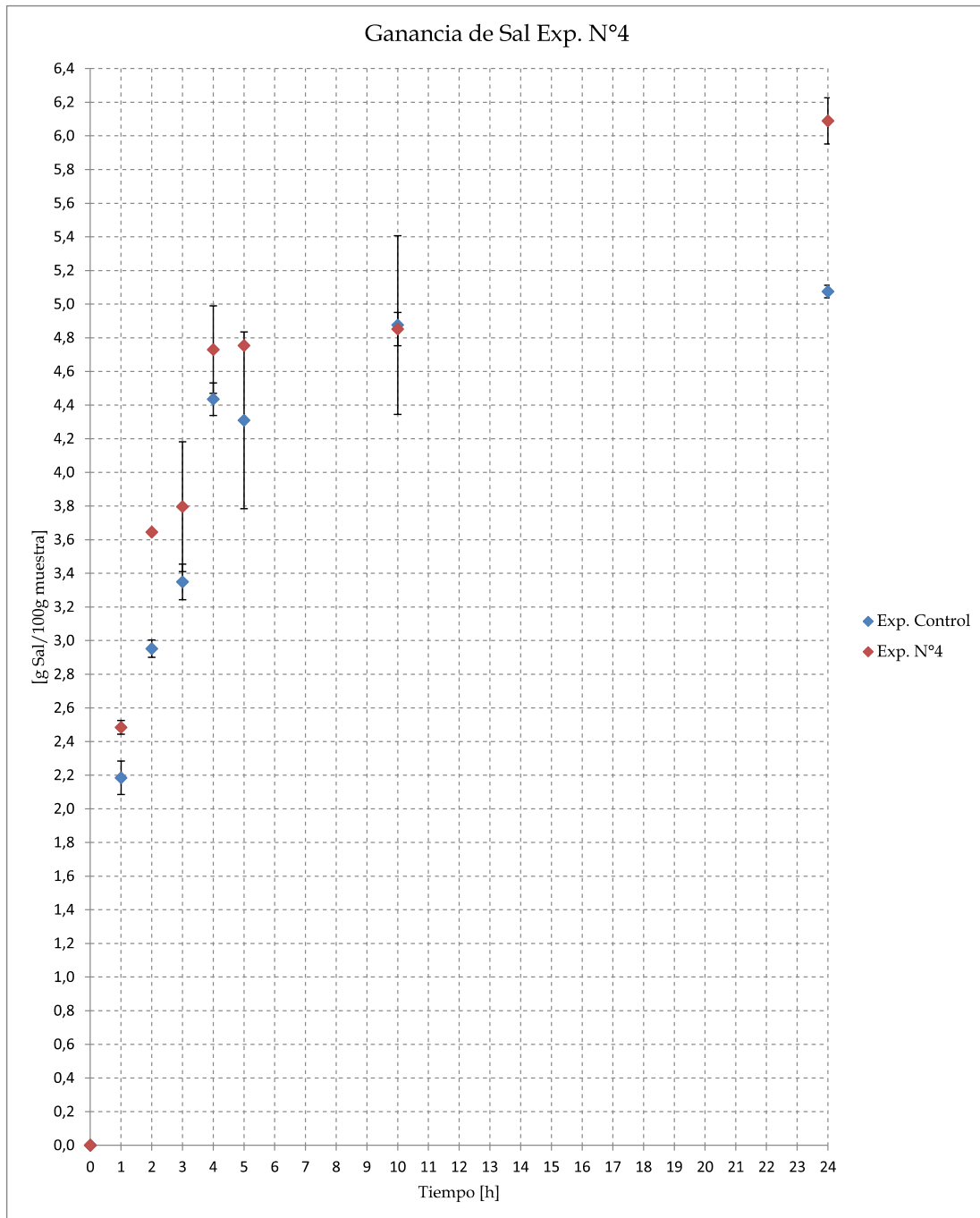


Figura 40: Resultados ganancia de sal, experiencia N°4.

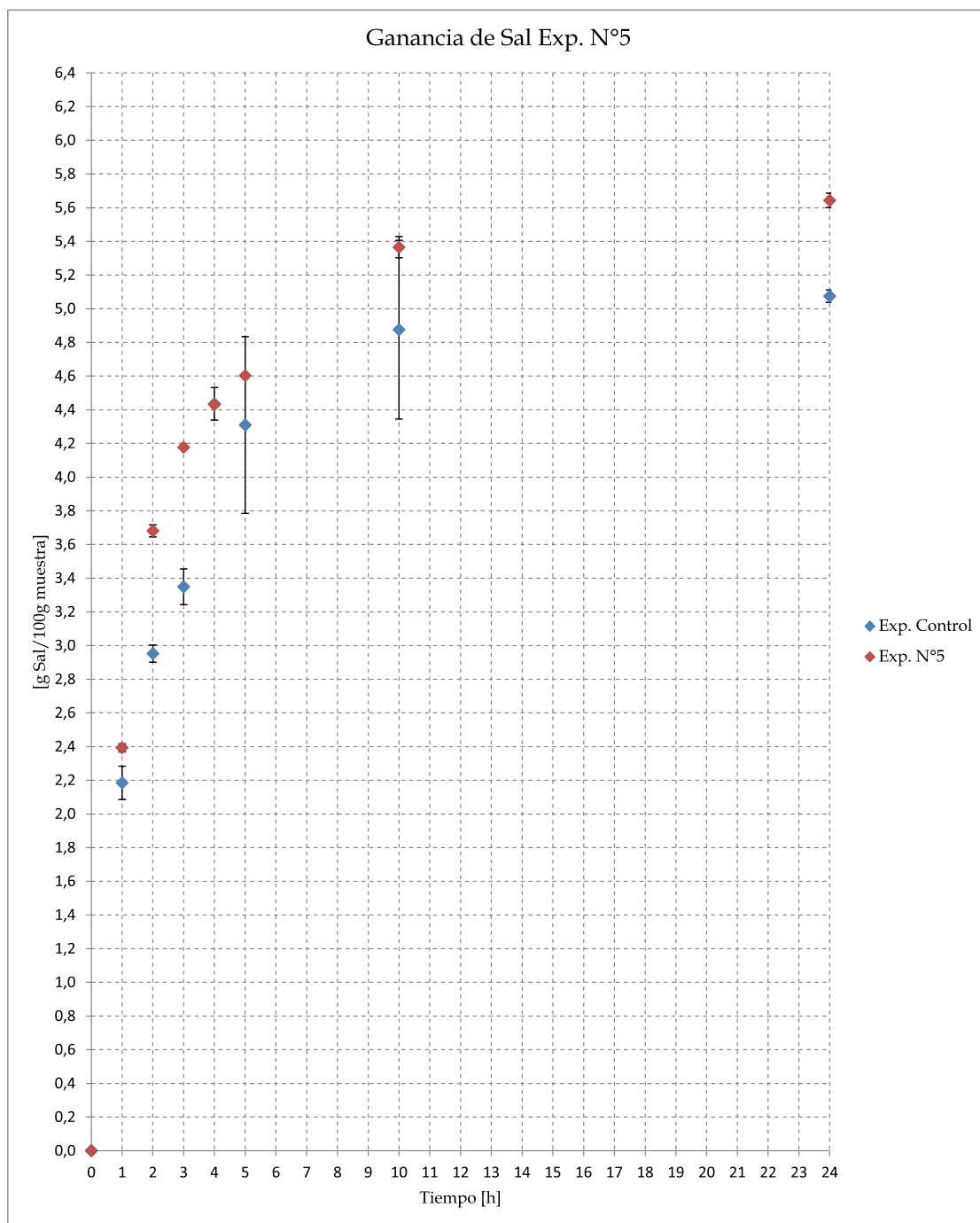


Figura 41: Resultados ganancia de sal, experiencia N°5.

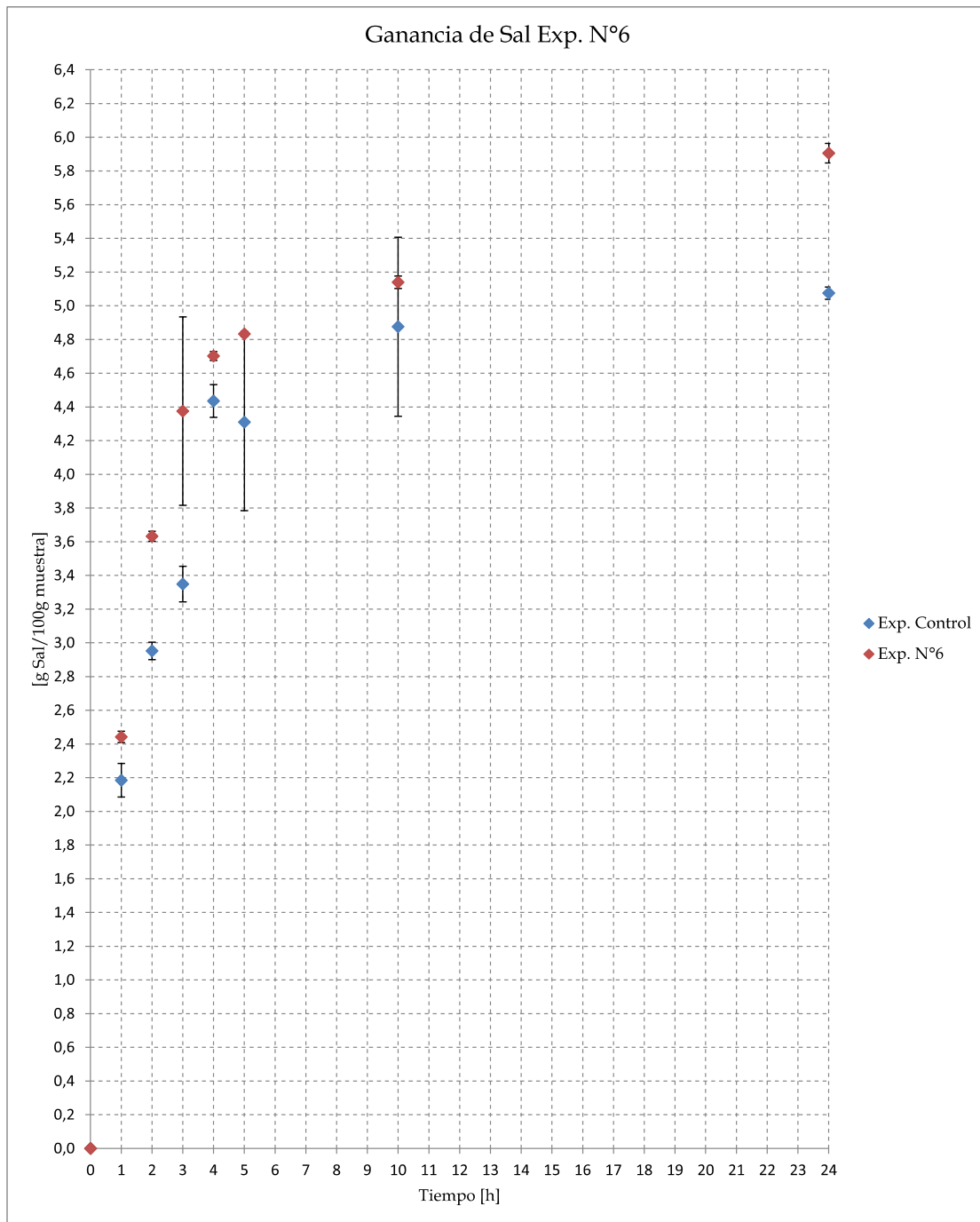


Figura 42: Resultados ganancia de sal, experiencia N°6.

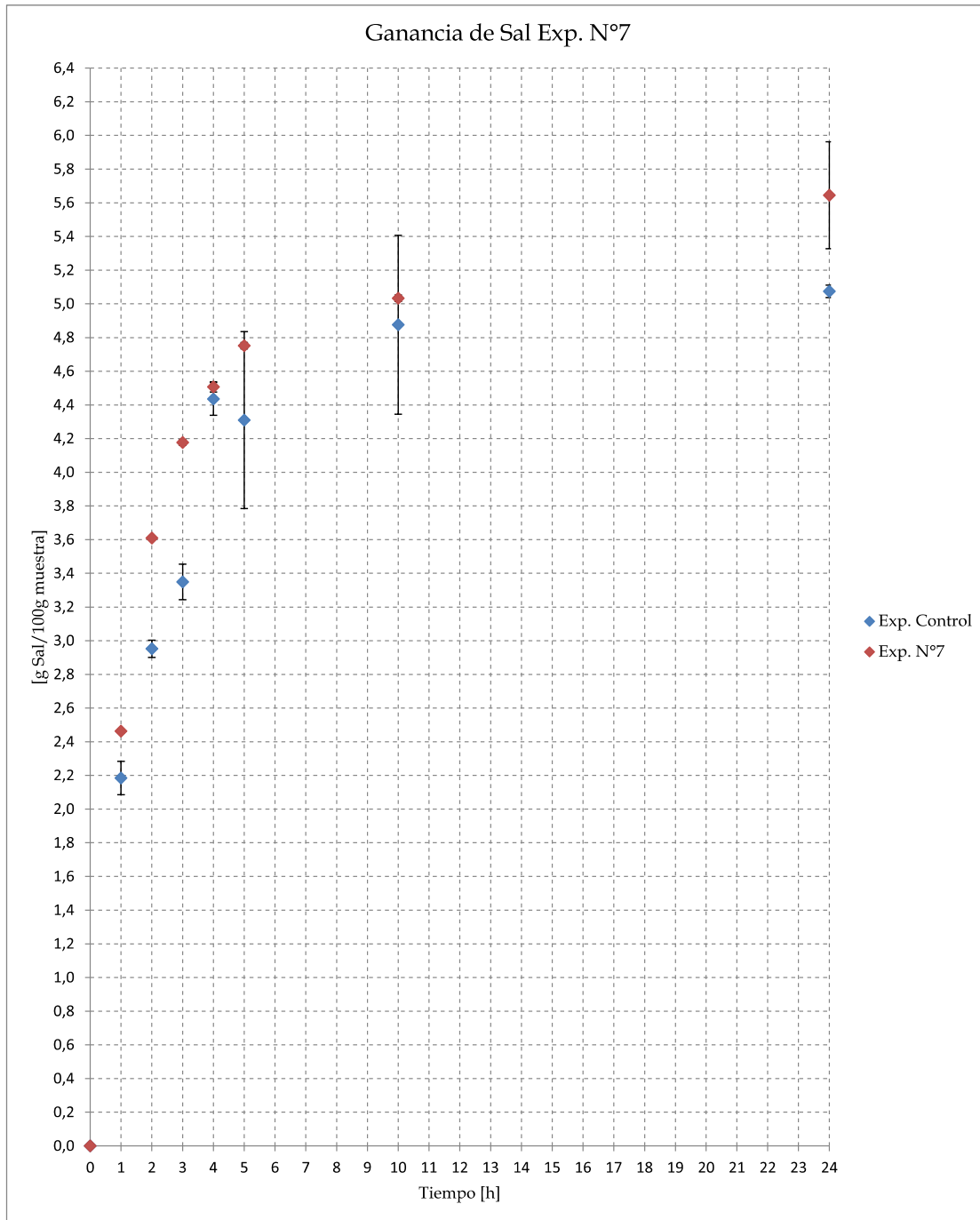


Figura 43: Resultados ganancia de sal, experiencia N°7.

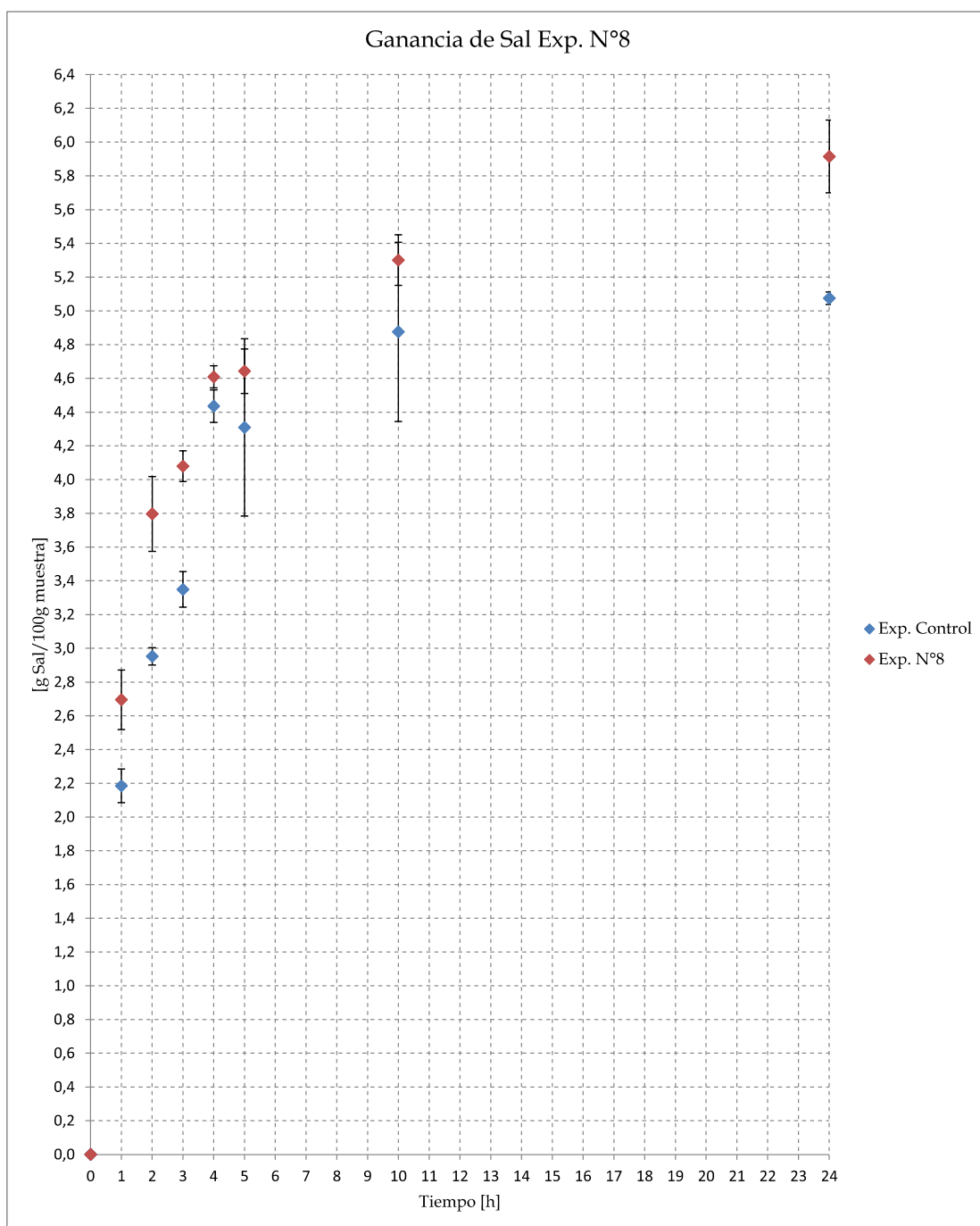


Figura 44: Resultados ganancia de sal, experiencia N°8.

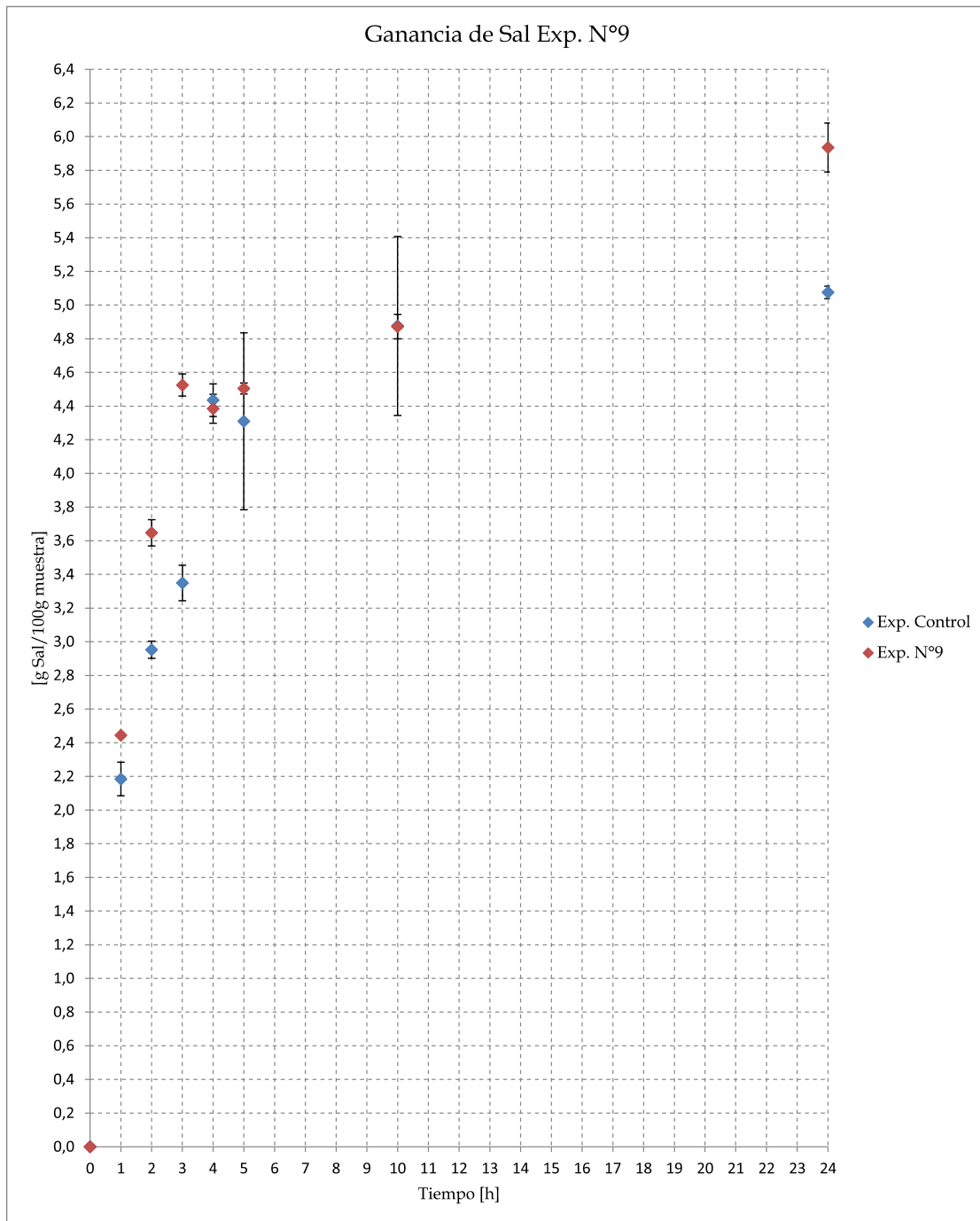


Figura 45: Resultados ganancia de sal, experiencia N°9.

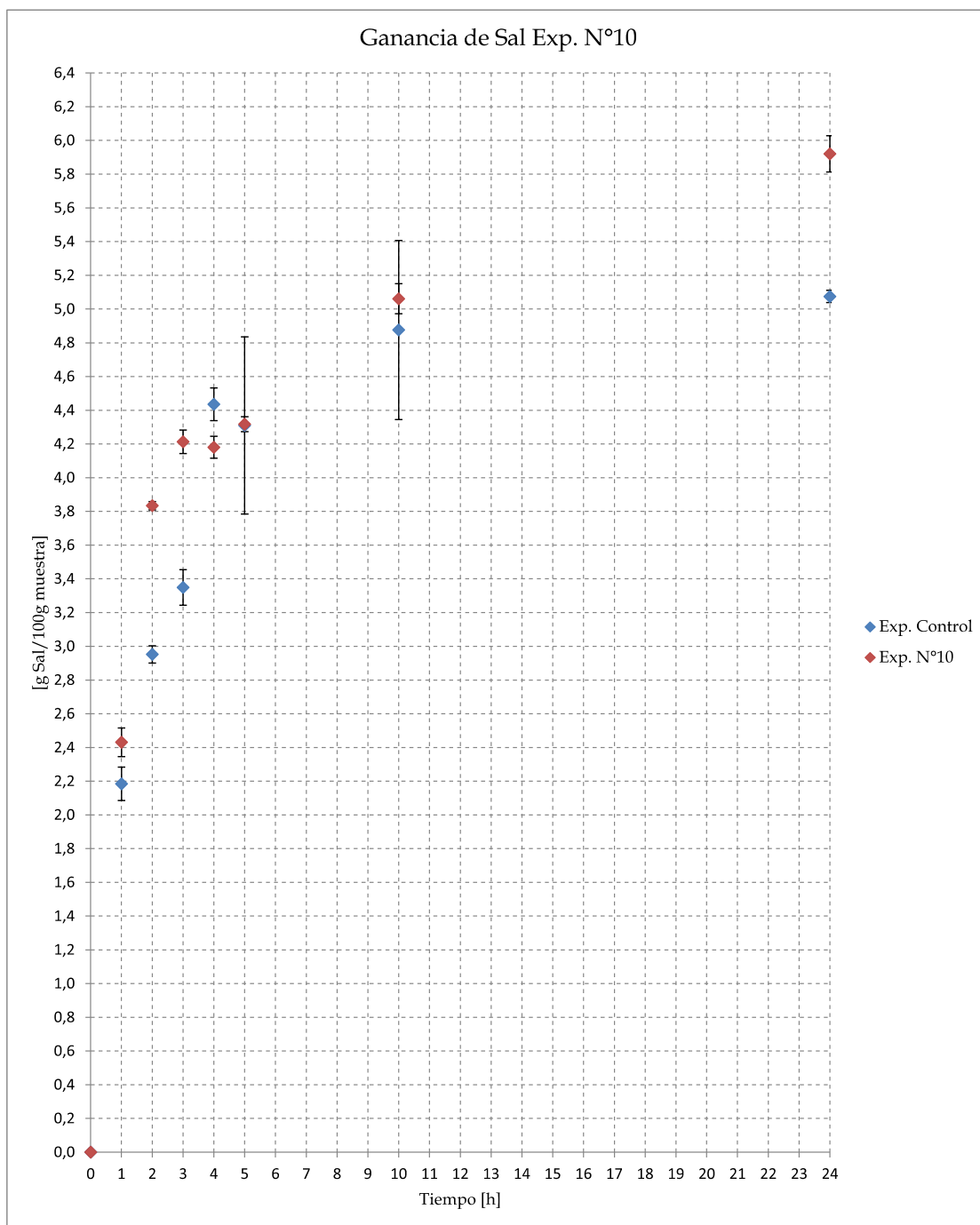


Figura 46: Resultados ganancia de sal, experiencia N°10.

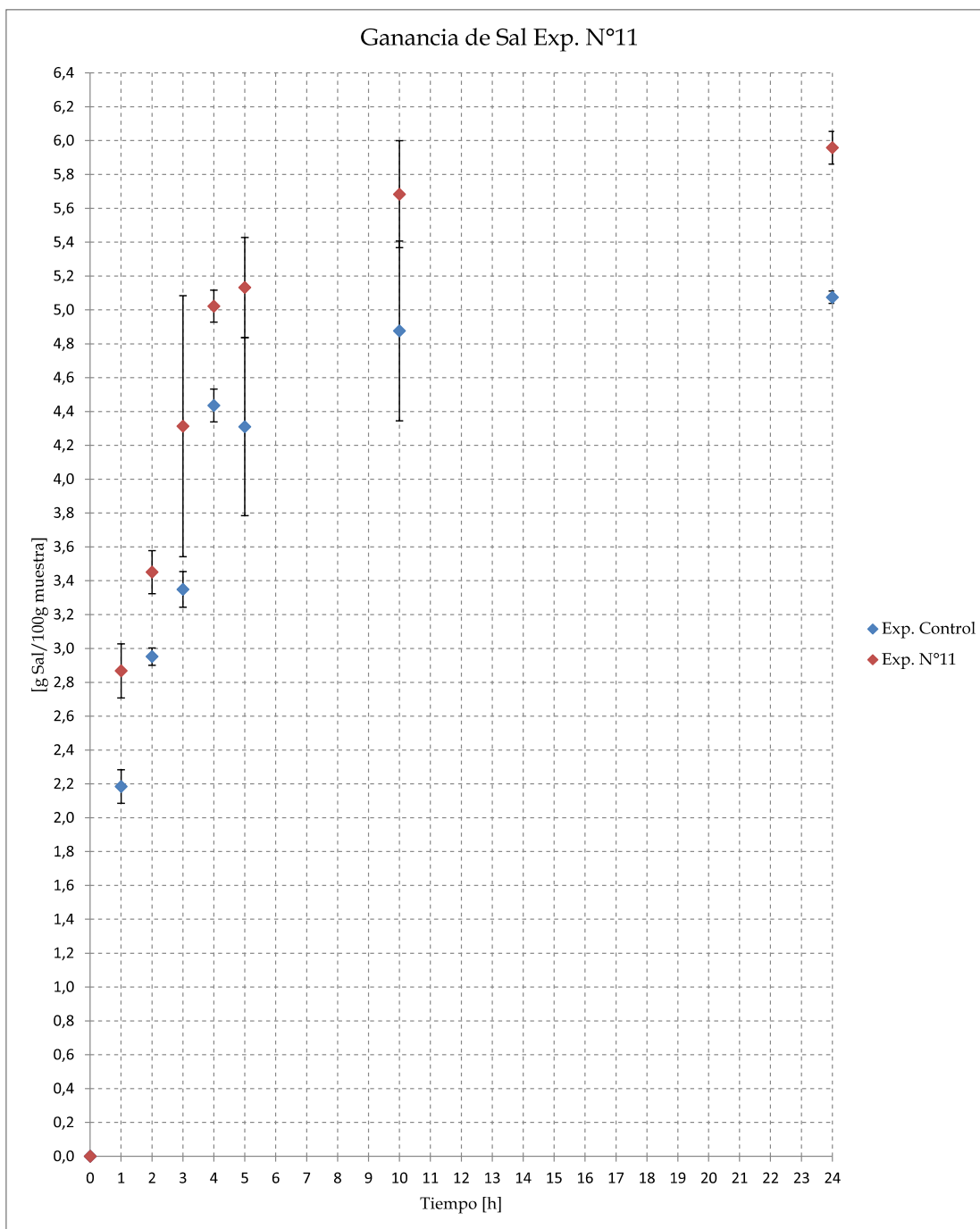


Figura 47: Resultados ganancia de sal, experiencia N°11.

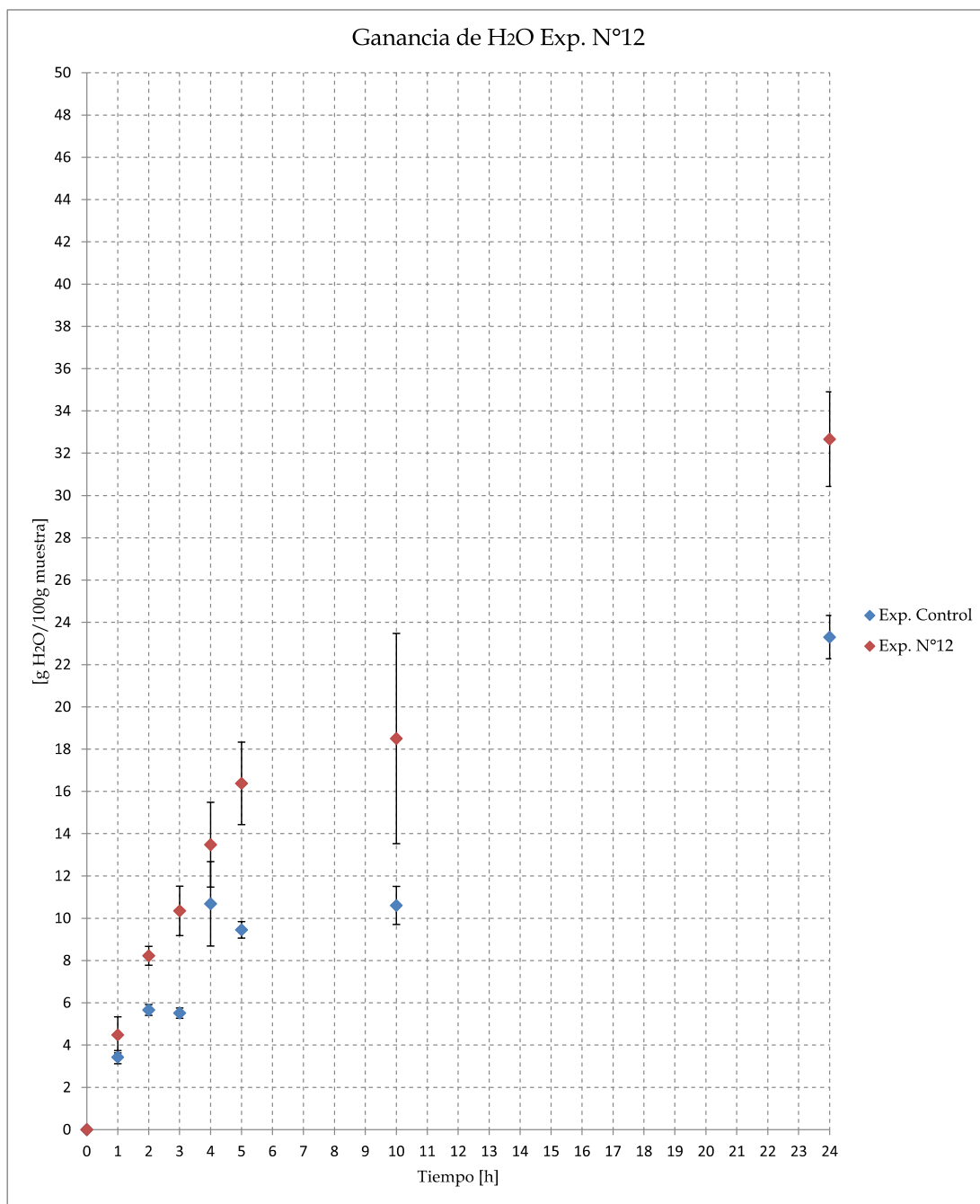


Figura 48: Resultados ganancia de sal, experiencia N°12.

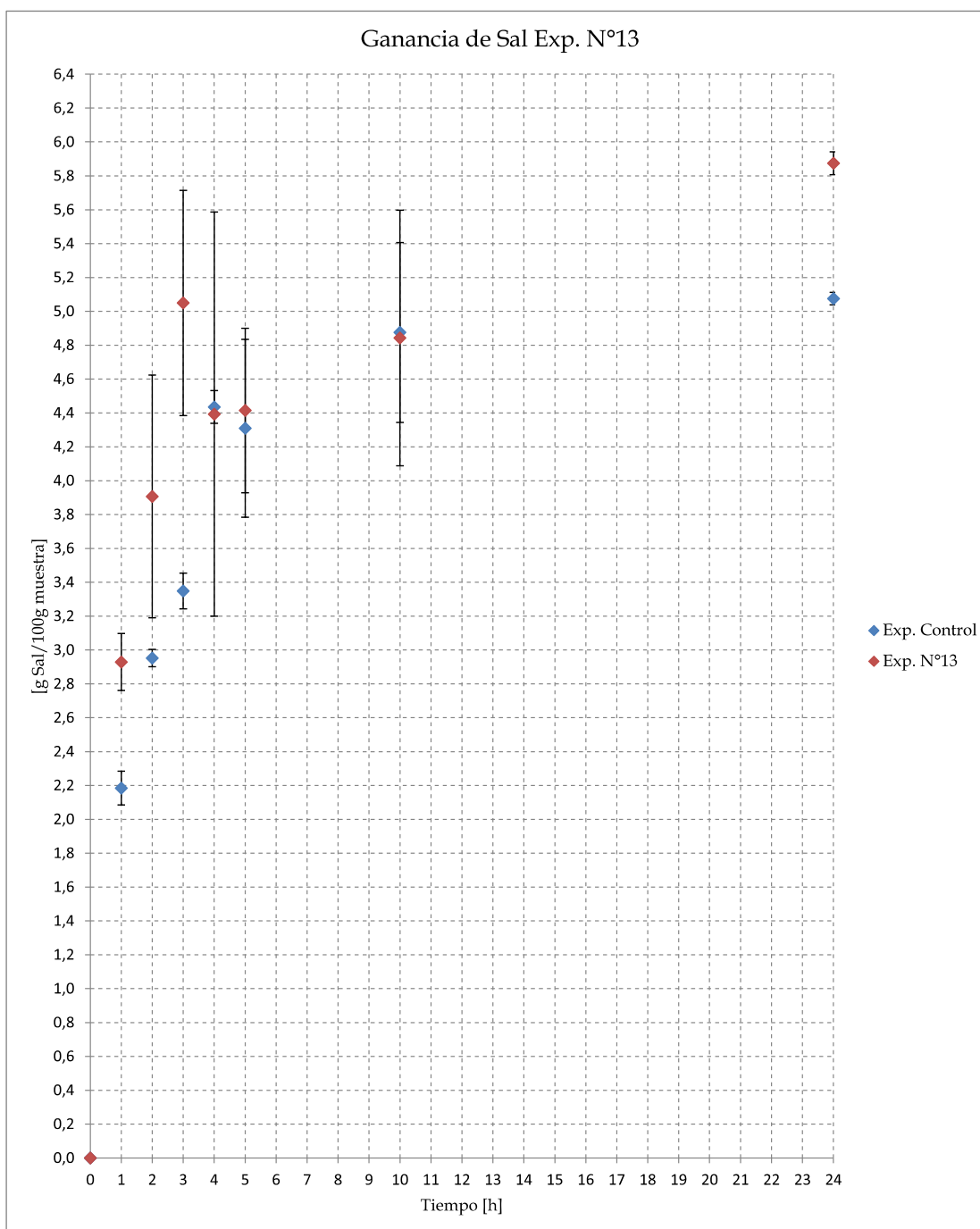


Figura 49: Resultados ganancia de sal, experiencia N°13.

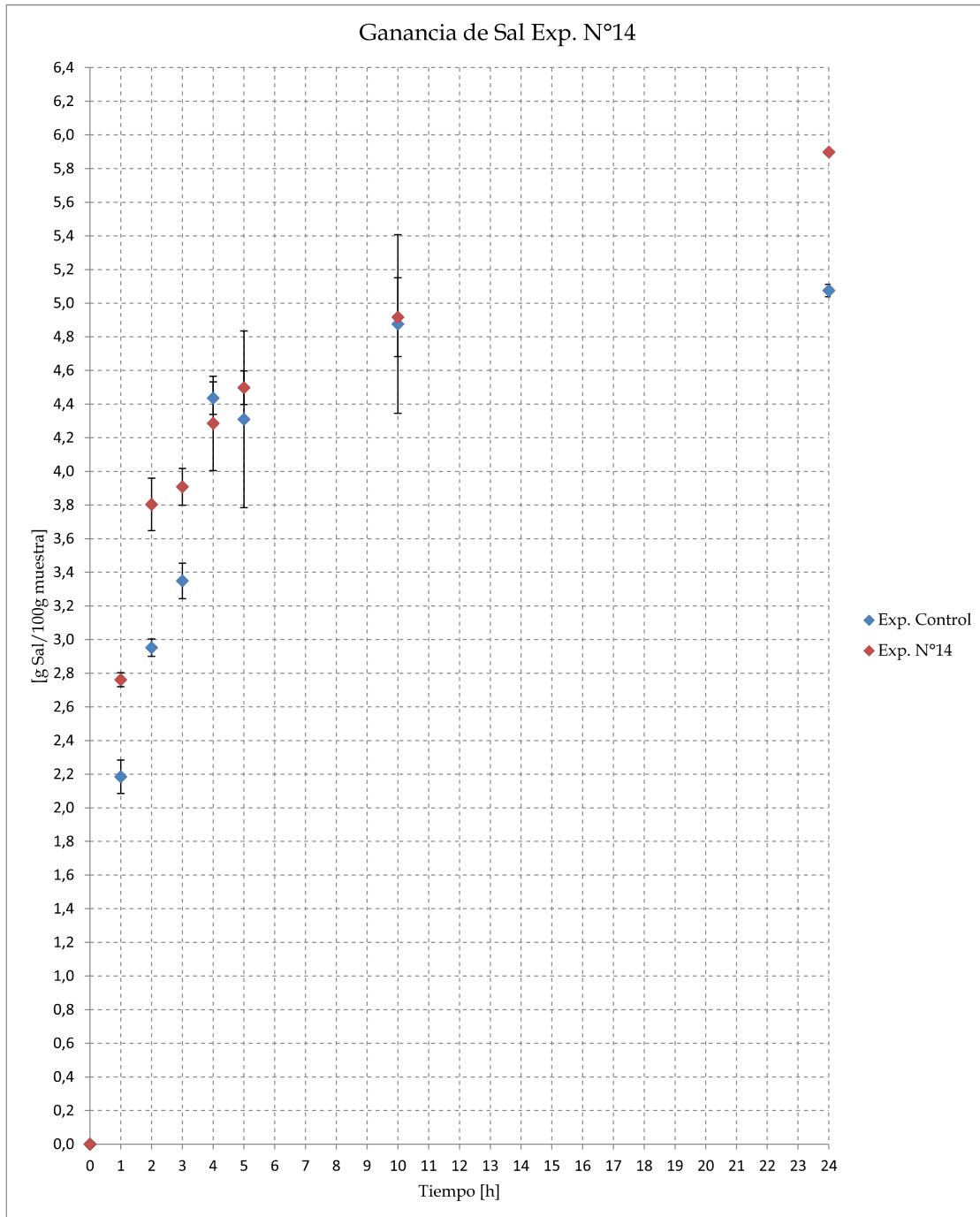


Figura 50: Resultados ganancia de sal, experiencia N°14.

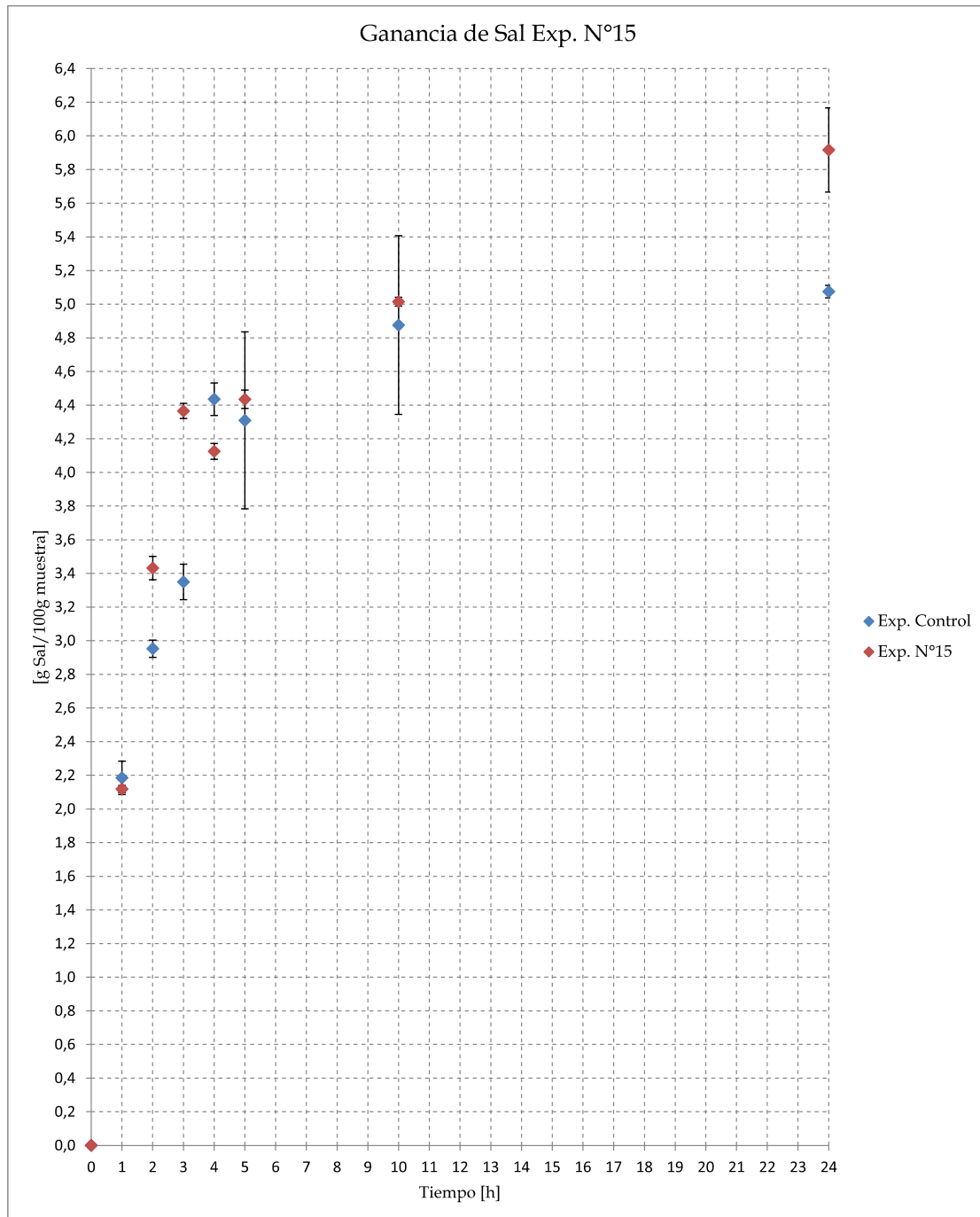


Figura 51: Resultados ganancia de sal, experiencia N°15.